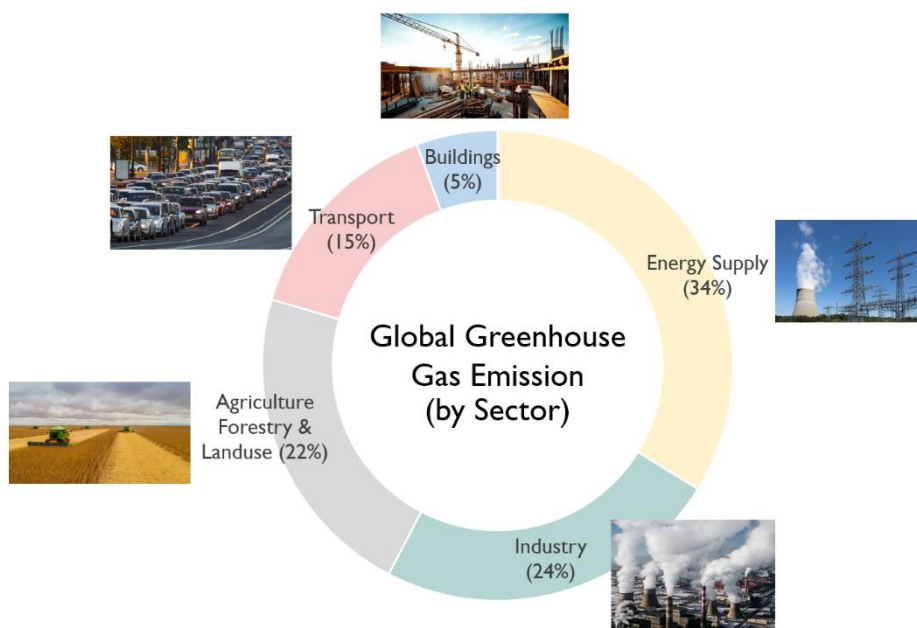


บทวิเคราะห์เชิงลึก

การศึกษาข้อมูลการประเมินวัฏจักรชีวิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ชีวภาพ เพื่อวางแผนการปรับปรุงการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวภาพให้บรรลุตามเป้าหมาย 'Net Zero'

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก (Climate change) ส่งผลกระทบวงกว้างต่อสิ่งมีชีวิตบนโลก ระบบนิเวศน์ ความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ตลอดจนการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม โดยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน เป็นผลจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gasses) ประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีเทน (CH₄) ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) ก๊าซเพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs) ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆) ก๊าซไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ (NF₃) เป็นต้น จากกิจกรรมต่าง ๆ อาทิ การผลิตไฟฟ้า การเผาไหม้เชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม การเพาะปลูกและเกษตรกรรม การขนส่งและคมนาคม การก่อสร้าง เป็นต้น

รูปที่ 1 สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโลกแยกตามประเภทกิจกรรม (ปี 2563)



ที่มา: IPCC / www.climatecentral.org

จากรายงานของคณะกรรมการการยุโรป (European commission)¹ พบว่า ในปี 2564 ทั่วโลกมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณกว่า 37,857.58 ล้านตัน จากปี 2533 ซึ่งมีปริมาณ 22,717.73 ล้านตัน คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อปีร้อยละ 1.6 นอกจากนี้ พบว่า จีน สหรัฐอเมริกา EU27 อินเดีย รัสเซีย และญี่ปุ่น เป็นผู้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดในโลก ซึ่งกลุ่มประเทศดังกล่าวเมื่อรวมกันแล้ว มีสัดส่วนประชากรคิดเป็นร้อยละ 49.2 ของประชากรโลก มีสัดส่วน GDP คิดเป็นร้อยละ 62.4 ของ GDP รวม มีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลคิดเป็นร้อยละ 66.4 ของปริมาณการใช้รวม และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าร้อยละ 67.8 ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมของโลก สำหรับประเทศไทย ในปี 2564 ที่ผ่านมา มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวม 269.57 ล้านตัน ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 0.71 ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมของโลก โดยไทยมีอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อปีร้อยละ 3.3 จากปี 2533 ซึ่งไทยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียง 94 ล้านตัน เท่านั้น

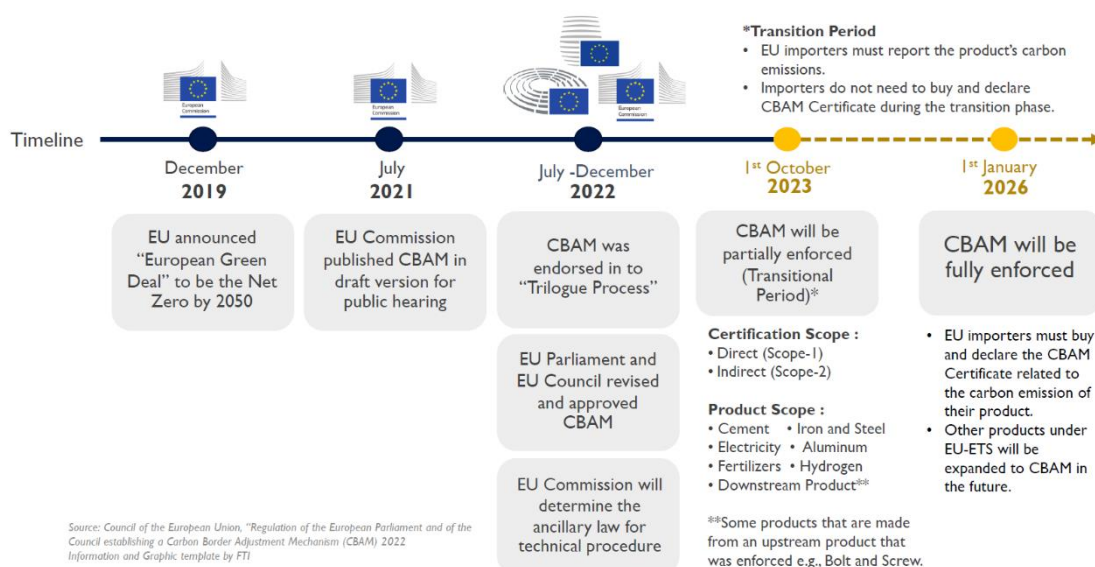
1. มาตรการด้านการค้าในต่างประเทศและนโยบายภาครัฐของไทยที่เกี่ยวข้องกับการส่งเสริมการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นเหตุให้หลายประเทศเริ่มให้ความสำคัญกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะการผลิตพลังงานไฟฟ้า การขับเคลื่อนอุตสาหกรรม การเกษตร การคมนาคมขนส่งต่าง ๆ ซึ่งเป็นกิจกรรมหลักที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณที่ค่อนข้างสูง โดยคณะกรรมการการยุโรป (European Commission) ได้ออกแผนการปฏิรูปสีเขียว หรือ European Green Deal เพื่อใช้เป็นแผนยุทธศาสตร์หลักในการสร้างสังคมที่มั่นคงและเป็นธรรมบนพื้นฐานของเศรษฐกิจที่ทันสมัยและใช้ทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยภายใต้แผนยุทธศาสตร์ดังกล่าว ได้ตั้งเป้าหมายที่จะลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงร้อยละ 50-55 ภายในปี 2573 (ค.ศ. 2030) และลดลงเป็นศูนย์ภายในปี 2593 (ค.ศ. 2050) ซึ่งยุทธศาสตร์ Green Deal ดังกล่าวได้ให้ความสำคัญกับมาตรการทางภาษีใน 2 ประเด็น เพื่อลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่

- 1) การแก้ไขกฎหมายภาษีพลังงาน (Energy Taxation Directive 2003/96: ETD)
- 2) การจัดทำกลไกการปรับคาร์บอนก่อนเข้าพรมแดน (Carbon Border Adjustment Mechanism: CBAM) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่จะเข้ามาจัดการการปล่อยคาร์บอนสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

¹ ที่มา: edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2022

รูปที่ 2 การพัฒนาการปรับคาร์บอนก่อนเข้าพรมแดน (CBAM) และกรอบระยะเวลาบังคับใช้



ในส่วนของการพัฒนาการปรับคาร์บอนก่อนเข้าพรมแดน หรือ CBAM นั้น ทางสหภาพยุโรป หรือ EU ได้มีการจัดตั้งระบบซื้อขายสิทธิในการปล่อยคาร์บอน (EU Emission Trading System: EU ETS) ซึ่งตั้งอยู่บนหลักการ Cap and Trade กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สหภาพยุโรป จะได้มีการกำหนดปริมาณคาร์บอนสูงสุดที่ผู้ประกอบการในภาคส่วนหนึ่งสามารถปล่อยได้ (Cap) โดยหากผู้ประกอบการปล่อยคาร์บอนในปริมาณที่น้อยกว่า Cap ที่กำหนดไว้ ผู้ประกอบการรายนั้น สามารถขายสิทธิในการปล่อยคาร์บอนให้แก่ผู้ประกอบการรายอื่นได้ นอกจากนี้ เพื่อเป็นการกระตุ้นให้ผู้ประกอบการมีการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตให้สามารถลดปริมาณการปล่อยคาร์บอนอย่างต่อเนื่อง โดยสหภาพยุโรป จะได้มีการปรับลด Cap ลงเป็นลำดับ ซึ่งมาตรการดังกล่าว จะเป็นแรงกดดันต่อต้นทุนการผลิตและการขยายสินค้าของผู้ประกอบการที่มีทำการค้าของทั้งประเทศสมาชิกของสหภาพยุโรปและประเทศคู่ค้า โดยในระยะเริ่มต้น CBAM จะนำมาใช้กับเฉพาะบางภาคส่วนที่มีความเสี่ยงสูงต่อการรั่วไหลของคาร์บอนตามการประเมินของคณะกรรมการยุโรปในกรอบการซื้อขายการปล่อยมลพิษของสหภาพยุโรป (EU ETS) โดยภาคส่วนที่จะได้รับผลกระทบจากมาตรการในระยะแรก คือ กลุ่มผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ แก้ว เหล็ก เหล็กกล้า ปูน และถ่านหิน (รูปที่ 2) และในระยะถัดไป อาจมีการพิจารณาขยายกลุ่มสินค้าเป้าหมายเพิ่มเติม ได้แก่ ผลิตภัณฑ์จากการกลั่นน้ำมัน สารเคมีอินทรีย์พื้นฐาน ไฮโดรเจน แอมโมเนีย และพอลิเมอร์² ทั้งนี้ มาตรการ CBAM จะเริ่มมีการบังคับใช้โดยเริ่มจากการให้ผู้ประกอบการมีการให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ข้างต้น ในช่วงปลายปี 2566 และจะเริ่มมีการบังคับใช้อย่างเต็มรูปแบบในปี 2569 (ค.ศ. 2026) อย่างไรก็ตาม แม้ว่าผลิตภัณฑ์ชีวภาพจะไม่ได้จัดอยู่ภายใต้ข้อกำหนด CBAM ในระยะแรก ผู้ประกอบการควร

² รอกการประกาศเพิ่มเติมอย่างเป็นทางการ / ที่มา: SET Note ฉบับที่ 4/2565 "ทำความเข้าใจ CBAM: Carbon Border Adjustment Mechanism"

มีการเตรียมความพร้อมโดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์และวางแผนในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการผลิตผลิตภัณฑ์เพื่อเตรียมตัวรับมือกับมาตรการทางการค้าที่อาจเข้มข้นขึ้น

กลไกการปรับคาร์บอนก่อนเข้าพรมแดน (CBAM) เป็นแรงกดดันทางอ้อมให้ผู้ประกอบการ โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนาซึ่งได้ให้ความสำคัญกับการปรับปรุงกระบวนการผลิตของตนเองให้สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศที่อยู่ในขั้นตอนการเจรจาความตกลงการค้าเสรี (FTA) กับ EU ซึ่ง EU สามารถนำกลไกดังกล่าวมาเป็นเงื่อนไขในการเจรจาได้

นอกจากสหภาพยุโรปแล้ว ยังมีอีกหลายประเทศที่เริ่มมีมาตรการในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เข้มข้น โดยเฉพาะประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งในการประชุมสุดยอดผู้นำด้านสภาพภูมิอากาศครั้งที่ 26 (COP26) สหรัฐอเมริกา ได้ประกาศเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นร้อยละ 50 ถึง 52 จากระดับการปล่อยในปี 2548 ภายในปี 2573 ขณะที่ประเทศจีน ก็ได้ประกาศตั้งเป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้มากที่สุดภายในหรือก่อนปี 2573 และบรรลุเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี 2603 ซึ่งทั้งจีนและสหรัฐฯ ได้ตกลงในแถลงการณ์ร่วมเมื่อวันที่ 18 เมษายน 2564 ที่จะร่วมมือกันต่อสู้กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ³

สำหรับประเทศไทย นับตั้งแต่ไทยเข้าร่วมภาคีกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือ United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC เมื่อปี 2537 ภาครัฐของไทยได้ให้ความสำคัญกับการรักษาระดับความเข้มข้นของปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศและปรับตัวต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่สอดคล้องกับการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมที่ยั่งยืนอย่างต่อเนื่องและได้มีการจัดทำ แผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจก ปี พ.ศ. 2564-2573 (Nationally Determined Contribution Roadmap on Mitigation 2021-2030)⁴ (รูปที่ 3) และมาตรการในการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย (พ.ศ. 2564-2573) ซึ่งจะได้มุ่งเน้นกิจกรรมการจัดการของเสีย การจัดการการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมและการขนส่ง การปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ซึ่งได้มีการวางแผนในการขับเคลื่อนทุกภาคส่วนเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศในภาพรวม

³ ที่มา: บทความเรื่อง ญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา ประกาศเพิ่มเป้าหมายในการลดก๊าซเรือนกระจก จัดทำและเผยแพร่โดย องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)

⁴ climate.onep.go.th/wp-content/uploads/2019/07/NDC-Roadmap-for-Printing.pdf

รูปที่ 3 แผนที้นำทางการลดก๊าซเรือนกระจก ปี พ.ศ.2564-2573 ภายใต้นโยบายการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย



ที่มา: สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

2. การส่งเสริมจากภาครัฐในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมชีวภาพสู่อุตสาหกรรมคาร์บอนต่ำ

จากสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและแนวโน้มการขยายตัวของกาปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้น ซึ่งภาครัฐของไทยได้ให้ความสำคัญกับประเด็นดังกล่าวผ่านการวิเคราะห์และจัดทำแผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกดังที่ได้กล่าวมา รวมถึงการกำหนดมาตรการส่งเสริมผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรมให้มีการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงาน การปรับเปลี่ยนมาใช้เครื่องจักรและเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่สามารถควบคุมการใช้พลังงานและของเสียได้มากขึ้น ซึ่งสำหรับอุตสาหกรรมชีวภาพแม้ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมที่มีการพึ่งพาทรัพยากรธรรมชาติและชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบทางเลือก แต่ในกระบวนการผลิตก็มีการใช้พลังงานสูงโดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเช่นเดียวกัน ปัจจุบันภาครัฐได้มีการขับเคลื่อนแนวทางการส่งเสริมการปรับปรุงกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวภาพเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในหลายรูปแบบ อาทิ

- **มาตรการพัฒนาอุตสาหกรรมชีวภาพของไทยปี 2561-2570**

จากนโยบายภาครัฐในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมตาม BCG Model ได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อสร้างความยั่งยืนให้กับสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากร โดยเฉพาะด้านเศรษฐกิจชีวภาพ

(Bioeconomy) ที่เน้นการพึ่งพาทรัพยากรหมุนเวียน (Renewable resource) แทนการใช้ทรัพยากรสิ้นเปลืองที่ใช้แล้วหมดไป โดยการขับเคลื่อนนโยบายเศรษฐกิจชีวภาพ ผ่านมาตรการพัฒนาอุตสาหกรรมชีวภาพของไทยปี 2561-2570 ได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของอุตสาหกรรมชีวภาพในหลายด้าน โดยภายใต้มาตรการดังกล่าวประกอบด้วยมาตรการย่อยและกิจกรรมที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมชีวภาพสู่อุตสาหกรรมคาร์บอนต่ำ อาทิ

- การพัฒนาองค์ความรู้ของผู้ประกอบการ ผ่านกิจกรรม Bio Industry Academy เพื่อผลักดันการพัฒนาผลิตภัณฑ์รักษ์สิ่งแวดล้อมที่ตรงกับความต้องการของตลาด รวมถึงการให้คำปรึกษาเกี่ยวกับแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น
- การส่งเสริมการสร้างความร่วมมือระหว่างหน่วยงานการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ กับผู้ประกอบการในอุตสาหกรรม ผ่านกิจกรรม Bio prototype เพื่อผลักดันให้เกิดการพัฒนาและออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่ำ และสามารถต่อยอดงานวิจัยดังกล่าวสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ (Commercialization) เป็นต้น

● มาตรการส่งเสริมการลงทุน

ภาครัฐ นำโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน ได้ให้ความสำคัญกับส่งเสริมการลงทุนเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ซึ่งจะมีส่วนช่วยสนับสนุนการขับเคลื่อนและพัฒนาประเทศด้วยโมเดลเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว (BCG) โดยได้มีมาตรการส่งเสริมการลงทุนและการพัฒนาศักยภาพด้านการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อาทิ มาตรการปรับปรุงประสิทธิภาพด้านการประหยัดพลังงาน การใช้พลังงานทดแทนหรือการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับผู้ประกอบการที่มีการปรับเปลี่ยนเครื่องจักรเพื่อการประหยัดพลังงาน การนำพลังงานทดแทนมาใช้ในกิจการ หรือการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามเกณฑ์ที่สำนักงานกำหนด โดยจะต้องได้รับการขึ้นทะเบียนและรับรองปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) เป็นต้น⁵

● การส่งเสริมด้านการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก

ในปี 2550 ภาครัฐโดยคณะรัฐมนตรี ได้มีการจัดตั้งองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) เพื่อให้บริการ ดูแล และกำหนดมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการวัด การรายงาน และการทวนสอบ และให้การรับรองปริมาณการปล่อย การลด และการชดเชยก๊าซเรือนกระจก รวมทั้งส่งเสริมพัฒนาโครงการและการตลาดซื้อขายปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ได้รับการรับรอง เป็นศูนย์กลางข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสถานการณ์ดำเนินงานด้านก๊าซเรือนกระจก ส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพ ตลอดจนให้คำแนะนำแก่หน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนเกี่ยวกับการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก โดยในช่วงที่ผ่านมา อบก. ได้มีการพัฒนาโครงการเพื่อ

⁵ คู่มือการขอรับการส่งเสริมการลงทุน 2566 โดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน จากเว็บไซต์ www.boi.go.th/upload/content/BOI_a_Guide_2023_TH.pdf

ส่งเสริมการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรม ร่วมกับหน่วยงานต่าง ๆ อาทิ โครงการส่งเสริมการจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งจัดให้มีการทวนสอบและรับรองผลการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรในภาคอุตสาหกรรมที่เข้าร่วมโครงการและเสริมสร้างความเข้มแข็งให้แก่กลไกการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกในระดับองค์กรของประเทศ รวมทั้งเพื่อวิเคราะห์แหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่าง ๆ ขององค์กร กำหนดเป้าหมายและหาแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรภาคอุตสาหกรรม นำไปสู่การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero emissions)⁶

3. หลักการวิเคราะห์และประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

สำหรับภาคอุตสาหกรรมซึ่งเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่ผลิตและปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญและกำลังเผชิญกับความท้าทายในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิต ซึ่งหนึ่งในแนวทางสำคัญในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรม คือ การวิเคราะห์และประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ถูกผลิตขึ้น ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบสำหรับผลิต กระบวนการผลิต การจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต การขนส่งและขนถ่ายสินค้า การใช้และบริโภคผลิตภัณฑ์ ไปจนถึงการจัดการผลิตภัณฑ์หลังการใช้งานแล้ว เพื่อให้ทราบถึงขั้นตอนการผลิตและช่วงวัฏจักรของผลิตภัณฑ์ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจกสูง ซึ่งจะเป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์แนวทางการในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างตรงจุดมากขึ้น นอกจากนี้ ภาครัฐ ในปัจจุบัน ได้มีการผลักดันการใช้พลังงานทางเลือกและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ภายใต้นโยบายเศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) ซึ่งเป็นการผลักดันให้เกิดการหมุนเวียนของทรัพยากรในระบบ การเลือกใช้ทรัพยากรทางเลือกที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่ผลิตจากชีวภาพหรือผลผลิตจากภาคการเกษตรภายใต้นโยบายการส่งเสริมเศรษฐกิจชีวภาพ (Bioeconomy) ซึ่งนอกจากจะช่วยผลักดันการต่อยอดผลิตภัณฑ์การเกษตรให้มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น เสริมสร้างโอกาสในการแข่งขันอย่างยั่งยืน ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากเมื่อเทียบกับการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

หลักการการประเมินวัฏจักรชีวิต หรือ LCA ได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ สามารถช่วยเพิ่มความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของมนุษย์และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาคุณภาพสังคมและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน หรืออาจจะกล่าวได้ว่า LCA เป็นกระบวนการวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบของผลิตภัณฑ์ (เชิงปริมาณ) ต่อสิ่งแวดล้อมตลอดช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เริ่มตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การขนส่งและการแจกจ่าย การใช้งานผลิตภัณฑ์หรือการบำรุงรักษา การนำมาใช้ซ้ำ (Reuse) หรือการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ไปจนถึงการจัดการเศษซากของผลิตภัณฑ์หลังจากการใช้งาน โดยการประเมินวัฏจักรชีวิต

⁶ ที่มา: www.tgo.or.th

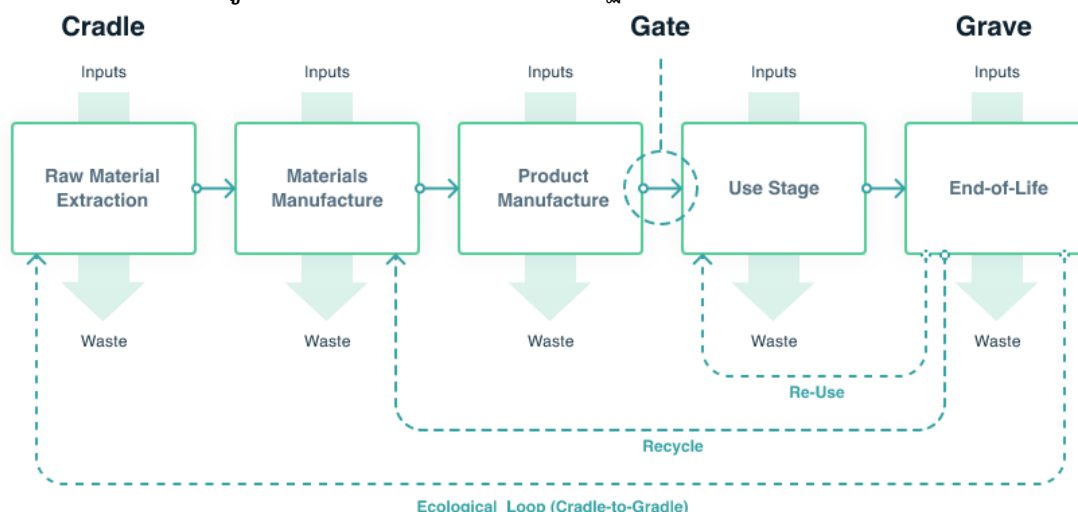
เป็นส่วนหนึ่งในมาตรฐานระบบจัดการสิ่งแวดล้อม (ISO 14000) ซึ่งมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับประเมินวัฏจักรชีวิตได้ถูกกำหนดไว้อยู่ภายใต้มาตรฐาน ISO 14040 (Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework)

โดยภายใต้มาตรฐานดังกล่าว ได้มีการกำหนดขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ไว้ 4 รูปแบบ (**รูปที่ 4**) ได้แก่

- 1) Gate to Gate: ซึ่งพิจารณาเฉพาะกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งจากทั้งสายโซ่การผลิต โดยเป็นเพียงบางส่วนของ LCA (Partial LCA) เช่น การพิจารณาเฉพาะขั้นตอนการจัดการซากผลิตภัณฑ์พลาสติกเท่านั้น หรือขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบเท่านั้น เป็นต้น
- 2) Cradle to Gate: เป็นการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ (แต่ไม่รวมถึงขั้นตอนการใช้งานหรือกำจัดซาก)
- 3) Cradle to Grave: เป็นการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบเต็มรูปแบบ ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบมาผลิตสินค้า การผลิตสินค้า การนำไปใช้งาน ตลอดจนการกำจัดซากหลังหมดอายุการใช้งาน
- 4) Cradle to Cradle: เป็นประเมินวัฏจักรสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีการจัดการซากผลิตภัณฑ์โดยการนำกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ เช่น การใช้เซลล์ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเช่นนี้ จะมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์น้อยกว่ากรณี Cradle to Grave

อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์หรือการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ผู้ประกอบการหรือผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องมีการกำหนดขอบเขตของการวิเคราะห์ที่ชัดเจนเพื่อผลการวิเคราะห์มีความถูกต้อง สอดคล้องกับความเป็นจริงและสามารถนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในเชิงเปรียบเทียบได้ โดยในการศึกษาวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ชีวภาพภายใต้บทวิเคราะห์เชิงลึกฉบับนี้ จะได้มีการศึกษาวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์จากกรณีศึกษาที่มีผลการวิจัยที่น่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับในระดับสากล ซึ่งการศึกษาข้อมูลในเชิงเปรียบเทียบนั้น จะได้มีการศึกษาภายใต้ขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตเดียวกันเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากกระบวนการหรือสถานะที่ต่างกันได้

รูปที่ 4 ขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์



ที่มา: Paints for Life (www.paintsforlife.eu)

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้หลายรูปแบบ อาทิ ออกแบบและปรับปรุงกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น พัฒนากลยุทธ์ด้านการตลาดและแผนการลงทุน ช่วยในการหาผู้จัดหาวัตถุดิบ (Supplier) ให้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นเกณฑ์ในการจัดทำราคาส่งต่อสิ่งแวดล้อม เป็นข้อมูลสนับสนุนให้ภาครัฐในการกำหนดนโยบายขับเคลื่อนอุตสาหกรรม พัฒนาสิ่งแวดล้อม และเป็นข้อมูลให้กับผู้บริโภคเพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ เป็นต้น โดยภายใต้กรอบการจัดทำบทวิเคราะห์เชิงลึกฉบับนี้ จะได้มีการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ชีวภาพเป้าหมายที่จะศึกษาข้อมูลวัฏจักรชีวิตจากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ อาทิ งานวิจัยระดับนานาชาติ ข้อมูลจากฐานข้อมูลของภาครัฐ ฯลฯ เพื่อนำมาวิเคราะห์แนวทางในการส่งเสริมการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากยิ่งขึ้น

4. การคัดเลือกผลิตภัณฑ์ชีวภาพเพื่อศึกษาและวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

สำหรับการวิเคราะห์และคัดเลือกผลิตภัณฑ์ชีวภาพเพื่อวิเคราะห์วัฏจักรชีวิต ในบทวิเคราะห์เชิงลึกในฉบับนี้ จะได้ให้คัดเลือกผลิตภัณฑ์ชีวภาพ 3 ผลิตภัณฑ์ จากกลุ่มอุตสาหกรรมชีวภาพเป้าหมายทั้ง 3 กลุ่ม ได้แก่ อุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ อุตสาหกรรมชีวภาพเภสัชภัณฑ์ อุตสาหกรรมเคมีชีวภาพ ซึ่งในการคัดเลือกจะพิจารณาตามเกณฑ์ ดังนี้

- เป็นผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่ไทยมีมูลค่าการส่งออกสูง โดยพิจารณาจากมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ในปี 2565 และมีขยายตัวของมูลค่าการส่งออกอย่างต่อเนื่องในช่วงระยะ 5 ปี (2561-2565)
- มีแนวโน้มความต้องการของตลาดสูง โดยพิจารณาจากมูลค่าตลาดโลกและแนวโน้มการขยายตัวของมูลค่าตลาดโลกในอนาคต
- เป็นผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่ไทยมีศักยภาพการผลิต โดยประเมินจากการมีผู้ประกอบการที่มีการผลิตภายในประเทศ

- เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเกี่ยวข้องและมีความสำคัญกับอุตสาหกรรมปลายทางที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่ม

จากผลการศึกษาและรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ชีวภาพเพื่อคัดเลือกผลิตภัณฑ์เป้าหมาย สำหรับศึกษาข้อมูลการประเมินวัฏจักรชีวิตและวิเคราะห์แนวทางในการปรับปรุงการผลิตให้มีประสิทธิภาพ สามารถลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจกได้มากขึ้น โดยมีข้อมูลดังแสดงใน **ตารางที่ 1**

ตารางที่ 1 การศึกษาข้อมูลผลิตภัณฑ์ชีวภาพเพื่อคัดเลือกผลิตภัณฑ์เป้าหมายสำหรับศึกษาข้อมูลวัฏจักรชีวิต (Lifecycle Assessment)

กลุ่มอุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ ⁷	สถิติมูลค่าการส่งออกของไทย ⁸	มูลค่าตลาดและการเติบโตของมูลค่าตลาด	ตัวอย่างผู้ผลิตในประเทศ ⁹	การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง
พลาสติกชีวภาพ	พอลิแลคติกแอซิด (PLA)	ไทยมีมูลค่าการส่งออกปี 2565 อยู่ที่ 3,045.29 ล้านบาท ขยายตัวเพิ่มขึ้นจากปี 2561 ซึ่งมีมูลค่าอยู่ที่ 135.03 ล้านบาท คิดเป็นอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปี (AAGR) ร้อยละ 117.92 จากปี 2561-2565	- มูลค่าตลาด PLA ของโลก มีมูลค่าอยู่ที่ประมาณ 1 พันล้านเหรียญสหรัฐ ในปี 2564 ซึ่งได้มีการคาดการณ์ว่ามูลค่าตลาดจะขยายตัวเพิ่มขึ้นเป็น 1.9 พันล้านเหรียญสหรัฐ ในปี 2569 ซึ่งคิดเป็นอัตราการเติบโต (CAGR) เฉลี่ยร้อยละ 12.2¹⁰ - กำลังการผลิตเม็ด PLA ขยายตัวเพิ่มขึ้นจาก 0.45 ล้านตัน ในปี 2565 เป็น 2.38 ล้านตันในปี 2570 คิดเป็นอัตราการขยายตัวร้อยละ 428 (ที่มา: European bioplastics 2022)	บริษัท โททาล คอร์เบียน พีแอลเอ (ประเทศไทย) จำกัด 	- บรรจุภัณฑ์พลาสติก - ถุงพลาสติกเพื่อการเกษตรและฟิล์มคลุมดิน - การผลิตเส้นใย - วัสดุสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ - อุปกรณ์การแพทย์และวัสดุฝังใน เช่น Pins, Rods, Mesh, Plates, Screws, Anchors, Sculptra ฯลฯ¹¹
	เม็ดพลาสติกที่มีแป้งเป็นหลัก (Starch based polymer)	ไทยมีมูลค่าการส่งออกปี 2565 อยู่ที่ 9.56 ล้านบาท ขยายตัวเพิ่มขึ้นจากปี 2563 ซึ่งมีมูลค่าการส่งออกอยู่ที่ 0.49 ล้านบาท	มูลค่าตลาดเม็ดพลาสติกชีวภาพในกลุ่ม Starch-based bioplastics ของโลก ในปี 2563 มีมูลค่าราว 1.4 พันล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งคาดการณ์ว่า มูลค่า	บริษัท สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด 	บรรจุภัณฑ์ เช่น แผ่นฟิล์ม หรือแผ่นซีท เป็นต้น

⁷ หมายเหตุ ผลิตภัณฑ์ที่ปรากฏตาม**ตารางที่ 1** เป็นผลิตภัณฑ์ชีวภาพ 3 อันดับแรกที่มีมูลค่าการส่งออกสูงสุดของแต่ละกลุ่มอุตสาหกรรม

⁸ ที่มา: กรมศุลกากร ข้อมูล ณ วันที่ 15 พฤษภาคม 2566

⁹ ที่มา: ข้อมูลผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมชีวภาพ จาก Bio Innovation Linkage ข้อมูล ณ วันที่ 15 พฤษภาคม 2566

¹⁰ ที่มา: www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/poly-lactic-acid-pla-market-29418964.html

¹¹ ที่มา: satisfibers.com/what-is-pla-fiber/

กลุ่มอุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ ⁷	สถิติมูลค่าการส่งออกของไทย ⁸	มูลค่าตลาดและการเติบโตของมูลค่าตลาด	ตัวอย่างผู้ผลิตในประเทศ ⁹	การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง
		และปี 2564 ซึ่งมีมูลค่าส่งออกอยู่ที่ 1.13 ล้านบาท ตามลำดับ	ตลาดจะขยายตัวเพิ่มขึ้นเป็น 3.6 พันล้านเหรียญสหรัฐ ในปี 2573 คิดเป็นอัตราการเติบโต (CAGR) เฉลี่ยร้อยละ 10.1 ¹² ● กำลังการผลิตเม็ดพลาสติกกลุ่ม Starch blend ในปี 2565 อยู่ที่ 0.397 ล้านตัน ซึ่งในปี 2570 คาดว่ากำลังการผลิตจะอยู่ในระดับใกล้เคียงกับกำลังการผลิต ปัจจุบัน (ที่มา: European bioplastics 2022)	● บริษัท ไทยวา จำกัด (มหาชน) 	● วัสดุอุปกรณ์การเกษตร เช่น กระจ่างใส่ต้นไม้ ฟิล์มคลุมหญ้า เสาลัก ส้อมพรวน เป็นต้น ● ผลิตภัณฑ์ในครัวเรือน ได้แก่ ถาด ขวด ถ้วย จาน ช้อน ส้อม ถู เป็นต้น
	พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS)	ไม่มีข้อมูลการนำเข้า-ส่งออก ¹³	● กำลังการผลิตเม็ดพลาสติก PBS ของโลกในปี 2565 อยู่ที่ประมาณ 1.9 หมื่นตัน ซึ่งในปี 2570 คาดว่ากำลังการผลิตจะอยู่ในระดับใกล้เคียงกับกำลังการผลิต ปัจจุบัน (ที่มา: European bioplastics 2022)	● บริษัท พีทีที เอ็มซีซี ปิโอบีเคมี จำกัด 	● บรรจุภัณฑ์และเครื่องใช้ในครัวเรือน อาทิ แก้วน้ำพลาสติก ฟิล์มห่ออาหาร ถุงหิ้ว ช้อน ส้อม พลาสติก เป็นต้น ● วัสดุอุปกรณ์การแพทย์ อาทิ วัสดุซ่อมแซมกระดูกอ่อน โครงสร้างรองรับเซลล์ เป็นต้น ● อุปกรณ์การเกษตร อาทิ ถุงเพาะชำ พลาสติกคลุมดิน เป็นต้น

¹² ที่มา: www.alliedmarketresearch.com/starch-based-bioplastics-market

¹³ หมายเหตุ เนื่องจาก ณ ปัจจุบัน ยังไม่มีการกำหนดพิกัดศุลกากร (HS Code) สำหรับเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS โดยเฉพาะเจาะจง

กลุ่มอุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ ⁷	สถิติมูลค่าการส่งออกของไทย ⁸	มูลค่าตลาดและการเติบโตของมูลค่าตลาด	ตัวอย่างผู้ผลิตในประเทศ ⁹	การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง
เคมีชีวภาพ	กรดซิตริก (Citric acid)	- มูลค่าการส่งออกปี 2565 อยู่ที่ 6,848.08 ล้านบาท (คิดเป็นร้อยละ 24.75 ของมูลค่าการส่งออกรวม) - ขยายตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อปี (AAGR) ร้อยละ 22.04 จากปี 2561-2565	- มูลค่าตลาดกรดซิตริกของโลกในปี 2565 ที่ผ่านมามีมูลค่าอยู่ที่ 3.87 พันล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งคาดการณ์ว่ามูลค่าตลาดจะขยายตัวเพิ่มขึ้นเป็น 4.2 พันล้านเหรียญสหรัฐ ในปี 2575 คิดเป็นอัตราการเติบโต (CAGR) ร้อยละ 8.6¹⁴ - หากพิจารณาขนาดตลาดกรดซิตริกในเชิงปริมาณ (Market size by volume) พบว่า ในปี 2565 ปริมาณกรดซิตริกในตลาดโลกมีปริมาณ 2.59 ล้านตัน ซึ่งคาดว่าความต้องการกรดซิตริกในตลาดจะเพิ่มสูงขึ้น จนมีปริมาณในตลาดอยู่ที่ 3.29 ล้านตันในปี 2571 คิดเป็นอัตราการขยายตัว (CAGR) ร้อยละ 4.1¹⁵	- บริษัท เอเชียโมดิไฟด์สตาร์ จำกัด - บริษัท อุตสาหกรรมกรดมะนาว จำกัด - บริษัท ไทยซิตริก แอซิด จำกัด - บริษัท คอฟไค์ ไบโอเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด - บริษัท ชันชาย ไบโอเทค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด - บริษัท นิรันดร์ (ประเทศไทย) จำกัด 	- อุตสาหกรรมอาหาร: เพื่อปรุงแต่งกลิ่นและรส เพื่อให้เกิดรสเปรี้ยวเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ที่สามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้อาหารและเครื่องดื่มคงสภาพ ไม่เน่าเสีย - อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง: ช่วยลอกเซลล์ผิวที่หมองคล้ำ - อุตสาหกรรมยาและการแพทย์: ควบคุมความเป็นกรดต่างในยา ช่วยให้การกระจายตัวได้ดี - ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำยาทำความสะอาด: สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสหลายชนิด และยังช่วยขจัดคราบและกลิ่น
	กรดกลูตามิก (Glutamic acid)	มูลค่าการส่งออกปี 2565 อยู่ที่ 6,408.02 ล้านบาท (คิดเป็นร้อยละ 24.75 ของมูลค่าการส่งออกรวม)	มูลค่าตลาดกรดกลูตามิกของโลกในปี 2564 ที่ผ่านมามีมูลค่าอยู่ที่ 10.4 พันล้านเหรียญสหรัฐ คาดว่าตลาดจะ	- บริษัท อายิโนโมะโต๊ะ (ประเทศไทย) จำกัด - บริษัท ไทยชูรส จำกัด	อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม: เพิ่มรสเปรี้ยว ช่วยให้มีรสชาติดีขึ้น ยับยั้งการเติบโตของ

¹⁴ ที่มา: www.thebusinessresearchcompany.com/report/citric-acid-global-market-report

¹⁵ ที่มา: www.expertmarketresearch.com/reports/citric-acid-market

กลุ่มอุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ ⁷	สถิติมูลค่าการส่งออกของไทย ⁸	มูลค่าตลาดและการเติบโตของมูลค่าตลาด	ตัวอย่างผู้ผลิตในประเทศ ⁹	การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง
		ร้อยละ 23.23 ของมูลค่าการส่งออกรวม) ขยายตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อปี (AAGR) ร้อยละ 6.67 จากปี 2561-2565	ขยายตัวเพิ่มขึ้นด้วยอัตราการเติบโต (CAGR) ร้อยละ 7.1 จากปี 2565-2573 ¹⁶ โดยในปี 2573 คาดว่าตลาดจะมีมูลค่าราว 19.4 พันล้านเหรียญสหรัฐ ¹⁷	บริษัท เค ที เอ็ม เอส จี จำกัด 	เชื้อจุลินทรีย์ ให้อาหารแก่การรักษาได้นานขึ้น - อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง: บำรุงเส้นผม ป้องกันผมร่วง เป็นส่วนผสมของเครื่องสำอางเพื่อป้องกันริ้วรอย - เกษตรและปศุสัตว์: เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ เป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์
	กรดแลคติก (Lactic Acid)	- มูลค่าการส่งออกปี 2565 อยู่ที่ 3,667.06 ล้านบาท (คิดเป็นร้อยละ 13.25 ของมูลค่าการส่งออกรวม) - ขยายตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อปี (AAGR) ร้อยละ 0.46 จากปี 2561-2565	มูลค่าตลาดกรดแลคติกของโลกในปี 2565 ที่ผ่านมามีมูลค่าอยู่ที่ 3.1 พันล้านเหรียญสหรัฐ คาดว่าตลาดจะขยายตัวเพิ่มขึ้นด้วยอัตราการเติบโต (CAGR) ร้อยละ 8.0 จากปี 2566-2573¹⁸	บริษัท พูแรค (ประเทศไทย) จำกัด 	- อุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ: เป็นสารตั้งต้นในการผลิตแลคไทด์และพอลิแลคติกแอซิด (PLA) - อุตสาหกรรมอาหาร: เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหมักอาหารหลายชนิด อาทิ นมเปรี้ยว โยเกิร์ต ฯลฯ ป้องกันการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์อื่นที่ทำให้อาหารเสีย

¹⁶ ที่มา: www.precedenceresearch.com/glutamic-acid-market

¹⁷ ที่มา: www.psmarketresearch.com/market-analysis/glutamic-acid-market

¹⁸ ที่มา: www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lactic-acid-and-poly-lactic-acid-market

กลุ่มอุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ ⁷	สถิติมูลค่าการส่งออกของไทย ⁸	มูลค่าตลาดและการเติบโตของมูลค่าตลาด	ตัวอย่างผู้ผลิตในประเทศ ⁹	การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง
					อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง: เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์บำรุงผิว ผลิตภัณฑ์สำหรับช่องปาก ผลิตภัณฑ์บำรุงเส้นผม และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดร่างกาย
ชีวเภสัชภัณฑ์ ¹⁹	วัคซีนสำหรับมนุษย์ (Human vaccine)	- มูลค่าการส่งออกปี 2565: 1,298.91 ล้านบาท (คิดเป็นร้อยละ 85.78 ของมูลค่าการส่งออกรวม) - ขยายตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อปี (AAGR) ร้อยละ 6.58 จากปี 2561-2565	มูลค่าตลาดวัคซีนของโลกในปี 2565 ที่ผ่านมามีมูลค่าอยู่ที่ 65.81 พันล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งคาดว่ามูลค่าตลาดวัคซีนของโลกจะขยายตัวเพิ่มขึ้นในช่วงปี 2566-2571 คิดเป็นอัตราการเติบโต (CAGR) ร้อยละ 4.10²⁰	- บริษัท ไบโอเนท-เอเชีย จำกัด - บริษัท องค์การเภสัชกรรม-เมอร์ริเออร์ชีววัตถุ จำกัด - มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี - สถานเสาวภา สภากาชาดไทย	อุตสาหกรรมการแพทย์: ใช้กระตุ้นร่างกายให้สร้างภูมิคุ้มกันต่อเชื้อไวรัส ลดอัตราการเสียชีวิต ป้องกันการป่วยหนัก และลดอัตราการรับการรักษาในโรงพยาบาลเป็นเวลานาน ๆ และช่วยเสริมสร้างภูมิคุ้มกันหมู่
	ผลิตภัณฑ์ภูมิคุ้มกันวิทยา (Immunological product)	- มูลค่าการส่งออกปี 2565: 107.01 ล้านบาท (คิดเป็นร้อยละ 7.07 ของมูลค่าการส่งออกรวม) - ขยายตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อปี (AAGR) ร้อยละ 65.61 จากปี 2561-2565	มูลค่าตลาดผลิตภัณฑ์ภูมิคุ้มกันวิทยาของโลกในปี 2564 และ 2565 ที่ผ่านมามีมูลค่าอยู่ที่ 97.93 และ 104.12 พันล้านเหรียญสหรัฐ ตามลำดับ ซึ่งคาดว่ามูลค่าตลาดจะขยายตัวเพิ่มขึ้นในช่วงปี 2565-2572 คิดเป็นอัตราการเติบโต		อุตสาหกรรมการแพทย์: ใช้ในกระบวนการรักษาผู้ป่วยแบบจำเพาะ เสริมสร้างภูมิคุ้มกันต่อเชื้อและสิ่งแปลกปลอมที่เข้าสู่ร่างกาย (Antigen)

¹⁹ หมายเหตุ: พิจารณาตามพิภพอุตสาหกรรมที่สามารถระบุผลิตภัณฑ์ปลายทางได้อย่างชัดเจน (ไม่นับรวมกลุ่มพิภพอุตสาหกรรมกลุ่มผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น ๆ ที่สามารถเจาะจงชื่อผลิตภัณฑ์ได้)

²⁰ ที่มา: www.expertmarketresearch.com/reports/vaccine-market

กลุ่มอุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ ⁷	สถิติมูลค่าการส่งออกของไทย ⁸	มูลค่าตลาดและการเติบโตของมูลค่าตลาด	ตัวอย่างผู้ผลิตในประเทศ ⁹	การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง
			(CAGR) ร้อยละ 8.5 ²¹ โดยในปี 2572 คาดว่าจะมีมูลค่าตลาดราว 184.21 พันล้านเหรียญสหรัฐ ²²		
	ยาปฏิชีวนะ (Antibiotics)	- มูลค่าการส่งออกปี 2565: 9.63 ล้านบาท (คิดเป็นร้อยละ 0.64 ของมูลค่าการส่งออกรวม) - โดนมูลค่าการส่งออกของไทยในปี 2565 หดตัวลงจากปี 2561 เฉลี่ยต่อปี (AAGR) ร้อยละ 20.48	มูลค่าตลาดยาปฏิชีวนะของโลกในปี 2565 ที่ผ่านมา มีมูลค่าอยู่ที่ 43.26 พันล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งคาดว่ามูลค่าตลาดยาปฏิชีวนะของโลกจะขยายตัวเพิ่มในช่วงปี 2565-2573 คิดเป็นอัตราการเติบโต (CAGR) ร้อยละ 8.9 โดยในปี 2573 คาดว่าจะมีมูลค่าตลาดราว 59.21 พันล้านเหรียญสหรัฐ²³	- บริษัท ไทยเมจิฟาร์มาชีฟติคัล จำกัด - บริษัท มิลลิเมด บีเอฟเอส จำกัด  	อุตสาหกรรมทางการแพทย์: ฆ่าเชื้อ หรือยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

²¹ ที่มา: www.expertmarketresearch.com/reports/vaccine-market

²² ที่มา: www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/immunology-market-100657

²³ ที่มา: www.expertmarketresearch.com/reports/vaccine-market

ตารางที่ 2 การคัดเลือกผลิตภัณฑ์ชีวภาพเป้าหมายเพื่อศึกษาข้อมูลวัฏจักรชีวิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

กลุ่มอุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ	มูลค่าการส่งออก	มูลค่าและแนวโน้มตลาดโลก	ศักยภาพในการผลิตในประเทศ	การใช้ประโยชน์ด้านอุตสาหกรรม	ภาพรวมการประเมิน
พลาสติกชีวภาพ	PLA	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
	Starch-based polymer	(1)	(2)	(3)	(2)	(2)
	PBS	(-)	(1)	(3)	(2)	(2)
เคมีชีวภาพ	กรดซิตริก	(3)	(2)	(3)	(3)	(3)
	กรดกลูตามิก	(2)	(3)	(3)	(2)	(2) ²⁴
	กรดแลคติก	(1)	(2)	(3)	(3)	(2)
ชีวเภสัชภัณฑ์	วัคซีน	(3)	(2)	(3)	(2)	(3)
	ผลิตภัณฑ์ภูมิคุ้มกันวิทยา	(2)	(3)	(3)	(2)	(2) ²⁵
	ยาปฏิชีวนะ	(1)	(1)	(3)	(2)	(2)

หมายเหตุ เกณฑ์การประเมิน (3) = สูง (2) = ปานกลาง (1) = ต่ำ (-) = ข้อมูลไม่เพียงพอต่อการประเมิน

จากผลการศึกษาข้อมูลด้านการตลาด ข้อมูลศักยภาพด้านการสร้างมูลค่าส่งออก ข้อมูลผู้ผลิตในประเทศและการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ชีวภาพในอุตสาหกรรมปลายทาง รวมถึงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลตามเกณฑ์การคัดเลือกที่กำหนด (**ตารางที่ 2**) ของผลิตภัณฑ์ชีวภาพภายใต้ 3 กลุ่มอุตสาหกรรมชีวภาพเป้าหมาย พบว่า เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กรดซิตริก (Citric Acid) และวัคซีนสำหรับมนุษย์ (Human vaccine) เป็น 3 ผลิตภัณฑ์เป้าหมายที่มีศักยภาพตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ซึ่งจะเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์เป้าหมายสำหรับศึกษาข้อมูลวัฏจักรชีวิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ต่อไป

5. การศึกษาการศึกษาวัฏจักรชีวิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวภาพเป้าหมาย

5.1 การศึกษาการศึกษาวัฏจักรชีวิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด (PLA)

พอลิแลคติกแอซิด หรือ PLA เป็นหนึ่งในพลาสติกชีวภาพที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั่วโลก จากข้อมูลของ European Bioplastics²⁶ รายงานว่าในปี 2565 ที่ผ่านมา ทั่วโลกมีกำลังการผลิตเม็ด PLA รวม 4.6 แสนตัน ซึ่งคาดว่าจะกำลังการผลิต PLA จะขยายตัวเพิ่มขึ้นเป็น 2.38 ล้านตันในปี 2570 โดยเม็ดพลาสติก PLA ผลิตจากกรดแลคติก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ปลายทางได้จากการหมักน้ำตาลที่ได้จากพืชชีวมวล

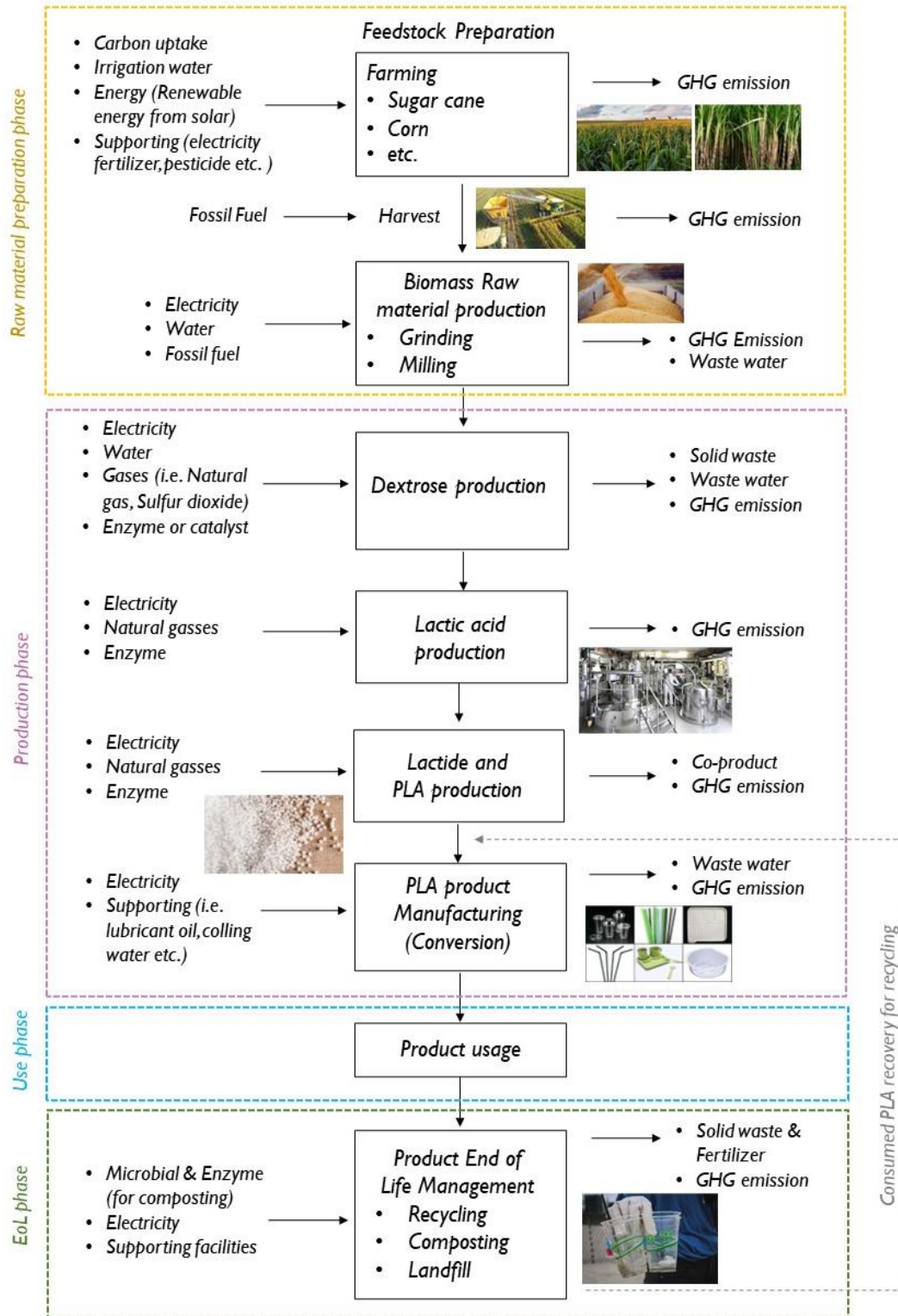
²⁴ เนื่องจากส่วนใหญ่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมต่อเนื่องน้อยกว่ากรดซิตริกและมีการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเป็นหลัก

²⁵ เนื่องจาก Monoclonal antibody ขอบเขตของการใช้งานต่างจากวัคซีน โดยมีขอบเขตการออกฤทธิ์ที่แคบอันเนื่องมาจากความจำเพาะต่อ antigen ชนิดเดียว

²⁶ ที่มา: www.european-bioplastics.org/market/

อาทิ อ้อย ข้าวโพด เป็นต้น โดยเม็ดพลาสติก PLA ที่ผลิตขึ้น ถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปลายทางที่หลากหลาย อาทิ สิ่งทอ บรรจุภัณฑ์ วัสดุทางการแพทย์ ฯลฯ

รูปที่ 5 วัฏจักรชีวิตของพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด (PLA)



ที่มา: Erfan Rezvani Ghomi et al. (2021), revised graphics by PITH

จากการศึกษาและวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด หรือ PLA (รูปที่ 5) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้

- 1) การได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Raw material preparation phase) เป็นช่วงของการเพาะปลูกพืชที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตกรดแลคติก (Lactic acid) โดยการเพาะปลูกส่วนใหญ่จะมีการใช้พลังงานจากธรรมชาติ (Solar energy) ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon uptake) จากบรรยากาศและสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นวัตถุดิบในปฏิกิริยาการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช และมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนการเก็บเกี่ยวและการแปรรูปเพื่อให้ได้แป้งและน้ำตาล
- 2) ขั้นตอนการผลิต (Production phase) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนที่สำคัญ คือ
 - 1) การผลิตกรดแลคติก โดยอาศัยกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์ (Enzymatic fermentation) ภายใต้สภาวะที่มีการควบคุม ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำในกระบวนการผลิต และมีการปล่อยของเสียและของเหลือจากกระบวนการผลิตออกมาบางส่วน
 - 2) การผลิตแลคไทด์และพอลิแลคติกแอซิด และ
 - 3) การแปรรูปเม็ดพลาสติก PLA เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกผ่านกระบวนการต่าง ๆ อาทิ การฉีดขึ้นรูป (Injection process) การทำฟิล์ม (Film casting process) การผลิตถุงพลาสติกผ่านกระบวนการเป่า (Blowing process) ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าและน้ำเป็นปัจจัยสนับสนุนในกระบวนการผลิต
- 3) ขั้นตอนการใช้งาน (Use phase) เป็นการใช้อยู่ผลิตภัณฑ์พลาสติก PLA ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การใช้เป็นวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ บรรจุภัณฑ์ เส้นใยและสิ่งทอ สิ่งของเครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น
- 4) ขั้นตอนการจัดการซากหลังการใช้งาน (End of Life Management) โดยผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตจาก PLA มีกระบวนการจัดการหลังการใช้งานแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ 1) การฝังกลบในหลุมฝังกลบ (Landfill) 2) การย่อยสลายภายใต้สภาวะควบคุม (Composting) และ 3) การนำกลับเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล (Recycle) เพื่อเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่

ตามหลักของการกำหนดขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ISO 14040 สามารถพิจารณาขอบเขตของการประเมินประเมินวัฏจักรชีวิตของ PLA แบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ คือ

- 1) รูปแบบ Cradle to gate (กรณีการผลิตเม็ดพลาสติก PLA) จะพิจารณาช่วงวัฏจักรชีวิตตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบจนถึงการผลิตเม็ดพลาสติก PLA ซึ่งไม่รวมถึงขั้นตอนของการใช้เม็ดพลาสติกในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ การใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติก PLA และการจัดการซากผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน
- 2) รูปแบบ Cradle to gate (กรณีผลิตภัณฑ์พลาสติก PLA) จะพิจารณาช่วงวัฏจักรชีวิตตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบจนถึงการผลิตเม็ดพลาสติก PLA การผลิตเม็ดพลาสติก PLA และการแปรรูปเม็ดพลาสติก PLA ซึ่งไม่รวมถึงขั้นตอนการจัดการซากผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน

- 3) รูปแบบ Cradle to grave จะพิจารณาช่วงวัฏจักรชีวิตตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การผลิตเม็ดพลาสติก PLA การแปรรูปเม็ดพลาสติก PLA เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติก การใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติก และการจัดการซากผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน ได้แก่ การฝังกลบในหลุมฝังกลบ และการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะควบคุม
- 4) รูปแบบ Cradle to cradle จะพิจารณาช่วงวัฏจักรชีวิตตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การผลิตเม็ดพลาสติก PLA การแปรรูปเม็ดพลาสติก PLA เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติก การใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติก และการจัดการซากผลิตภัณฑ์หลังการใช้งานด้วยการนำกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตผ่านกระบวนการรีไซเคิล

○ การศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตเม็ดพลาสติก PLA ผ่านกรณีศึกษา

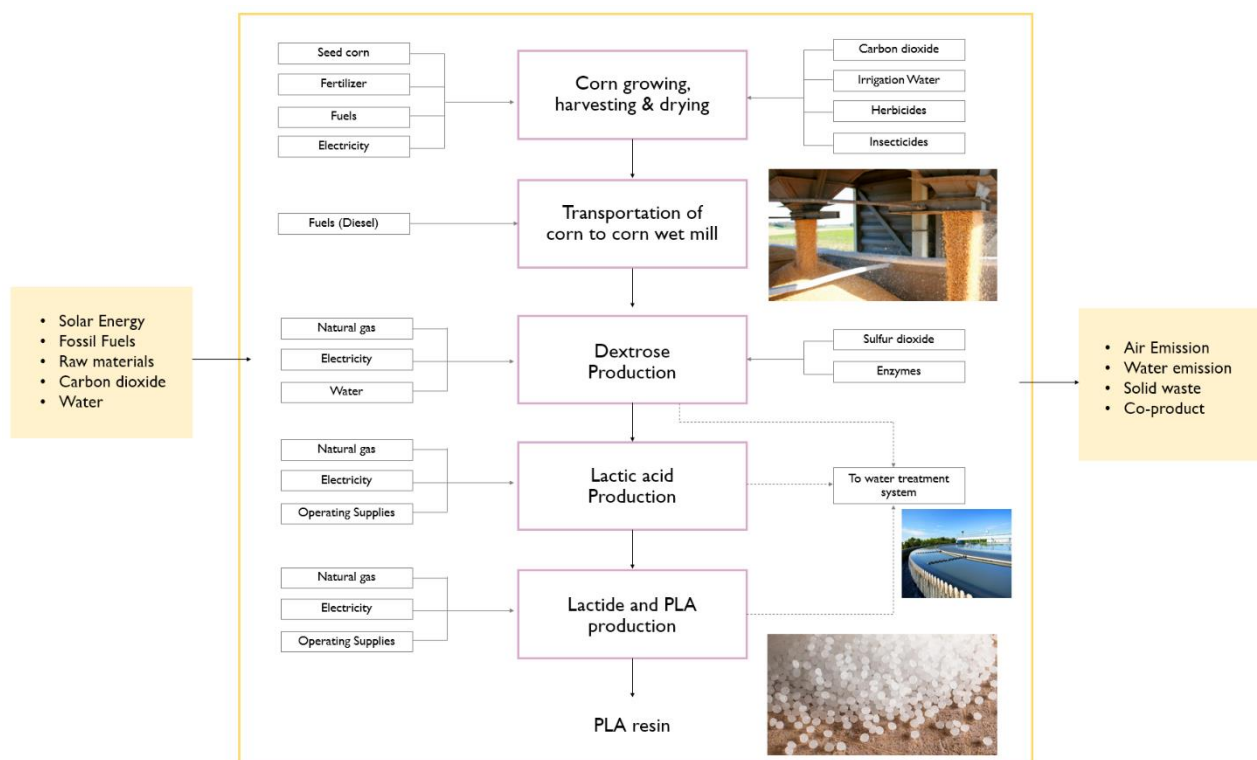
จากกรณีศึกษาภายใต้งานวิจัยเรื่อง Application of Life Cycle Assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production โดย Erwin T.H. Vink และคณะ ซึ่งได้มีการศึกษาวัฏจักรชีวิตของการผลิต PLA ที่ดำเนินการโดย Cargill Dow LLC ซึ่งเป็นบริษัทร่วมทุนระหว่าง Cargill Inc และ Dow Chemical Company ได้มีการศึกษาและวิจัยวัฏจักรชีวิตของการผลิตเม็ดพลาสติก PLA (ในรูปแบบ Cradle to gate) พบว่า วัฏจักรชีวิตจำแนกตามกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ประกอบด้วย 5 ส่วน คือ

- 1) การได้มาซึ่งวัตถุดิบ (ชีวมวล): สำหรับวัตถุดิบสำคัญในการผลิตเม็ด PLA จะเป็นพืชที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ อาทิ ข้าวโพด อ้อย เป็นต้น (ซึ่งในขั้นตอนนี้ จะได้ศึกษากระบวนการผลิต PLA จากข้าวโพด) ซึ่งในกระบวนการเติบโตของพืชดังกล่าว จำเป็นต้องมีแสงสว่าง น้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติตั้งต้น เพื่อช่วยสนับสนุนปฏิกิริยาการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (Photosynthesis) สำหรับการเพาะปลูกพืชในพื้นที่ควบคุมจำเป็นต้องมีระบบลำเลียงน้ำ การใช้ยาปราบศัตรูพืช และระบบไฟฟ้าต่าง ๆ เข้ามาสนับสนุนเพิ่มเติม
- 2) การแปรรูปผลิตผลจากข้าวโพดให้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตเม็ด PLA: หลังจากขั้นตอนการเก็บเกี่ยวข้าวโพดแล้ว จะถูกนำเข้าไปสู่กระบวนการแปรรูปเพื่อคัดแยกแบ่งออกจากส่วนประกอบอื่น ๆ อาทิ โปรตีน ไขมัน เส้นใย ชีวเถ้า และน้ำ ผ่านกระบวนการบดเปียก (Corn Wet Mill) ซึ่งในอดีตมีการใช้เครื่องจักรตีเซลล์ในกระบวนการผลิต แต่ปัจจุบันเริ่มมีการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องจักรเป็นระบบไฟฟ้าทดแทน
- 3) การผลิตเดกซ์โตรส (Dextrose): จากการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ (Enzymatic hydrolysis) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการใช้น้ำ ไฟฟ้า ก๊าซธรรมชาติ และเอนไซม์ เป็นวัตถุดิบสนับสนุนการผลิต สำหรับของเหลวหรือน้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะถูกส่งต่อไปจัดการด้วยระบบบำบัดน้ำเสียกลาง
- 4) การผลิตกรดแลคติก (Lactic acid): ซึ่งมีการใช้ไฟฟ้า น้ำ และก๊าซธรรมชาติ ในส่วนของการหมัก (Fermentation) เพื่อเปลี่ยนเดกซ์โตรสให้เป็นกรดแลคติกด้วยจุลินทรีย์ ซึ่งผลผลิตที่เกิดขึ้นประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กรดแลคติกซึ่งจะถูกส่งกลับไปผลิตแลคไทด์และ PLA ต่อไป ส่วนของเหลวหรือน้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะถูกส่งต่อไปจัดการด้วยระบบบำบัดน้ำเสียกลาง

- 5) การผลิตแลคไทด์และพอลิแลคติกแอซิด (PLA): จะเป็นการนำกรดแลคติกที่เกิดจากกระบวนการหมักเข้ามาทำปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ซึ่งในขั้นตอนนี้ จำเป็นต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้า ระบบสนับสนุนต่าง ๆ เพื่อควบคุมสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยา (Operating supplies condition) โดยจะได้ผลิตภัณฑ์ PLA ออกมาในขั้นตอนสุดท้าย ส่วนของเหลวหรือน้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะถูกส่งต่อไปจัดการด้วยระบบบำบัดน้ำเสียกลาง (Central water treatment system)

สำหรับขั้นตอนการผลิต PLA จากข้าวโพดของ Cargill Down LLC ในรูปแบบ Cradle to Gate โดยภาพรวมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6

รูปที่ 6 แผนภาพการวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตและกระบวนการการผลิต PLA จากข้าวโพด

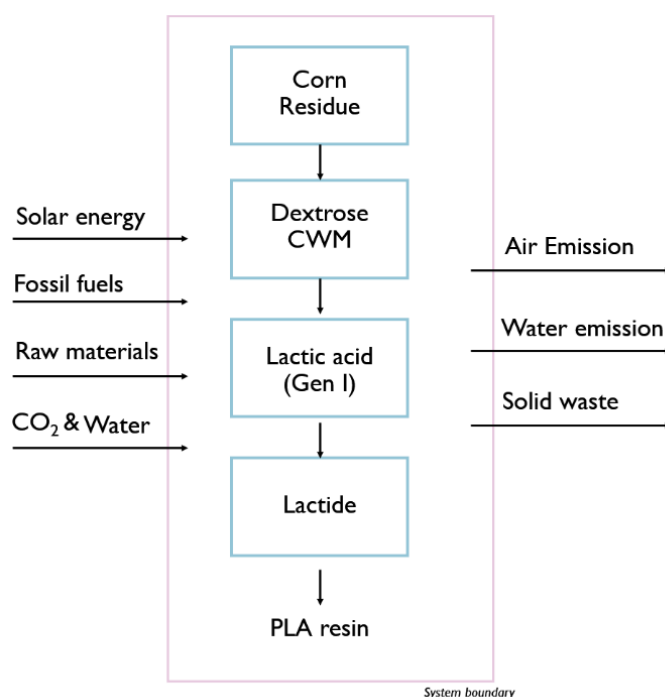


ที่มา: E.T.H Vink et al. (2003), revised graphics by PITH

● การใช้พลังงานในการผลิตเม็ดพลาสติก PLA

ในกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้มาซึ่งเม็ดพลาสติก PLA แบบดั้งเดิม (PLA 1) จากกรณีศึกษาการผลิต PLA ของ Cargill Dow LLC จะเป็นการแปรรูปข้าวโพดเพื่อให้ได้น้ำตาลเดกซ์โตรส ซึ่งจะถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตกรดแลคติก แลคไทด์และพอลิแลคติกแอซิด ตามลำดับ โดยในกระบวนการผลิต พบว่ามีการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ (Solar energy) คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมถึงพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (รูปที่ 7)

รูปที่ 7 แผนภาพการผลิต PLA จากข้าวโพดแบบดั้งเดิม (PLA 1)



ที่มา: E.T.H Vink et al. (2003), revised graphics by PITH

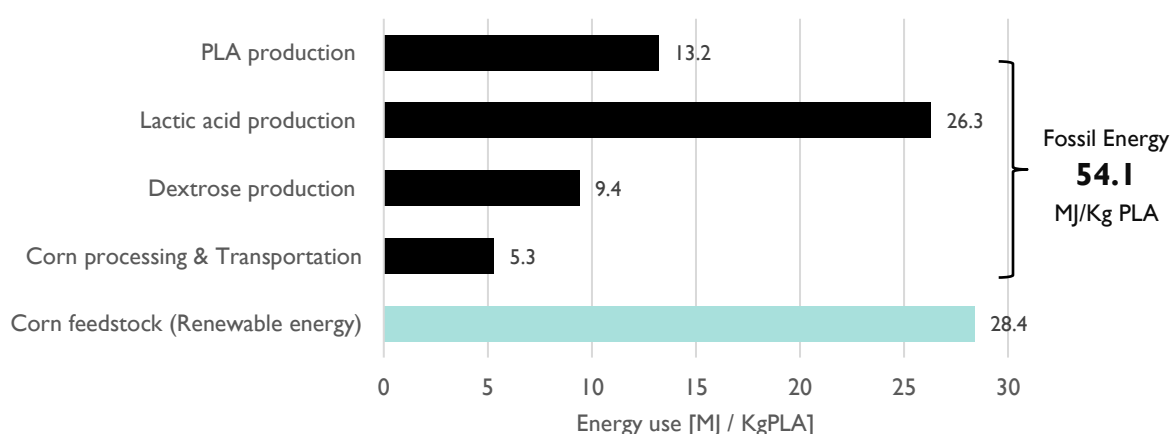
ซึ่งจะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิงฟอสซิลและเป็นปัจจัยสนับสนุนส่วนที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งในกระบวนการผลิต PLA ดังกล่าวมีการใช้พลังงานตั้งแต่ขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Corn feedstock) จนถึงการผลิตเม็ด PLA โดยมีปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิต PLA รวม 82.5 MJ/Kg ซึ่งสามารถจำแนกการใช้พลังงานตามวัฏจักรชีวิตของการผลิต (รูปที่ 8) ได้ดังนี้

- ส่วนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Corn feedstock): ซึ่งในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก PLA ของ Cargill Dow LLC อาศัยพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) คือ พลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยมีค่าพลังงานอยู่ที่ 28.4 MJ ต่อการผลิต PLA ปริมาณ 1 กิโลกรัม (สำหรับการผลิตวัตถุดิบที่ค่าความชื้นร้อยละ 15.5)²⁷

²⁷ นี่เป็นส่วนพลังงานหมุนเวียนและกำหนดโดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ของข้าวโพด (16.3 MJ/kg. ข้าวโพด) ส่วนนี้ได้รับการแก้ไขและสามารถลดลงได้โดยใช้ข้าวโพดน้อยลงเท่านั้น

- ส่วนการแปรรูปวัตถุดิบ (ข้าวโพดดิบ) ให้เป็นแป้งข้าวโพด: ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานฟอสซิล (Gross fossil energy use: GFEU) รวมอยู่ที่ 5.3 MJ ต่อการผลิต PLA 1 กิโลกรัม โดยจำแนกเป็น 3 ส่วน คือ 1) พลังงานในส่วนของการป้อนวัตถุดิบสำหรับการผลิตข้าวโพด ณ ฟาร์มหรือไร่ข้าวโพด อาทิ การไถมาซึ่งปุ๋ยและยาปราบศัตรูพืช ฯลฯ ซึ่งมีปริมาณพลังงานที่ใช้อยู่ที่ 3.8 MJ/Kg 2) พลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงที่ใช้ภายในฟาร์มหรือไร่ข้าวโพด ซึ่งมีปริมาณพลังงานที่ใช้อยู่ที่ 1.1 MJ/Kg 3) พลังงานในการขนส่งข้าวโพดจากไร่เพื่อนำไปแปรรูปยังโรงบดข้าวโพด ซึ่งมีปริมาณพลังงานที่ใช้รวมอยู่ที่ 0.4 MJ/Kg
- ส่วนของการแปรรูปแป้งข้าวโพดเป็นเดกซ์โตรส: ซึ่งมีการใช้พลังงาน (GFEU) รวม 9.4 MJ ต่อการผลิต PLA 1 กิโลกรัม ประกอบด้วย 2 ส่วนย่อย ได้แก่ 1) พลังงานในส่วนของการป้อนวัตถุดิบสำหรับการผลิต (Operating Supply) และการบำบัดน้ำเสีย คิดเป็น 0.6 MJ/Kg และ 2) พลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเดกซ์โตรส คิดเป็น 8.8 MJ/Kg
- ส่วนการผลิตกรดแลคติกจากเดกซ์โตรส: ซึ่งส่วนนี้มีการใช้พลังงานโดยรวมอยู่ที่ 26.3 MJ ต่อการผลิต PLA 1 กิโลกรัม โดยสามารถจำแนกย่อยได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) พลังงานส่วนของการป้อนวัตถุดิบสำหรับการผลิตและการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีการใช้พลังงาน 11.4 MJ/Kg และ 2) พลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตกรดแลคติก คิดเป็น 14.9 MJ/Kg
- ส่วนของการผลิต PLA จากกรดแลคติก: โดยในการแปรรูปกรดแลคติกเป็น PLA จำเป็นต้องใช้พลังงาน อยู่ที่ 13.2 MJ ต่อการผลิต PLA 1 กิโลกรัม โดยสามารถจำแนกย่อยได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) พลังงานส่วนของการป้อนวัตถุดิบสำหรับการผลิตและการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีการใช้พลังงาน 0.4 MJ/Kg และ 2) พลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต PLA คิดเป็น 12.8 MJ/Kg

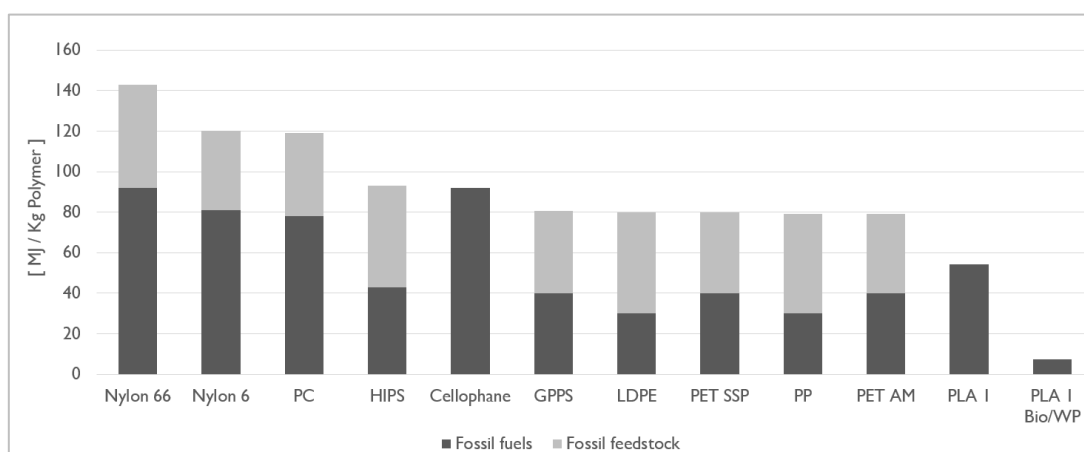
รูปที่ 8 สัดส่วนการใช้พลังงานในวัฏจักรชีวิตของการผลิต PLA (PLA 1) จากข้าวโพด



ที่มา: E.T.H Vink et al. (2003), revised graphics by PITH

ผลการศึกษาข้อมูลการใช้พลังงานในการผลิต PLA ปริมาณ 1 กิโลกรัม ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนที่มีการใช้พลังงานสูงสุด คือ ส่วนของการผลิตกรดแลคติก โดยในขั้นตอนการผลิตกรดแลคติกอาศัยกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาและการควบคุมสภาวะให้เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ขณะที่การได้มาซึ่งวัตถุดิบในการผลิตข้าวโพด (Corn feedstock) แม้ว่าจะมีการใช้พลังงานสูงกว่าพลังงานที่ใช้ในช่วงการผลิตกรดแลคติก แต่พลังงานที่ใช้เป็นพลังงานหมุนเวียนซึ่งไม่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อม

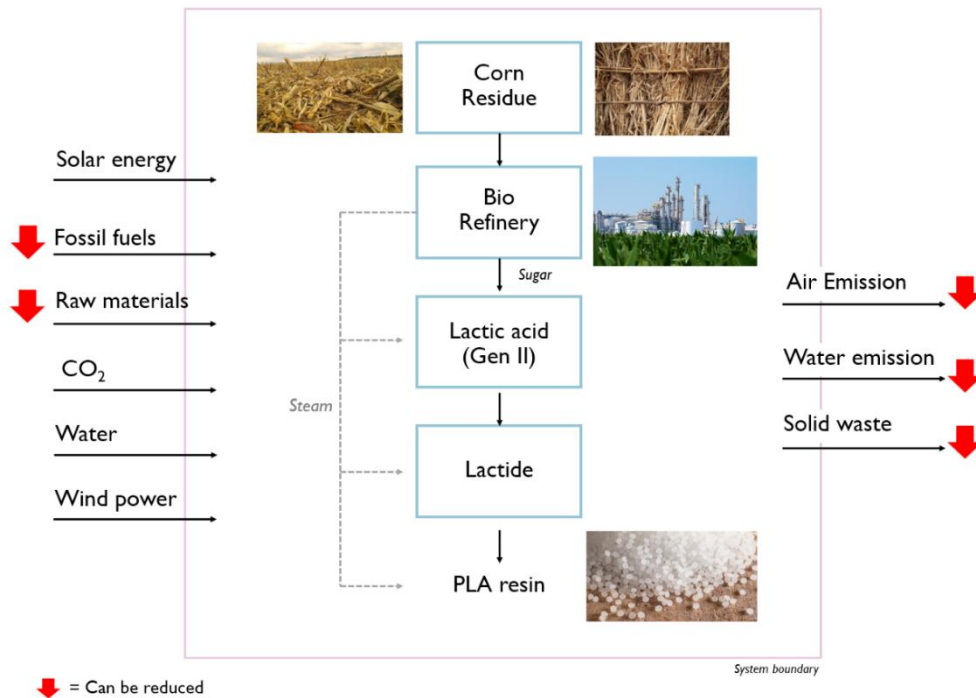
รูปที่ 9 การใช้พลังงานในการผลิตเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียมและการผลิตเม็ด PLA



ที่มา: E.T.H Vink et al. (2003), revised graphics by PITH

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานในการผลิตเม็ด PLA ซึ่งมีปริมาณการใช้พลังงานที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อการผลิต PLA ปริมาณ 1 กิโลกรัม อยู่ที่ 5.41 MJ/Kg (PLA 1) เทียบกับการใช้พลังงานในการผลิตเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียม (Petroleum based) แต่ละประเภท ในปริมาณที่เท่ากัน (รูปที่ 9) จะเห็นได้ว่า การผลิตเม็ดพลาสติก PLA มีการใช้พลังงานในระดับที่ต่ำกว่าการใช้พลังงานในการผลิตเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียม ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่เป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) สำหรับใช้ในกระบวนการผลิต PLA เท่านั้น ในขณะที่การผลิตเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียมอื่น ๆ พบว่า พลังงานที่ใช้มาจาก 2 ส่วน คือ พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์หรือเม็ดพลาสติก และพลังงานจากการได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Feedstock) ซึ่งในภาคการผลิต PLA พลังงานในส่วนนี้จะใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นหลัก ทำให้ PLA มีปริมาณการใช้พลังงานรวมน้อยกว่า

รูปที่ 10 กระบวนการผลิต PLA โดยอาศัยพลังงานลมและชีวมวล (PLA B/WP)



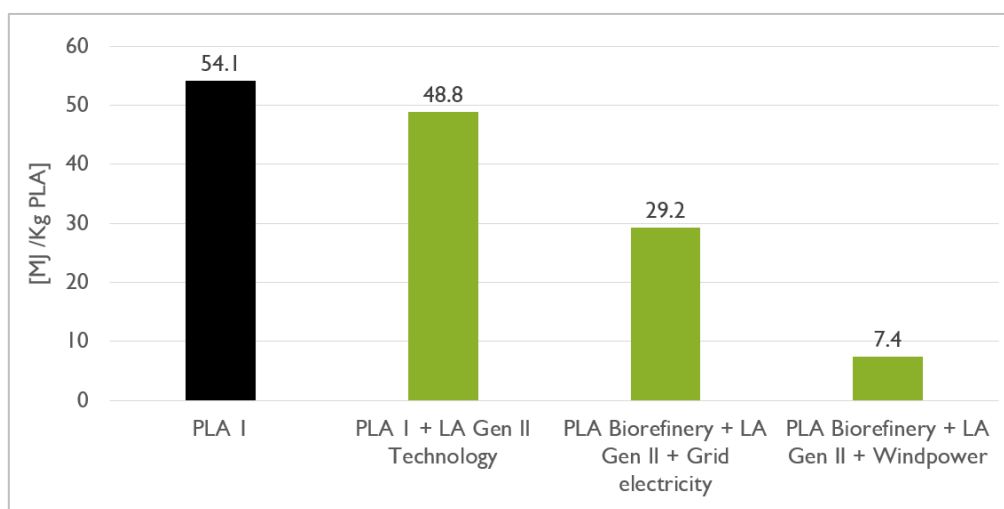
ที่มา: E.T.H Vink et al. (2003), revised graphics by PITH

นอกจากการผลิต PLA จะมีการใช้พลังงานในระดับที่ต่ำกว่าเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียมส่วนใหญ่ดังกล่าวมาแล้ว หากในกระบวนการผลิตเม็ด PLA มีการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีการพึ่งพาพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น ก็สามารถช่วยให้การผลิตสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ลดปริมาณการใช้วัตถุดิบ รวมถึงลดการปล่อยก๊าซและของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต โดยจากกรณีศึกษาการผลิตเม็ด PLA ของ Cargill Dow LLC ได้มีการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพิ่มเติม (รูปที่ 10) ดังนี้

- ประยุกต์ใช้พลังงานลม (Wind power: WP) ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนเพื่อนำไปผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าภายในโรงงานแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล
- ใช้เซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemi-cellulose) ซึ่งได้มาจากเศษหรือวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตร อาทิ เศษลำต้นของพืช ฟาง แกลบ และใบ เป็นชีวมวลตั้งต้นสำหรับแปรรูปเป็นน้ำตาลเพื่อเข้าสู่กระบวนการหมัก
- การนำเศษเหลือที่ประกอบด้วยลิกนิน (Lignin rich) กลับเข้าสู่กระบวนการผลิต โดยนำไปเป็นเชื้อสำหรับการผลิตไอน้ำ

โดยหลังจากที่ได้มีการวิจัยและปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อให้ร้อยละของผลได้ (Optimized yield) ที่เกิดขึ้นมีสัดส่วนสูงสุดแล้ว พบว่า เมื่อวิเคราะห์ระดับการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลของกระบวนการผลิตเม็ด PLA ดังกล่าว (PLA B/WP) มีการพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการผลิตเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียมสูงสุดกว่าร้อยละ 90 (รูปที่ 9)

รูปที่ 11 ระดับพลังงานที่ใช้ในวัฏจักรชีวิต (Gross energy requirement) ต่อการผลิตเม็ด PLA 1 กิโลกรัม ภายใต้สภาวะการผลิตที่แตกต่างกัน



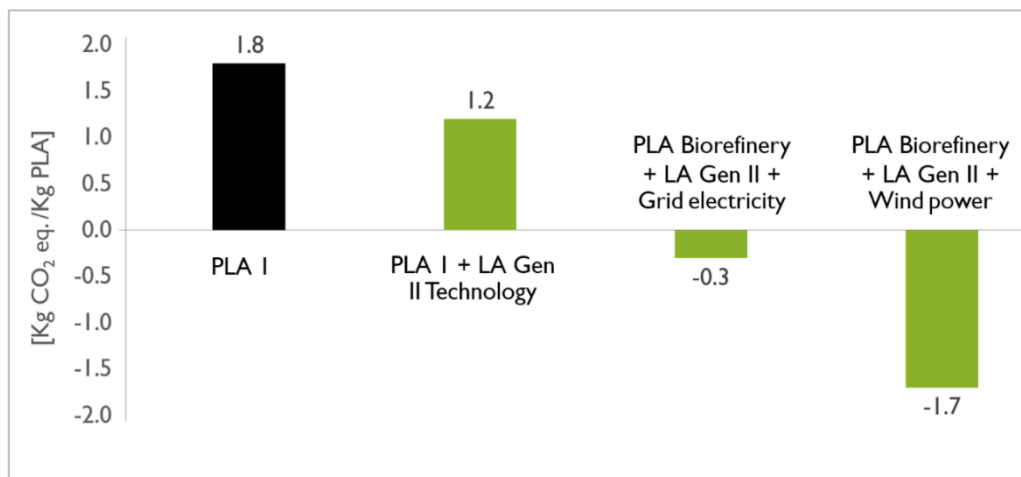
ที่มา: E.T.H Vink et al. (2003), revised graphics by PITH

นอกจากนี้ ผู้ผลิตได้ปรับเปลี่ยนเทคโนโลยีและการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่อจากการผลิตเม็ด PLA แบบดั้งเดิม (PLA 1) ใน 3 รูปแบบเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงาน (**รูปที่ 11**) และปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (**รูปที่ 12**) พบว่า ได้ผลจำแนกตามกรณีดังนี้

- 1) ปรับเปลี่ยนจากการพึ่งพาข้าวโพดเป็นวัตถุดิบและใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในกระบวนการผลิต มาเป็นการใช้เทคโนโลยีการผลิตกรดแลคติกสมัยใหม่ (LA Gen II Technology) ที่สามารถลดการใช้ปัจจัยสนับสนุนการผลิต ลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น ปรับสมดุลของระบบไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตให้สอดคล้องกับปริมาณวัตถุดิบ (น้ำตาล) และความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กรณี PLA 1 + LA Gen II Technology) ซึ่งผลการปรับเปลี่ยนการผลิตดังกล่าว ส่งผลให้สามารถลดการใช้พลังงานฟอสซิลลงได้ 5.3 MJ/Kg PLA และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 0.6 Kg CO₂ eq./Kg PLA
- 2) ปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตน้ำตาลและไอน้ำด้วยกระบวนการ Biorefinery รวมถึงการใช้เทคโนโลยีการผลิตกรดแลคติกสมัยใหม่ (LA Gen II Technology) และใช้พลังงานไฟฟ้าผ่านระบบโครงข่ายไฟฟ้าสาธารณะ (PLA Biorefinery + LA Gen II + Grid electricity) พบว่า สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานฟอสซิลจากกรณีแรก 19.6 MJ/Kg PLA และหากเทียบกับการผลิตเม็ด PLA แบบดั้งเดิม (PLA 1) พบว่า สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานฟอสซิลลงได้ 24.9 MJ/Kg PLA และมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงกว่า 2.1 Kg CO₂ eq./Kg PLA
- 3) ปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตต่อจากกรณีที่สอง โดยเปลี่ยนการใช้พลังงานไฟฟ้ามาเป็นการใช้พลังงานลม (Wind power) ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนจากธรรมชาติ (PLA Biorefinery + LA Gen II + Wind power) พบว่า สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานฟอสซิลลงได้เพิ่มจากกรณีที่สอง 21.8 MJ/Kg PLA

และหากเทียบกับการผลิตเม็ด PLA แบบดั้งเดิม (PLA 1) พบว่า สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานลงได้ 46.7 MJ/Kg PLA และมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดลงสูงถึง 3.5 Kg CO₂ eq./Kg PLA

รูปที่ 12 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตเม็ด PLA
ภายใต้สภาวะการผลิตที่แตกต่างกัน

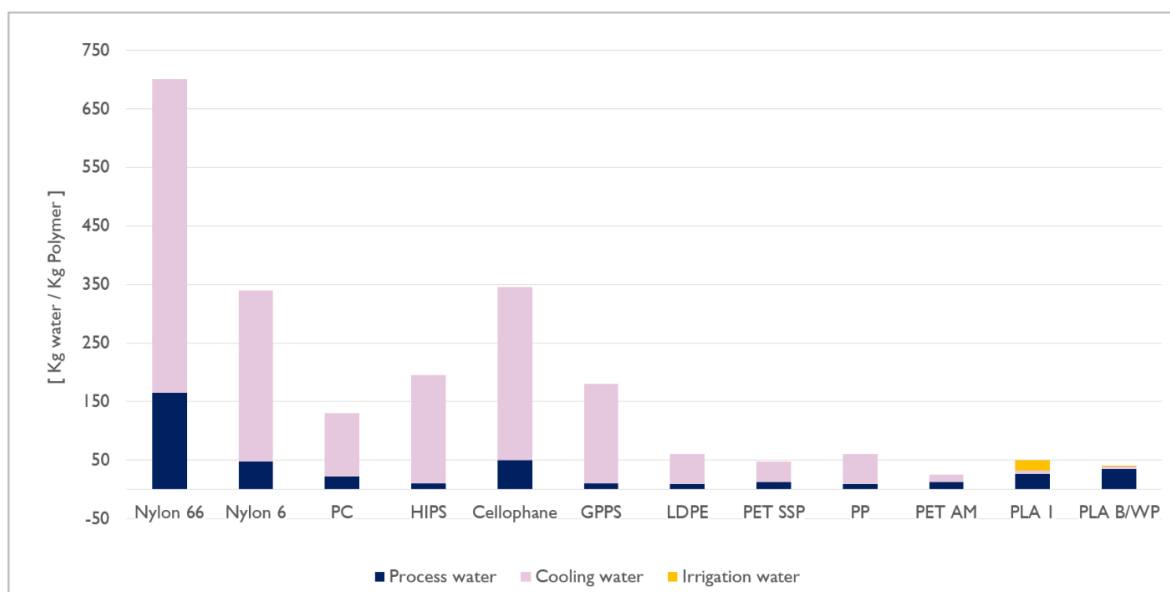


ที่มา: E.T.H Vink et al. (2003), revised graphics by PITH

- **การใช้น้ำในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก PLA**

สำหรับการผลิตเม็ดพลาสติก PLA รวมถึงเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียมทั่วไปมีการใช้น้ำในกระบวนการผลิต 2 รูปแบบหลัก ๆ คือ 1) น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตทั่วไป (Process water) และ 2) น้ำสำหรับป้อนเข้าสู่ระบบหล่อเย็น (Colling Water) แต่สำหรับการผลิตเม็ด PLA ซึ่งจำเป็นต้องใช้น้ำในช่วงวัฏจักรชีวิตของการเพาะปลูกพืช ซึ่งมีการพึ่งพาน้ำจากระบบชลประทาน (Irrigation water) ซึ่งจะมีการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตเพิ่มเติมที่แตกต่างจากเม็ดพลาสติกปิโตรเลียมทั่วไป ซึ่งปริมาณน้ำที่ใช้ทั้งในกระบวนการผลิตและการเพาะปลูกจะถูกนำมาพิจารณาคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตด้วย

รูปที่ 13 ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกปิโตรเลียมและ PLA



ที่มา: E.T.H Vink et al. (2003), revised graphics by PITH

จากผลการวิจัยปริมาณการใช้น้ำ (ต่อการผลิตพอลิเมอร์ 1 กิโลกรัม) จำแนกตามวัตถุประสงค์ของการผลิตเม็ด PLA แบบดั้งเดิม (PLA 1) การผลิตเม็ด PLA ที่มีการปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตโดยพึ่งพาวัตถุดิบเหลือใช้จากภาคการเกษตร (PLA B/WP) และการผลิตเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียมประเภทต่าง ๆ (รูปที่ 13) พบว่า การผลิตเม็ดพลาสติก PLA ทั้ง 2 รูปแบบ มีปริมาณการใช้น้ำที่น้อยกว่าปริมาณการใช้น้ำในการผลิตเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียมโดยส่วนใหญ่ ซึ่งเมื่อพิจารณาสัดส่วนการใช้น้ำในการผลิตเม็ด PLA โดยทั่วไป (PLA 1) จะเห็นได้ว่า มีการใช้น้ำ 2 ส่วนสำคัญ คือ ใช้ในช่วงระยะเวลาการเพาะปลูกอ้อย และการใช้น้ำในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก PLA ขณะที่การผลิต PLA โดยอาศัยวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตรเป็นชีวมวล (PLA B/WP) พบว่า สามารถช่วยให้สัดส่วนการใช้น้ำในการเพาะปลูกลดลง ส่งผลให้ภาพรวมการใช้น้ำต่อหนึ่งกิโลกรัมพอลิเมอร์น้อยกว่าการผลิตเม็ดพลาสติก PLA แบบทั่วไป ส่วนการผลิตเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียม แม้ว่าจะมีการใช้น้ำในช่วงของการเพาะปลูกเนื่องจากพึ่งพาวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งพบว่า ปริมาณการใช้น้ำเทียบกับหนึ่งหน่วยพอลิเมอร์มีปริมาณสูงกว่าการผลิตเม็ด PLA โดยเป็นการใช้น้ำในระบบหล่อเย็นเป็นหลัก

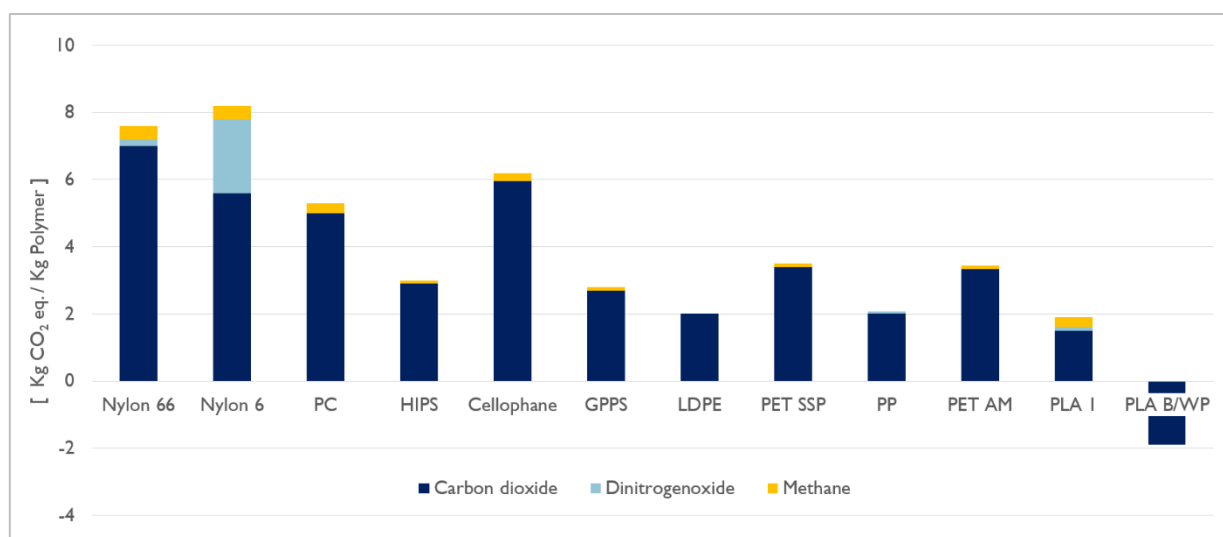
● การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตเม็ด PLA

จากกรณีศึกษาและวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ ซึ่งครอบคลุมขั้นตอนของการเพาะปลูกจนถึงการเก็บเกี่ยว รวมถึงการใช้ปัจจัยสนับสนุนการเพาะปลูกที่เกี่ยวข้อง การนำวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการแปรรูปผ่านการบวนการทางชีวภาพ (Bioprocess & Biorefinery) กระบวนการทางเคมี (Chemical reaction) ต่าง ๆ ซึ่งได้มีการวิเคราะห์การใช้พลังงาน ทั้งในรูปแบบพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานไฟฟ้าและพลังงานหมุนเวียน ปริมาณการใช้น้ำในการผลิต การใช้สารเคมีในการผลิต ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก รวมถึงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจาก

กระบวนการผลิต ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้น โดยสามารถก๊าซเรือนกระจกที่มี การปล่อยจากอุตสาหกรรมการผลิตเม็ดพลาสติกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่

- คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานไฟฟ้าสำหรับ เครื่องจักรและระบบจัดการน้ำเสีย (Water treatment system)
- มีเทน (CH_4) จากการย่อยสลายของวัสดุชีวภาพ (Biological Material) รวมถึงกระบวนการทางด้าน อุตสาหกรรมเคมี (Chemical/industrial process)
- ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) เกิดจากกระบวนการผลิตพลาสติกที่มีการใช้กรดไนตริก (Nitric acid) รวมถึง การใช้ปุ๋ยไนเตรตสำหรับการเพาะปลูก

รูปที่ 14 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนตรัสออกไซด์ และมีเทนจากการผลิตเม็ดพลาสติก ปีโตรเลียมและเม็ด PLA



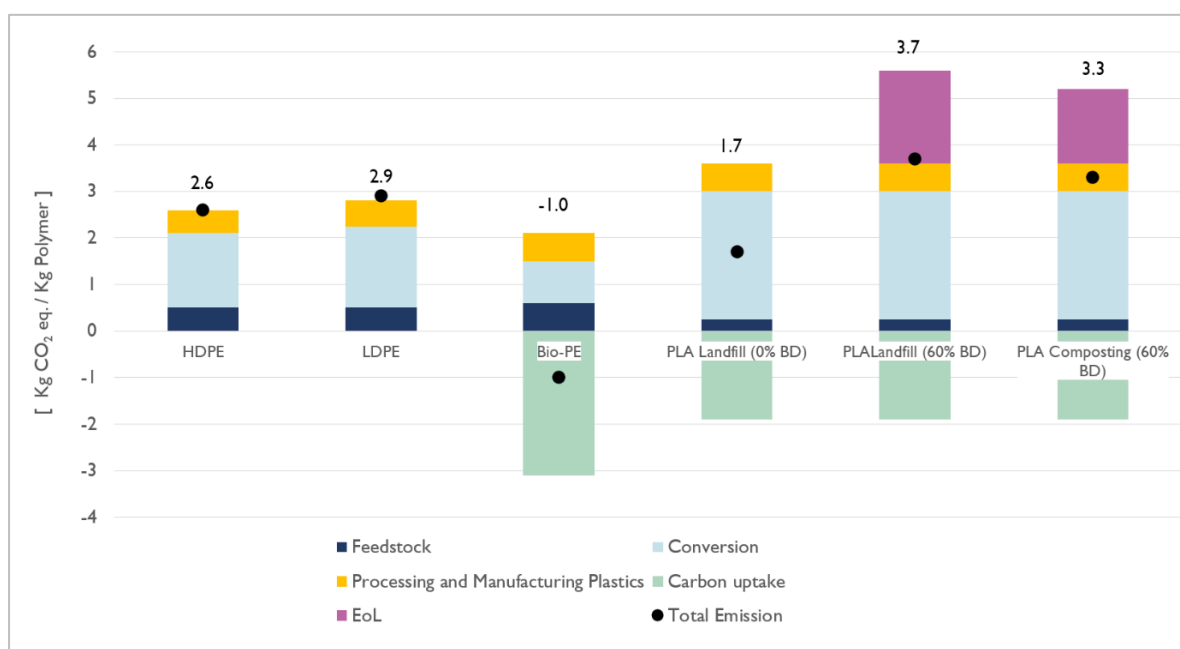
ที่มา: E.T.H Vink et al. (2003), revised graphics by PITH

ผลการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้ง 3 ชนิด เทียบกับการผลิตเม็ดพลาสติกปริมาณ 1 กิโลกรัม ผ่านกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกของกรณีศึกษา (**รูปที่ 14**) สามารถวิเคราะห์และสรุปปริมาณ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้ง 3 ชนิดของการผลิตเม็ดพลาสติก PLA และเม็ดพลาสติกปีโตรเคมี ได้ดังนี้

- การผลิตเม็ดพลาสติกปีโตรเคมีโดยทั่วไป ตั้งแต่กระบวนการได้ซึ่งน้ำมันดิบ (Crude oil) จาก อุตสาหกรรมปีโตรเคมี การกลั่นน้ำมันดิบ (Refinery) เพื่อให้ได้วัตถุดิบตั้งต้น (Monomer feedstock) การสังเคราะห์และผลิตพอลิเมอร์ในอุตสาหกรรมปีโตรเคมี การใช้สารเคมีใน กระบวนการผลิต ตลอดจนขนส่งวัตถุดิบต่าง ๆ จำเป็นต้องอาศัยพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลและ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ตลอดช่วงวัฏจักรชีวิตในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบจนถึงการ ผลิตเม็ดพลาสติกขั้นสุดท้าย

- การผลิตเม็ดพลาสติก PLA แบบดั้งเดิม (PLA 1) มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับต่ำกว่าการผลิตเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียมโดยเฉลี่ย ซึ่งจะเห็นว่า ก๊าซเรือนกระจกที่มีการผลิตปล่อยจากวัฏจักรชีวิตของการผลิต PLA มาจาก 2 ส่วนหลัก ๆ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อผลิตพลังงาน (Fossil energy) และมีเทน ซึ่งส่วนหนึ่งเกิดจากการเพาะปลูกอ้อยเพื่อเป็นวัตถุดิบการผลิตและกระบวนการผลิต
- การผลิต PLA (PLA B/WP) โดยอาศัยของส่วนที่เหลือจากภาคการเกษตร มีการพึ่งพาพลังงานลม ซึ่งเป็นหมุนเวียนในการผลิต รวมถึงการนำเศษเหลือจากกระบวนการผลิต (Lignin fraction) กลับมาเป็นวัตถุดิบ (Lignocellulosic feedstock) เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้การผลิต PLA เป็นรูปแบบดังกล่าวเป็นลักษณะ “Close the loop” ส่งผลให้มีปริมาณของเสีย (Residue) จากการผลิตน้อยกว่าการผลิต PLA รูปแบบดั้งเดิม (PLA 1) และด้วยปริมาณการใช้ทรัพยากร ทั้งเชื้อเพลิงฟอสซิลและน้ำในปริมาณที่น้อยกว่า รวมถึงการใช้วัตถุดิบที่เหลือจากภาคการเกษตรแทนการใช้วัตถุดิบการเกษตรโดยตรง นอกจากนี้ พืชที่เพาะปลูกเพื่อนำเศษเหลือมาใช้เป็นวัตถุดิบยังสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการกระบวนการผลิตไปใช้ในการสร้างผลผลิตใหม่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้สามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้เพิ่มขึ้น

รูปที่ 15 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิของ PLA ตามรูปแบบการจัดการหลังการใช้งานเทียบกับพลาสติกจากปิโตรเลียมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE)



ที่มา: Erfan Rezvani Ghomi et al. (2021), revised graphics by PITH

นอกจากนี้ ผลการวิจัยปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดช่วงวัฏจักรชีวิตของการผลิต PLA ในรูปแบบ Cradle to Grave²⁸ (รูปที่ 15) ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ จนถึงการจัดการหลังการใช้งาน เมื่อเทียบกับเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียม อาทิ HDPE LDPE และเม็ดพลาสติกชีวภาพ Bio-PE ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม Bio-based polymer โดยพบประเด็นข้อสังเกตจากการวิจัยข้างต้น ดังนี้

- ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิต่อน้ำหนักของพลาสติกของพลาสติก PLA มีค่าสูงกว่า HDPE LDPE และ Bio-PE ซึ่งเป็นผลมาจากการปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกมาในช่วงของการย่อยสลายหลังการใช้งาน ในขณะที่พลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมีไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงไม่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงวัฏจักรชีวิตดังกล่าว
- สำหรับการได้มาซึ่งวัตถุดิบในการผลิตเม็ดพลาสติก PLA และ Bio-PE มีที่มาจากภาคการเกษตร ซึ่งพืชมีส่วนสำคัญในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศ (Carbon uptake) ซึ่งทำให้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิลดลง
- สำหรับกลุ่ม Bio-PE มีที่มาของวัตถุดิบจากการเพาะปลูกพืชในภาคการเกษตรซึ่งสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศได้ ในขณะเดียวกัน คุณสมบัติของ Bio-PE ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงไม่เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงการจัดการหลังการใช้งาน ส่งผลทำให้การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิมีค่าต่ำกว่า PLA HDPE และ LDPE ตามลำดับ

จากการศึกษาและวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของพลาสติก PLA จากกรณีศึกษาข้างต้น แสดงให้เห็นว่า การผลิต PLA มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลในภาคการผลิตและการแปรรูปผลิตภัณฑ์ปลายทาง รวมถึงการจัดการหลังการใช้งานในรูปแบบของการย่อยสลาย ซึ่งจากกรณีศึกษาดังกล่าว สามารถวิเคราะห์และสรุปแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดช่วงวัฏจักรชีวิตของ PLA ได้ 4 แนวทางดังนี้

- 1) การปรับเปลี่ยนการพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) หรือพลังงานทางเลือก (Alternative green energy) เช่น พลังงานลม พลังงานจากแสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับใช้ในภาคการผลิตได้
- 2) การใช้วัตถุดิบทางเลือก (Alternative raw materials) เช่น การนำของเหลือจากภาคการเกษตรกลับมาแปรรูปเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิต เช่น เศษลำต้นของพืช ฟาง แกลบ ใบ ฯลฯ ซึ่งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ (Cellulosic materials) สามารถนำมาผลิตเป็นน้ำตาลเดกซ์โตรส (Dextrose) ต่อไปได้ เป็นต้น
- 3) การปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตให้สามารถลดของเสียที่เกิดขึ้น หรือสามารถนำของเสียและผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (By product) กลับเข้าสู่กระบวนการผลิตในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การนำน้ำ

²⁸ Erfan Rezvani Ghomi et al. The Life Cycle Assessment for Polylactic Acid (PLA) to Make It a Low-Carbon Material. *Polymers* (2021), 13, 1854.

เสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเข้าสู่ระบบการบำบัด (Treatment system) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ หรือการนำชีวมวลที่เหลือมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อน เป็นต้น

- 4) การนำผลิตภัณฑ์ปลายทางกลับเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการย่อยสลายหลังการใช้งาน

ปัจจุบันภาครัฐของไทยได้ให้ความสำคัญกับการส่งเสริมด้านการตลาดและการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biocompostable plastics) ตามมาตรฐาน มอก. 17088 ผ่านมาตรการกระตุ้นอุปสงค์ (Green Tax Expense) เพื่อผลักดันให้เกิดการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพในภาคการแปรรูปผลิตภัณฑ์รักษาสีสิ่งแวดล้อม อันจะนำไปสู่การจัดการปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน แต่อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของพลาสติกชีวภาพ รวมถึงปัจจัยด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้อง จะพบว่า การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพบางชนิดจำเป็นต้องดำเนินการภายใต้สภาวะควบคุม เพื่อให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งภาครัฐ ควรพิจารณาส่งเสริมการจัดการที่ปลายทางให้สอดคล้องกับปริมาณขยะพลาสติกที่ชีวภาพที่จะเกิดขึ้นในอนาคตจากการผลักดันมาตรการของภาครัฐ อาทิ โครงสร้างพื้นฐานเพื่อรองรับการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพหลังการใช้งานให้สอดคล้องกับปริมาณการผลิตหรือการใช้งาน เป็นต้น

5.2 การศึกษาการศึกษาวัฏจักรชีวิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตกรดซิตริก (Citric Acid)

กรดซิตริกเป็นกรดอินทรีย์ (Organic acid) เป็นกรดอ่อน (Weak acid) ใช้ประโยชน์เพื่อการถนอมอาหารโดยมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มรสชาติให้กับอาหารให้มีรสเปรี้ยว และมีกลิ่นหอมชวนรับประทาน ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่ามีความปลอดภัยในการบริโภค สามารถเติมลงไปในการอาหารโดยไม่เกิดอันตราย และสามารถย่อยสลายได้ง่ายและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม กรดซิตริกพบได้ตามธรรมชาติโดยทั่วไปในผักและผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว โดยเฉพาะพืชตระกูลมะนาว ส้ม และส้ม ซึ่งมีสัดส่วนกรดซิตริกเป็นองค์ประกอบสูง ในระยะแรกๆ การผลิตกรดซิตริกทำโดยคั้นมะนาวโดยตรงเพื่อให้ได้น้ำมะนาว ซึ่งจะมีส่วนประกอบของกรดซิตริกประมาณร้อยละ 7-9 แต่ในปัจจุบันมีโรงงานผลิตกรดซิตริกที่นิยมผลิตด้วยวิธีการสังเคราะห์กรดซิตริกจากน้ำตาลกลูโคสผ่านวิถีไกลโคไลซิส (Glycolysis Pathway) ได้เป็นสารออกซาโลอะซิเตต (Oxaloacetate) แล้วสะสมเป็นกรดซิตริกโดยจุลินทรีย์ที่นิยมใช้ในการผลิตแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เชื้อรา *Aspergillus Niger* และ ยีสต์ *Candida Lipolytica*

ปัจจุบันการผลิตกรดซิตริกนิยมผลิตในรูปของผลึกมอนอไฮเดรต (Monohydrate) มีสูตรเคมี คือ $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ ชื่อทางเคมี คือ 2-hydroxy 2, 3-propanetricarboxylic acid โดยผลึกของกรดซิตริกจะมีน้ำประกอบอยู่ 1 โมเลกุล มีสีใส ไม่มีกลิ่น มีรสเปรี้ยว มีความสามารถละลายในน้ำเย็น (133 g/ml) มากกว่าการละลายในน้ำร้อน โดยปัจจุบันการผลิตกรดซิตริกของโลกส่วนใหญ่ร้อยละ 99 นิยมใช้วิธีแบบหมัก เนื่องจากปลอดภัยกว่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าวิธีการสังเคราะห์ โดยการผลิตกรดซิตริกสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) การเตรียมการหมัก 2) การหมักเพื่อให้เป็นน้ำหมัก และ 3) การทำให้บริสุทธิ์

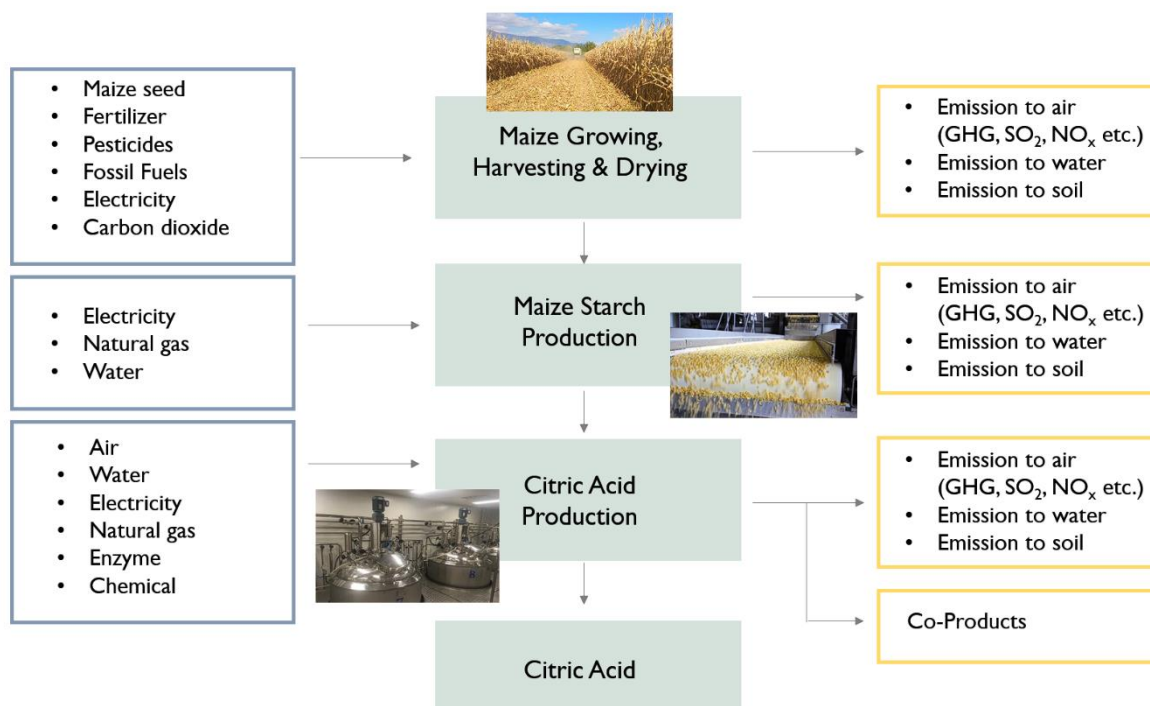
กรดซิตริกถูกนำมาใช้ในอาหาร ยา เครื่องดื่ม และการเกษตร และเป็นสารเคมีที่มีมูลค่าเพิ่มสูงที่สามารถผลิตได้จากชีวมวล การผลิตกรดซิตริกส่วนใหญ่ ร้อยละ 70 ใช้เป็นสารเพิ่มรสชาติในอาหารและเครื่องดื่ม และส่วนที่เหลือใช้ในบัพเฟอร์ เช่น เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และโลหะเชิงซ้อน การผลิตกรดซิตริกทั่วโลกเพิ่มขึ้นเป็น 2 ล้านตันในปี 2558 (Ding et al., 2018) โดยมีความต้องการใช้เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อปีร้อยละ 3.5 – 4.0 (Dhillon et al., 2011) ซึ่งปัจจุบันมีประเทศที่มีการผลิตและบริโภคกรดซิตริกที่สำคัญของโลก ได้แก่ จีน ยุโรปตะวันตก และสหรัฐอเมริกา (Berovic and Legisa, 2007) โดย จีน มีสัดส่วนการผลิตสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 70 ของการผลิตกรดซิตริกทั่วโลก

โรงงานผลิตกรดซิตริกส่วนใหญ่ในประเทศจีนใช้การหมักแบบแช่จมกับเชื้อรา *Aspergillus Niger* ซึ่งเติบโตบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีน้ำตาลกลูโคส โดยข้าวโพดเป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่พบมากที่สุดสำหรับการผลิตกรดซิตริก ด้วยวัฏจักรกรดไตรคาร์บอกซิลิก (Tricarboxylic acid Cycle Partway) ซึ่งแป้งข้าวโพดจะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม (C6) จากนั้นหมักโดยใช้เชื้อรา *Aspergillus Niger* เพื่อผลิตกรดซิตริก จะได้น้ำหมักที่มีกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 60 จากนั้น นำน้ำหมักดังกล่าวมาทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งมีหลายวิธี อาทิ การตกตะกอนด้วยแคลเซียม การสกัดด้วยตัวทำละลาย การแลกเปลี่ยนไอออน การแยกด้วยเยื่อผ่านเหลว (Liquid Membranes) การแยกสารด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrodialysis) สำหรับโรงงานผลิตกรดซิตริกในประเทศจีน นิยมใช้วิธีการตกตะกอนด้วยไตรแคลเซียมซิเตรตที่ไม่ละลายน้ำ โดยการเติมปูนขาวในปริมาณที่เท่ากันลงในสารละลายกรดซิตริก การตกตะกอนแคลเซียมเป็นวิธีการที่พบได้มากที่สุดในการนำกรดซิตริกกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากใช้ได้กับทุกกระบวนการ แต่มีข้อเสียตรงที่การกำจัดโมเชลล์ออกจากเชื้อราน้ำหมัก และสารแขวนลอยโดยการกรอง นอกจากวิธีการตกตะกอนด้วยแคลเซียมแล้ว การสกัดด้วยตัวทำละลายและการแลกเปลี่ยนไอออนก็มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

● การวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของการผลิตกรดซิตริก

วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นวิธีการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมเชิงปริมาณโดยพิจารณาผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ สำหรับการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตกรดซิตริกเป็นประเด็นที่มีการศึกษาไม่มากนัก ตัวอย่างเช่น Nica and Woinaroschy (2010) ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตกรดซิตริกเชิงอุตสาหกรรมที่ผลิตจากหางนม ในการศึกษาของ De Beer (2011) วิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตกรดซิตริกด้วยแหล่งคาร์บอนที่แตกต่างกัน Pacrez et al. (2015) ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตกรดซิตริกจากกลูโคสซึ่งใช้เป็นแหล่งคาร์บอนโดยใช้เชื้อรา *Aspergillus Niger* เป็นจุลินทรีย์ ซึ่งการศึกษาทั้งสามเรื่องไม่ได้มุ่งเน้นไปที่การประเมินอิทธิพลของวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่ต่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตกรดซิตริก

รูปที่ 16 วัฏจักรชีวิตของการผลิตกรดซิตริกจากข้าวโพด



จากการศึกษาและวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของการผลิตกรดซิตริกจากแป้งข้าวโพด (รูปที่ 16) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

- 1) การได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Raw Material Phase) เป็นช่วงของการเพาะปลูกพืชที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตกรดซิตริก (Citric Acid: CA) โดยการเพาะปลูกจะมีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) มีการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon uptake) จากบรรยากาศเพื่อเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์แสงของพืช มีการใช้ปุ๋ย สารเคมีกำจัดศัตรูพืช เชื้อเพลิงและพลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนดูแลรักษา เก็บเกี่ยว อบแห้ง และกะเทาะเมล็ด จะได้เมล็ดข้าวโพดแห้ง
- 2) การผลิตแป้งข้าวโพด (Maize Starch Production) ทำการการแช่เมล็ดข้าวโพดในถังขนาดใหญ่ด้วยน้ำอุ่นที่มีกรดและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หลังจากนั้น ทำการบดเปียกในน้ำ ทำการกรองแยกกาก จากนั้น ทำการหมุนเหวี่ยงแป้งในสารแขวนลอยจะแยกออกจากโปรตีน อบแห้ง จะได้แป้งข้าวโพด โดยกระบวนการผลิตแป้งข้าวโพดจะมีการใช้ไฟฟ้า ไอน้ำจากก๊าซธรรมชาติ สารเคมี และน้ำ
- 3) การผลิตกรดซิตริก (Citric acid production) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนสำคัญ ได้แก่
 - การปรับสภาพวัตถุดิบ จะใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเพื่อไฮโดรไลซ์แป้งเป็นกลูโคส จากนั้น นำมาผ่านการกรองเพื่อแยกกากออก และเติมน้ำในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก จะได้กลูโคสเหลว
 - การเตรียมสปอร์ (Spore preparation) เป็นขั้นตอนการเพาะเลี้ยงเชื้อโดยใช้เชื้อรา *Aspergillus Niger* ข้าวโพดเหลวและยูเรีย

- **การหมัก (Fermentation)** เป็นขั้นตอนการนำข้าวโพดเหลวจากกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบมาหมักร่วมกับอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมไว้ โดยหมักที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง และทำการเติมอากาศในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ (Bioreactor) ระหว่างการหมัก จะได้น้ำหมักที่มีองค์ประกอบของกรดซิตริก
- **การทำให้บริสุทธิ์ (Purification)** โดยนำน้ำหมักมาตกตะกอนด้วยแคลเซียม จากนั้นใช้กรดกำมะถันสกัดกรดซิตริกออกจากผลึกเกลือ นำสารละลายกรดซิตริกไปลดสี ระเหยน้ำ และตกผลึก จะได้กรดซิตริกชนิดโมโนไฮเดรต โดยกระบวนการผลิตจะมีการใช้พลังงานไฟฟ้า ไอน้ำ สารเคมีต่าง ๆ อากาศ และน้ำ และมีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการหมัก ปล่อยมลสารทางอากาศ น้ำเสีย และของเสียจากกระบวนการผลิต

โดยนอกจากข้าวโพดดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในกระบวนการผลิตกรดซิตริกในปัจจุบันนั้น ได้มีการนำชีวมวล (Biomass) ซึ่งมีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ เช่น กากน้ำตาล (Molasses) และมันสำปะหลัง

○ การผลิตกรดซิตริกจากกากน้ำตาล

การผลิตกรดซิตริกจากกากน้ำตาลด้วยการหมักด้วยเชื้อรา *Aspergillus Niger* แบบแช่จม (Submerged Fermentation) เริ่มต้น โดยปรับกากน้ำตาลไปที่ความเข้มข้นน้ำตาล ประมาณร้อยละ 15 หรือที่ 20 Brix และเติมสารอาหาร Ammonium Nitrate 2-2.5 g/L, Monopotassium Phosphate 0.3-1.0 g/L, Magnesium Sulphate 0.2-0.25 g/L เติมโลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) และ แมงกานีส (Mn) เล็กน้อยที่ระดับ 0.01 g/L ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ (Sterilization) ปรับสภาวะกรดต่างที่ค่า pH ประมาณ 6 เติมเชื้อ *Aspergillus Niger* ML 516 ที่ผ่านการเลี้ยงเชื้อประมาณร้อยละ 2 ต่อน้ำหนัก และใช้อุณหภูมิการหมักประมาณ 28-30 องศาเซลเซียส เติมอากาศและกวนด้วยใบกวนประมาณ 8 วัน จะได้น้ำหมักที่มีกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 60 นำน้ำหมักมาตกตะกอนด้วยปูนขาว ในรูปเกลือ ใช้กรดกำมะถันละลายกรดซิตริกออกจากผลึกเกลือ นำไปกรองแยกยิปซัม (Calcium Sulphate) ออกไป นำของเหลวที่ได้ผ่านการลดสีด้วยถ่าน (Active Carbon) จากนั้นนำมาต้มและเคี่ยวตกผลึก อบแห้ง แล้วนำไปบรรจุเพื่อจำหน่ายต่อไป ในรูปผลึกโมโนไฮเดรต (Monohydrate)

○ การผลิตกรดซิตริกจากมันสำปะหลัง

ขั้นตอนการผลิตกรดซิตริกจากมันสำปะหลัง เริ่มจากการนำมันสำปะหลังมาบด ย่อยให้เป็นผง และนำไปหมักในถังหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์ *Aspergillus Niger* ที่มีประสิทธิภาพสูงใน การเปลี่ยนแปลงให้เป็นกรดซิตริก โดยจะควบคุมอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง และการเติมออกซิเจน พร้อมทั้งมีการกวนผสมภายในถังเพื่อให้จุลินทรีย์ทำงานให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จากนั้น นำไปผ่านการกรองเพื่อนำกากมันออก ตกผลึกด้วยปูนขาว ใช้ถ่านกับกรดกำมะถันละลายกรดซิตริกออกจากผลึกเกลือ ก่อนนำไปกรองแยกยิปซัมออกไป นำของเหลวที่ได้มาตกผลึก อบแห้ง แล้วนำไปบรรจุเพื่อจำหน่ายต่อไป

● การศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตกรดซิตริกผ่านกรณีศึกษา

จากกรณีศึกษาภายใต้งานวิจัยเรื่อง Techno-economic analysis and environmental impact assessment of citric acid production through different recovery methods โดย Wang และคณะ (2020) ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตกรดซิตริกโดยเปรียบเทียบกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ 3 วิธี ได้แก่ 1) การสกัดด้วยตัวทำละลาย 2) การแลกเปลี่ยนไอออน และ 3) การตกตะกอนด้วยแคลเซียม เพื่อหาทางเลือกที่เหมาะสมในการผลิตกรดซิตริกทั้งด้านการใช้พลังงานในกระบวนการและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะช่วยระบุประเด็นปัญหาสำคัญและแนวทางการปรับปรุงศักยภาพในการพัฒนาที่ยั่งยืนของอุตสาหกรรมการผลิตกรดซิตริก

○ ขอบเขตและกรอบการประเมินวัฏจักรชีวิต

ขอบเขตของระบบสำหรับการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ครอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอนการส่งมอบวัตถุดิบ (ข้าวโพด) ไปยังโรงงานจนถึงขั้นตอนการผลิตกรดซิตริก กำหนดหน่วยการทำงาน (Functional Unit) คือ กรดซิตริก 1 กิโลกรัม ระยะเวลาเดินเครื่องจักรของโรงงานกรดซิตริก คิดเป็น 330 วันต่อปี โดยเครื่องจักรมีอายุการใช้งาน 20 ปี และมีกำลังการผลิต คิดเป็น 6,400 กิโลกรัมกรดซิตริกต่อชั่วโมง ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้โปรแกรม OpenLCA ส่วนข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกสำหรับการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตกรดซิตริก ได้มีการรวบรวมจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและโรงงานผลิตกรดซิตริกในประเทศจีน สำหรับพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตกรดซิตริกในโรงงานจำลอง ข้อมูลมาจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและงานวิจัยของ Heinzle et al. (2007)

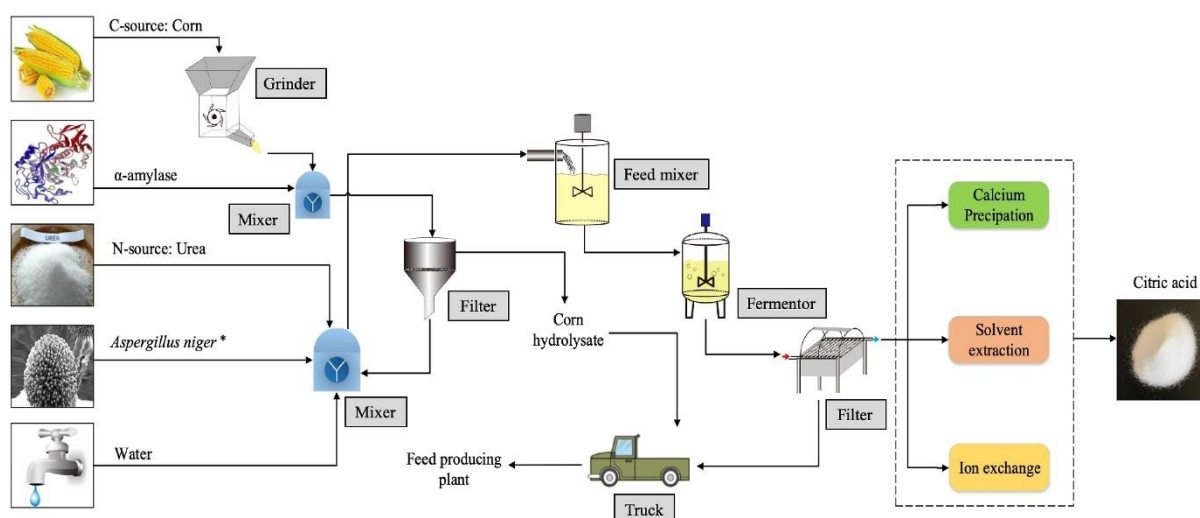
○ กระบวนการผลิตกรดซิตริกและการจำลองสถานการณ์ที่เกี่ยวข้อง

แผนผังการผลิตกรดซิตริกจากข้าวโพดแสดงในรูปที่ 17 ซึ่งแสดงการจำลองกระบวนการผลิตกรดซิตริกผ่านการหมักข้าวโพด ประกอบด้วย 4 หน่วยผลิต ได้แก่ การปรับสภาพวัตถุดิบ การเตรียมสปอร์ การหมักข้าวโพด และการทำให้บริสุทธิ์หรือการคืนสภาพกรดซิตริก สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมของกระบวนการคืนสภาพกรดซิตริก (Citric Acid Recovery) จะอธิบายอยู่ในส่วนของสถานการณ์จำลอง 3 สถานการณ์ ที่ถูกกำหนดขึ้นในการศึกษานี้ ในขณะที่ ขั้นตอนการปรับสภาพวัตถุดิบ การเตรียมสปอร์ และการหมักข้าวโพดจะเหมือนกันในทุกสถานการณ์จำลองที่กำหนดขึ้น

หน่วยปรับสภาพวัตถุดิบ: เมล็ดข้าวโพดจะถูกส่งไปยังเครื่องย่อยเพื่อลดขนาดอนุภาคลงเหลือประมาณ 1 มม. สมมติฐานของการศึกษานี้ คือ วัตถุดิบแห้ง ดังนั้น กระบวนการทำให้แห้งจึงไม่รวมอยู่ในการสร้างแบบจำลองกระบวนการ ในขั้นตอนต่อไปหลังจากการบดย่อย จะมีการเติมเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสทนร้อน 0.5 กรัมต่อข้าวโพด 1 กิโลกรัม เพื่อไฮโดรไลซ์แป้งเป็นกลูโคสที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส หลังจากการไฮโดรไลซิส ข้าวโพดเหลวจะผ่านการกรองเพื่อเอาของแข็งซึ่งส่วนใหญ่เป็นเส้นใยและไขมันออก ในขั้นตอนถัดไป เติมน้ำในอัตราส่วนโดยมวล 3:1 จะได้ข้าวโพดเหลวสำหรับใช้ในขั้นตอนถัดไป

หน่วยเตรียมสปอร์: การเพาะเลี้ยงเชื้อได้มาจาก Anhui BBKA Biochemical Co. Ltd. ซึ่งใช้ข้าวโพด เหลวเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากหน่วยปรับสภาพวัตถุดิบ เป็นแหล่งคาร์บอนและเติมยูเรียเป็นแหล่ง ไนโตรเจน คิดเป็นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของของเหลวทั้งหมด (Anhui BBKA Biochemical Co. Ltd., 2014) สารตั้งต้น (Substrate) ต้องผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้น จึงเติมเชื้อรา *Aspergillus Niger* ลงในถังเพาะเลี้ยง โดยต้องมีการกวนในกระบวนการนี้ด้วยความเร็วรอบการ หมุน 130 รอบต่อนาที และต้องปรับเปลี่ยนเชื้อรา *Aspergillus Niger* ทุก 6 เดือน

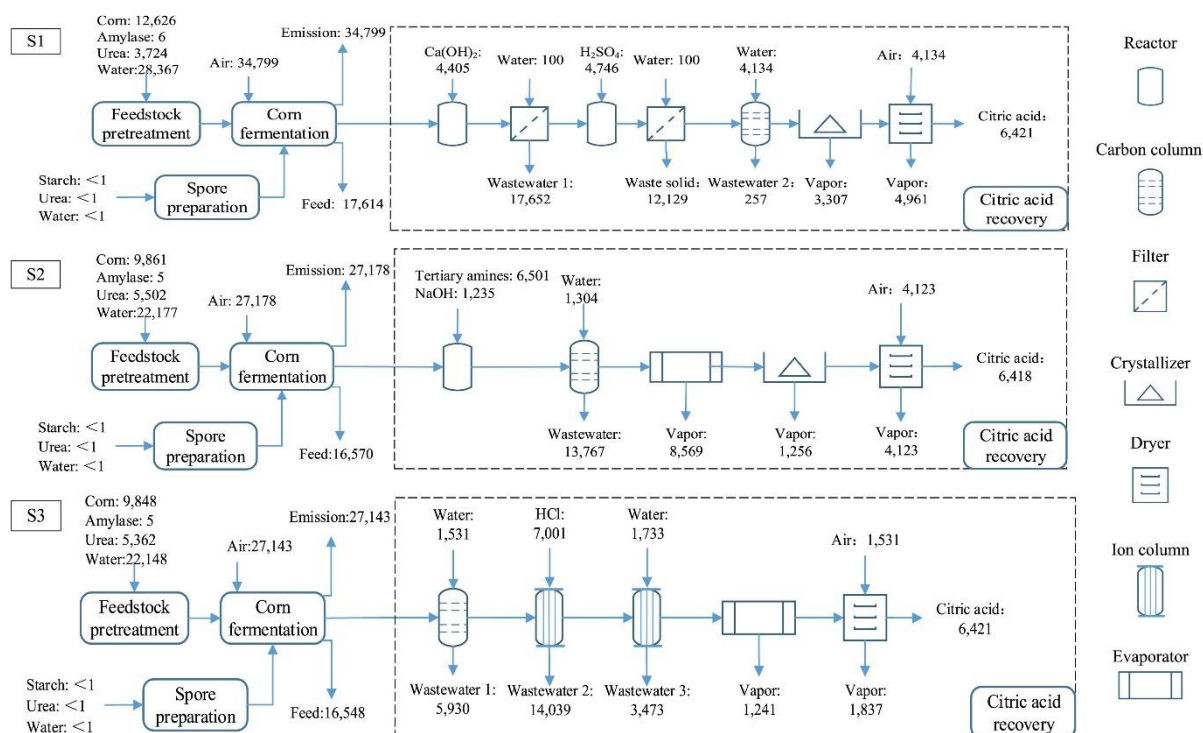
รูปที่ 17 แผนภาพกระบวนการผลิตกรดซิตริกจากข้าวโพด



ที่มา: Wang et al., 2020

หน่วยหมักข้าวโพด: ข้าวโพดเหลวจากหน่วยปรับสภาพวัตถุดิบจะใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและเติม ยูเรีย ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นแหล่งไนโตรเจน ซับสเตรต (Substrate) ทำให้ปราศจากเชื้อโดยการให้ ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที โดยเป็นการฆ่าเชื้อแบบต่อเนื่อง หลังจากนั้น ถ่ายเชื้อรา *Aspergillus Niger* จากหน่วยเตรียมสปอร์ไปยังถังหมัก โดยนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ในระหว่างกระบวนการหมัก ทำการเติมอากาศในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ (Bioreactor) โดยใช้เครื่องอัดอากาศ และกรองอากาศโดยใช้ตัวกรองอากาศ อัตราส่วนโดยมวลของอากาศ คือ 1:0.2 (Anhui BBKA Biochemical Co. Ltd., 2014) หลังจากหมักกรดซิตริก น้ำหมักจากเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ จะถูกส่งไปยังเครื่องกรองสุญญากาศแบบหมุนเพื่อกรองเอามวลชีวภาพออก จากนั้นนำมวลชีวภาพที่แยก ออกมาล้างเพื่อลดการสูญเสียกรดซิตริก จากนั้น น้ำหมักจะนำเข้าสู่หน่วยทำให้บริสุทธิ์

รูปที่ 18 สมดุลมวลสารของการผลิตกรดซิตริกจากข้าวโพด (หน่วย: kg/h)



ที่มา: Wang et al., 2020

สถานการณ์ที่ 1: S1 (รูปที่ 18, S1) จะใช้วิธีการตกตะกอนด้วยแคลเซียม โดยวิธีนี้ จะค่อย ๆ เติม Ca(OH)_2 ที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส โดยมีค่า pH เท่ากับ 7 ขั้นตอนนี้ใช้เวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง จากนั้น จึงทำการกรอง สำหรับสารตกค้างจะทำการบำบัดด้วย H_2SO_4 เพื่อสกัดกรดซิตริกออกจากไตรแคลเซียม ซึ่งจะได้ CaSO_4 จากกระบวนการนี้ สำหรับส่วนของเหลวที่กรองได้จะนำเข้าสู่คอลัมน์ถ่านกัมมันต์ เพื่อขจัดสิ่งเจือปนที่ตกค้าง โดยสถานการณ์จำลองนี้มาจากกระบวนการผลิตในโรงงานผลิตกรดซิตริกที่ตั้งอยู่ในมณฑลอานฮุย ทางตอนใต้ของประเทศจีน

สถานการณ์ที่ 2: S2 (รูปที่ 18, S2) จะใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยวิธีนี้ น้ำหมักจะถูกเติมลงในหอสกัดแบบจานหมุนต่อเนื่องโดยการสกัดแบบไหลสวนทางกันระหว่างน้ำหมักและตัวทำละลาย (Counter-current flow) โดยใช้ตัวทำละลายเอมีน ไตรออกติลามีน และออกทานอล (*n*-octanol) เป็นสารสกัด โดยเอมีน สามารถสร้างสารเชิงซ้อนของเอมีนชนิดตติยภูมิ (Tertiary Amine) กับกรดซิตริก เนื่องจากที่ค่า pH ต่ำ กรดซิตริกจะอยู่ในรูปกรด อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดอยู่ที่ประมาณ 27 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 30 นาที จากนั้น ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เพื่อสกัดซ้ำ จากนั้น ใช้น้ำล้างผลิตภัณฑ์และคืนสภาพสารสกัด โดยสถานการณ์จำลองนี้ใช้ข้อมูลจากผลการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

สถานการณ์ที่ 3: S3 (รูปที่ 18, S3) จะใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยวิธีนี้ น้ำหมักจะเข้าสู่คอลัมน์ถ่านกัมมันต์เพื่อให้สีจางลง จากนั้น นำมาผ่านคอลัมน์ Anion Resin เพื่อกำจัดไอออนประจุลบและคาร์บอน-

ซัสเตรต จากนั้น ใช้กรดไฮโดรคลอริกเพื่อล้างเรซินและแยกกรดซิตริกออก ในขั้นตอนถัดไป จะใช้ Cation Resin เพื่อแยกกลุ่มกรดอะมิโนที่เป็นกรดออกจากกลุ่มที่เป็นกลางและด่าง จากนั้น แยกไอออนของแมกนีเซียมและโพแทสเซียมออกจากผลิตภัณฑ์ในคอลัมน์แลกเปลี่ยนไอออน Cation จะจับกับเรซิน และถูกล้างออกมา ในขณะที่กรดซิตริกไหลผ่านคอลัมน์ โดยสถานการณ์จำลองนี้ใช้ข้อมูลจากผลการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

หลังจากผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์แล้ว จะนำมาผ่านกระบวนการเพื่อให้ได้กรดซิตริกชนิดผลึก โดยกระบวนการเริ่มจากนำสารละลายบริสุทธิ์มาผ่านเครื่องระเหยสุญญากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส ผ่านเครื่องกรองและถังปั่นแยก หลังจากนั้น ผ่านเครื่องอบแห้งแบบโรตารี (Rotary evaporator) จะได้กรดซิตริกชนิดผลึก

○ วิธีการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมและการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตกรดซิตริกนี้ ทำการวัดปริมาณต่อการผลิตกรดซิตริก 1 กิโลกรัม โดยใช้วิธี TRACI 2.1 ในการประเมินผลกระทบ กลุ่มผลกระทบที่พิจารณาในการศึกษานี้ ได้แก่ ศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน หรือการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (แสดงในหน่วย kg CO₂eq.) ศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะฝนกรด (แสดงในหน่วย kg SO₂eq.) ศักยภาพการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชัน (แสดงในหน่วย kg N eq.) การลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิล (แสดงในหน่วย MJ surplus) ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ (แสดงในหน่วย CTUe) ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ (แสดงในหน่วย CTUh) การเกิดหมอกควันจากปฏิกิริยาแสงเคมี (แสดงในหน่วย kg O₃) การลดลงของโอโซน (แสดงในหน่วย kg CFC-11 eq.) และผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (แสดงในหน่วย kg PM 2.5 eq.) อย่างไรก็ตาม ศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะฝนกรด และศักยภาพการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชันจะกล่าวถึงในรายละเอียดเพิ่มเติม เนื่องจากผลกระทบเหล่านี้เป็นกลุ่มผลกระทบที่มีความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวนี้ ดำเนินการเพื่อวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ป้อนเข้าแต่ละรายการที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตกรดซิตริก โดยพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงที่ร้อยละ ± 20 ของระดับเฉลี่ยของค่าป้อนเข้าแต่ละรายการ เพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์โดยสมมติว่าปัจจัยอื่น ๆ ทั้งหมดคงที่เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่สนใจ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวจะช่วยค้นหาพารามิเตอร์ใดมีอิทธิพลมากต่อผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตกรดซิตริก

○ การศึกษาผลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของการผลิตกรดซิตริกผ่านกรณีศึกษา

จากปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกของแต่ละสถานการณ์จำลองดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าผลผลิตกรดซิตริกทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 50–66 โดยน้ำหนัก กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ที่อยู่ภายใต้ขอบเขตการศึกษา ได้แก่ การตกตะกอนด้วยแคลเซียม การสกัดด้วยตัวทำละลาย และการแลกเปลี่ยนไอออน อัตราการผลิตกรดซิตริก คิดเป็น 6,416 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความต้องการพลังงานของแต่ละหน่วยผลิต สรุปดังตารางที่ 1 ขั้นตอนการหมักข้าวโพดทั้ง S1 S2 และ S3 เป็นขั้นตอนที่ต้องใช้พลังงานมากที่สุด สาเหตุหลักมา

จากการใช้ไฟฟ้าสูงในระหว่างกระบวนการหมัก หน่วยปรับสภาพวัตถุดิบต้องการใช้น้ำมากกว่าร้อยละ 70 ของความต้องการไอน้ำทั้งหมด น้ำหล่อเย็นส่วนใหญ่จะใช้ในถังหมัก กระบวนการหลักอื่น ๆ ที่ต้องการใช้น้ำหล่อเย็น คือ เครื่องปฏิกรณ์ปรับสภาพวัตถุดิบ เพื่อใช้ในการลดอุณหภูมิของวัตถุดิบหลังการบดย่อย

ตารางที่ 1 ความต้องการพลังงานของการผลิตกรดซิตริกในสถานการณ์ต่าง ๆ

กระบวนการ	สถานการณ์	ไฟฟ้า		ไอน้ำ		น้ำหล่อเย็น	
		(GWh/y)	(%)	(MT/y)	(%)	(MT/y)	(%)
การปรับสภาพวัตถุดิบ	S1	3.7	2.9	3.6×10^5	88.3	3.0×10^6	12.9
	S2	3.0	3.1	2.9×10^5	76.4	2.4×10^6	13.2
	S3	3.0	3.1	2.8×10^5	94.1	2.4×10^6	13.0
การเตรียมสปอร์	S1	1.2	1.0	–	–	0.3×10^6	1.1
	S2	1.0	0.9	–	–	0.2×10^6	0.9
	S3	1.0	1.0	–	–	0.2×10^6	0.9
การหมักข้าวโพด	S1	120.3	95.7	–	–	20.3×10^6	86.0
	S2	96.3	95.6	–	–	15.9×10^6	85.9
	S3	93.9	95.6	–	–	15.8×10^6	86.1
การคืนสภาพกรดซิตริก	S1	0.5	0.4	0.5×10^5	11.7	–	–
	S2	0.4	0.4	0.9×10^5	23.6	–	–
	S3	0.4	0.4	0.2×10^5	5.9	–	–

ที่มา: Wang et al., 2020

● ผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

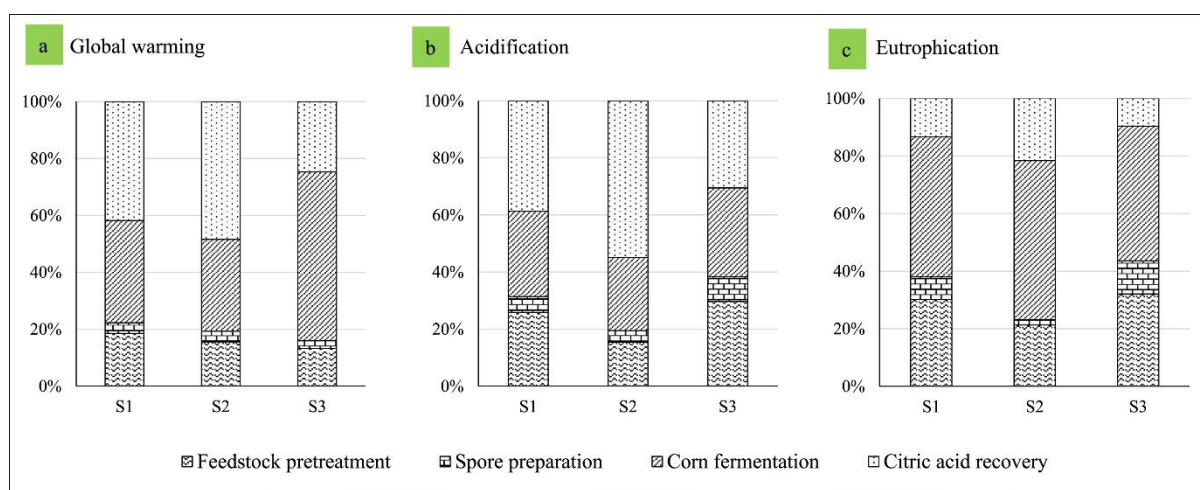
จากกรณีศึกษากระบวนการผลิตกรดซิตริกในภาคอุตสาหกรรม โดยการเปรียบเทียบการก่อให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ของกระบวนการผลิตที่มีความแตกต่างกันขึ้นต้นของการคืนสภาพกรดซิตริก (Citric acid recover) ใน 3 รูปแบบ พบว่า ได้ผลการวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อมในประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

1) ศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนหรือการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

แสดงผลลัพธ์เป็นสัดส่วนร้อยละของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตกรดซิตริกเปรียบเทียบ ทั้ง 3 สถานการณ์ ดัง**รูปที่ 19** พบว่า หน่วยการหมักข้าวโพดและหน่วยการคืนสภาพกรดซิตริก (Citric Recovery) หรือหน่วยการทำให้บริสุทธิ์ และการหมักข้าวโพด (Corn fermentation) เป็นกระบวนการหลักที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (**รูปที่ 19a**) โดยในหน่วยการหมักข้าวโพดนั้น การผลิตไฟฟ้าและไอน้ำส่งผลกระทบต่อ ด้านการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนสูงสุด หรือมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด ซึ่งผลกระทบหลักมาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในระหว่างกระบวนการหมัก

ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ De Beer (2011) ใน **ตารางที่ 2** แสดงค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตกรดซิตริกทั้ง 3 สถานการณ์ โดยการผลิตกรดซิตริกตามสถานการณ์ S2 มีค่าศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนสูงสุด เมื่อเทียบกับการผลิตกรดซิตริกตามสถานการณ์ S1 และ S3 โดยในสถานการณ์ S2 จำเป็นต้องใช้สารเคมีอินทรีย์และกระบวนการผลิตสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้น การผลิตกรดซิตริกโดยใช้สถานการณ์ S2 จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดในด้านการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน นอกจากนี้ เมื่อเทียบกับ S3 กับ S1 พบว่า S1 มีศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนสูงกว่า เนื่องจากในสถานการณ์ S1 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าและไอน้ำสูงกว่า นอกจากนี้ การใช้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในปริมาณมากใน S1 ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการเผาหินปูน (De Beer, 2011) ในขณะที่ S3 ความต้องการใช้ไฟฟ้าและไอน้ำน้อยกว่า จึงส่งผลกระทบต่อด้านการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนต่ำกว่า

รูปที่ 19 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน การก่อให้เกิดภาวะฝนกรด และการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชันของการผลิตกรดซิตริกในสถานการณ์ต่าง ๆ



ที่มา: Wang et al., 2020

2) ศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะฝนกรด

ดังแสดงใน **ตารางที่ 2** พบว่า ศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะฝนกรดของการผลิตกรดซิตริกโดยใช้สถานการณ์ S1, S2 และ S3 มีค่าประมาณ 0.029, 0.048 และ 0.015 kg SO₂ eq/kg ตามลำดับ ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า S2 มีศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะฝนกรดสูงสุด โดยแหล่งที่มาของศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะฝนกรดของการผลิตกรดซิตริก แสดงดัง **รูปที่ 19b** ซึ่งแสดงให้เห็นว่า หน่วยปรับสภาพวัตถุดิบ หน่วยหมักข้าวโพด และหน่วยคั้นสภาพกรดซิตริก เป็นกระบวนการหลักที่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านศักยภาพในการก่อให้เกิดฝนกรด โดย SO₂ เป็นปัจจัยสำคัญในการก่อให้เกิดภาวะฝนกรด สำหรับสถานการณ์จำลองทั้ง 3 สถานการณ์ พบว่า ค่าศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะฝนกรดสูงในหน่วยการปรับสภาพวัตถุดิบ เนื่องมาจาก

ปริมาณการใช้ไฟฟ้าสูงในขั้นตอนการบดย่อยข้าวโพด ส่วนหน่วยหมักข้าวโพดนั้น ค่าศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะฝนกรดส่วนใหญ่มาจากการใช้พลังงานในกระบวนการหมัก

ตารางที่ 2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตกรดซิตริกในสถานการณ์ต่าง ๆ

ผลกระทบสิ่งแวดล้อม	หน่วย	S1	S2	S3
การปล่อยก๊าซเรือนกระจก	kg CO ₂ eq/kg CA	4.7	6.1	3.1
ศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะฝนกรด	kg SO ₂ eq/kg CA	0.029	0.048	0.015
ศักยภาพการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชัน	kg N eq/kg CA	1.6	5.4	1.3
การลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิล	MJ surplus/kg CA	3.2	4.8	2.5
ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ	CTUe/kg CA	3.4	4.5	1.6
การลดลงของโอโซน	kg CFC-11eq/kg CA	5.80x10 ⁻⁷	1.32x10 ⁻⁶	4.31x10 ⁻⁷
การเกิดหมอกควันจากปฏิกิริยาแสงเคมี	kg O ₃ /kg CA	0.0049	0.0136	0.0032
ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์	CTUe/kg CA	4.82x10 ⁻⁷	8.54x10 ⁻⁷	2.49x10 ⁻⁷
ผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ	kg PM2.5 eq/kg CA	0.0001	0.0005	0.0001

หมายเหตุ: CA – Citric Acid / ที่มา: Wang et al., 2020

3) ศักยภาพการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชัน

จากผลลัพธ์ใน**ตารางที่ 2** พบว่า การผลิตกรดซิตริกโดยใช้สถานการณ์ S2 มีค่าศักยภาพการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชัน คิดเป็น 5.4 kg N eq/kg ซึ่งสูงกว่าค่าศักยภาพการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชันของการผลิตกรดซิตริกในสถานการณ์จำลองอื่น ๆ อย่างมาก ซึ่งสาเหตุหลักมาจากการใช้ไตรออกติลามีน (Trioctylamine) ในหน่วยการคั่นสภาพกรดซิตริกหรือการทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งเพิ่มภาระด้านสิ่งแวดล้อมอย่างมาก นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่า ศักยภาพในการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชันของการผลิตกรดซิตริกในสถานการณ์จำลอง S1 และ S3 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงใน**รูปที่ 19c** โดยหน่วยการหมักข้าวโพดมีส่วนค่าศักยภาพในการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชันสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทั้งหมด ผลกระทบรองลงมา คือ กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ และกระบวนการคั่นสภาพกรดซิตริก ตามลำดับ โดยค่าศักยภาพในการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชันครอบคลุมผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากองค์ประกอบต่าง ๆ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) (Li et al., 2018) ภาวะยูโทรฟิเคชันส่วนใหญ่เป็นผลกระทบจากการปล่อยสารเคมีหลังกระบวนการบำบัดลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน และเป็นตัวชี้วัดความเข้มข้นของสารเคมีในแหล่งน้ำผิวดิน (Mandegari et al., 2018) ในกระบวนการหมักข้าวโพดนั้น สาเหตุหลักของการเกิดยูโทรฟิเคชันคือการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ไนเตรตไอออน (NO₃⁻) และแอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) ศักยภาพในการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชันของการผลิตกรดซิตริกโดยใช้สถานการณ์ S1 และ S2 ส่วนใหญ่เป็นผลกระทบมาจากการปล่อยของเสียระหว่างการผลิตแป้งข้าวโพด เช่น NH₄⁺, PO₄³⁻, NO_x และการใช้ปุ๋ย

4) กลุ่มผลกระทบสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ

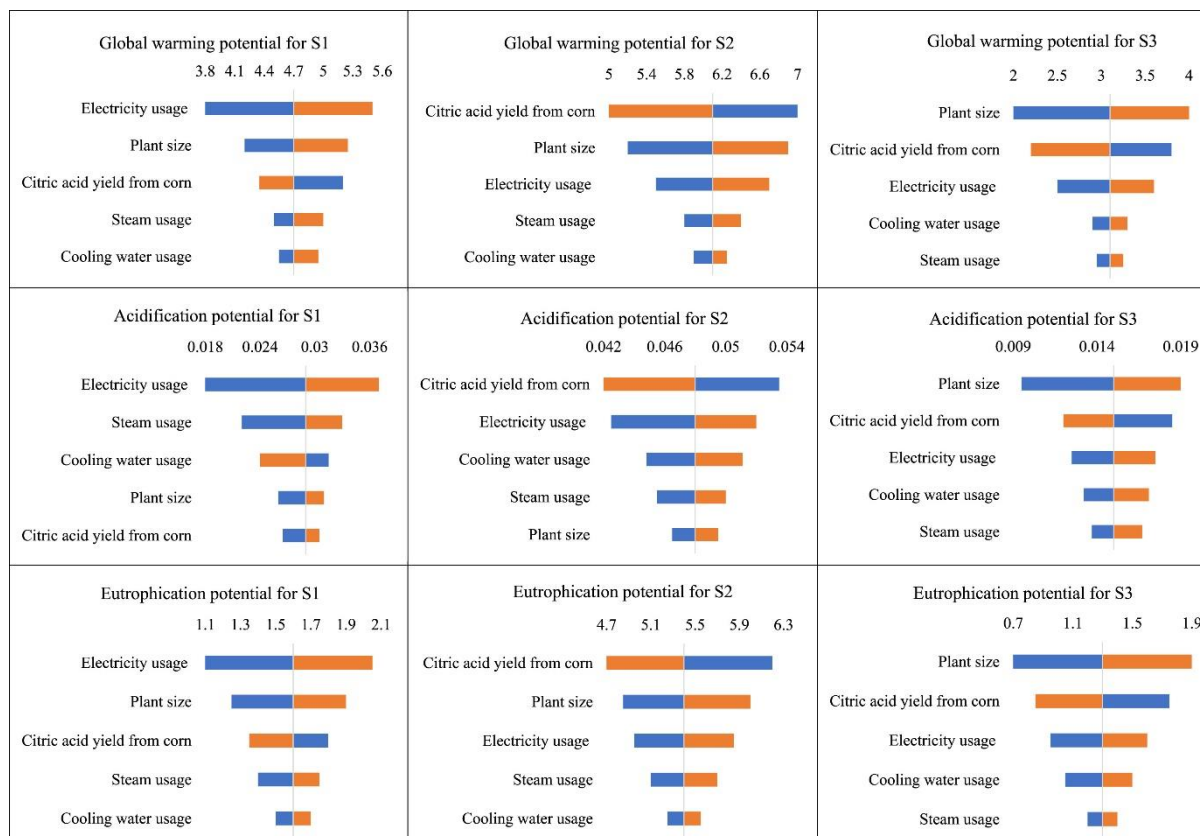
สำหรับกลุ่มผลกระทบอื่น ๆ ตามวิธีการประเมินผลกระทบด้วยวิธี TRACI ได้แก่ การลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิล ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ การลดลงของโอโซน การก่อให้เกิดหมอกควันจากปฏิกิริยาแสงเคมี ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ และผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ โดยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบทั้ง 3 สถานการณ์จำลอง พบว่า สถานการณ์ S2 มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดเมื่อเทียบกับสถานการณ์อื่น ๆ (ตารางที่ 2) สาเหตุหลักมาจากการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ปริมาณมากในการขั้นตอนการคืนสภาพกรดซิตริกใน S2 โดยตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ผลิตมาจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ซึ่งก่อให้เกิดการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนการผลิตกรดซิตริกในสถานการณ์ S3 มีการปล่อยมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 สถานการณ์ สำหรับการปล่อยมลพิษในสถานการณ์ S1 ส่งผลกระทบท่อสิ่งแวดล้อมสูงกว่าสถานการณ์ S3 เนื่องจากการเกิดของเสียปริมาณมากในระหว่างขั้นตอนการคืนสภาพกรดซิตริก

อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์จากการประเมิน LCA พบว่า การผลิตกรดซิตริกโดยใช้สถานการณ์ S3 ช่วยลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เป็นประเด็นสำคัญ (Hotspot) โดยรวมของการผลิตกรดซิตริก ดังนั้น จึงเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้สำหรับการผลิตกรดซิตริกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น สำหรับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของสถานการณ์ S2 ที่มีค่าสูงนั้น เนื่องจากการใช้สารเคมีซึ่งเพิ่มภาระต่อสิ่งแวดล้อม การกำจัดของเสียจากกระบวนการผลิตกรดซิตริกในระดับอุตสาหกรรมเป็นประเด็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นด้วย เกี่ยวกับนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมนั้น ในการหมักน้ำเสียซึ่งโดยทั่วไปมีค่า Biological Oxygen Demand (BOD) สูง และต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องด้วยการให้ความสำคัญมากขึ้นเกี่ยวกับการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้น โรงงานผลิตกรดซิตริกจึงต้องเผชิญกับการเลือกตัดสินใจอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างการลดต้นทุนและภาระด้านสิ่งแวดล้อม

● การวิเคราะห์ความอ่อนไหวด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

สำหรับสถานการณ์จำลอง S1, S2 และ S3 พารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวที่สุดเกี่ยวกับผลกระทบด้านศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะฝนกรด และศักยภาพการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชัน บ่งชี้ว่าเป็นขนาดของโรงงาน การใช้ไฟฟ้า ผลผลิตกรดซิตริกที่ผลิตได้ การใช้ไอน้ำ และการใช้น้ำหล่อเย็น (รูปที่ 20) จากผลลัพธ์สะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดโรงงานจะเพิ่มปริมาณการปล่อยมลพิษ ในขณะที่ การเพิ่มผลผลิตกรดซิตริกจากข้าวโพดจะลดของเสียและทำให้ภาระด้านสิ่งแวดล้อมลดลงด้วย การใช้พลังงานสูง ทั้งพลังงานไฟฟ้า ไอน้ำ และน้ำหล่อเย็น เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

รูปที่ 20 การวิเคราะห์ประเด็นความอ่อนไหวที่ส่งผลต่อศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (ในหน่วย kg CO₂ eq./kg CA) ศักยภาพการก่อให้เกิดภาวะฝนกรด (ในหน่วย kg SO₂ eq./kg CA) และศักยภาพการก่อให้เกิดยูโทรฟิเคชัน (ในหน่วย kg N eq./kg CA) ของการผลิตกรดซิตริกในสถานการณ์ต่าง ๆ



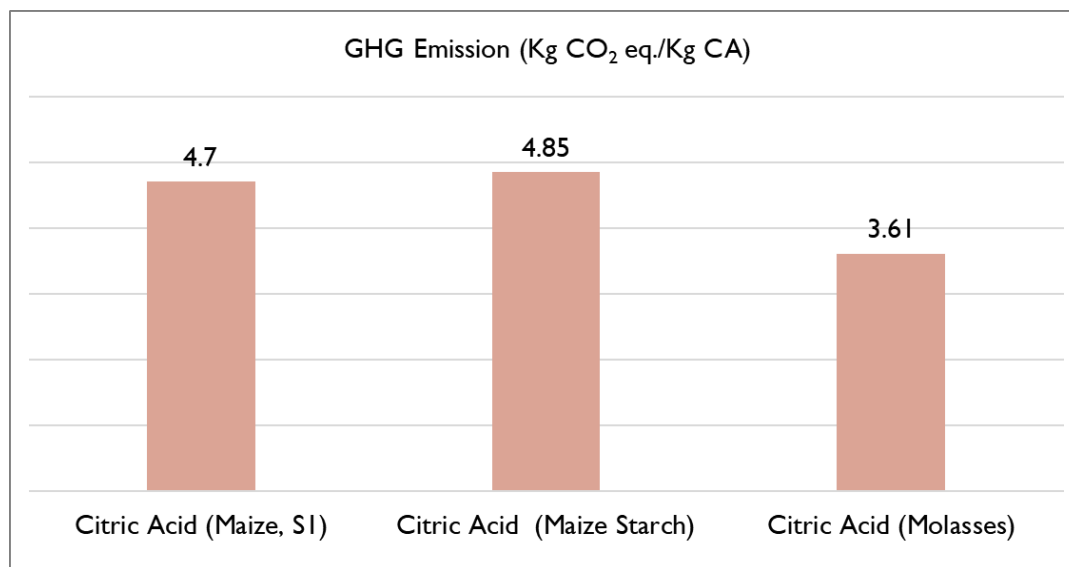
ที่มา: Wang et al., 2020

- การเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตกรดซิตริกที่ใช้วัตถุดิบแตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตกรดซิตริกที่ใช้วัตถุดิบแตกต่างกัน พบว่า การผลิตกรดซิตริกจากการใช้ข้าวโพดเป็นวัตถุดิบและใช้กระบวนการทำให้บริสุทธิ์โดยการตกตะกอนด้วยแคลเซียม (Citric acid – Maize, S1) มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกคิดเป็น 4.7 kg CO₂ eq./kg citric acid เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตกรดซิตริกจากแป้งข้าวโพดและจากกากน้ำตาล (จากงานวิจัยของ De Beer (2011) พบว่า การผลิตกรดซิตริกจากข้าวโพดและใช้กระบวนการทำให้บริสุทธิ์โดยการตกตะกอนด้วยแคลเซียม ส่งผลกระทบบ้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับที่ต่ำกว่าการผลิตกรดซิตริกจากแป้งข้าวโพด ร้อยละ 3 โดยประมาณ แต่มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงกว่าการผลิตกรดซิตริกจากกากน้ำตาล ประมาณร้อยละ 30 โดยปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตกรดซิตริกจากแป้งข้าวโพดและจากกากน้ำตาล คิดเป็น 4.85 และ 3.61 kg CO₂ eq./kg citric acid ตามลำดับ แสดงผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 21 ทั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าการผลิตกรดซิตริกจากข้าวโพดทั้งสองกรณีศึกษามี

ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใกล้เคียงกัน เนื่องจากการใช้พลังงานและวัตถุดิบต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตใกล้เคียงกัน ส่วนกรณีการผลิตกรดซิตริกจากกากน้ำตาลมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากกากน้ำตาลที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล จึงมีภาระทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ติดตัวมาด้วยวัตถุดิบต่ำกว่าข้าวโพดและแป้งข้าวโพด

รูปที่ 21 เปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการผลิตกรดซิตริกโดยใช้วัตถุดิบต่าง ๆ



ที่มา: Wang et al., 2020 และ De Beer, 2011

จากผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกรณีศึกษาของการผลิตกรดซิตริกจากการหมักข้าวโพดด้วยวิธีการคืนสภาพกรดซิตริกหรือการทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การตกตะกอนด้วยแคลเซียม การสกัดด้วยตัวทำละลาย และการแลกเปลี่ยนไอออน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าผลผลิตกรดซิตริกจากการจำลองกระบวนการอยู่ในช่วงร้อยละ 50-66 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้วิธีการคืนสภาพกรดซิตริกที่แตกต่างกัน โดยผลการประเมินด้านสิ่งแวดล้อมแสดงให้เห็นว่าการผลิตกรดซิตริกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นสถานการณ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด

การวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของการผลิตกรดซิตริกจากกรณีศึกษาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการผลิตกรดซิตริกมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงานไฟฟ้าและไอน้ำซึ่งผลิตมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล รวมถึงการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการหมัก และการใช้สารเคมีในกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งจากกรณีศึกษาดังกล่าว สามารถวิเคราะห์และสรุปแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของกรดซิตริก ได้ 3 แนวทางดังนี้

- 1) **การปรับเปลี่ยนหรือลดสัดส่วนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล** เช่น การใช้พลังงานไฟฟ้าและความร้อนจากแสงอาทิตย์ การใช้พลังงานหมุนเวียนจากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากน้ำเสียหรือของเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงาน เป็นต้น

- 2) การใช้วัตถุดิบทางเลือก เช่น การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิต เช่น ฟางข้าว ใบอ้อย กากมันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ (Cellulosic materials) สามารถนำมาผลิตเป็นน้ำตาลกลูโคส (Glucose) เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการหมักกรดซิตริกได้
- 3) การปรับปรุงกระบวนการผลิตให้สามารถลดของเสียที่เกิดขึ้นหรือสามารถนำของเสียและผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By-products) กลับมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การนำน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเข้าสู่ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion) เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนฟอสซิลได้ เป็นต้น

5.3 การศึกษาการศึกษาวัฏจักรชีวิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัคซีน (Vaccines)

วัคซีน (Vaccine) เป็นสารชนิดหนึ่งที่ถูกฉีดเข้าไปในร่างกาย เพื่อสร้างภูมิคุ้มกันโรคต่างๆ โดยข้อมูลของสถาบันวัคซีนแห่งชาติ กล่าวว่า วัคซีนส่วนใหญ่ทำมาจากเชื้อโรค แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ ทำจากเชื้อโรคที่ตาย (Killed vaccine) แล้วมีสารของเชื้อโรคมานำเข้าร่างกายมนุษย์ วัคซีนที่ทำจากเชื้อโรคที่อ่อนแอ (Live attenuated vaccine) และวัคซีนประเภทที่ออกซอยด์ (Toxoid) โดยแต่ละประเภทมีความสำคัญและรูปแบบการผลิตดังนี้

- **วัคซีนเชื้อตาย (Killed vaccine)** หมายถึง วัคซีนที่ผลิตขึ้นโดยใช้เชื้อโรคทั้งตัว (whole cell) ที่ตายแล้ว ตัวอย่างวัคซีนในกลุ่มนี้ได้แก่ วัคซีนไอกรนชนิดทั้งเซลล์ วัคซีนตับอักเสบบี วัคซีนอหิวาตกโรคชนิดฉีด วัคซีนพิษสุนัขบ้า และวัคซีนไขสันหลังอักเสบชนิดเชื้อตาย วัคซีนโปลิโอชนิดฉีด และผลิตจากส่วนประกอบบางส่วนของเชื้อโรค (Subunit) ตัวอย่างวัคซีนในกลุ่มนี้ได้แก่ วัคซีนตับอักเสบบี วัคซีนไขสันหลังอักเสบชนิดทั้งเซลล์ วัคซีนโปลิโอชนิดฉีด และวัคซีนนิวโมคอคคัส หรือผลิตจากโปรตีนส่วนประกอบของเชื้อที่ผลิตมาใหม่โดยอาศัยหลักวิศวกรรมศาสตร์
- **วัคซีนเชื้อเป็นอ่อนฤทธิ์ (Live attenuated vaccine)** หมายถึง วัคซีนที่ผลิตขึ้นโดยใช้เชื้อโรคมานำให้อ่อนฤทธิ์ลงจนไม่สามารถทำให้เกิดโรคแต่เพียงพอที่จะกระตุ้นภูมิคุ้มกันของร่างกายได้ วัคซีนในกลุ่มนี้ได้แก่ วัคซีนโปลิโอชนิดกิน วัคซีนรวมหัด-หัดเยอรมัน-คางทูม วัคซีนอีสุกอีใส วัคซีนวัณโรค วัคซีนไทฟอยด์ชนิดรับประทาน วัคซีนโรคตา วัคซีนไขสันหลังอักเสบชนิดพ่นจมูก เป็นต้น
- **วัคซีนประเภทที่ออกซอยด์ (Toxoid)** หมายถึง วัคซีนที่ผลิตโดยการนำพิษของจุลชีพที่เป็นส่วนสำคัญในการก่อโรคมานำให้หมดฤทธิ์แต่ยังสามารถกระตุ้นให้เกิดภูมิคุ้มกันโรคได้ เช่น วัคซีนคอตีบ วัคซีนบาดทะยัก ฯลฯ

รูปที่ 22 การแบ่งประเภทของวัคซีนตามกระบวนการผลิต



ที่มา: สถาบันวัคซีนแห่งชาติ

ในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัส COVID-19 ที่ทั่วโลกเผชิญอยู่ในช่วงปี 2563-2565 และกลายเป็นโรคประจำถิ่นในปี 2566 ทำให้หลายประเทศทั่วโลกมีการตื่นตัวในการศึกษา ค้นคว้า วิจัยและพัฒนา เทคโนโลยีการผลิตวัคซีนสำหรับป้องกันโรค COVID-19 เป็นจำนวนมาก พร้อมทั้งมีการทดสอบและรับรองคุณภาพ รวมถึงการผลิตในระดับอุตสาหกรรมขึ้นใช้กับผู้ป่วยและประชาชนในปัจจุบัน ทั้งนี้ สามารถเปรียบเทียบวัคซีนป้องกันโรค COVID-19 ชนิดต่าง ๆ ดังตารางที่ 3

- วัคซีนที่ผลิตจากโปรตีนส่วนหนึ่งของไวรัส (Protein subunit) เป็นวัคซีนที่ประกอบด้วยโปรตีนของเชื้อไวรัสซาร์ส-โควี-2 (SARS-CoV-2) โดยอาจใช้เป็นชิ้นส่วนโปรตีนของไวรัส เช่น โปรตีนส่วนหนาม (Spike protein) เป็นต้น ตัวอย่างวัคซีนในกลุ่มโปรตีนจากไวรัส ได้แก่ วัคซีนของบริษัทโนวาแวก (Novavax) ข้อดีของวัคซีนชนิดนี้ คือ มีต้นทุนการผลิตต่ำ มีความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดผลข้างเคียงต่ำ ในด้านประสิทธิภาพการกระตุ้นภูมิคุ้มกัน อาจจำเป็นต้องใช้สารเสริมฤทธิ์ (Adjuvant) เพื่อเพิ่มการกระตุ้นทางภูมิคุ้มกัน เนื่องจากความซับซ้อนในการผลิตจึงใช้เวลานาน โดยวัคซีน COVID-19 ที่ผลิตโดยกระบวนการนี้คิดเป็นร้อยละ 35.9 ของทั้งหมด

- **วัคซีนชนิดที่ใช้กรดนิวคลีอิก (Nucleic acid)** วัคซีนชนิดนี้เป็นวัคซีนชนิดที่ใช้สารพันธุกรรม mRNA หรือ DNA ของไวรัสซาร์ส-โควี-2 (SARS-CoV-2) เพื่อให้เซลล์ในร่างกายเกิดการจำลองการสร้างแอนติเจนเช่นเดียวกับไวรัสขึ้น เมื่อสารพันธุกรรม mRNA หรือ DNA เข้าสู่เซลล์ร่างกาย จะเกิดกระบวนการผลิตโปรตีนจากเซลล์ของมนุษย์ เพื่อสร้างแอนติเจนที่จะตอบสนองต่อการกระตุ้นภูมิคุ้มกัน ตัวอย่างวัคซีนในกลุ่ม mRNA ได้แก่ วัคซีนจากบริษัทไฟเซอร์ ไบโอเอ็นเทค (Pfizer-BioNTech) และวัคซีนของบริษัทโมเดอร์นา (Moderna) ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยข้อดีของวัคซีนชนิดที่ใช้กรดนิวคลีอิก คือ สามารถผลิตง่ายและราคาถูก สามารถเห็นย่นำการสร้างปฏิกิริยาของภูมิคุ้มกันอย่างแข็งแรง แต่อย่างไรก็ตาม วัคซีนชนิดนี้ก็มีข้อจำกัด เนื่องจากวัคซีนป้องกันโรคอื่น ๆ ที่เคยมีใช้ทั่วโลกก่อนหน้านี้ ยังไม่มีวัคซีนตัวไหนที่ผลิตโดยเทคโนโลยีนี้ ทำให้ข้อมูลเกี่ยวกับความปลอดภัยในระยะยาวและข้อมูลรองรับอาจมีไม่มากนัก นอกจากนี้ วัคซีนในกลุ่มนี้ยังมีข้อจำกัดในด้าน การจัดเก็บและขนส่งมากกว่าวัคซีนชนิดอื่น เนื่องจาก mRNA มักจะถูกทำลายได้ง่าย จำเป็นต้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำมาก เช่น -70 หรือ -20 องศาเซลเซียส เพื่อให้คงประสิทธิภาพ
- **วัคซีนชนิดที่ใช้ไวรัสเป็นพาหะ (Viral vector)** การทำงานของวัคซีนชนิดนี้เป็นการสร้างพันธุกรรมจากเซลล์เพื่อไปผลิตแอนติเจนเช่นเดียวกับวัคซีนชนิดที่ใช้กรดนิวคลีอิก แต่แตกต่างกันตรงที่มีกระบวนการนำเชื้อไวรัสชนิดอื่นมาใช้เป็นพาหะขนส่งสารพันธุกรรม mRNA หรือ DNA เข้าสู่เซลล์ โดยที่วัคซีนชนิดที่ใช้ไวรัสเป็นพาหะ (Viral vector vaccines) สามารถเลียนแบบการแพร่เชื้อไวรัสตามธรรมชาติได้ จึงกระตุ้นการตอบสนองของภูมิคุ้มกันได้อย่างแข็งแรงและเป็นธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม วัคซีนชนิดที่ไม่เหมาะสมกับผู้ที่มีภูมิคุ้มกันบกพร่อง นอกจากนั้น อาจมีโอกาที่ผู้ที่ได้รับวัคซีนชนิดนี้มีประวัติติดเชื้อไวรัสชนิดที่ใช้เป็นพาหะมาก่อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวัคซีนลดน้อยลง โดย ตัวอย่างวัคซีนที่ใช้ไวรัสเป็นพาหะ ได้แก่ วัคซีนของบริษัทแอสตราเซนีก้า (AstraZeneca) ร่วมกับ University of Oxford ของประเทศอังกฤษ การเก็บรักษาวัคซีนสามารถเก็บได้ที่อุณหภูมิ 2-8 องศาเซลเซียส (อย่างน้อย 6 เดือน) เป็นต้น

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบวัคซีนป้องกันโรค Covid-19 ชนิดต่าง ๆ

Vaccines	Country	Type	Efficiency rate	Storage temp
Pfizer	USA & Germany	mRNA	~95.0%	-70 °C
Moderna	USA	mRNA	~95.0%	-20 °C
Sinovac	China	Inactivated virus	79.9%	2-8 °C
Sinopharm	China	Inactivated virus	79.3%	2-8 °C
Sputnik V	Russian Federation	Viral two vector	91.6%	2-8 °C
AstraZeneca	British-Swedish	Viral vector	79.0%	2-8 °C
Covaxin	India	Inactivated virus	81.0%	2-8 °C
Johnson & Johnson	USA	Viral vector	68.0%	2-8 °C

ที่มา: Klemes et al., 2021

- การศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตวัคซีนผ่านกรณีศึกษา

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศยังคงเป็นประเด็นเร่งด่วนสำหรับผู้กำหนดนโยบาย ซึ่งมีการทำให้ชัดเจนขึ้นในระหว่างการประชุมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศขององค์การสหประชาชาติ (COP26) ในปี พ.ศ. 2564 ที่เมืองกลาสโกว์ สหราชอาณาจักร การประชุมดังกล่าวเน้นย้ำถึงปัจจัยสำคัญในการลงทุนของรัฐบาลเพื่อลดผลกระทบด้านสภาพอากาศ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าข้อมูลสภาพภูมิอากาศจะถูกนำมาใช้มากขึ้นเพื่อนำเสนอนโยบายด้านสาธารณสุขและการดูแลสุขภาพ การประเมินผลกระทบด้านสภาพอากาศของโครงการด้านสาธารณสุขนั้นมีน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจ

อุตสาหกรรมดูแลสุขภาพเป็นหนึ่งในสาขาที่มีคาร์บอนเข้มข้นมากที่สุด โดยคิดเป็นร้อยละ 5 ของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกโดยประมาณ และมากกว่าร้อยละ 10 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ ในสหราชอาณาจักรมีการศึกษาพบว่า ห่วงโซ่อุปทานยาและเวชภัณฑ์เป็นแหล่งสำคัญของการปล่อยคาร์บอนในอุตสาหกรรมดูแลสุขภาพ โดยคิดเป็นร้อยละ 32 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดในส่วนอุตสาหกรรมดูแลสุขภาพ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการผลิตสารเคมี พลังงาน และการขนส่งในระบบห่วงโซ่ความเย็น (Cold chain system)

จากกรณีศึกษาภายใต้งานวิจัยเรื่อง The Ecological Footprint of COVID-19 mRNA Vaccines: Estimating Greenhouse Gas Emissions in Germany โดย Kurzweil และคณะ (2021) ซึ่งทำการศึกษาและประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัคซีน mRNA Covid-19 จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ วัคซีน BNT162b2 และวัคซีน mRNA-1273 โดยเปรียบเทียบวิธีการแช่แข็งและการจัดการห่วงโซ่อุปทานที่แตกต่างกันโดยเป็นกรณีศึกษาในประเทศเยอรมนี

- ขอบเขตและกรอบการประเมิน

ขอบเขตของระบบสำหรับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม ครอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การบรรจุ การจัดเก็บวัคซีน การกระจายและส่งมอบวัคซีน การฉีดวัคซีน และการจัดการของเสีย กำหนดหน่วยการทำงาน (Functional Unit) คือ วัคซีน 1 โดส (Dose) แสดงขอบเขตการประเมินดังรูปที่ 23

รูปที่ 23 ห่วงโซ่อุปทานและขั้นตอนการส่งมอบวัคซีน mRNA ในเยอรมนี



จากภาพรวมห่วงโซ่อุปทานและขั้นตอนการส่งมอบวัคซีน mRNA พบว่า มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนตั้งแต่การผลิต (Manufacturing) ไปจนถึงการขนส่ง (Logistics) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัคซีน ดังนี้

1. ส่วนการผลิตวัคซีน การทำให้ปลอดเชื้อ และของเสีย

โดยทั่วไป ผู้ผลิตวัคซีนต่าง ๆ จะทำงานโดยอิสระเพื่อดำเนินการตามแผนพัฒนาทางคลินิกของวัคซีน ให้เสร็จสิ้นตามแผนการพัฒนาและผลิตวัคซีนของตนเอง เมื่อวัคซีนได้รับการอนุมัติ จึงจะเริ่มขยายขนาดการผลิต ในการพัฒนาวัคซีนอย่างเต็มรูปแบบนั้นจะต้องผ่านกระบวนการทำงานในหลายส่วน ๆ และนำมาต่อยอดกับกระบวนการทั้งหมด ตั้งแต่การทดลองพรีคลินิกไปจนถึงการผลิต

ความแตกต่างในกระบวนการผลิตทางชีวเคมีของวัคซีน mRNA ชนิดต่าง ๆ ทำให้ไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลในเชิงปริมาณได้ เนื่องจากขาดข้อมูลที่เปิดเผยต่อสาธารณะ โดยในการผลิตวัคซีน mRNA ของ BioNTech ต้องใช้ขั้นตอนกว่า 50,000 ขั้นตอน ทำให้ไม่สามารถประเมินค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในขั้นตอนการผลิตวัคซีนได้อย่างน่าเชื่อถือ สำหรับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการฉีดวัคซีน mRNA ในการศึกษาี้ครอบคลุมขั้นตอนการผลิต การใช้และการกำจัดโพลิเมอร์และแก้ว การใช้น้ำแข็งแห้งและตู้แช่แข็ง และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากรถบรรทุกและเครื่องบินในการส่งมอบวัคซีนให้กับผู้ป่วย ประเมินจากข้อมูลที่รวบรวมได้จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยในการผลิตวัคซีนต้องใช้พลังงาน 3.34 kWh/กรัมวัคซีน (1 โดส เท่ากับ 100 ไมโครกรัมของ mRNA) (Klemes et al., 2021)

1) สารตกค้างทางเภสัชกรรม

การป้องกันของเสียเป็นหนึ่งในหลักการใน 12 ประการของเคมีสีเขียว (Green Chemistry) กระบวนการทางเภสัชกรรมมีความแตกต่างของมวลอย่างมากระหว่างวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย (อาจสูงถึง 100 เท่าขึ้นไป) การศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจำเป็นต้องมีความรู้เชิงลึกในทุกขั้นตอนการผลิต

และวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณาจากปริมาณการใช้แล้ว จะพบว่า ภาคเภสัชกรรมก่อให้เกิดของเสียในปริมาณที่น้อยกว่าอุตสาหกรรมอื่น ๆ มาก

ปัจจุบัน ขยะทางการแพทย์ เพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้เข็มฉีดยา หลอดบรรจุ หน้ากาก ชุดป้องกัน และอุปกรณ์ป้องกันใบหน้า โดยทั่วไปแล้ว พอลิโพรพิลีนจะใช้สำหรับการผลิตกระบอกฉีดยาและหน้ากาก N-95 และโพลิเอทิลีนใช้ผลิตชุดป้องกัน ถุงมือ และอุปกรณ์ป้องกันใบหน้า อย่างไรก็ตาม ทั่วโลกมีเพียงร้อยละ 1 เท่านั้นที่พอลิโพรพิลีนถูกนำไปรีไซเคิล และส่วนใหญ่นำไปจัดการด้วยการฝังกลบ สำหรับวัคซีน BNT162b2 บรรจุ 6 โดสต่อขวด ในขณะที่ วัคซีน mRNA-1273 บรรจุ 10 โดสต่อขวด ดังนั้น ขยะทางการแพทย์ประเภทขวดวัคซีนจึงน้อยมาก เนื่องจากขวดแก้วสามารถนำไปรีไซเคิลได้ (Phadke et al., 2021)

2) การทำให้ปลอดเชื้อ (Sterilization)

การผลิตขวดบรรจุวัคซีน ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า 0.014 kWh ต่อขวด และเชื้อเพลิงจากก๊าซธรรมชาติ 0.243 MJ ต่อขวด (1 ขวด บรรจุได้ 5 โดส) การใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพพลังงานช่วยให้ประหยัดพลังงานอย่างมาก โดยกระบวนการฆ่าเชื้อใช้พลังงานไฟฟ้า 0.775 kWh ต่อกลิลกรัมและน้ำมันดีเซล 0.048 ลิตรต่อกลิลกรัม สำหรับการผลิตน้ำที่ใช้ผสมยาฉีดในโรงบรรจุปลอดเชื้อ น้ำจะถูกกรอง กำจัดโอโซน และกลั่นในห้องปลอดเชื้อ เพื่อกำจัดประจุ คลอรีน อนุภาค และเอนโดทอกซิน

2. การขนส่งและการเก็บรักษาวัคซีน

ภายใต้ห่วงโซ่ความเย็นของวัคซีน COVID-19 ประกอบด้วย 4 ส่วนที่สำคัญ (รูปที่ 23) ได้แก่

- (1) การขนส่งจากโรงงานผลิตไปยังการทดลองทางการแพทย์และผู้ผลิตยาโดยรถบรรทุก
- (2) การขนส่งในตู้เย็นปริมาณมากไปยังศูนย์กระจายสินค้าทั่วโลกโดยเครื่องบิน
- (3) การกระจายวัคซีนไปยังสถานพยาบาลในภูมิภาคหลายพันแห่งโดยรถบรรทุก และ
- (4) การกระจายวัคซีนไปยังสถานพยาบาลในพื้นที่โดยบริการจัดส่ง

ในห่วงโซ่ความเย็นต้องการทั้งความสามารถในการบรรจุช่องแช่แข็งที่ศูนย์จัดเก็บและกระจายสินค้า และบรรจุภัณฑ์พิเศษเพื่อรักษาอุณหภูมิที่ต่ำมากระหว่างการจัดเก็บที่ศูนย์ กรณีศึกษาในประเทศตูนิเซียเกี่ยวกับห่วงโซ่ความเย็นของวัคซีนโควิด (Klemes et al., 2021) แสดงให้เห็นว่าภาคการขนส่งใช้พลังงานมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 60 รองลงมา คือ ตู้เย็น (ร้อยละ 13) เครื่องทำความร้อน (ร้อยละ 10) เครื่องปรับอากาศ (ร้อยละ 8) ไฟส่องสว่าง (ร้อยละ 6) และคอมพิวเตอรื (ร้อยละ 3) ตามลำดับ

● น้ำแข็งแห้ง (Dry ice)

วัคซีนที่ต้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิเฉพาะ ระหว่าง -20 องศาเซลเซียส ถึง -80 องศาเซลเซียส หรือระหว่าง 2 องศาเซลเซียส ถึง 8 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลาบรรจุในโรงงานจนถึงผู้ใช้ปลายทางต้องใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ บางครั้งต้องใช้น้ำแข็งแห้งเป็นสารทำความเย็น (น้ำแข็งแห้ง คือ คาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของแข็งและเยือกแข็ง (-78.5 องศาเซลเซียส)) เพื่อการขนส่งชีวเภสัชภัณฑ์โดยไม่มีอุปกรณ์ทำความเย็นด้วยไฟฟ้า น้ำแข็งแห้งจะระเหิดจากของแข็งกลายเป็นไอและไม่มีสารตกค้างที่อาจทำให้

บรรจุภัณฑ์หรือสินค้าเสียหายได้ พลังงานที่ต้องใช้สำหรับการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในโรงงานทำความเย็น เท่ากับ 0.2–0.55 kWh/กิโลกรัม การผลิตน้ำแข็งแห้งจาก CO₂ ต้องใช้พลังงาน 0.17–0.32 kWh/กิโลกรัม

● **ตู้เย็น**

ในทศวรรษที่ผ่านมา สารฟลูออโรคาร์บอนในตู้เย็น ซึ่งทำลายชั้นโอโซนและมีศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อนสูง ได้ถูกแทนที่ด้วยไฮโดรคาร์บอนที่เป็นอันตรายน้อยกว่า เนื่องจากอุปกรณ์ทำความเย็นถูกปิดผนึกอย่างมิดชิด ความเสี่ยงของมลพิษจากสารไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) จากการใช้วัคซีน COVID-19 ดูเหมือนจะเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ห้องเย็นและการขนส่งระยะทางไกลไม่สอดคล้องกับเป้าหมายและยุทธศาสตร์ Green Deal ของสหภาพยุโรป ในการมุ่งสู่ความเป็นกลางต่อสภาพอากาศภายในปี 2593

3. การขนส่งและโลจิสติกส์

สมาคมขนส่งทางอากาศระหว่างประเทศ (IATA) (2020) ประมาณการว่าเครื่องบินบรรทุกทุกสินค้ามากกว่า 8,000 ลำ มีความจำเป็นในการส่งวัคซีนเพียงโดสเดียวให้กับผู้คน 7,800 ล้านคนทั่วโลก อย่างไรก็ตาม ในยุโรปกลาง วัคซีนส่วนใหญ่สามารถขนส่งทางบกได้ ต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อมของการขนส่งจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยเครื่องบินและรถบรรทุก ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในการแจกจ่ายวัคซีนให้กับผู้คนหลายล้านคนจากโรงงานไปยังผู้ค้าส่ง ศูนย์ฉีดวัคซีน และสำนักงานแพทย์ ซึ่งนับว่ามีผลกระทบสำคัญต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัคซีน COVID-19 เส้นทางการขนส่งมีผลอย่างมากต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือคาร์บอนฟุตพริ้นท์ โดยการเผาไหม้ของออกเทน 1 กิโลกรัม ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 3.088 kg CO₂eq. นอกจากนี้ ยังปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยง่าย ไนโตรเจนออกไซด์ และอนุภาคฝุ่นละออง ส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการเดินทางทางอากาศนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อคน ขึ้นอยู่กับระยะทางจากเครื่องขึ้นถึงเครื่องลงจอด ประเภทของเครื่องบิน จำนวนที่นั่ง น้ำหนักบรรทุก และสินค้าที่บรรทุก โดยการเผาไหม้น้ำมันก๊าด 1 กิโลกรัม ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 3.15 กิโลกรัม การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และอนุภาคฝุ่นในชั้นบรรยากาศจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพอากาศด้วย

4. การขนส่งวัคซีนขั้นสุดท้าย

ปัจจุบัน การจัดส่งขั้นสุดท้ายถือว่าเป็นส่วนที่แพงที่สุด มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด และก่อมลพิษมากที่สุดในช่วงโซ่โลจิสติกส์ทั้งหมด จากมุมมองด้านความยั่งยืน การขนส่งด้วยรถบรรทุกไปยังศูนย์เพียงไม่กี่แห่งที่ติดตั้งห้องเย็นขนาดใหญ่จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการส่งไปยังศูนย์ขนาดเล็กจำนวนมากที่มีช่วงเวลาสั้น ๆ ในการใช้วัคซีน เมื่อวัคซีนละลายแล้ว การขนส่งที่ไม่เหมาะสมและการทำความเย็นที่ไม่เหมาะสม จะนำไปสู่การสูญเสียวัคซีนและการสูญเสียจากขวดวัคซีนที่เปิดแล้วไม่ได้ใช้ ในเยอรมนี ระยะทางระหว่างศูนย์กระจายสินค้าร้านขายยา และสำนักงานแพทย์นั้นค่อนข้างสั้น ดังนั้น ห่วงโซ่อุปทานระดับภูมิภาคที่เพียงพอช่วยให้สามารถเข้าถึงประเทศเพื่อนบ้านได้อย่างรวดเร็วและลดความต้องการด้านการขนส่งโดยรวม ซึ่งมีการจำลองการขนส่งวัคซีนขั้นสุดท้าย พบว่า จำเป็นต้องขับรถ 1.2 ล้านกิโลเมตรต่อเดือน เพื่อการแจกจ่ายวัคซีนให้แก่ศูนย์ฉีดวัคซีนในเยอรมนี ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 370,000 kg CO₂eq. ต่อเดือน

○ ผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) จากการผลิต การขนส่ง และการจัดเก็บวัคซีน mRNA COVID-19 จำนวน 2 ชนิด (วัคซีน BNT162b2 และ วัคซีน mRNA-1273) ต่อวัคซีน 1 ล้านโดส ซึ่งผลการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกนี้เป็นการประมาณค่าเบื้องต้น ผลการเปรียบเทียบค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการผลิต การใช้ และการกำจัดของเสีย มีความไม่แน่นอนอย่างมีนัยสำคัญ โดยการศึกษาไม่สามารถระบุรายละเอียดเชิงปริมาณได้ทุกขั้นตอนกระบวนการทั้งหมดตั้งแต่วัตถุดิบไปจนถึงการใช้งานขั้นสุดท้าย เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือตลอดห่วงโซ่

ตารางที่ 4 ผลการประมาณค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการขนส่ง การผลิต การเก็บรักษาและจัดการของเสียของวัคซีน mRNA Covid-19 จำนวน 1 ล้านโดส (kg CO₂eq./million doses)

No.	Stage	BNT162b2 (Dry Ice)	mRNA-1273 (No Dry Ice)	Error (%)
1	Transport			
	Air freight (USA–Europe)	87,756	35,892	50
	Truck	1231	403	20
	Last-mile analysis	566	566	10
	Traffic to the vaccination site (1 km per patient)	100,000	100,000	100
2	Manufacture			
	mRNA biochemical process	15	15	500
	Glass	720	720	5
	Paper, cardboard, ancillary kit	610	610	5
	Syringes and sterilization	4540	4540	5
3	Storage			
	Freezer farm (6 months at –20 to –80°C)	1440	1440	10
	Dry ice for shipping	1180	–	3
	Freezing during transport (10 days at –40°C)	–	80	10
	Refrigerator in regional centers (2–8°C)	10	10	20
4	Waste disposal			
	Combustion of plastics	3520	3520	20
Total per dose (kg CO ₂ eq.) – included transport		0.202 ± 0.110	0.148 ± 0.102	54
Total per dose (kg CO ₂ eq.) - excluded transport		0.012 ± 0.001	0.011 ± 0.001	7

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการบรรจุหีบห่อ การเก็บรักษา และการแช่เยือกแข็ง มีค่าน้อยกว่าการขนส่งทางอากาศและการขนส่งสินค้า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัคซีนทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน คือ การขนส่งด้วยน้ำหนักรวดยาวัคซีนต่อขวดที่แตกต่างกัน โดยผลกระทบจากการขนส่งทางอากาศแสดงให้เห็นความแตกต่างกันอย่างโดดเด่นระหว่างวัคซีน mRNA ทั้งสองชนิด นอกจากนี้ ความแตกต่างของผลกระทบจากการขนส่งทางบกมีผลมาจากน้ำแข็งแห้งที่ต้องใช้ในการขนส่งวัคซีน BNT162b2

เมื่อเปรียบเทียบวัคซีน mRNA ทั้งสองชนิดจำนวนหนึ่งล้านโดสในเยอรมนีส่งผลกระทบแตกต่างกัน ประมาณ 1,100 kg CO₂eq. กรณีที่ไม่รวมการขนส่ง และ 54,000 kg CO₂eq. กรณีที่รวมการขนส่งทุกรูปแบบ จนถึงขั้นสุดท้าย โดยความแตกต่างนี้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรจุภัณฑ์และจำนวนโดสต่อขวด สำหรับของเสียทางการแพทย์ที่เกิดจากโรค COVID-19 (เข็มฉีดยา หน้ากากอนามัย หน้ากากคลุมหน้า ยาฆ่าเชื้อ ฯลฯ) ไม่ได้พิจารณาในการศึกษานี้ เนื่องจากวัคซีนช่วยให้เอาชนะโรคระบาดได้เร็วขึ้น

เมื่อพิจารณาผลกระทบด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัคซีน BNT162b2 และวัคซีน mRNA-1273 จำนวน 1 โดส กรณีที่รวมการขนส่งทุกรูปแบบ คิดเป็น 0.202 ± 0.110 kg CO₂eq. และ 0.148 ± 0.102 kg CO₂eq. ตามลำดับ สำหรับกรณีที่รวมการขนส่ง พบว่า มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก คิดเป็น 0.012 ± 0.001 kg CO₂eq. และ 0.011 ± 0.001 kg CO₂eq. ตามลำดับ

○ เปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัคซีน COVID-19 ชนิดต่าง ๆ

นอกจากกรณีศึกษาดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีกรณีศึกษาของ Patenaude และ Ballreich (2022) ซึ่งทำการศึกษา เรื่อง Estimating & comparing greenhouse gas emissions for existing intramuscular COVID-19 vaccines and a novel thermostable oral vaccine โดยได้ทำการศึกษากว่า ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัคซีน COVID-19 โดยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างวัคซีนชนิดรับประทานกับวัคซีนฉีดเข้ากล้ามเนื้อ 4 ชนิด ได้แก่ วัคซีน COVISHIELD® ของ AstraZeneca วัคซีน COMIRNATY® ของ Pfizer/BioNTech วัคซีน mRNA-1273 ของ Moderna และวัคซีน Ad26.COV2.S COVID-19 ของ Johnson & Johnson [19, 20] โดยการศึกษานี้พิจารณาครอบคลุมห่วงโซ่ความยั่งยืน การผลิตวัคซีน และการกำจัดของเสียทางการแพทย์ ผลการศึกษาพบว่า วัคซีนโควิดชนิดรับประทาน สามารถหลีกเลี่ยงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้เมื่อเปรียบเทียบกับวัคซีนชนิดฉีดเข้ากล้ามเนื้อ โดยสามารถหลีกเลี่ยงการปล่อย GHGs ในช่วง 0.007 ถึง 0.024 kg CO₂eq. ต่อคอร์สการรักษา เมื่อเปรียบเทียบกับวัคซีนของ Johnson & Johnson สามารถหลีกเลี่ยงการปล่อย GHGs อยู่ระหว่าง 0.013 ถึง 0.048 kg CO₂eq. ต่อคอร์สการรักษา เมื่อเปรียบเทียบกับวัคซีนของ AstraZeneca สามารถหลีกเลี่ยงการปล่อย GHGs ระหว่าง 0.23 ถึง 0.108 kg CO₂eq. ต่อคอร์สการรักษา เมื่อเปรียบเทียบกับวัคซีนของ Moderna และสามารถหลีกเลี่ยงการปล่อย GHGs ได้ในช่วง 0.134 ถึง 0.466 kg CO₂eq. ต่อคอร์สการรักษา เมื่อเทียบกับวัคซีนของ Pfizer/BioNTech แสดงดังตารางที่ 5 ทั้งนี้ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจะแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ โดยขึ้นอยู่กับความต้องการวัคซีนที่คาดการณ์ไว้ สัดส่วนเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า และกลยุทธ์การผลิตวัคซีน

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากวัคซีนจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับจำนวนวัสดุสิ้นเปลืองที่ต้องใช้ในแต่ละคอร์สการรักษา เช่น หลอดฉีดยา ก้านแอลกอฮอล์ ขวดวัคซีน และถุงมือ รวมถึงข้อกำหนดในการทำ ความเย็นสำหรับวัคซีนแต่ละชนิด วัคซีน ChAdOx1-S (COVISHIELD®) ของ AstraZeneca วัคซีน BNT162b2 (COMIRNATY®) ของ Pfizer-BioNTech และวัคซีน mRNA-1273 ของ Moderna ต่างต้องการ วัคซีน 2 โดสสำหรับการฉีดวัคซีนหนึ่งคอร์ส ในขณะที่ วัคซีน Ad26.COV2.S ของ Johnson & Johnson (J&J) นั้นต้องการเพียงโดสเดียว จึงลดปริมาณวัคซีนที่ต้องใช้ต่อคอร์สลงครึ่งหนึ่ง

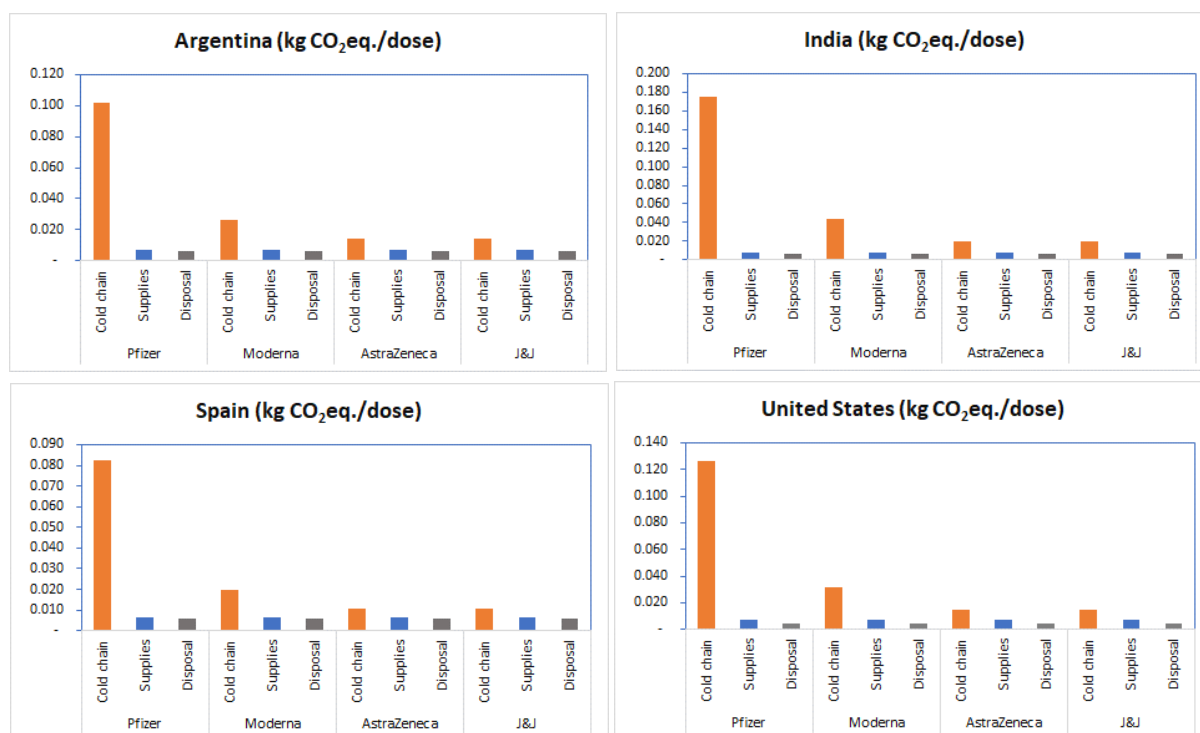
ตารางที่ 5 ประมาณค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่หลีกเลี่ยงได้ต่อคอร์สการรักษา (kg CO₂eq.)

Country	COMIRNATY® (Pfizer/BioNTech)	mRNA-1273 (Moderna)	COVISHIELD® (AstraZeneca)	Ad26.COV2.S (J&J / Janssen)
Argentina	0.227	0.047	0.023	0.012
Brazil	0.134	0.023	0.013	0.007
Chile	0.181	0.035	0.018	0.009
India	0.38	0.086	0.039	0.02
Kenya	0.466	0.108	0.048	0.024
Spain	0.191	0.037	0.019	0.01
United Kingdom	0.201	0.041	0.02	0.01
United States	0.278	0.061	0.028	0.014
Vietnam	0.299	0.065	0.03	0.015
Low Value	0.134	0.023	0.013	0.007
High Value	0.466	0.108	0.048	0.024

ที่มา: Patenaude and Ballreich (2022)

รูปที่ 24 แสดงรายละเอียดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัคซีน COVID-19 ทั้ง 4 ชนิด ตาม แหล่งที่มาและประเทศ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ห่วงโซ่ความเย็นเป็นส่วนที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด โดย วัคซีนของ Pfizer/BioNTech ปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมอยู่ในช่วง 0.067–0.231 kg CO₂eq. ต่อโดส ห่วงโซ่ ความเย็นคิดเป็นสัดส่วนระหว่างร้อยละ 71–90 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ในขณะที่ วัคซีนของ Moderna ปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมอยู่ในช่วง 0.024–0.069 kg CO₂eq. ต่อโดส ห่วงโซ่ความเย็นคิดเป็น สัดส่วนร้อยละ 42–72 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ส่วนวัคซีนของ AstraZeneca และ Johnson & Johnson นั้น ปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมอยู่ในช่วง 0.020–0.039 kg CO₂eq. ต่อโดส ห่วงโซ่ความเย็นคิด เป็นสัดส่วนร้อยละ 28–53 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด

รูปที่ 24 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัคซีนทั้ง 4 ชนิด ตามแหล่งที่มาและประเทศ



ที่มา: Patenaude and Ballreich (2022)

จากที่ได้กล่าวมา การศึกษานี้เป็นความพยายามในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของวัคซีน mRNA 2 ชนิด ในประเด็นปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยพิจารณาการขนส่งและการจัดการห่วงโซ่อุปทานที่แตกต่างกัน แม้ว่าจะไม่สามารถคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่แท้จริงของเทคโนโลยีการสังเคราะห์ทางชีวเคมีได้อย่างแม่นยำ แต่สามารถแสดงผลเห็นได้ชัดเจนว่า การขนส่งมีสัดส่วนถึงร้อยละ 99 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด โดยการปล่อยมลพิษจากการขนส่งทางอากาศ การขนส่งทางถนน และการขนส่งขั้นสุดท้ายนั้น คิดเป็น 19 เท่าของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากเทคโนโลยีการแช่เยือกแข็ง การผลิตน้ำแข็งแห้ง การผลิตขวดแก้ว และพอลิเมอร์สำหรับบรรจุภัณฑ์และวัสดุทางการแพทย์ โดยปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวัคซีน mRNA ที่ฉีดเข้าไปในผู้ป่วยมีค่าประมาณ 0.01 ถึง 0.2 kg CO₂eq. ต่อโดส ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีการทำความเย็นและเส้นทางการขนส่งไปยังสถานที่ฉีดวัคซีน

จากการศึกษาวัฏจักรชีวิตของวัคซีน COVID-19 พบว่า การผลิต การขนส่ง และการกำจัดของเสียของวัคซีนมีการใช้ทรัพยากรและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม การผลิตวัคซีนเป็นการผลิตทางเทคโนโลยีชีวภาพที่มีประสิทธิภาพสูง มีการใช้พลังงานต่ำ ซึ่งทำให้สามารถลดปริมาณของเสียได้อย่างมาก ในขณะที่ ทรัพยากรธรรมชาติถูกบริโภคในปริมาณเล็กน้อย ทั้งนี้ จากผลการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกี่ยวข้องกับวัคซีน มีข้อเสนอแนะในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ พลังงาน และกระบวนการใน 3 ประเด็น ดังนี้

- 1) **พลังงาน (การใช้พลังงานหมุนเวียน) สำหรับเครื่องทำความเย็น:** การเข้าถึงพลังงานค่อนข้างต่ำในพื้นที่ห่างไกลบางแห่งที่ไม่มีสายส่งไฟฟ้าเข้าถึงหรือมีไฟฟ้าจ่ายจำกัด อย่างไรก็ตาม การขนส่งแบบห้องเย็นมีความเข้มงวดสำหรับวัคซีน COVID-19 เช่น การเก็บวัคซีนที่อุณหภูมิ 2-8 องศาเซลเซียส หรือแม้กระทั่งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส และ -70 องศาเซลเซียส โดยทางเลือกหนึ่ง คือ ระบบพลังงานแบบกระจายศูนย์และพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
- 2) **การเพิ่มประสิทธิภาพห่วงโซ่อุปทานความเย็น:** บรรจุภัณฑ์ และห่วงโซ่อุปทาน ล้วนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบโลจิสติกส์ของห่วงโซ่ความเย็น ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นให้เหมาะสมกับน้ำหนักรักษา
- 3) **การนำกลยุทธ์เศรษฐกิจหมุนเวียนมาใช้:** เนื่องจากมีความเป็นไปได้สูงที่การระบาดของ COVID-19 จะคงอยู่ต่อไปอีกหลายปี กรณีที่เลวร้ายที่สุด คือ โรคระบาดที่เกิดขึ้นทุกปี เช่น ไข้หวัดใหญ่ ดังนั้น การนำกลยุทธ์เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) มาใช้ในภาคการแพทย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการฉีดวัคซีน แทนที่จะใช้ระบบเศรษฐกิจเชิงเส้น การเปลี่ยนแปลงไปสู่ระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนเป็นโอกาสที่ชัดเจนในการสร้างประโยชน์ในระบบการรักษาพยาบาลและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นแนวคิดที่มีความท้าทายและเป็นโอกาสในภาคการแพทย์ในแง่ของการออกแบบเพื่อให้เกิดระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนเกิดขึ้นในภาคการแพทย์
- 4) **การพัฒนาวัคซีนที่ไม่ต้องการอุณหภูมิต่ำในการเก็บรักษาและยังคงมีประสิทธิภาพสูง** จะช่วยลดก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนห่วงโซ่ความเย็นได้เป็นอย่างมาก มิฉะนั้นจะมีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมหลายอย่างที่จัดการ Pfizer/BioNTech เป็นบริษัทวัคซีนใช้ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนเพื่อแช่แข็งผลิตภัณฑ์วัคซีนไวที่ -70 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบศักยภาพในการก่อให้เกิดโลกร้อนแล้ว การปล่อยก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกที่ส่งผลทำให้โลกร้อนขึ้นประมาณ 23,000 เท่าของคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับการลดก๊าซเรือนกระจกจากการทำความเย็นวัคซีนบนเครื่องบินสามารถดำเนินการได้โดยใช้น้ำแข็งแห้ง นอกจากสารทำความเย็นแล้ว วัสดุบรรจุภัณฑ์ก็มีความสำคัญ การใช้วัสดุ CORREX (แทนที่จะใช้กระดาษแข็ง) เป็นกล่องด้านนอกเนื่องจากปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่าและการใช้แผงฉนวนสุญญากาศ (แทนที่จะใช้โฟมพอลิสไตรีน) เป็นฉนวนในกล่องเนื่องจากอัตราการสูญเสียความร้อนต่ำกว่าน้ำแข็งแห้ง

ผลการศึกษาวัฏจักรชีวิต การปล่อยก๊าซเรือนกระจก รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่าง ๆ ตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ชีวภาพเป้าหมายทั้ง 3 ผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย เม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กรดซิตริก และวัคซีน จะพบว่า ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นมีที่มาจากช่วงของวัฏจักรชีวิตที่แตกต่างกัน เช่น ในกรณีของการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด (PLA) พบว่า มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงจากการใช้พลังงานในกระบวนการหมัก (Fermentation) การผลิตกรดซิตริก พบว่า มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงจากขั้นตอนการหมักและการคืนสภาพกรดซิตริก (Citric acid recovery)

ขณะที่ วัคซีน มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนการเก็บรักษาทั้งในขั้นตอนการขนส่งและการเก็บรักษาคุณภาพยาก่อนถึงผู้ป่วย

อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ถึงแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ชีวภาพเป้าหมาย จะเห็นได้ว่า มีแนวทางที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในบางประเด็นที่คล้ายกัน อาทิ

1. การใช้พลังงานหมุนเวียนในการผลิต ทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล
2. การใช้วัตถุดิบทางเลือกในการผลิตโดยพึ่งพาวัตถุดิบหมุนเวียน โดยเฉพาะวัตถุดิบที่มีส่วนในการดูดซับก๊าซเรือนกระจกจากบรรยากาศ
3. การใช้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนมาปรับใช้เพื่อลดปริมาณของเสียจากกระบวนการผลิต รวมถึงการนำของเสียจากกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นกลับไปใช้ใหม่ในรูปแบบต่าง ๆ ให้ได้มากที่สุด

นอกจากนี้ ยังพบว่า มีประเด็นเกี่ยวกับแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีความจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์นั้น ๆ อาทิ

1. การเลือกใช้วิธีการคืนสภาพ (Recovery method) หรือวิธีการทำให้บริสุทธิ์ (Purification method) ที่มีความเหมาะสม โดยมีผลการศึกษาแล้วว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุด เช่น การเลือกใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) สำหรับการคืนสภาพผลิตภัณฑ์กรดซิตริก (Citric acid recovery) เป็นต้น
2. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่ไม่ต้องการอุณหภูมิต่ำในการเก็บรักษาและยังคงมีประสิทธิภาพสูง รวมถึงการพัฒนาประสิทธิภาพห่วงโซ่อุปทานความเย็น (Cold chain system)

6. ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายสำหรับการส่งเสริมการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในวัฏจักรชีวิตและการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวภาพ

จากแนวทางในการแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ชีวภาพข้างต้น สามารถสรุปแนวทางในการกำหนดมาตรการส่งเสริมผู้ประกอบการในห่วงโซ่อุปทานและวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ชีวภาพ เพื่อให้เกิดการปรับปรุงกระบวนการผลิต รวมถึงการพัฒนากระบวนการผลิตให้สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากยิ่งขึ้น ดังนี้

- 1) **ส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนในกระบวนการผลิต** โดยนอกเหนือจากสิทธิประโยชน์ด้านภาษี (Tax incentive) ในการปรับปรุงเครื่องจักรที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่ภาครัฐได้ให้การส่งเสริมอยู่แล้วในปัจจุบัน อาทิ
 - การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อรองรับความต้องการใช้พลังงานหมุนเวียนที่เพิ่มขึ้น อาทิ การพัฒนาระบบสนับสนุนด้านพลังงานทางเลือกในเขตอุตสาหกรรม เพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้ประกอบการและสนับสนุนในช่วงแรกของการปรับเปลี่ยนการใช้พลังงาน (Transition phase)

- การให้สิทธิประโยชน์ด้านภาษีเพิ่มเติมสำหรับผู้ประกอบการที่มีแผนการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการนำพลังงานหมุนเวียนมาปรับใช้ภายในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างชัดเจน
- การพัฒนาพื้นที่สำหรับการศึกษาทดลอง (Sandbox) การปรับใช้พลังงานหมุนเวียนในกระบวนการผลิต เพื่อเป็นข้อมูลและเป็นแหล่งศึกษาทดลองให้กับผู้ประกอบการ สำหรับการศึกษาและวางแผนในการปรับปรุงการใช้พลังงานทางเลือกที่เหมาะสมต่อไป

2) การส่งเสริมการสร้างความร่วมมือระหว่างภาคการวิจัยและการผลิตในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อาทิ

- การสร้างความร่วมมือในการถ่ายทอดองค์ความรู้ระหว่างผู้พัฒนาเทคโนโลยีวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) สำหรับการคืนสภาพกรดซัลฟิวริกในต่างประเทศ ให้กับภาคการวิจัยในประเทศ เพื่อนำมาปรับใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีให้กับผู้ประกอบการในประเทศ
- การสร้างความร่วมมือในการวิจัยพัฒนาผลิตภัณฑ์วัคซีนที่ไม่ต้องการอุณหภูมิต่ำในการเก็บรักษา เพื่อให้เกิดการถ่ายทอดองค์ความรู้ (Know-how) ที่จะสามารถนำมาปรับใช้ในการพัฒนาวัคซีนในประเทศต่อไป เป็นต้น

3) การถ่ายทอดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการเลือกใช้วัตถุดิบการผลิตที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในส่วนของการได้มาซึ่งวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์ชีวภาพ โดยสามารถพิจารณาดำเนินการใน 3 แนวทาง ดังนี้

- การจัดสัมมนาหรือการประชุมเชิงวิชาการเพื่อเป็นช่องทางในการให้ความรู้และแลกเปลี่ยนความเห็นด้านการใช้วัตถุดิบทางเลือกสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวภาพให้กับผู้ประกอบการและผู้สนใจเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาทดลอง
- การศึกษาและกำหนดแนวทางในการส่งเสริมห่วงโซ่อุปทานการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่มีการใช้วัตถุดิบหมุนเวียนรูปแบบต่าง ๆ เพื่อประเมินความพร้อมด้านอุปทานวัตถุดิบและการสร้างฐานข้อมูลผู้ประกอบการที่มีส่วนเกี่ยวข้องในห่วงโซ่อุปทานดังกล่าว รวมถึงการพัฒนาฐานข้อมูลห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain Database) ที่มีข้อมูลที่ครอบคลุมครบถ้วนตั้งแต่ต้นน้ำจนถึงปลายน้ำของแต่ละห่วงโซ่อุปทาน เพื่อให้บริการด้านข้อมูลแก่ผู้ประกอบการ
- การพิจารณามาตรการด้านภาษีเพิ่มเติม สำหรับผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่มีการผลิตจากวัตถุดิบทางเลือกและมีผลการประเมินหรือผ่านการรับรองว่ามีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่ลดลง เช่น การลดภาษีเงินได้นิติบุคคลในกรณีที่บริษัทมีการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่มีผลการทดสอบอย่างชัดเจนว่า มีค่าคาร์บอนคาร์บอนฟุตพริ้นท์ไม่เกินกว่าที่ภาครัฐกำหนด หรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการพัฒนาต่อยอดซึ่งสามารถลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ลงไปได้จากเดิมตามเกณฑ์ที่กำหนด เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- Ghomi E.R. et al., 2021. The Life Cycle Assessment for Polylactic Acid (PLA) to Make It a Low-Carbon Material., 13: pp. 1854 (1-16).
- Vink et al., 2003. ApplicationsoflifecycleassessmenttoNatureWorks™ polylactide (PLA) production., 80: pp. 403-419.
- Berovic and Legisa, 2007. Citric acid production. Biotechnol. Annu. Rev., 13: pp. 303-343.
- De Beer, 2011. Modelling and Simulation Based Assessment in Sustainable Bioprocess Development. Master of Science thesis, University of Cape Town, South Africa.
- Dhillon et al., 2011. Recent advances in citric acid bio-production and recovery. Food Bioprocess Technol., 4: pp. 505-529.
- Ding et al., 2018. Improving the dewaterability of citric acid wastewater sludge by Fenton treatment. J. Clean. Prod., 196: pp. 739-746.
- Heinzle et al., 2007. Development of Sustainable Bioprocesses: Modeling and Assessment. John Wiley & Sons.
- Mandegari et al., 2018. A new insight into sugarcane biorefineries with fossil fuel co-combustion: techno-economic analysis and life cycle assessment. Energy Convers. Manag., 165: pp. 76-91.
- Nica and Woinaroschy, 2010. Environmental assessment of citric acid production. U.P.B Sci. Bull. Series B, 72: pp. 45-56.
- PÃcrez et al., 2015. Techno-economic and environmental assessment of citric acid production by *Aspergillus Niger* (rapid fire). 2015 AIChE Annual Meeting Conference Abstract.
- Wang et al., 2020. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of citric acid production through different recovery methods. J. Clean. Prod., 249: 119315.
- สถาบันวัคซีนแห่งชาติ (2023). ประเภวัคซีนตามการผลิต, เข้าถึงได้จาก <http://guruvaccine.com>
- IATA. The time to prepare for COVID-19 vaccine transport is now. In: International air transport association (IATA); 2020. <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2020-09-09-01/>.
- Klemes et al. 2021. COVID-19 pandemics Stage II – Energy and environmental impacts of vaccination, Renewable and Sustainable Energy Reviews 150: 111400.
- Kurzweil et al. 2021. The Ecological Footprint of COVID-19 mRNA Vaccines: Estimating Greenhouse Gas Emissions in Germany, Int. J. Environ. Res. Public Health 18, 7425.
- Patenaude and Ballreich. 2022. Estimating & comparing greenhouse gas emissions for existing intramuscular COVID-19 vaccines and a novel thermostable oral vaccine, The Journal of Climate Change and Health 6: 100127.
- Phadke et al. 2021. Eco-friendly vaccination: Tackling an unforeseen adverse effect. J. Clim. Chang. Health 1: 100005.