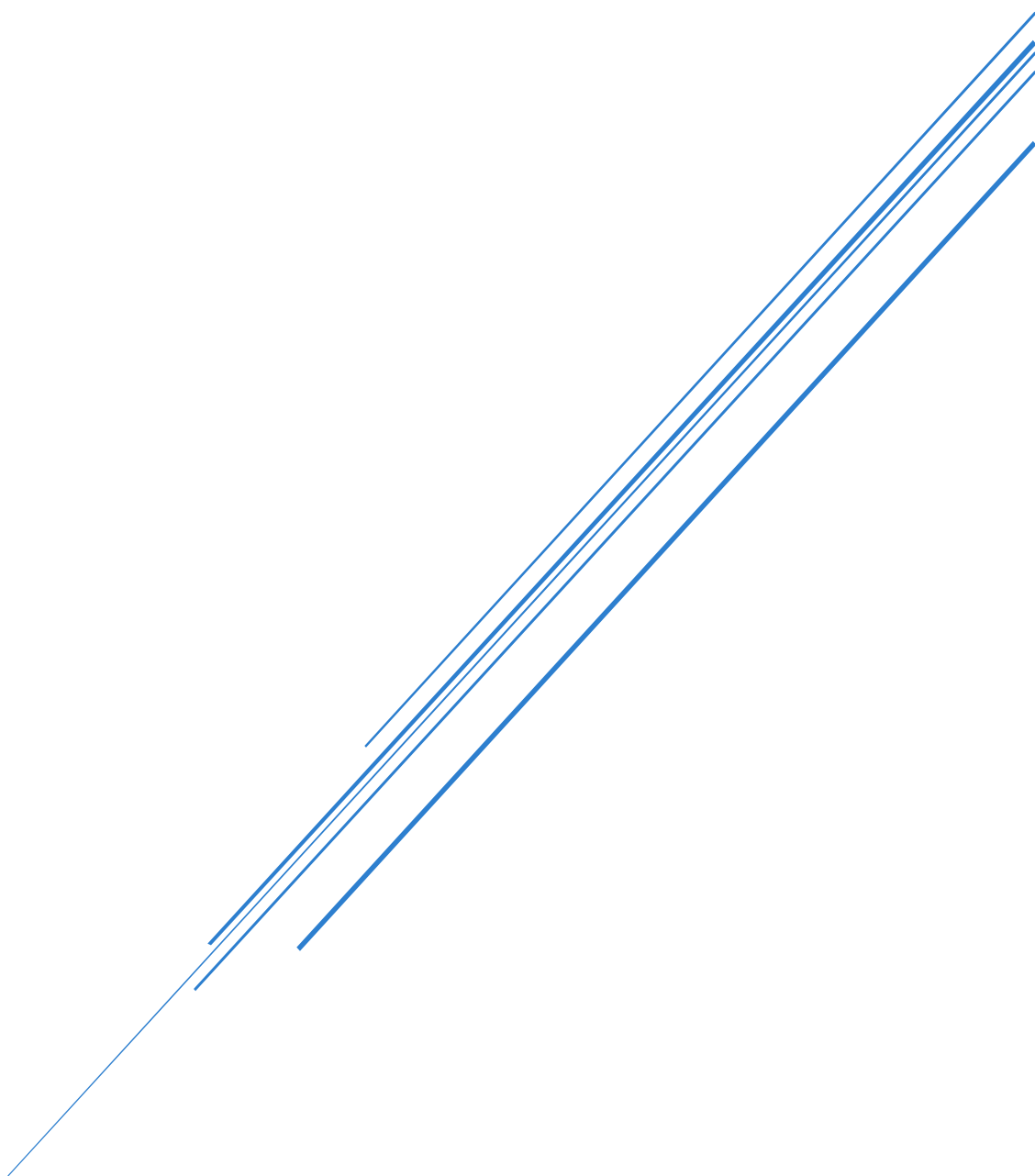


DECARBONIZATION FOR SUSTAINABILITY IN THAILAND'S PROCESS INDUSTRY

การลดคาร์บอนเพื่อความยั่งยืนสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของไทย

White Paper 2024



The Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry (TIChE)
The Petroleum and Petrochemical College (PPC), Chulalongkorn University

สารบัญ

สารบัญ.....	ก
สารบัญรูปภาพ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทสรุปผู้บริหาร.....	ช
คำนำ.....	ซ
บทที่ 1 พลิกโฉมอุตสาหกรรม: เส้นทางลดคาร์บอนสู่ความยั่งยืนในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต.....	1
บทที่ 2 สถานการณ์และนโยบายก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมการผลิต และอุตสาหกรรมเคมีในประเทศไทย.....	4
2.1) สถานการณ์และนโยบายก๊าซเรือนกระจกประเทศไทย.....	4
2.2) นโยบายต่างประเทศที่มีผลต่อการขับเคลื่อนด้านก๊าซเรือนกระจกในประเทศ.....	6
2.3) นโยบายที่สนับสนุนและกลไกขับเคลื่อนก๊าซเรือนกระจกในประเทศไทย.....	9
บทที่ 3 เทคโนโลยีการลดการปลดปล่อยคาร์บอน (Decarbonization Technologies).....	11
3.1) การแปรรูปชีวมวล (Biomass).....	11
บทบาทของชีวมวลในการบรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน.....	13
ความก้าวหน้าของนวัตกรรมเทคโนโลยี.....	15
ชีวมวลที่มีศักยภาพในประเทศไทย.....	18
ความท้าทายและแนวโน้มในอนาคต.....	19
3.2) การผลิตพลังงานไฟฟ้า (Electrification).....	22
เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบโมดูลาร์ขนาดเล็ก (Small Modular Nuclear Reactors หรือ SMRs).....	22
พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy).....	25
3.3) ไฮโดรเจน (Hydrogen).....	28
ห่วงโซ่คุณค่าของไฮโดรเจนจากการผลิตสู่การใช้งาน.....	28
การผลิตไฮโดรเจนอย่างยั่งยืน: วิธีทางและการปฏิบัติ.....	30
มุ่งสู่ความท้าทายในอนาคตของไฮโดรเจนในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต.....	33
3.4) การปรับปรุงกระบวนการ (Process Improvement).....	37
การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอย่างยั่งยืน (การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ).....	37
อุตสาหกรรม 4.0 ที่ยั่งยืน (การเปลี่ยนแปลงทางดิจิทัล).....	45

กรณีศึกษาทางอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพิ่มเติม.....	48
มุมมองความท้าทายและแนวโน้มในอนาคต	49
3.5) เทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture Utilization and Storage หรือ CCUS)	
.....	51
ความสำคัญของเทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน	51
ประโยชน์ของเทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน	51
เทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน	52
ความท้าทายและโอกาสในอนาคต.....	59
3.6) เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)	61
แนวทางการจัดการสำหรับเศรษฐกิจหมุนเวียน.....	63
ความพร้อมในประเทศไทย	70
บทที่ 4 ทิศทางเทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมกระบวนการ ของประเทศไทยอย่างยั่งยืน	
.....	71
ภาคผนวก.....	82

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 แผนภูมิแสดงสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต	1
รูปที่ 2 เทคโนโลยีการลดการปล่อยคาร์บอนสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการ	2
รูปที่ 3 ภาพรวมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมเคมี	4
รูปที่ 4 แผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ปี ค.ศ. 2021 – 2030 (พ.ศ. 2564 – 2573) โดยสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในปี ค.ศ. 2021	6
รูปที่ 5 วัตถุประสงค์เชิงมวลประเภทต่างๆ	11
รูปที่ 6 ภาพรวมของชีวมวลในฐานะวัตถุดิบในอุตสาหกรรมกระบวนการ	12
รูปที่ 7 กลยุทธ์ในการผลิตสารเคมีมูลค่าเพิ่มเชิงพาณิชย์จากฐานปิโตรเลียมและชีวภาพ	13
รูปที่ 8 การจัดหาพลังงานชีวภาพและแหล่งพลังงานชีวมวลทั่วโลกในสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ ปี 2010 - 2050'	15
รูปที่ 9 ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการแปรรูปวัตถุดิบชีวมวลสู่ผลิตภัณฑ์	15
รูปที่ 10 ความร่วมมือทางด้านเชื้อเพลิงยั่งยืนของ 2 เทคโนโลยี จากบริษัท T.EN x LanzaJet	17
รูปที่ 11 ภาพรวมของกระบวนการ UOP ECOFINING	17
รูปที่ 12 ภาพรวมกระบวนการผลิตของศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	19
รูปที่ 13 การจัดการห่วงโซ่อุปทานอย่างยั่งยืน	20
รูปที่ 14 ความพร้อมของเทคโนโลยีชีวมวล	21
รูปที่ 15 ภายในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบโมดูลาร์ขนาดเล็ก (Small Modular Nuclear Reactors หรือ SMRs)	22
รูปที่ 16 ความพร้อมของเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้า	27
รูปที่ 17 การจัดประเภทสีไฮโดรเจนโดยอิงจากวิธีการผลิตและแหล่งพลังงานที่ใช้ในการผลิต	28
รูปที่ 18 ห่วงโซ่คุณค่าของไฮโดรเจน	29
รูปที่ 19 เชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนและความต้องการก๊าซไฮโดรเจนในแต่ละภาคส่วนในแผนพัฒนาอย่างยั่งยืน	30
รูปที่ 20 แผนภาพการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงมีเทนด้วยไอน้ำ	30
รูปที่ 21 แผนภาพการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซ (Gasification)	31
รูปที่ 22 แผนภาพการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)	31
รูปที่ 23 ความพร้อมของเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจน	32
รูปที่ 24 สถานที่ตั้งการพัฒนาโครงการการผลิตไฮโดรเจนปลดปล่อยคาร์บอนต่ำ	33
รูปที่ 25 กระบวนการผลิตไฮโดรเจนสีน้ำเงินด้วยวิธีการแปรสภาพเป็นก๊าซของรอยัลดัตช์เชลล์ (Shell)	34
รูปที่ 26 ต้นทุนการผลิตไฮโดรเจนอิงจากแหล่งพลังงานในการผลิต	35
รูปที่ 27 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและต้นทุนของการผลิตไฮโดรเจนตามเทคโนโลยี	35
รูปที่ 28 การออกแบบเครื่องถ่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเทคนิค Pinch Analysis	38

รูปที่ 29 การออกแบบปรับปรุงเครื่องช่วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ของน้ำมัน	39
รูปที่ 30 ตัวอย่างแบบแผนการบูรณาการเครื่องช่วยระบบน้ำ.....	40
รูปที่ 31 ขอบเขตและหลักการสำคัญของการรวมกระบวนการ (Process Intensification)	41
รูปที่ 32 การเปรียบเทียบระหว่างการผลิตแบบดั้งเดิม (ซ้าย) และแบบผนวกรวม (ขวา) สำหรับการผลิตเมทิลแอลซีเตทของ Eastman Chemical.....	42
รูปที่ 33 เครื่องปฏิกรณ์ไมโครแชนแนลของ Velocys สำหรับการสังเคราะห์ฟิซเซอร์-ทรอปซ์	43
รูปที่ 34 ตัวอย่างการจัดเรียงรูปแบบต่าง ๆ ของ DWCs.....	43
รูปที่ 35 การพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการแบบดั้งเดิม (ซ้าย) ด้วยเทคโนโลยี Intensification (ขวา) ในรูปแบบต่างๆ.....	44
รูปที่ 36 กรอบแนวคิดของกระบวนการทำงานของเทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัล.....	45
รูปที่ 37 ตัวอย่างแสดงกระบวนการและความสัมพันธ์ในระบบการทำงานของเซ็นเซอร์อัจฉริยะ.....	46
รูปที่ 38 รูปแบบการประยุกต์ใช้งานที่เป็นไปได้ของปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด	47
รูปที่ 39 ความพร้อมของเทคโนโลยีการปรับปรุงกระบวนการ	49
รูปที่ 40 ห่วงโซ่คุณค่าของเทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน.....	51
รูปที่ 41 ตัวอย่างเทคโนโลยี CCUS ในระดับความพร้อมต่าง ๆ ในระดับชาติ.....	52
รูปที่ 42 ภาพรวมเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอน.....	54
รูปที่ 43 แผนภาพ Carbon capture, utilization and storage (CCUS).....	56
รูปที่ 44 ความสามารถในการดักจับคาร์บอนทั่วโลก ณ ปี 2021 และ 2030.....	57
รูปที่ 45 เทคโนโลยีด้านการกักเก็บคาร์บอนโดยจากบริษัท PTTEP.....	58
รูปที่ 46 แผนภาพกลุ่มอุตสาหกรรมในประเทศไทยในระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC) ในโครงการ Eastern Thailand CCS Hub.....	59
รูปที่ 47 ต้นทุนสำหรับห่วงโซ่คุณค่าของ CCS (ไม่รวมเทคโนโลยีการดักจับ) ของ US Gulf Coast.....	60
รูปที่ 48 ภาพรวมและความสำคัญของเศรษฐกิจหมุนเวียน.....	61
รูปที่ 49 โมเดล BCG ดัดแปลงจากโมเดล BCG ของกระทรวงอุตสาหกรรม	62
รูปที่ 50 วงจรการเกิดขยะพลาสติกของประเทศ.....	62
รูปที่ 51 ปริมาณการบริโภคพลาสติกแต่ละชนิดต่อการรีไซเคิลโดยประมาณต่อปี	63
รูปที่ 52 ขั้นตอนกระบวนการรีไซเคิลเชิงกล ดัดแปลงจาก กระบวนการรีไซเคิลเชิงกล ENVICCO	65
รูปที่ 53 Carbon Renewal Technology (CRT).....	66
รูปที่ 54 การรีไซเคิลขยะพลาสติกผสมด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ดัดแปลงจาก Sulzer	67
รูปที่ 55 การผลิตสไตรีนมอนอเมอร์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส.....	68
รูปที่ 56 ภาพรวมการจัดการรีไซเคิลพลาสติกด้วยวิธีต่างๆ	68
รูปที่ 57 ความพร้อมของเทคโนโลยีสำหรับเศรษฐกิจหมุนเวียน.....	70

รูปที่ 58 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของเทคโนโลยีชีวมวล	71
รูปที่ 59 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้า	71
รูปที่ 60 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของเทคโนโลยีไฮโดรเจน	72
รูปที่ 61 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของเทคโนโลยีการปรับปรุงกระบวนการ.....	72
รูปที่ 62 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของเทคโนโลยีการดักจับ การใช้ประโยชน์ และการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	72
รูปที่ 63 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของเทคโนโลยีเศรษฐกิจหมุนเวียน.....	72
รูปที่ 64 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการเพื่อตอบสนองเป้าหมายของประเทศ.....	73

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 นโยบายต่างประเทศที่มีผลต่อการขับเคลื่อนด้านก๊าซเรือนกระจกในต่างประเทศ.....	8
ตารางที่ 2 มาตรฐานการจัดกลุ่มกิจกรรมทางเศรษฐกิจ "Thailand Taxonomy".....	10
ตารางที่ 3 มูลค่าเพิ่มของวัตถุดิบสู่ผลิตภัณฑ์ชีวมวลหลังผ่านกระบวนการแปรรูป (USD/ton).....	21
ตารางที่ 4 เปรียบเทียบโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบ SMRs กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทั่วไป.....	23
ตารางที่ 5 โครงการโรงไฟฟ้าปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบโมดูลาร์ขนาดเล็ก (Small Modular Nuclear Reactors หรือ SMRs) ที่อยู่ภายใต้การก่อสร้างและภายใต้การดำเนินงาน.....	24
ตารางที่ 6 โครงการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสงเข้มข้น (Concentrated Solar Power หรือ CSP) ภายใต้การดำเนินงาน.....	26
ตารางที่ 7 โครงการที่มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการปรับปรุงกระบวนการจากงาน TNChE 2024.....	48
ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ SWOT ที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีการปรับปรุงกระบวนการและการประยุกต์ใช้งาน.....	50
ตารางที่ 9 โครงการ CCS ที่กำลังดำเนินการในประเทศไทย.....	58
ตารางที่ 10 ตัวอย่างความพร้อมของกระบวนการรีไซเคิลต่อเม็ดพลาสติกชนิดต่างๆ.....	70
ตารางที่ 11 แผนพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก.....	82

บทสรุปผู้บริหาร

อุตสาหกรรมกระบวนการ (Process Industry) ของไทยเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ จากรายงานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกพบว่าอุตสาหกรรมดังกล่าวมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกคิดเป็นร้อยละ 7 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่เกิดขึ้นในประเทศ เพื่อตอบสนองเป้าหมายต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ควบคู่ไปกับการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับต่างประเทศ อุตสาหกรรมกระบวนการจึงจำเป็นต้องมุ่งเน้นไปที่การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วยการนำเทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ รายงานการศึกษานี้นำเสนอภาพรวมของเทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ตลอดจนความพร้อมของระดับเทคโนโลยี สถานการณ์และนโยบายกสนับสนุน และทิศทางเทคโนโลยีที่ขับเคลื่อนการเปลี่ยนแปลงนี้

รายงานการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงการนำเทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาใช้ในอุตสาหกรรมกระบวนการของไทย ได้แก่ เทคโนโลยีในการพัฒนาและปรับเปลี่ยนกระบวนการเพื่อลดการใช้พลังงานและการเกิดของเสียอย่างมีประสิทธิภาพ การเปลี่ยนผ่านวัตถุดิบและเชื้อเพลิงจากฟอสซิลไปเป็นชีวมวลและพลังงานหมุนเวียน และการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมกระบวนการเดิม โดยเริ่มต้นจากการใช้วัตถุดิบที่ยั่งยืน เช่น ชีวมวล (Biomass) เพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล การเพิ่มการใช้เทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานนิวเคลียร์ไร้การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า (Electrification) นอกจากนี้รายงานฯ นำเสนอความสำคัญเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen) ซึ่งเป็นแหล่งเชื้อเพลิงคาร์บอนต่ำ การปรับปรุงกระบวนการ (Process Improvement) ที่สนับสนุนให้เกิดการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและก่อให้เกิดของเสียจากกระบวนการผลิตให้น้อยที่สุด การใช้เทคโนโลยีการดักจับ การใช้ประโยชน์ และการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Capture, Utilization and Storage หรือ CCUS) เพื่อนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์หรือเก็บกลับ (อย่างกึ่งถาวร) ในแหล่งกักเก็บปิโตรเลียม และเทคโนโลยีที่สนับสนุนต่อเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) จากการลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรผ่านกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบรรลุเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยในอนาคต

อุตสาหกรรมกระบวนการของไทยต้องดำเนินการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยี เพื่อบรรลุเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 30 – 40 ในปี ค.ศ. 2030 ความเป็นกลางทางคาร์บอน ในปี ค.ศ. 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ ภายในปี ค.ศ. 2065 ซึ่งเริ่มจากการการใช้เทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อาทิ การปรับปรุงกระบวนการเดิมให้มีประสิทธิภาพสูงสุด การสนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนให้มีของเสียเกิดขึ้นน้อยที่สุด การเปลี่ยนผ่านการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นพลังงานหมุนเวียน การเปลี่ยนผ่านวัตถุดิบและสารตั้งต้นเป็นชีวมวล การวางโครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีไฮโดรเจนและการดูดซับ รวมถึงการใช้ประโยชน์และการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มาประยุกต์ร่วมกับเทคโนโลยีเดิม ดังนั้นความร่วมมือระหว่างรัฐบาล ภาคเอกชน ประชาคม และองค์กรระหว่างประเทศเป็นสิ่งสำคัญในการขับเคลื่อนความพยายามเหล่านี้ไปข้างหน้า ด้วยการพัฒนาและนำใช้เทคโนโลยีฯ อย่างต่อเนื่อง ประเทศไทยจะสามารถเปลี่ยนผ่านสู่อุตสาหกรรมกระบวนการให้ปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการมีส่วนร่วมในการฟื้นฟูสภาพภูมิอากาศโลกและก้าวสู่ความยั่งยืนในระดับสากล

คำนำ

ปรากฏการณ์ภูมิอากาศโลกเดือด เนื่องจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (เรียกสั้นๆว่า คาร์บอน เพราะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก) จากทั่วโลกไปสะสมในชั้นบรรยากาศกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกำลังจะเพิ่มเกินค่าวิกฤติ 1.5 – 2.0 องศาที่ภูมิอากาศโลกจะสามารถฟื้นคืนสภาวะเดิม ได้ทำให้ทั่วโลกตื่นตัวและหลายประเทศได้ตั้งเป้าหมายในการลดการปล่อยคาร์บอน (Decarbonization) จนเป็นกลาง (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050 รวมทั้งกรณีของประเทศไทย

อุตสาหกรรมกระบวนการ (Process Industries) ซึ่งเป็นกลุ่มอุตสาหกรรมหนักที่เน้นการผลิตวัสดุภัณฑ์ โดยวัตถุดิบผ่านกระบวนการแปรรูปต่างๆ ทั้งทางเคมีและกายภาพ จนได้เป็นสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ เช่น อุตสาหกรรมเคมี ปิโตรเลียม ปิโตรเคมี พลาสติก และซีเมนต์ เป็นต้น มีความสำคัญมาก ทั้งในแง่ของ เศรษฐกิจและความอยู่ดีและสะดวกสบายของประชาชน ในปี 2024 มูลค่าเพิ่มของตลาดอุตสาหกรรมเคมีโลก มีสูงถึง 900 พันล้านเหรียญสหรัฐ (12.8 พันล้านเหรียญสหรัฐ สำหรับตลาดไทย) ส่วนในแง่ของการปล่อยคาร์บอน อุตสาหกรรมเคมี มีส่วนถึงร้อยละ 5 – 6 ของการปล่อยคาร์บอนทั่วโลก จึงมีบทบาทสำคัญในการบรรลุเป้าหมายการปล่อยคาร์บอนเป็นกลาง

สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย (TICHe) จัดตั้งอย่างเป็นทางการเมื่อปี พ.ศ. 2539 เพื่อเป็นเครือข่ายของวิศวกรเคมีและนักเคมีประยุกต์ สร้างความร่วมมือระหว่างภาคการศึกษา ภาครัฐและภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งสนับสนุนและเผยแพร่ความรู้ด้านวิชาการและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเคมีและกระบวนการ ในช่วง 3 ปีที่ผ่านมา สมาคมฯ ได้จัดงานประชุมวิชาการและนิทรรศการนานาชาติ Thailand International Chemical Engineering & Chemical Technology (TNChE Asia 2022, 2023, 2024) ซึ่งนับเป็นหนึ่งในงานที่ยิ่งใหญ่ของเอเชียที่เน้นธีมหลักด้าน Decarbonization เพื่อสนับสนุนและเผยแพร่องค์ความรู้ ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและนวัตกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยวิทยากรจากภาครัฐ ภาคอุตสาหกรรม และภาคการศึกษา รวมทั้งการแสดงผลนิทรรศการจากบริษัทเจ้าของเทคโนโลยีจากนานาประเทศด้วย

ด้วยเหตุข้างต้น นายกสมาคม และคณะกรรมการบริหาร TICHe จึงมีความริเริ่มในการจัดทำสมุดปกขาว (White Paper) เพื่อเผยแพร่องค์ความรู้ ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและนวัตกรรม รวมทั้งข้อเสนอแนะ สำหรับสมาชิกสมาคมฯ ตลอดจนวิศวกร นักวิชาการ และบุคลากรในภาคส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องของประเทศ ซึ่งฉบับปฐมฤกษ์นี้ จัดทำขึ้นภายใต้หัวข้อ “Decarbonization for Sustainability of Process Industries” โดยได้รับความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีจาก

(1) ทีมคณาจารย์และนิสิตบัณฑิตศึกษา วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นผู้ค้นคว้า รวบรวม และวิเคราะห์ข้อมูลทั้งจาก proceedings ของ TNChE Asia (2022 – 2024) และแหล่งข้อมูลอ้างอิงต่างๆ และจัดเตรียมเป็นสมุดปกขาวโดยการว่าจ้างของ TICHe

(2) คณะทำงานด้าน White Paper ของสมาคมฯ เป็นผู้วางแผนและจัดทำ TOR เสาะหาทีมมาจัดทำ และติดต่อประสานงาน รวมทั้งร่วมประชุมให้ความเห็นและติดตามความก้าวหน้าของงาน ตลอด 7 – 8 เดือนที่ผ่านมา และ

(3) คณะทำงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สถาบันปิโตรเลียมและพลังงานแห่งประเทศไทย (PEIT) ที่ช่วยวิพากษ์ และให้ข้อเสนอแนะต่อเนื้อหาฉบับร่างของสมุดปกขาวนี้

ท้ายที่สุดนี้ สมาคมฯ หวังว่า White Paper 2024 “Decarbonization for Sustainability of Process Industries” ฉบับปฐมฤกษ์นี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านทุกท่าน และมีส่วนช่วยให้อุตสาหกรรมเคมีและกระบวนการของประเทศ ก้าวสู่เป้าหมายการปล่อยคาร์บอนเป็นกลางในภาคส่วนที่เกี่ยวข้องได้สำเร็จ ตามกำหนดเวลาที่ประเทศไทยได้แสดงเจตจำนงไว้

นาย สุรเชษฐ์ ชโลธร

นายก สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย (TICHe)

พฤศจิกายน พ.ศ. 2567

รายชื่อคณะทำงาน สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย

- | | |
|---|----------------------|
| 1. คุณสุรเชษฐ์ ชโลธร | ที่ปรึกษาคณะทำงาน |
| 2. ศ.กิตติคุณ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล | ประธานคณะทำงาน |
| 3. รศ. ดร. ชำรงรัตน์ มุ่งเจริญ | คณะทำงาน |
| 4. ผศ. ดร. ชลิตา คล้ายโสม | คณะทำงาน |
| 5. ดร. เรืองศักดิ์ ฐิติรัตน์สกุล | คณะทำงาน |
| 6. คุณเกศินี เกียรติประดับ | คณะทำงาน |
| 7. คุณบำรุง สูงเนิน | คณะทำงาน |
| 8. คุณกานตพันธ์ ปุณณอนันต์ | คณะทำงานและเลขานุการ |

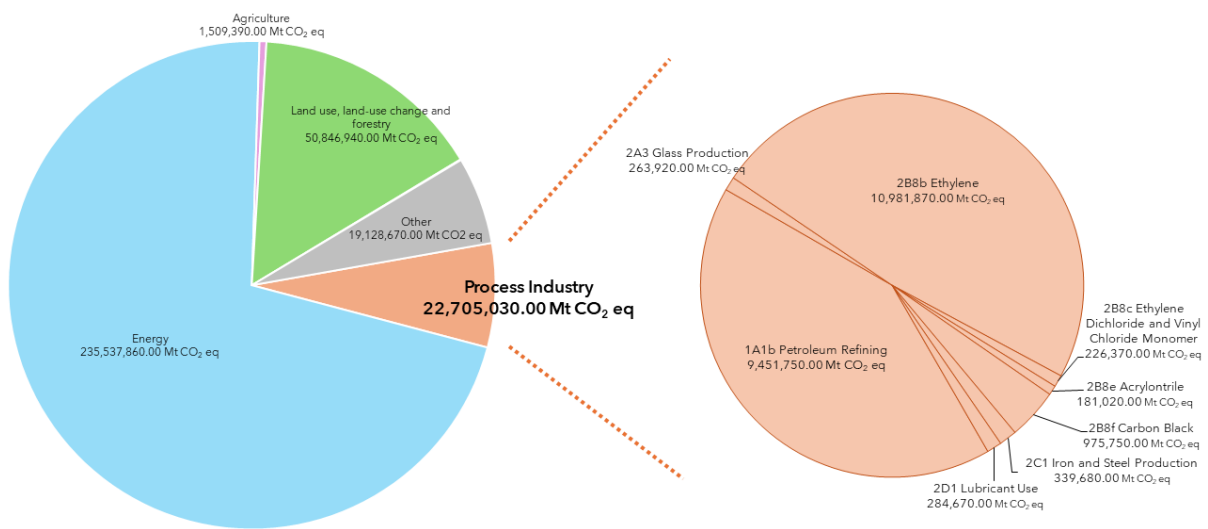
รายชื่อคณะทำงาน วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- | | |
|------------------------------------|----------------------|
| 1. ผศ. ดร.อุทัยพร สุริยประภาติลก | หัวหน้าคณะทำงาน |
| 2. รศ. ดร.ธัญญลักษณ์ ฉายสุวรรณ | ผู้ประสานงานคณะทำงาน |
| 3. ผศ. ดร.อัมพิรา เจริญแสง | คณะทำงาน |
| 4. อ. ดร. ภูมินทร์ ถานอานา | คณะทำงาน |
| 5. อ. ดร. ณัฐพงศ์ ชี้อวีริย์พันธุ์ | คณะทำงาน |
| 6. นายสิทธิเกียรติ บุญชู | คณะทำงาน |
| 7. นายชากรณ์ วิริยะกุล | คณะทำงาน |
| 8. นายวีรวิทย์ ลีอวนิวงษ์ | คณะทำงาน |
| 9. นางสาวแคทรียา สระสำราญ | คณะทำงาน |
| 10. นายประพันธ์ ทองลอย | คณะทำงาน |

บทที่ 1

พลิกโฉมอุตสาหกรรม: เส้นทางลดคาร์บอนสู่ความยั่งยืนในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต

ด้วยสถานการณ์วิกฤตการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศหรือโลกร้อนที่เป็นประเด็นร่วมในหลายประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย ทำให้การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นพันธกิจสำคัญต่อการมีส่วนร่วมในการแก้ปัญหาวิกฤตสภาพภูมิอากาศ ซึ่งภาคอุตสาหกรรมการผลิต เป็นภาคส่วนสำคัญที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และต้องมีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉพาะจากกลุ่มอุตสาหกรรม เคมีภัณฑ์ ปิโตรเคมี ซีเมนต์ และเหล็ก ให้ได้ตามเป้าหมาย ดังนั้นเทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงมีบทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการบรรลุเป้าหมายการแก้ปัญหาโลกร้อนอย่างยั่งยืนต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1 แผนภูมิแสดงสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต¹

ประเทศไทยได้ตั้งเป้าหมายเพื่อบรรลุความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ.2050 (พ.ศ. 2593) และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero GHG Emissions) ภายในปี ค.ศ.2065 (พ.ศ.2608) โดยกำหนดเป้าหมายการดำเนินการลดก๊าซเรือนกระจกภายในประเทศ (Unconditional NDC) ที่ร้อยละ 30 และกรณีประเทศไทยได้รับการสนับสนุนการดำเนินการลดก๊าซเรือนกระจกจากต่างประเทศ (Conditional NDC) ร้อยละ 40 จากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกกรณีดำเนินการปกติ (Business-as-Usual หรือ BAU) ภายในปี ค.ศ. 2030² (พ.ศ.2573) การใช้พลังงานในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เป็นด้านที่มีความพร้อมและมีศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจกให้ได้ตามเป้าหมายการมีส่วนร่วมที่ประเทศกำหนด (Nationally Determined Contributions หรือ NDCs)

¹ "Thailand's long-term low greenhouse gas emission development strategy" (Thailand: Ministry of Natural Resources and Environment, November 2022), accessed July 19, 2024.

² สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (สผ.) เป็นผู้จัดทำ NDC ของประเทศไทย โดยกรณีปกติ หรือ Business-as-Usual (BAU) หมายถึง กรณีที่ไม่มีการดำเนินการลดก๊าซเรือนกระจก (ที่มาก NDC (Nationally Determined Contribution))

เทคโนโลยีการลดการปล่อยคาร์บอนสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการ



รูปที่ 2 เทคโนโลยีการลดการปล่อยคาร์บอนสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการ

จากนโยบายในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เกิดการพัฒนาระบบเทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Decarbonization Technology) ที่หลากหลายเพื่อให้ครอบคลุมตลอดห่วงโซ่ของการผลิตและการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยในรายงานการศึกษานี้ ได้จัดหมวดหมู่เทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็น 6 ด้าน ได้แก่ 1) การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานผ่านการปรับปรุงกระบวนการ (Process Improvement) โดยใช้เทคโนโลยีต่างๆ มาบูรณาการ 2) การผสมผสานการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนและพลังงานทางเลือกอื่นๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานนิวเคลียร์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า (Electrification) เพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล 3) การใช้วัตถุดิบการผลิตและทรัพยากรจากแหล่งชีวมวล (Biomass) เช่น ชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้และของเสียจากการเกษตร รวมถึงผลพลอยได้และของเสีย เพื่อนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง 4) เทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen) ซึ่งเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ เช่น ไฮโดรเจนสีเขียว (Green Hydrogen) ที่ผลิตโดยใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนผ่านกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า เป็นทางเลือกที่นำมาทดแทนวิธีการผลิตไฮโดรเจนแบบดั้งเดิมที่พึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น กระบวนการรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำ (Steam Methane Reforming) หรือกระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซ (Gasification) รวมถึงการเปลี่ยนผ่านไฮโดรเจนสีเทา (Grey Hydrogen) เป็นไฮโดรเจนสีน้ำเงิน (Blue Hydrogen) ด้วยเทคโนโลยี CCUS ที่มีศักยภาพที่จะเกิดขึ้นได้ในประเทศ 5) เทคโนโลยีการดักจับ การใช้ประโยชน์ และการกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture, Utilization, and Storage หรือ CCUS) ที่สามารถดักจับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม ตามด้วยการกักเก็บใต้ดินหรือนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการอุตสาหกรรมหรือผลิตภัณฑ์ ที่ทำให้อุตสาหกรรมและเศรษฐกิจเติบโตอย่างยั่งยืน 6) เทคโนโลยีที่สนับสนุนต่อแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ด้วยการส่งเสริมการนำกลับมาใช้ใหม่ การแปรสภาพ และการเพิ่มมูลค่าในกระบวนการ เน้นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและลดของเสียจากกระบวนการผลิต

รายงาน (White Paper) ฉบับนี้ จะกล่าวถึงศักยภาพของเทคโนโลยีการลดการปล่อยคาร์บอนในอุตสาหกรรม กระบวนการของประเทศไทย นอกจากนี้ยังกล่าวถึงความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี อีกทั้งมาตรการเชิงนโยบาย และปัจจัยทาง เศรษฐกิจที่จำเป็นสำหรับการเปลี่ยนผ่านของเทคโนโลยีนี้ ด้วยการนำเสนอกรณีศึกษาที่ประสบความสำเร็จและแนวปฏิบัติจาก ต่างประเทศ รายงานฉบับนี้มุ่งหวังที่จะให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีคุณค่า ข้อเสนอแนะ และแนวทางการประยุกต์ใช้แก่ผู้ ภาคอุตสาหกรรม ภาครัฐ สถาบันการศึกษา ประชาชนทั่วไป และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่มุ่งมั่นในการส่งเสริมอนาคตที่ยั่งยืน ของอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตในประเทศไทย

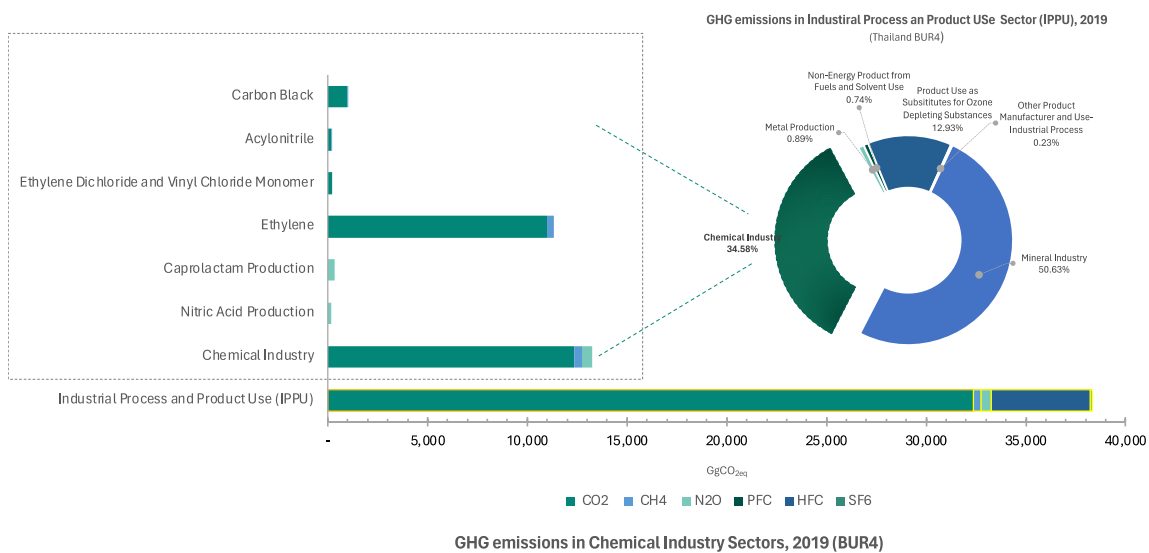
บทที่ 2

สถานการณ์และนโยบายก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมการผลิต และอุตสาหกรรมเคมีในประเทศไทย

2.1) สถานการณ์และนโยบายก๊าซเรือนกระจกประเทศไทย

ปัจจุบัน ประเทศไทยได้อยู่ภายใต้เป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกที่ได้เสนอไว้กับประชาคมโลก การมีส่วนร่วมที่ประเทศกำหนด (Nationally Determined Contribution หรือ NDC) ซึ่งฉบับล่าสุดฉบับปรับปรุง ครั้งที่ 2 (2nd Updated NDC)³ เป็นการยกระดับเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ จากเดิมร้อยละ 20 - 25 เป็นร้อยละ 30 สำหรับการดำเนินการลดก๊าซเรือนกระจกภายในประเทศ (Unconditional NDC) และร้อยละ 40 สำหรับกรณีที่ประเทศไทยได้รับการสนับสนุนการดำเนินการลดก๊าซเรือนกระจกจากต่างประเทศ (Conditional NDC) จากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกกรณีดำเนินการตามปกติ (Business as Usual หรือ BAU) ในปีฐาน ค.ศ.2005 (พ.ศ.2548) ภายในปี ค.ศ.2030 (พ.ศ.2573)

การคาดการณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2030 อยู่ที่ประมาณ 555 Mt CO₂ eq จากกรณีดำเนินการตามปกติ จากรายงานความก้าวหน้ารายสองปี ฉบับที่ 4 (Fourth Biennial Update Report หรือ BUR4)⁴ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ (Industrial Process and Product Uses หรือ IPPU) ในปี ค.ศ.2019 คิดเป็น 32.81 Mt CO₂ eq โดยในกลุ่มอุตสาหกรรมเคมี (Chemical Industry) คิดเป็นร้อยละ 34.58 ของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3



ที่มาข้อมูล: รายงานความก้าวหน้ารายสองปี ฉบับที่ 4 (Fourth Biennial Update Report หรือ BUR4) สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

รูปที่ 3 ภาพรวมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมเคมี

³ การมีส่วนร่วมที่ประเทศกำหนด ฉบับปรับปรุง ครั้งที่ 2. สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม (สผ.)

⁴ รายงานความก้าวหน้ารายสองปี ฉบับที่ 4 (Fourth Biennial Update Report: BUR4) สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

สำหรับประเทศไทยได้จัดทำแผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ปี ค.ศ. 2021 – 2030 (Thailand's Nationally Determined Contribution Roadmap on Mitigation 2021-2030)⁵ ดังแสดงในรูปที่ 4 ภายในปี 2030 ได้ตั้งเป้าการลดก๊าซเรือนกระจกให้ได้ร้อยละ 30 - 40 จากกรณีดำเนินการตามปกติ (BAU) โดยประมาณคิดเป็น 222 Mt CO₂ eq โดยสาขากระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ (Industrial Process and Product Uses หรือ IPPU) คิดเป็นร้อยละ 0.5 (1.1 Mt CO₂ eq) โดยวางมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกสำหรับสาขากระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์⁶ ไว้ 2 มาตรการหลัก คือ การใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดและการปรับเปลี่ยนสารทำความเย็น นอกจากนี้มาตรการที่เกี่ยวข้องกับภาคการผลิตของอุตสาหกรรม สำหรับสาขาพลังงานและการขนส่ง⁷ คือ มาตรการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและมาตรการใช้พลังงานทดแทนในอุตสาหกรรม ซึ่งคิดเป็นประมาณ 43 Mt CO₂ eq

นอกจากนี้ไทยได้มีการจัดทำยุทธศาสตร์ระยะยาวในการพัฒนาแบบปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำของประเทศ ฉบับปรับปรุง (LT-LEDS, Revised version)⁸ โดยมีเป้าหมายที่มุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน ในปี ค.ศ. 2050 โดยมีแนวทางที่สำคัญสำหรับภาคอุตสาหกรรมเพิ่มเติม คือ การขับเคลื่อนโมเดลเศรษฐกิจหมุนเวียนสีเขียว (Bio-Circular Green หรือ BCG) เพื่อการเติบโตที่ยั่งยืน การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน การปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การสร้างแรงจูงใจและสนับสนุนการใช้พลังงานหมุนเวียน การวิจัย พัฒนา และประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการดักจับและการกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Storage หรือ CCS) เน้นการจัดการของเสียต้นทาง การเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน และการจัดการน้ำเสียอุตสาหกรรม เป็นต้น นอกจากนี้ในส่วนของยุทธศาสตร์ชาติ LT-LEDS ยังสนับสนุนการสร้างความเป็นหุ้นส่วนและการส่งเสริมดำเนินงาน ในด้านการกำหนดกรอบนโยบายและกฎหมาย การสร้างแรงจูงใจในการลงทุนที่ปล่อยคาร์บอนต่ำ การมีโครงสร้างตลาดพื้นฐานคาร์บอน การขับเคลื่อนการดำเนินงานการดักจับและการกักเก็บคาร์บอน เป็นต้น จะเห็นได้ว่าแรงผลักดันเชิงนโยบายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรม พลังงาน และของเสีย มีบทบาทต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก จึงทำให้ส่วนใหญ่แล้วเทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือคาร์บอน (Decarbonization Technology) จะมุ่งเน้นส่วนของจัดการด้านพลังงานและเชื้อเพลิงที่เป็นวัตถุดิบหรือทรัพยากรของการผลิต การจัดการกระบวนการผลิตตลอดจนของเสียที่เกิดขึ้น ดังนั้นนโยบายและแผนยุทธศาสตร์ประเทศจึงเป็นกลไกสำคัญในการกำหนดความเป็นไปได้ของเทคโนโลยีสำหรับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปแบบต่างๆ สำหรับอนาคต

⁵ แผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2564 – 2573 (Thailand's Nationally Determined Contribution Roadmap on Mitigation 2021 - 2030). สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

⁶ แผนปฏิบัติการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2564 - 2573 สาขากระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ รวมถึงน้ำเสียอุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม

⁷ แผนปฏิบัติการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2564 - 2573 สาขาพลังงาน. กระทรวงพลังงาน

⁸ ยุทธศาสตร์ระยะยาวในการพัฒนาแบบปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำของประเทศ ฉบับปรับปรุง (Thailand's Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy: LT-LEDS, Revised version) สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 18 ตุลาคม 2565

3) นโยบายส่งเสริมการวิจัยและพัฒนา (Research and Development Policy) เป็นนโยบายที่ภาครัฐจะเข้าไปส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก สามารถแก้ปัญหาได้ในระยะยาว ตัวอย่างของนโยบายกลุ่มนี้ที่สำคัญ เช่น การส่งเสริมการลงทุนในพลังงานหมุนเวียน หรือลงทุนในเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ เป็นต้น

กลไกปรับคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดน(ของสหภาพยุโรป)

(Carbon Border Adjustment Mechanisms หรือ CBAM)

มาตรการ CBAM ได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงที่ผ่านมา เพราะนับเป็นครั้งแรกที่จะมีการเก็บภาษีสินค้านำเข้าที่มีการปล่อยคาร์บอนสูง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งเพื่อบรรลุเป้าหมาย Net Zero Emission ของสหภาพยุโรปโดยตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2023 ซึ่งผู้นำเข้าสินค้าเป้าหมาย 6 กลุ่ม ได้แก่ ซีเมนต์ ไฟฟ้า ปูน เหล็กและเหล็กกล้า อะลูมิเนียม และไฮโดรเจน เคมีภัณฑ์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นบางตัว และผลิตภัณฑ์ปลายน้ำบางตัวที่กำหนด (อาจมีการพิจารณาประกาศรายการสินค้าในกลุ่มเคมีภัณฑ์ อินทรีย์และพอลิเมอร์เพิ่มเติม ก่อนปี 2026) จะต้องรายงานปริมาณการนำเข้า รวมถึงปริมาณการปล่อยคาร์บอนทางตรงและทางอ้อม (Embedded Emission – Scope 1 and Scope 2) ของสินค้า และ CBAM จะมีผลบังคับใช้อย่างเต็มรูปแบบในวันที่ 1 มกราคม 2026 ซึ่งผู้นำเข้าจะต้องซื้อ CBAM Certificate ตามปริมาณการนำเข้าและปริมาณการปล่อยคาร์บอนของสินค้า

นโยบายต่างประเทศที่สนับสนุนต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

สหภาพยุโรปนับได้ว่าเป็นผู้นำในระดับโลกด้านการจัดการกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก จึงกำหนดนโยบาย แผนการปฏิรูปสีเขียว (European Green Deal) ซึ่งตั้งเป้าลดก๊าซเรือนกระจกสุทธิได้อย่างน้อย 55% ภายในปี ค.ศ. 2030 เมื่อเทียบกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกในปี ค.ศ. 1990 โดยภายใต้ European Green Deal มีนโยบายและมาตรการสำคัญ เช่น การพัฒนาตลาดซื้อขายการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Trading Scheme หรือ ETS) การกำหนดอัตราภาษีธุรกิจที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การกำหนดสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเป็น 40% การกำหนดนิยามกิจกรรมของธุรกิจที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Taxonomy) การเก็บภาษีคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดน (Carbon Border Adjustment Mechanism หรือ CBAM)

ส่วนประเทศสหรัฐอเมริกา นโยบายภาครัฐอาจยังไม่มีความชัดเจนต่อการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเมื่อเทียบกับสหภาพยุโรป แต่มีกฎหมายหลายฉบับที่มีจุดประสงค์เพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน เช่น Inflation Reduction Act (IRA) ที่ส่งเสริมการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และให้ผู้บริโภคนำมาใช้พลังงานสะอาดผ่านการใช้นโยบายภาษี เช่น การให้เครดิตภาษีให้กับผู้ประกอบการที่ปรับมาใช้พลังงานทดแทน เครดิตภาษีเมื่อซื้อรถยนต์ไฟฟ้า และเงินอุดหนุนราคาแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาบ้าน นอกจากนี้ กฎหมายที่อยู่ระหว่างการพิจารณา ได้แก่ Clean Competition Act (CCA) ที่จะจัดเก็บภาษีคาร์บอนบนสินค้าทั้งที่ผลิตในประเทศและนำเข้าที่ปล่อยคาร์บอนเกินกว่าค่าเฉลี่ยของอุตสาหกรรมเพื่อสร้างการแข่งขันที่เป็นธรรมและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมยิ่งขึ้น

ประเทศในแถบเอเชียต่างก็ให้ความสำคัญกับยุทธศาสตร์สีเขียวมากขึ้นเช่นกัน เช่น จีน ได้บรรจุประเด็นการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ 5 ปี ในฉบับที่ 14 (ปี 2021 - 2025) และยังคงเริ่ม

จัดตั้งตลาดซื้อขายโควตาการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (China ETS) เมื่อปี 2021 เพื่อสนับสนุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรม และมีการกำหนด Green Bond Principles ในปี 2022 สิงคโปร์มีนโยบายขับเคลื่อนในระดับชาติคือ Singapore Green Plan 2030 มุ่งเน้นการพัฒนาที่ยั่งยืน ซึ่งมีเป้าหมายครอบคลุมการใช้พลังงานสะอาด ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่ง และเป็นศูนย์กลางทางการเงินสีเขียว (Green Finance) ของเอเชีย เพื่อการเปลี่ยนผ่านสู่อนาคตที่ยั่งยืน เกาหลีใต้มีนโยบาย Green New Deal ที่ให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานหมุนเวียนและการเดินทางสีเขียวที่สนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์แห่งอนาคต และการลงทุนเพื่อนวัตกรรมสีเขียว และญี่ปุ่นได้มีนโยบาย Green Growth Strategy ที่มุ่งขับเคลื่อนการเปลี่ยนผ่านใน 3 ภาคส่วน ได้แก่ 1) ภาคพลังงาน เช่น สนับสนุนเชื้อเพลิงไฮโดรเจน และเชื้อเพลิงแอมโมเนีย 2) ภาคการขนส่ง/อุตสาหกรรม เช่น ยานยนต์ไฟฟ้า และการนำคาร์บอนกลับมาใช้ใหม่ และ 3) ภาคครัวเรือน/สำนักงาน เช่น การใช้วัสดุหมุนเวียน โดยตั้งเป้าหมายเป็น

ตารางที่ 1 นโยบายต่างประเทศที่มีผลต่อการขับเคลื่อนด้านก๊าซเรือนกระจกในต่างประเทศ

ภูมิภาค/ ประเทศ	นโยบายกำหนดและการควบคุม (Command and Control Policy)	นโยบายอิงกลไกตลาด (Market-based Policy)	นโยบายส่งเสริมการวิจัยและพัฒนา (Research and Development Policy)
EU	<ul style="list-style-type: none"> - 2nd Renewable Energy Directive (REDII) - EU Hydrogen Strategy - Waste Framework Directive - Circular Economy Action Plan 	<ul style="list-style-type: none"> - EU-ETS - EU-Green Deal - EU-CBAM 	<ul style="list-style-type: none"> - Innovation Fund - ETS Innovation Fund - Connecting Europe Facility (CEF)
UK	<ul style="list-style-type: none"> - Industrial Decarbonization Strategy - Hydrogen Strategy - Biomass and Waste Processing (BECCUS) 	<ul style="list-style-type: none"> UK ETS Environmental Tax 	<ul style="list-style-type: none"> - Biomass - Feedstocks - Innovation Program - Net Zero - Hydrogen Fund
US	<ul style="list-style-type: none"> - Inflation Reduction Act (IRA) - Clean Competition Act (CCA) 	<ul style="list-style-type: none"> Carbon Credit Market (Industry) 	
China	<ul style="list-style-type: none"> - Green Bond Principles 	<ul style="list-style-type: none"> China ETS 	
Japan	<ul style="list-style-type: none"> - Green Growth Strategy - Basic Hydrogen Strategy 2023 - 6th Strategic Energy Plan - Carbon Recycling (CCS/CCU) 	<ul style="list-style-type: none"> Carbon Credit Market 	
Korea	<ul style="list-style-type: none"> - Green New Deal 		
Singapore	<ul style="list-style-type: none"> - Singapore Green Plan 2030 		
Thailand	<ul style="list-style-type: none"> - Thailand's Long-Term-Low Emission Development Strategy, 2022 - Thailand's PDP 2024 - Energy Efficiency Plan (EEP) 2024 (Draft) - Alternative Energy Development Plan (ADEP) 2024 (Draft) 	<ul style="list-style-type: none"> - Carbon Trade: Voluntary Carbon Market (T-Ver) 	<ul style="list-style-type: none"> The Energy Conservation (ENCON) Fund

2.3) นโยบายที่สนับสนุนและกลไกขับเคลื่อนก๊าซเรือนกระจกในประเทศไทย

นโยบายการลดก๊าซเรือนกระจกของไทยที่ระบุไว้ในแผนปฏิบัติการ ภายใต้แผนที่นำทางลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ปี ค.ศ. 2021 – 2030 เมื่อเทียบกับต่างประเทศแล้ว มีครอบคลุมทั้ง 3 รูปแบบเช่นเดียวกัน ได้แก่

- 1) นโยบายกำหนดและควบคุม เช่น การใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ด และการปรับเปลี่ยนสารทำความเย็น และการส่งเสริมอุตสาหกรรมตามแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียนสีเขียว (BCG) เป็นต้น
- 2) นโยบายที่อิงกลไกตลาด ได้แก่ โครงการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจตามมาตรฐานของประเทศไทย (T-VER)¹⁰ สำหรับภาคเอกชนให้สามารถเข้ามาซื้อขายแลกเปลี่ยนคาร์บอนเครดิตได้อย่างอิสระ แต่ยังไม่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากตลาดคาร์บอนเครดิตของไทยเป็นแบบสมัครใจ (Voluntary Carbon Market) เป็นตลาดที่สร้างขึ้นโดยไม่มีกรอบบังคับใช้กฎหมาย ส่วนใหญ่จึงมีเพียงกลุ่มธุรกิจเอกชนขนาดใหญ่ในไทยที่ตระหนักถึงความจำเป็นและประโยชน์ของการเข้าร่วมโครงการดังกล่าว
- 3) นโยบายส่งเสริมการวิจัยและพัฒนา ได้แก่ ทุนวิจัยและพัฒนาจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และหน่วยงานรัฐต่างๆ การส่งเสริมพลังงานหมุนเวียนในประเทศและการส่งเสริมการผลิตรถยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น

ปัจจุบัน ภาครัฐอยู่ระหว่างการพิจารณา ร่าง พ.ร.บ. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ¹¹ เพื่อจัดการปัญหาด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของไทย ซึ่งได้กำหนดโครงสร้างเชิงสถาบัน หน้าที่และอำนาจของหน่วยงานรัฐ ผ่านการจัดตั้งคณะกรรมการนโยบายการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศแห่งชาติ นอกจากนี้ ร่าง พ.ร.บ. ยังกำหนดให้มีการจัดทำมาตรฐานการจัดกลุ่มกิจกรรมทางเศรษฐกิจ “Thailand Taxonomy”¹² การกำหนดนิยามและจัดหมวดหมู่กิจกรรมในภาคเศรษฐกิจที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นมาตรฐานเดียวกันเพื่อใช้ในการประเมินว่า กิจกรรมใดเข้าข่ายเป็นการดำเนินธุรกิจที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมเพื่อช่วยในการประเมินกิจกรรมการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างโปร่งใส มีแผนการจัดตั้งกองทุนการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เพื่อสามารถนำไปใช้จ่ายเพื่อดำเนินงานต่างๆ และมีแนวทางในการผลักดันมาตรการการลดก๊าซเรือนกระจกที่อิงกลไกตลาดให้ใช้แพร่หลายในประเทศไทยมากขึ้น ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นจุดเริ่มต้นที่จะช่วยให้ไทยสามารถดำเนินนโยบายการลดก๊าซเรือนกระจกในระยะต่อไปในอนาคตอย่างมีประสิทธิภาพ

¹⁰ T-VER (Thailand Voluntary Emission Reduction Program) คือ โครงการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจตามมาตรฐานของประเทศไทย (Thailand Voluntary Emission Reduction Program: T-VER) คือ โครงการลดก๊าซเรือนกระจกที่องค์กรบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.)

¹¹ สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร สำนักวิชาการ กลุ่มงานบริการวิชาการ 3; อนุชา ศิวสวัสดิ์, ผู้เรียบเรียง ที่มา <https://library.parliament.go.th/radioscript/r2567-jun8>

¹² Thailand Taxonomy ได้ดำเนินงานแล้วเสร็จในระยะแรก ซึ่งมุ่งไปที่ภาคพลังงานและภาคการขนส่งที่เป็น ภาคส่วนหลักที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสัดส่วนสูง และในระยะถัดมาจะครอบคลุมภาคส่วนอื่นๆ ได้แก่ ภาคอุตสาหกรรมการผลิต ภาคเกษตรกรรม การก่อสร้าง และการบำบัด/กำจัดของเสีย ที่มา ธนาคารแห่งประเทศไทย เมื่อ กรกฎาคม 2567 <https://www.bot.or.th/en/financial-innovation/sustainable-finance/green/Thailand-Taxonomy.html>

การจัดทำมาตรฐานการจัดกลุ่มกิจกรรมทางเศรษฐกิจ “Thailand Taxonomy”

มาตรฐานการจัดกลุ่มกิจกรรมทางเศรษฐกิจที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย คือ การกำหนด นิยามและจัดหมวดหมู่กิจกรรมในภาคเศรษฐกิจที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นมาตรฐานเดียวกันเพื่อใช้ในการประเมินว่า กิจกรรมใดเข้าข่ายเป็นการดำเนินธุรกิจที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมเพื่อช่วยในการประเมินกิจกรรมการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างโปร่งใส แบ่งออกเป็น 3 ระดับดังสรุปในตารางที่ 2

สถานการณ์ดำเนินงาน ได้ดำเนินงานแล้วเสร็จในระยะแรก ซึ่งมุ่งไปที่ภาคพลังงานและภาคการขนส่งที่เป็น ภาคส่วนหลักที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสัดส่วนสูง และในระยะถัดไปจะครอบคลุมภาคส่วนอื่นๆ ได้แก่ ภาคอุตสาหกรรมการผลิต ภาคเกษตรกรรม การก่อสร้าง และการบำบัด/กำจัดของเสีย

ตารางที่ 2 มาตรฐานการจัดกลุ่มกิจกรรมทางเศรษฐกิจ "Thailand Taxonomy"

มาตรฐานการจัดกลุ่มกิจกรรมทางเศรษฐกิจ “Thailand Taxonomy”		
สีเขียว	กิจกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	กิจกรรมที่ลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์ในปัจจุบัน
สีเหลือง	กิจกรรมที่อยู่ระหว่างการปรับตัว	กิจกรรมที่ยังไม่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์ในปัจจุบันและอยู่ระหว่างปรับตัวเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยสามารถลดปัญหาได้บ้างแต่ยังปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นได้
สีแดง	กิจกรรมที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	กิจกรรมที่ไม่สามารถถูกประเมินว่าเป็นมิตรต่อการลดก๊าซเรือนกระจกสุทธิได้ และไม่เข้าข่ายตามเงื่อนไขในระดับสีเขียวหรือสีเหลือง

จากภาพรวมในหลายประเทศ นโยบายที่อิงกลไกตลาดนับได้ว่ามีส่วนสำคัญอย่างมากในขับเคลื่อนให้เกิดการใช้เทคโนโลยีลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากการพัฒนาและการนำเทคโนโลยีไปใช้ในอุตสาหกรรมกระบวนการต้องการทั้งความรู้ ความเชี่ยวชาญ เงินลงทุน ตลอดจนความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้น เป็นตัวกำหนดความยั่งยืนของเทคโนโลยีนั้น ๆ

บทที่ 3

เทคโนโลยีการลดการปลดปล่อยคาร์บอน (Decarbonization Technologies)

3.1) การแปรรูปชีวมวล (Biomass)

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงและมีการปลดปล่อยคาร์บอนต่ำสามารถนำมาใช้ได้หลากหลาย นำมาเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) ได้โดยตรงและนำมาผลิตสารประกอบพื้นฐานชีวภาพ (Bio-Based Building Blocks) คุณลักษณะเด่นของชีวมวลคือเป็นพลังงานหมุนเวียน ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิ และสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรม

1st Generation: Edible



3rd Generation: Algae



2nd Generation: Inedible



4th Generation

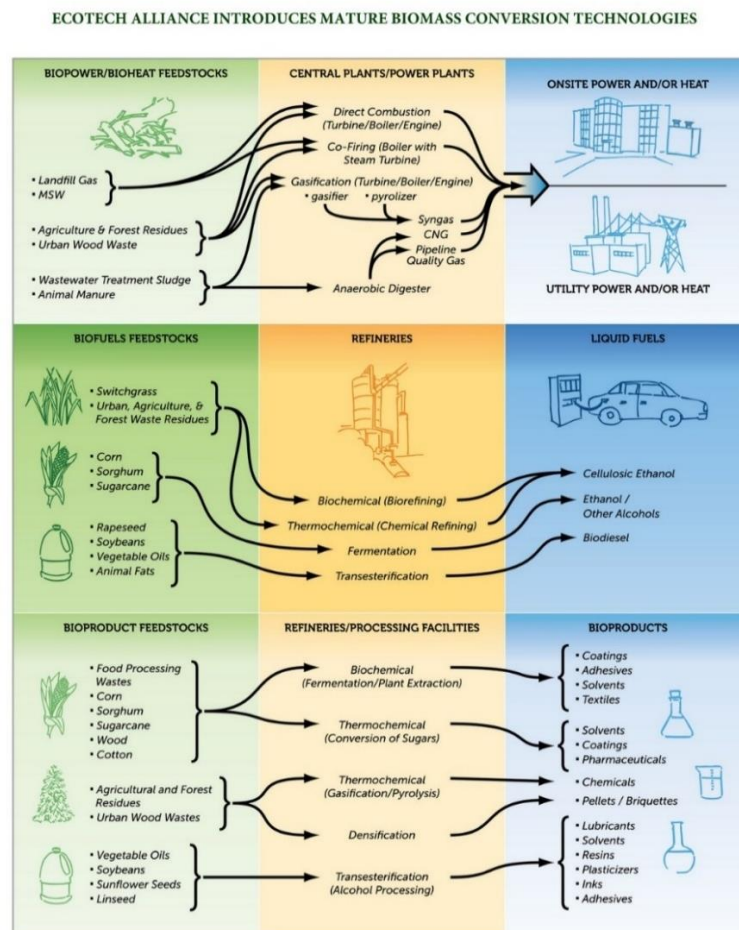


รูปที่ 5 วัตถุดิบชีวมวลประเภทต่างๆ

การนำชีวมวลมาใช้ในอุตสาหกรรมเริ่มต้นด้วยชีวมวลประเภทที่ 1 (1st Generation Biomass) ซึ่งเป็นชีวมวลที่สามารถบริโภคได้ อาทิ อ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง และข้าวบาร์เลย์ วัตถุดิบเหล่านี้สามารถนำมาผลิตเป็นเอทานอลหรือเชื้อเพลิงไบโอดีเซลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในประเทศที่มีการเกษตรเป็นอุตสาหกรรมหลัก อย่างไรก็ตาม การใช้ชีวมวลประเภทนี้ก่อให้เกิดข้อถกเถียงเกี่ยวกับความคุ้มค่าในการนำวัตถุดิบที่สามารถใช้เป็นอาหารมาผลิตพลังงาน รวมถึงผลกระทบต่อความมั่นคงทางอาหารและราคาอาหารที่อาจสูงขึ้น จากประเด็นดังกล่าว จึงนำไปสู่การพัฒนาชีวมวลประเภทที่ 2 (2nd Generation Biomass) ซึ่งเป็นชีวมวลที่ไม่จัดอยู่ในหมวดหมู่อาหาร โดยมีความหลากหลาย เช่น เศษวัสดุทางการเกษตร ชานอ้อย ฟางข้าว และเศษไม้จากอุตสาหกรรม ชีวมวลประเภทนี้มีข้อได้เปรียบในด้านต้นทุนและไม่จำเป็นต้องแข่งขันกับการจัดสรรทรัพยากรเพื่อการผลิตอาหาร อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาการกำจัดของเสียจากการเกษตรและอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม การแปรรูปชีวมวลประเภทที่ 2 นี้จำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูงในกระบวนการผลิต เช่น การย่อยสลายเซลล์ลูโลสและการแปลงลิกนินให้เป็นพลังงาน ต่อมาได้มีการพัฒนาชีวมวลประเภทที่ 3 (3rd Generation Biomass) โดยใช้สาหร่ายเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชีวภาพขั้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวดเร็ว และหลากหลายมากขึ้น โดยมีข้อได้เปรียบคือสามารถเติบโตได้เร็วและไม่ต้องการพื้นที่เพาะปลูกบนบก อย่างไรก็ตาม การใช้ชีวมวลประเภทนี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เนื่องจากอยู่ในระยะการศึกษาวิจัยและต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูง อีกทั้งยังมีความต้องการน้ำปริมาณสูงในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย รวมถึงต้นทุนในการผลิตที่ยังสูงอยู่ ความท้าทายเหล่านี้นำไปสู่การพัฒนาชีว

มวลประเภทที่ 4 (4th Generation Biomass) ซึ่งเกี่ยวข้องกับ การตัดแปลงทางพันธุกรรมของวัสดุชีวมวล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดในการตอบสนองต่อความต้องการในอนาคต เช่น การปรับปรุงพันธุ์พืชให้มีปริมาณน้ำมันหรือเซลลูโลสสูงขึ้น หรือการพัฒนาจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม ชีวมวลประเภทนี้ยังอยู่ในระยะเริ่มต้นของการศึกษาวิจัย และยังมีประเด็นด้านความปลอดภัยทางชีวภาพและการยอมรับของสังคมที่ต้องพิจารณา^{13,14} โดยวัตถุดิบชีวมวลประเภทต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5

ห่วงโซ่คุณค่าของชีวมวลประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญหลายขั้นตอน เริ่มจากการผลิตชีวมวล ซึ่งรวมถึงการเพาะปลูกพืชพลังงานและการจัดการของเสียทางการเกษตร ต่อมาคือการเก็บเกี่ยวและรวบรวมวัตถุดิบ เพื่อนำมาแปรรูปเป็นสารตั้งต้น เช่น น้ำตาล แป้ง น้ำมัน รวมถึงการย่อยชีวมวลเป็นสารเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แล้วใช้กระบวนการทางเคมี หรือกระบวนการหมัก เพื่อเปลี่ยนสารตั้งต้นชีวมวลไปเป็นสารองค์ประกอบพื้นฐานชีวภาพ (Bio-Based Building Blocks) เช่น เอทานอล กลีเซอรอล กรดแลคติก สารกลุ่มเฟอร์พิวรัล และกรดอื่นๆ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นให้กับอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ กระบวนการเหล่านี้มีทั้งที่อยู่ในระดับอุตสาหกรรมแล้ว และยังอยู่ในขั้นตอนการวิจัยและพัฒนา โดยภาพรวมของชีวมวลในฐานะวัตถุดิบในอุตสาหกรรมกระบวนการ แสดงในรูปที่ 6



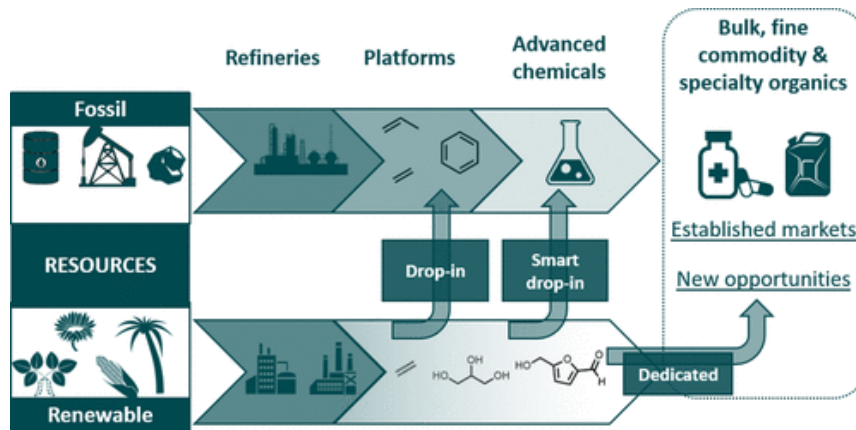
รูปที่ 6 ภาพรวมของชีวมวลในฐานะวัตถุดิบในอุตสาหกรรมกระบวนการ¹⁵

¹³ The Evolution of Biomass and Its Generations (carboncredits.com)

¹⁴ Hydrothermal Treatment of Biomass Feedstocks for Sustainable Production of Chemicals, Fuels, and Materials: Progress and Perspectives | Chemical Reviews (acs.org)

¹⁵ Ecotech Alliance Introduces Mature Biomass Conversion Technologies - Page 1 - Created with Publitas.com

ดังนั้นจะพบว่าการใช้งานชีวมวลส่วนใหญ่ยังคงเน้นที่ชีวมวลประเภทที่ 2 เป็นหลัก ควบคู่ไปกับการศึกษาระบบไบโอรีไฟเนอรี (Biorefinery) ซึ่งมีศักยภาพในการทดแทนระบบการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม (Petro-Based Refinery) ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ระบบไบโอรีไฟเนอรีนี้สามารถผลิตทั้งพลังงานและผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่มีมูลค่าสูง เช่น พลาสติกชีวภาพ เคมีภัณฑ์ และยา ซึ่งช่วยเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจและลดการพึ่งพาทรัพยากรฟอสซิล การพัฒนาเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความก้าวหน้าที่อย่างต่อเนื่องในการใช้ประโยชน์จากชีวมวลเพื่อตอบสนองความต้องการด้านพลังงานและผลิตภัณฑ์ชีวภาพในอนาคต อีกทั้งยังสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนและการพัฒนาที่ยั่งยืน



รูปที่ 7 กลยุทธ์ในการผลิตสารเคมีมูลค่าเพิ่มเชิงพาณิชย์จากฐานปิโตรเลียมและชีวภาพ¹⁶

บทบาทของชีวมวลในการบรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน

ความมั่นคงทางพลังงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ขับเคลื่อนการพัฒนานโยบายพลังงานชีวมวลในปี 2023 โดยมีการคาดการณ์ว่าความต้องการเชื้อเพลิงชีวมวลจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญถึงร้อยละ 11 ในปี 2024 อันเป็นผลมาจากนโยบายสนับสนุนและความต้องการด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้นทั่วโลก การเติบโตนี้สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของพลังงานทางเลือกในการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและบรรเทาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ¹⁷

บริบทของชีวมวลในปัจจุบันได้กลายเป็นวาระสำคัญระดับโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสหภาพยุโรป ซึ่งคณะกรรมการธิการยุโรปได้บังคับใช้นโยบาย Renewable Energy Directive (RED) ในปี 2018 นโยบายนี้มีเป้าหมายเพื่อเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงานและลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยตั้งเป้าหมายที่ท้าทายในการเพิ่มสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการคมนาคมให้ถึงร้อยละ 14 ภายในปี 2030 นอกจากนี้ ยังมีการกำหนดเป้าหมายการใช้พลังงานหมุนเวียนโดยรวมที่ร้อยละ 32 ภายในปี 2030 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความมุ่งมั่นอย่างแน่วแน่ในการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาด อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันสหภาพยุโรปยังคงต้องพึ่งพาการนำเข้าไบโอดีเซลในสัดส่วนที่สูงถึงร้อยละ 40 ในปี 2022 สะท้อนให้เห็นถึงความท้าทายในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพให้เพียงพอต่อความต้องการภายในภูมิภาค¹⁸

¹⁶ Continuous Flow Upgrading of Selected C2–C6 Platform Chemicals Derived from Biomass | Chemical Reviews (acs.org)

¹⁷ Will energy security concerns drive biofuel growth in 2023 and 2024? – Renewable Energy Market Update - June 2023 – Analysis - IEA

¹⁸ Biomass (europa.eu)

ในสหรัฐอเมริกา นโยบาย Inflation Reduction Act (IRA) ปี 2022 มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมพลังงานชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวภาพ โดยจัดสรรงบประมาณกว่า 369 พันล้านดอลลาร์สำหรับโครงการพลังงานสะอาดและการแก้ไขปัญหาสภาพภูมิอากาศ มาตรการสำคัญรวมถึงการเพิ่มเครดิตภาษีสำหรับการผลิตไบโอดีเซลและเชื้อเพลิงชีวภาพขั้นสูงเป็น 1 ดอลลาร์ต่อแกลลอน และสูงถึง 1.75 ดอลลาร์ต่อแกลลอนสำหรับเชื้อเพลิงการบินที่ยั่งยืน นอกจากนี้ ยังมีการลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานและการวิจัยพัฒนา ส่งผลให้การผลิตเอทานอลในสหรัฐฯ เพิ่มขึ้นเป็น 15.5 พันล้านแกลลอนในปี 2023 อย่างไรก็ตาม ยังมีความท้าทายในการขยายการใช้งานและการสร้างสมดุลกับความมั่นคงทางอาหาร¹⁹

การผลักดันการใช้ชีวมวลยังคงดำเนินการอย่างเข้มข้นในภูมิภาคอื่นๆ ทั่วโลก โดยเฉพาะในประเทศเศรษฐกิจเกิดใหม่ คาดการณ์ว่าสองในสามของการเพิ่มขึ้นของความต้องการเชื้อเพลิงชีวภาพจะมาจากประเทศเหล่านี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อินเดีย บราซิล และอินโดนีเซีย ประเทศเหล่านี้มีข้อได้เปรียบทั้งในด้านวัตถุดิบที่อุดมสมบูรณ์ ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และนโยบายสนับสนุนที่เข้มแข็ง ซึ่งนโยบายของทั้งสามประเทศมีรากฐานมาจากการพิจารณาถึงความมั่นคงทางพลังงานเป็นสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถช่วยลดการพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันได้อย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเช่น

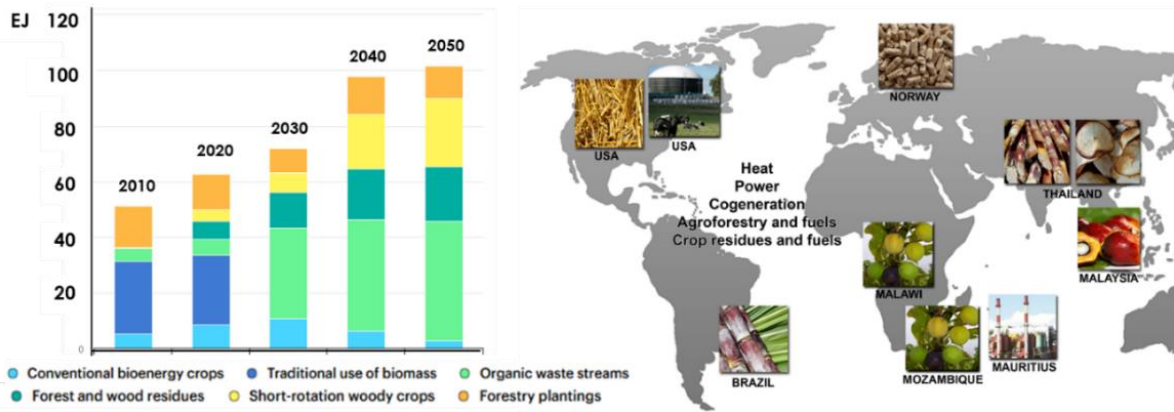
- บราซิล แม้จะเป็นผู้ส่งออกน้ำมันดิบสุทธิ แต่ยังคงต้องนำเข้าน้ำมันเบนซินและดีเซลร้อยละ 19 ในปี 2021 ประเทศนี้มีประวัติศาสตร์อันยาวนานในการใช้เอทานอลจากอ้อย และได้พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่รองรับการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพอย่างกว้างขวาง รวมถึงการส่งเสริมการใช้รถยนต์ที่สามารถใช้ได้ทั้งเอทานอลและน้ำมันเบนซิน (Flex-Fuel Vehicles)
- อินเดีย ซึ่งนำเข้าน้ำมันดิบถึงร้อยละ 87 ของอุปทานทั้งหมด ได้ตั้งเป้าหมายที่จะเพิ่มสัดส่วนการผสมเอทานอลในน้ำมันเบนซินเป็นร้อยละ 20 ภายในปี 2025 เพื่อลดการนำเข้าน้ำมันและส่งเสริมความมั่นคงทางพลังงาน
- อินโดนีเซีย แม้จะเป็นผู้ผลิตน้ำมันปาล์มรายใหญ่ของโลก แต่ยังคงนำเข้าน้ำมันสุทธิคิดเป็นร้อยละ 20 ของอุปทานในปี 2021 ประเทศนี้ได้ดำเนินนโยบาย B30 ซึ่งกำหนดให้น้ำมันดีเซลต้องผสมไบโอดีเซลร้อยละ 30 เพื่อลดการนำเข้าน้ำมันและสนับสนุนอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มในประเทศ

ในภาพรวม การเติบโตของอุตสาหกรรมชีวมวลและเชื้อเพลิงชีวภาพทั่วโลกสะท้อนให้เห็นถึงความพยายามในการสร้างความมั่นคงทางพลังงาน ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และส่งเสริมการพัฒนาเศรษฐกิจในภาคการเกษตรและพลังงานอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตาม ความท้าทายสำคัญยังคงอยู่ในการสร้างสมดุลระหว่างการผลิตอาหารและพลังงาน รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากขึ้นในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ²⁰

เมื่อวิเคราะห์การจัดสรรทรัพยากรจากปัจจุบันไปจนถึงอนาคตพบว่าการใช้ชีวมวลแบบดั้งเดิมจะหายไปภายในปี 2030 และถูกทดแทนโดยการนำของเสียทางชีวภาพมาใช้แทน พบว่ามากกว่าร้อยละ 60 ของพลังงานชีวภาพจะมาจากของเสียทางชีวภาพ ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงความตระหนักในการจัดสรรทรัพยากรเทียบกับการใช้ปริมาณร้อยละ 20 ในปัจจุบัน ดังแสดงในรูปที่ 8

¹⁹ Inflation Reduction Act Guidebook | Clean Energy | The White House

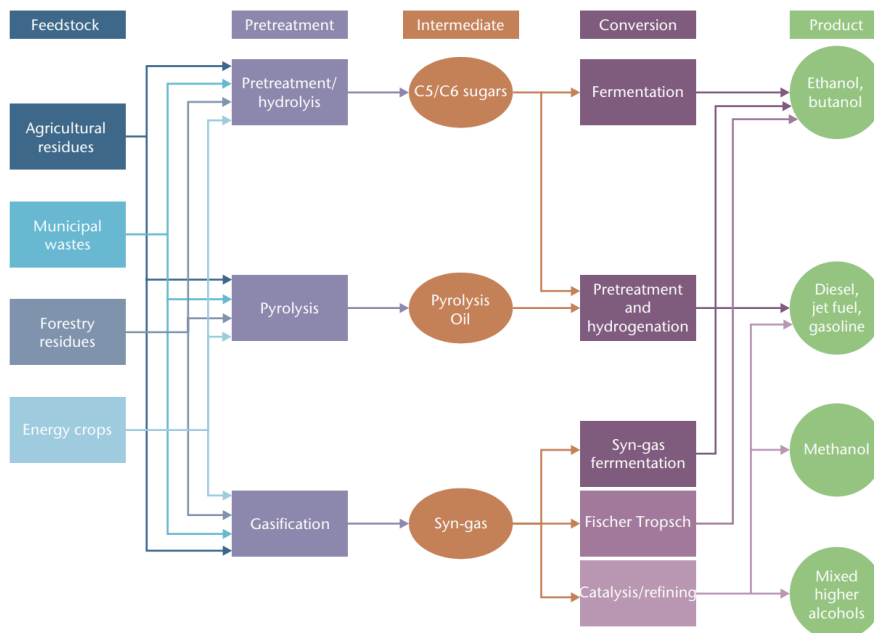
²⁰ Will energy security concerns drive biofuel growth in 2023 and 2024? – Renewable Energy Market Update - June 2023 – Analysis - IEA



รูปที่ 8 การจัดหาพลังงานชีวภาพและแหล่งพลังงานชีวมวลทั่วโลกในสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ ปี 2010 - 2050^{21, 22}

ความก้าวหน้าของนวัตกรรมเทคโนโลยี

ในสถานการณ์การลดการปล่อยคาร์บอน การใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการขนส่งจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจนถึงปี 2030 โดยมีสัดส่วนเชื้อเพลิงที่ผลิตจากของเสีย วัสดุเหลือใช้ และพืชที่ไม่ใช่อาหารเพิ่มขึ้นอย่างมาก เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการบิน หรือที่รู้จักกันในชื่อน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานชีวภาพ (Sustainable Aviation Fuel หรือ SAF) จำเป็นต้องมีการพัฒนาอย่างก้าวกระโดด เพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์การลดการปล่อยคาร์บอน ปัจจุบันการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพส่วนใหญ่ใช้วัตถุดิบแบบดั้งเดิม ส่งผลให้การขยายการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพไปสู่วัตถุดิบขั้นสูงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการรับประกันว่าจะส่งผลกระทบต่อการใช้ที่ดิน ราคาอาหารและอาหารสัตว์ และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ น้อยที่สุด



รูปที่ 9 ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการแปรรูปวัตถุดิบชีวมวลสู่ผลิตภัณฑ์²³

²¹ bioen-scope_chapter14.pdf (bioenfapesp.org)

²² Bioenergy - IEA

²³ Next generation biofuels derived from thermal and chemical conversion of the Greek transport sector - ScienceDirect

รูปที่ 9 แสดงความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลสู่ผลิตภัณฑ์ ซึ่งกระบวนการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวมวลรุ่นใหม่สามารถแบ่งออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ 1) Advance Bioethanol 2) Biomethanol 3) Advanced Biodiesel 4) Hydrothermal Upgrading (HTU) Biodiesel 5) Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) และ 6) Algal Biofuels อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการแปรรูปดังกล่าวนี้ยังอยู่ในขั้นตอนการวิจัยและพัฒนาเพียงเท่านั้น

ตัวอย่างเทคโนโลยีและนวัตกรรมในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลในระดับสากล²⁴

- สำหรับเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่จะได้รับสถานะการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องผลิตมาจากวัตถุดิบตั้งต้นที่ไม่ใช่อาหาร ตัวอย่างเช่น เอทานอลจากเซลลูโลสและเทคโนโลยี Fischer-Tropsch (bio-FT) ที่ใช้ชีวมวลซึ่งสามารถใช้วัตถุดิบตั้งต้นที่ไม่ใช่อาหารเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีคาร์บอนต่ำสำหรับใช้ในภาคการขนส่ง แม้ว่าต้นทุนการผลิตเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวภาพดังกล่าวจะยังคงเป็นสองเท่าหรือสามเท่าของเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เทียบเท่า แต่ก็อาจลดลงได้มากถึง 27% ในทศวรรษหน้า
- การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพหลายแห่งได้รับสถานะเชิงพาณิชย์ รวมถึงการผลิตเอทานอลจากข้าวโพดและอ้อย ไบโอดีเซลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Methyl Ester หรือ FAME) น้ำมันพืชและน้ำมันใช้แล้วที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรทรีต (Hydrotreated Vegetable and Waste Oil หรือ HVO) ดีเซลหมุนเวียนและเอสเทอร์ที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรคาร์บอน และกรดไขมัน (Hydrotreated Ester and Fatty Acids หรือ HEFA) น้ำมันก๊าดไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช และน้ำมันเสีย เส้นทางอื่นๆ
- แอลกอฮอล์สู่น้ำมันเครื่องบิน (Alcohol to Jet หรือ ATJ) คาดว่าจะได้รับสถานะเชิงพาณิชย์ในอีกไม่นาน ซึ่งในหลายบริษัท กำลังสำรวจพืชเมล็ดพืชน้ำมันชนิดใหม่ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการแข่งขันกับที่ดินทำกิน
- นวัตกรรมการผลิตเชื้อเพลิงเหลว ปัจจุบันมีโครงการนำร่องเพียงไม่กี่โครงการสำหรับเส้นทางทั้งสองนี้ โครงการ EU HyFlexFuel และ NextGenRoadFuels เสร็จสิ้นในปี 2021 และ 2022 ตามลำดับ ในขณะที่การผลิตเชื้อเพลิงเริ่มต้นในปี 2022 สำหรับ Pyrocell ของสวีเดน ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่างโรงเลื่อยและโรงกลั่นน้ำมัน
- พลังงานชีวภาพที่มีการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Bioenergy with Carbon Capture and Storage หรือ BECCS) เป็นกระบวนการดักจับและจัดเก็บคาร์บอนจากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอย่างถาวร โดยเทคนิคนี้เป็นการกำจัดคาร์บอนเพียงอย่างเดียวที่สามารถให้พลังงานไปพร้อมๆ กับการจัดการคาร์บอน การใช้เทคโนโลยี BECCS ในสวีเดน เป็นกลยุทธ์สำคัญในการลดการปล่อยคาร์บอน โดยเฉพาะในภาคพลังงานที่ร้อยละ 68 ของการปล่อยคาร์บอนมาจากแหล่งชีวภาพ เช่น อุตสาหกรรมไม้ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม และอุตสาหกรรมกระดาษ โครงการ BECCS เริ่มต้นในปี 2019 ที่โรงงาน Värtaverket ในสตอกโฮล์ม โดยใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนและไฟฟ้า ซึ่งสามารถลดคาร์บอนได้ถึง 800,000 ตันต่อปี เป้าหมายคือทำให้สตอกโฮล์มมี Carbon Footprint เป็นบวกภายในปี 2040 นอกจากนี้ โครงการยังช่วยลดค่าใช้จ่าย สร้างมูลค่าการส่งออก และสร้างงานใหม่ได้อีกด้วย²⁵

²⁴ Biofuels - Energy System - IEA

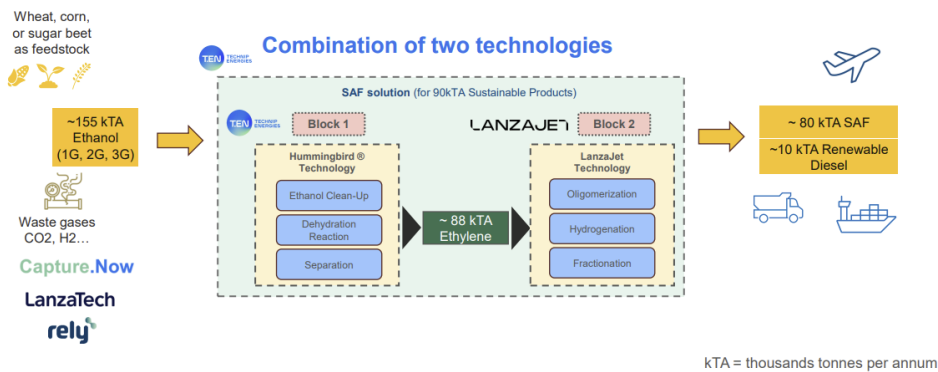
²⁵ เทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอนในสวีเดน - Welcome to TNIU (tniu-rte.org)

TECHNIP ENERGIES (T. EN) x LanzaJet

บริษัท Technip Energies และ LanzaJet ได้ประกาศความร่วมมือแบบพิเศษ โดยนำจุดแข็งของทั้งสองฝ่าย มาผสมผสานกัน กล่าวคือ:

1. เทคโนโลยี Hummingbird: เป็นนวัตกรรมของ Technip Energies ที่สามารถเปลี่ยนเอทานอล (แอลกอฮอล์ที่ได้จากพืช) ให้กลายเป็นเอทิลีน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี
2. เทคโนโลยี Alcohol-to-Jet (AtJ): เป็นนวัตกรรมของ LanzaJet ที่สามารถผลิตเชื้อเพลิงอากาศยานจากแอลกอฮอล์ โดยกระบวนการนี้ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากถึง 70% เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอากาศยานแบบดั้งเดิม

โรงงานแห่งแรกที่เกิดจากความร่วมมือนี้ได้แก่ "Freedom Pines Fuels" ตั้งอยู่ที่เมืองโซเพอร์ตัน รัฐจอร์เจีย สหรัฐอเมริกา ซึ่งได้เปิดดำเนินการในเดือนมกราคม 2024 โดยกำลังการผลิตเชื้อเพลิง AtJ สูงถึง 10 ล้านแกลลอนต่อปี ความร่วมมือนี้ถือเป็นก้าวสำคัญในการพัฒนาเชื้อเพลิงทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับอุตสาหกรรมการบิน

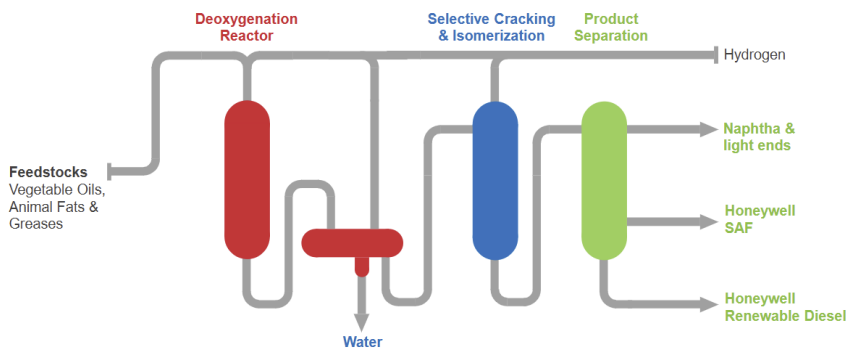


รูปที่ 10 ความร่วมมือทางด้านเชื้อเพลิงยั่งยืนของ 2 เทคโนโลยี จากบริษัท T.EN x LanzaJet

(TECHNIP ENERGIES: Sustainable Aviation Fuel: Necessity and Path Forward as Clean Energy: TNChE2024)

UOP Honeywell

กระบวนการ ECOFINING สำหรับเชื้อเพลิงอากาศยาน (Sustainable Aviation Fuel หรือ SAF) ที่ผลิตจากน้ำมันใช้แล้ว เป็นกระบวนการที่พัฒนาโดย UOP บนพื้นฐานของเทคโนโลยีการกลั่นแบบดั้งเดิมด้วยกระบวนการไฮโดรไพโรซิสซึ่ง กระบวนการนี้ทำงานโดยการเติมไฮโดรเจนเพื่อกำจัดออกซิเจนออกจากวัตถุดิบ จากนั้นจึงกลั่นผลิตภัณฑ์นี้เพิ่มเติมเพื่อให้ตรงตามข้อกำหนดที่ต้องการ กระบวนการนี้ผลิตน้ำมันก๊าดสังเคราะห์ชีวภาพ (bio-SPK) หรือดีเซลทดแทน ซึ่งจะถูกผสมกับน้ำมันเครื่องบินมาตรฐานเพื่อใช้ในการบิน เชื้อเพลิงที่ได้ตรงตามข้อกำหนดทั้งหมดของน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบินที่กำหนดโดยหน่วยงานที่มีอำนาจรับรองและพิสูจน์การใช้งานจริงแล้วในเชิงพาณิชย์



รูปที่ 11 ภาพรวมของกระบวนการ UOP ECOFINING

(Honeywell UOP: Efforts on Sustainable and Low Carbon Solutions: TNChE2022-2024)

ชีวมวลที่มีศักยภาพในประเทศไทย

ประเทศไทย ในฐานะประเทศเกษตรกรรม เป็นตัวอย่างที่โดดเด่นของการใช้ประโยชน์จากชีวมวล ด้วยแหล่งทรัพยากรที่หลากหลายและอุดมสมบูรณ์ ทั้งจากภาคการเกษตร ป่าไม้ อุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร และขยะอินทรีย์จากชุมชน ประเทศไทยได้พัฒนาระบบการจัดการชีวมวลที่ครอบคลุม ตั้งแต่การเก็บรวบรวม การแปรรูป ไปจนถึงการนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ นโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนของรัฐบาลไทยได้กระตุ้นให้เกิดการลงทุนในโครงการพลังงานชีวมวลทั่วประเทศ โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทที่มีวัตถุดิบชีวมวลจำนวนมาก นอกจากนี้ ยังมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนการผลิต

ตัวอย่างของกลุ่มบริษัทและธุรกิจแนวหน้าในอุตสาหกรรมชีวมวลของประเทศไทย ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาพลังงานทดแทนและเศรษฐกิจหมุนเวียน องค์กรเหล่านี้เป็นผู้นำในการผลิตพลังงานและผลิตภัณฑ์จากชีวมวล สร้างนวัตกรรม และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานและการพัฒนาอย่างยั่งยืนของประเทศ

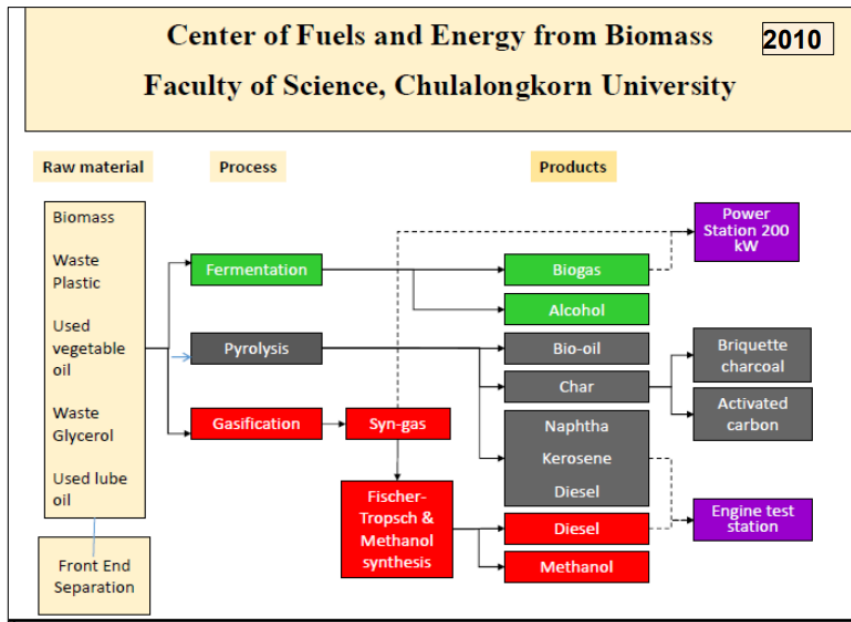
- บีบีจีไอ (BBGI) ดำเนินธุรกิจที่มุ่งเน้นการลงทุนในธุรกิจผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ โดยเฉพาะเอทานอลและไบโอดีเซล ทำให้บริษัทก้าวขึ้นเป็นผู้ผลิตรายสำคัญของประเทศไทย นอกจากการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพแล้ว บีบีจีไอฯ ยังมีแผนขยายธุรกิจไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชีวภาพมูลค่าสูง ผ่านเทคโนโลยีชีววิทยาสังเคราะห์ (Synthetic Biology หรือ SynBio) เป็นฐานในการสร้างนวัตกรรม โดยมุ่งเน้นไปยังเชื้อเพลิงอากาศยานอย่างยั่งยืน (SAF) เพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นทั่วโลก ในทุกๆ ปี²⁶
- คอร์เบียน (Corbion) เป็นผู้ผลิตและจัดจำหน่ายสารองค์ประกอบพื้นฐานชีวภาพสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและเคมีชีวภาพ โดยเริ่มดำเนินการผลิตในปี 2007 มีกำลังการผลิตกรดแลคติก 125,000 ตันต่อปี พอลิแลคติกแอซิด 75,000 ตันต่อปี และสารอนุพันธ์อื่นๆ กระบวนการผลิตใช้น้ำตาลเป็นสารตั้งต้นผ่านกระบวนการหมักด้วยแบคทีเรีย เพื่อให้ได้กรดแลคติกเป็นสารตั้งต้นในการผลิตพอลิแลคติกแอซิด (PLA)²⁷
- PPP Green Complex (PPPGC) ผู้ผลิตน้ำมันปาล์มแบบครบวงจรรายแรกของประเทศไทย ผสานเทคโนโลยีขั้นสูงอย่าง SAP S/4HANA และ Microsoft Azure cloud เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนในการดำเนินงาน PPPGC ผลิตน้ำมันปาล์มดิบ ไบโอดีเซล และน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ พร้อมทั้งใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้เพื่อผลิตพลังงานชีวมวลและก๊าซชีวภาพผ่านโมเดลการผลิตแบบไร้ของเสีย²⁸
- ศูนย์พลังงานชีวมวลแปรรูปวัตถุดิบผ่านกระบวนการหลากหลาย ได้แก่ การคัดแยก หมัก ไพรโอไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และการผลิตดีเซลกับเมทานอล เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์หลักอย่างก๊าซชีวภาพ แอลกอฮอล์ ถ่านชาร์ เชื้อเพลิงเหลว (แฉฟทา น้ำมันก๊าด ดีเซล) และสารเคมีเมทานอล พร้อมผลพลอยได้เช่นไฟฟ้าและถ่านกัมมันต์ โดยเชื้อเพลิงเหลวทั้งหมดจะผ่านการทดสอบคุณภาพที่สถานีทดสอบเครื่องยนต์ เพื่อรับรองประสิทธิภาพก่อนนำไปใช้งานจริงใน

²⁶ SynBio นวัตกรรมสีเขียวล้ำยุค บุกผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่มีมูลค่าสูง | Bangchak Corporation

²⁷ Total Corbion PLA starts-up 75,000 tonne/year Thai bioplastics plant | PRA-Plastics and Rubber Asia China Industry News

²⁸ Customer stories - PPPGC: Fujitsu Global

ภาคอุตสาหกรรมและการขนส่ง ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนี้ช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและส่งเสริมการใช้พลังงานทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม²⁹



รูปที่ 12 ภาพรวมกระบวนการผลิตของศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความท้าทายและแนวโน้มในอนาคต

- เทคโนโลยีและนวัตกรรมการพัฒนาพลังงานชีวภาพในประเทศไทย (Technologies and Innovations in Bioenergy Development in Thailand)

ประเทศไทยมีศักยภาพสูงในการพัฒนาพลังงานชีวภาพ เนื่องจากมีทรัพยากรชีวมวลที่อุดมสมบูรณ์จากภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร อย่างไรก็ตาม การพัฒนาในด้านนี้ยังเผชิญกับความท้าทายหลายประการ เช่น การขาดเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการแปรรูปชีวมวล ต้นทุนการผลิตที่สูง และการขาดโครงสร้างพื้นฐานที่เหมาะสม นอกจากนี้ ยังมีปัญหาเรื่องการแข่งขันการใช้ที่ดินระหว่างพืชพลังงานและพืชอาหาร อย่างไรก็ตาม ด้วยการลงทุนในการวิจัยและพัฒนา รวมถึงการสนับสนุนจากภาครัฐ การพัฒนาพลังงานชีวภาพในไทยมีแนวโน้มที่จะเติบโตและมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศในอนาคต

- นโยบายในการพัฒนาพลังงานชีวภาพในประเทศไทย (Policy for Bioenergy Development in Thailand)

รัฐบาลไทยได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนาพลังงานชีวภาพ โดยได้กำหนดนโยบายและมาตรการสนับสนุนหลายประการ เช่น การกำหนดเป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนในร่างแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan หรือ AEDP2024) การให้แรงจูงใจทางการเงินแก่ผู้ผลิตพลังงานชีวภาพ เช่น การยกเว้นภาษีและการให้เงินอุดหนุน นอกจากนี้ ยังมีการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานชีวภาพ และการสร้างความร่วมมือระหว่างภาครัฐ เอกชน และชุมชน อย่างไรก็ตาม ยังมีความจำเป็นในการปรับปรุงนโยบายให้มีความยืดหยุ่นและ

²⁹ Center of Fuels and Energy from Biomass, Chulalongkorn University: Introduction of Center of Fuels & Energy from Biomass: TNChE2023

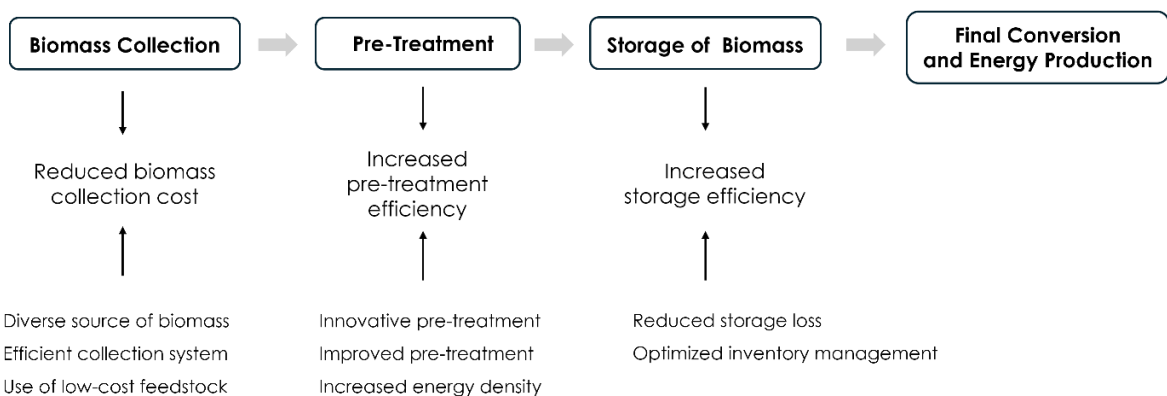
ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของตลาดและเทคโนโลยีมากขึ้น รวมถึงการสร้างกลไกที่มีประสิทธิภาพในการติดตามและประเมินผลนโยบายเหล่านี้

- **สถานที่ที่เหมาะสมในการพัฒนาพลังงานชีวภาพในประเทศไทย (Proper Places to Develop Bioenergy in Thailand)**

การพัฒนาพลังงานชีวภาพในประเทศไทยควรมุ่งเน้นไปที่พื้นที่ที่มีศักยภาพสูงในการผลิตและการใช้ชีวมวล โดยภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นพื้นที่ที่มีความเหมาะสมมาก เนื่องจากเป็นแหล่งผลิตข้าวและอ้อยที่สำคัญ ซึ่งสามารถนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานชีวภาพได้ ภาคใต้ก็มีศักยภาพสูงในการพัฒนาพลังงานชีวภาพจากปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้ พื้นที่ใกล้กับนิคมอุตสาหกรรมหรือโรงงานแปรรูปอาหารก็เป็นตำแหน่งที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถใช้ประโยชน์จากของเสียอุตสาหกรรมและลดต้นทุนในการขนส่ง อย่างไรก็ตาม การเลือกพื้นที่พัฒนาต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนท้องถิ่น รวมถึงความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐานและระบบสาธารณูปโภคด้วย

- **การจัดการห่วงโซ่อุปทานอย่างยั่งยืน (Sustainable Supply Chain Management)**

การจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลในอนาคตต้องเผชิญกับความท้าทายหลายประการ ประการแรก คือการรับมือกับความผันผวนของปริมาณและคุณภาพวัตถุดิบที่ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและฤดูกาล ประการที่สอง คือการพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุน ประการที่สาม คือการจัดการโลจิสติกส์ที่ซับซ้อนเนื่องจากชีวมวลมักกระจายตัวในพื้นที่กว้าง ประการที่สี่ คือการสร้างสมดุลระหว่างการใช้ที่ดินเพื่อผลิตอาหารและพลังงาน และประการสุดท้าย คือการพัฒนา นโยบายและกฎระเบียบที่เอื้อต่อการใช้ชีวมวลอย่างยั่งยืน การรับมือกับความท้าทายเหล่านี้จะเป็นกุญแจสำคัญในการเพิ่มศักยภาพของชีวมวลในฐานะแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญในอนาคต



รูปที่ 13 การจัดการห่วงโซ่อุปทานอย่างยั่งยืน³⁰

ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งในการเพิ่มศักยภาพการใช้ชีวมวลเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมกระบวนการ คือ มูลค่าเพิ่มที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการแปรรูป ตารางที่ 3 แสดงมูลค่าเพิ่มของผลิตภัณฑ์ชีวมวลเมื่อเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้น โดยแสดงในหน่วยดอลลาร์สหรัฐต่อตัน จากข้อมูลพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปมีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบชีวมวลเริ่มต้น กระบวนการแปรรูปชีวมวลสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

³⁰ Biomass feedstocks for advanced biofuels: Sustainability and supply chain management - ScienceDirect

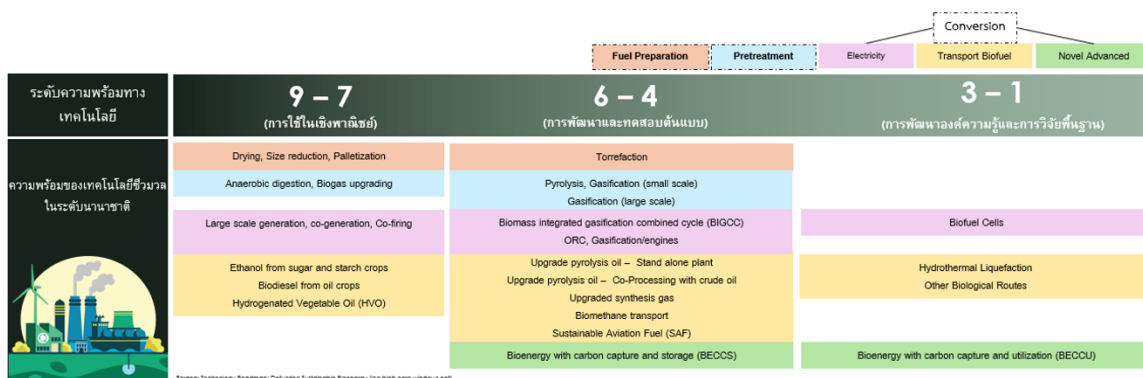
โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแปรรูปจะมีมูลค่าต่อหน่วยสูงกว่าวัตถุดิบอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งปัจจัยนี้สามารถสร้างแรงจูงใจทางเศรษฐกิจที่สำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้ชีวมวลในภาคอุตสาหกรรม

ตารางที่ 3 มูลค่าเพิ่มของวัตถุดิบสู่ผลิตภัณฑ์ชีวมวลหลังผ่านกระบวนการแปรรูป (USD/ton)

Raw Material	Cost	Product	Selling Price
Corn grain	210	Corn grain	260
Wheat	260	Wheat	290
Corn stover	60	Ethanol	667
Wheat straw	60	Green gasoline	1063
Miscanthus	56	Biodiesel	841
Forest residue	47	Hydrogen	1580
Algal oil	131	DDGS	170
Waste cooking oil	200	Glycerol	600

*Based on European Union Prices

เทคโนโลยีชีวมวลในปัจจุบันมีระดับความพร้อมที่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับประเภทและการประยุกต์ใช้ บางเทคโนโลยีถือว่ามีความพร้อมสูงและใช้งานในเชิงพาณิชย์แล้ว ในขณะที่เทคโนโลยีขั้นสูงยังอยู่ในขั้นตอนการวิจัยและพัฒนา หรือการทดลองในระดับต้นแบบ ความท้าทายสำคัญคือการพัฒนาประสิทธิภาพการผลิต การลดต้นทุน และการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรม ความพร้อมของเทคโนโลยีชีวมวลชนิดต่างๆ สามารถจำแนกได้หลายระดับ โดยระดับ 1 – 3 หมายถึงการพัฒนาองค์ความรู้และการวิจัยพื้นฐาน ระดับ 4 – 6 หมายถึงการพัฒนาและการทดสอบต้นแบบ และระดับที่ 7 – 9 หมายถึง ใช้ในเชิงพาณิชย์ ดังที่แสดงรูปที่ 14



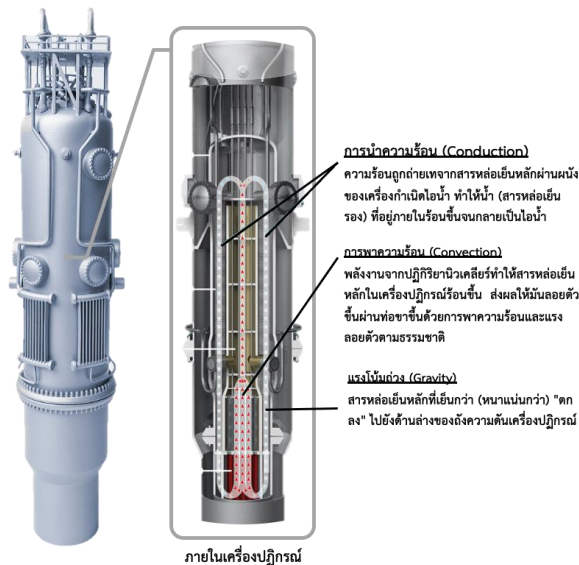
รูปที่ 14 ความพร้อมของเทคโนโลยีชีวมวล³¹

³¹ Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy (iea.blob.core.windows.net)

3.2) การผลิตพลังงานไฟฟ้า (Electrification)

การเปลี่ยนแปลงด้านพลังงานมีความจำเป็นต้องลดหรือทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล (เช่น เครื่องยนต์ หม้อต้มน้ำ หรือเตาเผา) โดยใช้พลังงานทางเลือกอื่นที่ไม่ก่อมลพิษ การหันมาใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และ พลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงสะอาด เช่น พลังงานนิวเคลียร์ จึงเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพและมีความเป็นไปได้มากที่สุดเพื่อบรรลุเป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ^{32,33}

เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบโมดูลาร์ขนาดเล็ก (Small Modular Nuclear Reactors หรือ SMRs)



รูปที่ 15 ภายในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบโมดูลาร์ขนาดเล็ก (Small Modular Nuclear Reactors หรือ SMRs)³⁴

เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็ก (Small Modular Nuclear Reactors หรือ SMRs) ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 15 เป็นทางเลือกที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตพลังงานอย่างยั่งยืน ด้วยกำลังการผลิตตั้งแต่ 1 ถึง 300 เมกกะวัตต์ ด้วยขนาดที่กะทัดรัดและการออกแบบโมดูลาร์ช่วยให้มีความยืดหยุ่นในการติดตั้งและการบูรณาการเข้ากับระบบต่างๆ SMRs มีปลอดภัยและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ทั้งยังช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธีการผลิตพลังงานแบบดั้งเดิม

³² IEA (2023), World Energy Outlook 2023, IEA, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

³³ Siemens(2023), Accelerating the electrification of everything, <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:df95fbb6-640e-40cf-82e6-9dc3f608186b/Electrification-Whitepaper-FINAL.pdf>

³⁴ The NEA Small Modular Reactor Dashboard_ Second Edition.pdf, <https://www.nuscalepower.com>

³⁴ <https://ned.egat.co.th/index.php/component/sppagebuilder/?view=page&id=60>

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์แบบ SMRs กับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทั่วไป³⁵

	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ SMRs	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบทั่วไป
กำลังการผลิต	< 300 MW	> 1000 MW
การปล่อย CO ₂	ไม่มี	ไม่มี
พื้นที่	100 ไร่	1000 ไร่
ระยะเวลาก่อสร้าง	3 – 4 ปี	5 – 6 ปี
รูปแบบการก่อสร้าง	ประกอบเสร็จจากโรงงาน	ก่อสร้างในพื้นที่
จัดทำแผนฉุกเฉินในรัศมี	< 1 กม.	16 กม.
ความปลอดภัย	มีความปลอดภัยสูง ระบบความปลอดภัย อาศัยหลักธรรมชาติโดยไม่ต้องใช้ไฟฟ้า	มีความปลอดภัยสูง ระบบความปลอดภัย ทำงานโดยอัตโนมัติ
กากกัมมันตรังสี	ปริมาณน้อยกว่าโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่	กากกัมมันตรังสีจากการเดินเครื่อง

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ SMRs กับแบบทั่วไปซึ่งเป็นระบบขนาดใหญ่ ปัจจุบันระบบ SMRs ถูกออกแบบและพัฒนาให้มีความปลอดภัยภายในตัวเอง เช่น

- แกนเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่มีปริมาณวัสดุนิวเคลียร์น้อยกว่า
- การใช้เชื้อเพลิงที่ทนต่ออุบัติเหตุและเชื้อเพลิงขั้นสูงที่สามารถรักษาความสมบูรณ์ของโครงสร้างได้แม้ในอุณหภูมิที่สูงขึ้น
- การทำงานที่แรงดันต่ำและการใช้ระบบความปลอดภัยที่ไม่ต้องพึ่งพาที่มาจากแหล่งพลังงานภายนอกหรือการเข้ามาเกี่ยวข้องของมนุษย์เพื่อให้มันคงปลอดภัย

ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ SMRs เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล

เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งพลังงานที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน หรือก๊าซธรรมชาติ เครื่องปฏิกรณ์ SMRs มีข้อดีหลายประการ

1. ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก: SMRs สามารถผลิตพลังงานได้โดยไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและเป็นทางเลือกที่สะอาดกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล
2. ความยืดหยุ่นในการดำเนินงาน: SMRs สามารถติดตั้งในพื้นที่ห่างไกลหรือใช้เป็นแหล่งพลังงานเสริมสำหรับเมืองขนาดเล็กได้ ซึ่งไม่สามารถทำได้กับโรงไฟฟ้าฟอสซิลที่ต้องพึ่งพาการขนส่งเชื้อเพลิงอย่างสม่ำเสมอ

ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ SMRs เมื่อเทียบกับพลังงานหมุนเวียน

แม้ว่า SMRs จะมีข้อดีในหลายด้าน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานลม ก็ยังมีข้อจำกัดบางประการ:

1. ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นสูง: ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง SMRs ยังคงสูงกว่าพลังงานหมุนเวียนที่มีการลดต้นทุนการติดตั้งอย่างมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา
2. ปัญหาด้านการจัดการของเสียกัมมันตรังสี: แม้ว่าปริมาณของเสียจาก SMRs จะน้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบเดิม แต่ยังคงมีความท้าทายในการจัดการของเสียกัมมันตรังสี ซึ่งต่างจากพลังงานหมุนเวียนที่ไม่มีของเสียอันตราย
3. เวลาที่ใช้ในการพัฒนาและก่อสร้างนานกว่า: การก่อสร้างและการรับใบอนุญาตสำหรับโรงไฟฟ้า SMRs ใช้เวลานานกว่าการติดตั้งโครงการพลังงานหมุนเวียน ทำให้ SMRs ไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการพลังงานในระยะสั้นได้เท่ากับโครงการพลังงานหมุนเวียน

ตัวอย่างโครงการโรงไฟฟ้าปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบโมดูลาร์ขนาดเล็ก (SMRs) ที่กำลังอยู่ระหว่างการก่อสร้างและดำเนินงานในหลายประเทศ (ตารางที่ 5) โดยระบุเทคโนโลยีที่ใช้ ผู้พัฒนา ความสามารถในการผลิตไฟฟ้า (MW(e)) และสถานะของโครงการ ตัวอย่างโครงการที่โดดเด่น ได้แก่ CAREM ในอาร์เจนตินา, ACP100 ในจีน, BREST-OD-300 และ KLT-40S ในรัสเซีย, HTR-PM ในจีน, และ HTTR ในญี่ปุ่น โครงการเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาและการใช้งาน SMRs ที่มุ่งเน้นความยืดหยุ่น ความปลอดภัย และการลดต้นทุนการผลิตพลังงานในอนาคต

ตารางที่ 5 โครงการโรงไฟฟ้าปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบโมดูลาร์ขนาดเล็ก (Small Modular Nuclear Reactors หรือ SMRs) ที่อยู่ภายใต้การก่อสร้างและภายใต้การดำเนินงาน³⁶

Design	Optput MW(e)	Technology Type	Designer	Country	Status
CAREM	30	PWR	CNEA	Argentina	Under Construction
ACP100	125	PWR	CNNC/NPIC	China	Under Construction
BREST-OD-300	300	LMFR	NIKIET	Russian	Under Construction
KLT-40S	70	PWR	JSC Afrikantov OKBM	Russian	In operation
HTR-PM	210	HTGR	INET, Tsinghua University	China	In operation
HTTR	30	HTGR	JAEA	Japan	In operation

PWR: Pressurized-water-cooled small modular reactors

HTGR: High - temperature gas cooled small modular reactors

LMFR: Liquid metal cooled fast neutron spectrum small modular reactors

³⁶ The NEA Small Modular Reactor Dashboard_ Second Edition_2024

พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy)

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่สามารถผลิตได้จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของแสงแดด เป็นแหล่งพลังงานที่ให้ทั้งพลังงานแสงและพลังงานความร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานหมุนเวียนสะอาดที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษหรือส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีศักยภาพสูงและไม่มีความผันผวน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ในหลายประเด็นหลักๆ เช่น การผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อน การคาดการณ์สำหรับโซลาร์เซลล์ จนถึงปี 2030 ได้เห็นการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่ปี 2019 – 2023^{37,38} การเติบโตนี้มีมาจาก 4 ปัจจัยหลัก

- **นโยบาย:** ปัจจุบันมีมากกว่า 140 ประเทศที่กำลังสนับสนุนการขยายโซลาร์เซลล์ ในตลาดหลัก เช่น จีน สหภาพยุโรป อินเดีย ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกา ได้เสริมสร้างนโยบายและการสนับสนุนอย่างมากเพื่อกระตุ้นการใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น
- **การลดต้นทุน:** ต้นทุนไฟฟ้าสำหรับโซลาร์เซลล์ที่ปรับระดับลดลงประมาณ 90% ในช่วงปี 2010 ถึง 2022³⁹ นำไปสู่การขยายขนาดการใช้งาน
- **กำลังการผลิตและนโยบายอุตสาหกรรม:** ความก้าวหน้าในการพัฒนาโซลูชันพลังงานสะอาด โดยเฉพาะการใช้โซลาร์เซลล์ ส่งผลให้เกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว

พลังงานแสงอาทิตย์มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนไปสู่พลังงานหมุนเวียน เพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเทคโนโลยีหลักใช้ในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงาน คือ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Cell หรือ PV) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า โซลาร์เซลล์ (Solar cell) และพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสงเข้มข้น (Concentrated Solar Power หรือ CSP) ซึ่งแต่ละระบบมีการแปลงแสงอาทิตย์เป็นพลังงานในรูปแบบที่แตกต่างกัน

- ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Cell หรือ PV) แปลงแสงอาทิตย์โดยตรงเป็นไฟฟ้าโดยใช้เซลล์ PV เซลล์เหล่านี้ทำจากวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ซึ่งมักจะเป็นซิลิคอนที่ดูดซับโฟตอนจากแสงอาทิตย์ การดูดซับนี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าผ่านกระบวนการโฟโตโวลตาอิก
- พลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสงเข้มข้น (Concentrated Solar Power หรือ CSP) สร้างพลังงานความร้อนโดยใช้กระจกหรือเลนส์เพื่อโฟกัสแสงอาทิตย์ในพื้นที่กว้างให้มารวมอยู่ที่จุดเล็กๆ ที่มีความเข้มข้นสูง จากนั้นแสงที่รวมกันนี้จะใช้เพื่อให้ความร้อนกับเกลือหลอมเหลวและนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อทำให้เกิดไอน้ำ ไอน้ำนี้จะขับเคลื่อนกังหันที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้า ระบบ CSP เหมาะสำหรับการผลิตพลังงานในขนาดใหญ่และมักใช้ในภูมิภาคที่มีแสงอาทิตย์โดยตรงสูง

³⁷ Mohamed Rashad_A Comparative Study on Photovoltaic and Concentrate Solar Thermal Power Plants_2015.pdf

³⁸ International Journal of Photoenergy_Sharma_Imperative Role of Photovoltaic and Concentrating Solar Power_2022

³⁹ Lazard (2024)

การเปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) และเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์แบบเข้มข้น (CSP) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) แปลงแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าโดยตรงมีความเหมาะสมที่สุด สำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดต่างๆ ตั้งแต่ขนาดเล็กที่ติดตั้งบนหลังคาไปจนถึงโซลาร์ฟาร์มขนาดใหญ่ โดยต้องการการบำรุงรักษาน้อย อย่างไรก็ตามพลังงานที่ได้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณแสงอาทิตย์และกระบวนการจัดเก็บพลังงาน ในขณะที่ CSP แปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนก่อน แล้วจึงใช้กังหันแบบเดิมแปลงความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า CSP ทำให้มีข้อได้เปรียบที่สำคัญเหนือเซลล์แสงอาทิตย์ PV และพลังงานหมุนเวียนอื่นๆ โดยการจัดเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ไว้เป็นความร้อนในเกลือหลอมเหลว ความร้อนที่สะสมไว้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด แม้ว่าจะไม่มีแสงแดดก็ตาม ด้วยการรวมพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อให้ความร้อนกับเกลือหลอมเหลว ระบบ CSP สามารถกักเก็บพลังงานได้เป็นเวลาหลายชั่วโมง

ในส่วนของต้นทุนการผลิตไฟฟ้า โดยคำนึงจากค่า Levelized Cost of Electricity (LCOE) คือ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุของโรงไฟฟ้าหารด้วยปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยค่า LCOE โรงไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์อยู่ที่ 29 – 92 \$/MWh และ พลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสงเข้มข้นจะอยู่ที่ 118 \$/MWh ซึ่งในปัจจุบันค่า LCOE ของพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์มีค่าต่ำกว่าถ่านหิน (69 – 168 \$/MWh) และ ก๊าซธรรมชาติ (45 – 108 \$/MWh) อีกทั้งพลังงานหมุนเวียนมีแนวโน้มต้นทุนการผลิต ไฟฟ้ามีราคาต่ำ ลงหากมีการใช้พลังงานหมุนเวียนมากขึ้นในอนาคต^{40,41,42}

ตัวอย่างข้อมูลโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสงเข้มข้น (Concentrated Solar Power หรือ CSP) ที่อยู่ภายใต้การดำเนินงานในหลายประเทศทั่วโลก

ตารางที่ 6 โดยระบุชื่อโครงการ กำลังการผลิตไฟฟ้า (MW(e)) เทคโนโลยีที่ใช้ ผู้ออกแบบ ประเทศที่ตั้ง และสถานะของโครงการ ซึ่งช่วยแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายและการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์แบบ CSP ที่ได้รับความนิยมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานหมุนเวียน

ตารางที่ 6 โครงการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสงเข้มข้น (Concentrated Solar Power หรือ CSP) ภายใต้การดำเนินงาน⁴³

Name	Optput MW(e)	Technology Type	Designer	Country	Status
Ouarzazate Solar Power Station	510	Parabolic trough and solar power	Noor	Morocco	In operation
Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park	700	Parabolic trough and solar power	Dubai Electricity and Water Authority (DEWA)	Dubai	In operation
Ivanpah Solar Power Facility	392	solar power	NRG Energy	US	In operation
Solaben Solar Power Station	200	Parabolic trough	Abengoa	Spain	In operation

⁴⁰ Anthony Asuega et al. (2023)

⁴¹ Lazard (2024)

⁴² IRENA

⁴³ Sylvian Rodat et al.,_clean technologies_2024

การจัดการกับขยะแผงโซลาร์เซลล์ (Solar Panel Waste Management)

1) การแยกและรีไซเคิลวัสดุ (Material Separation and Recycling)

- กระบวนการทางเคมี (Chemical Processes): แผงโซลาร์เซลล์มักประกอบด้วยซิลิคอน (Si), อะลูมิเนียม (Al), ทองแดง (Cu), และวัสดุอื่นๆ โดยมีการแยกโลหะโดยกระบวนการทางเคมี เช่น การล้างด้วยกรด (Acid Leaching)
- การรีไซเคิลซิลิคอน (Silicon Recycling): ซิลิคอนที่สกัดออกมาสามารถนำมาผลิตแผงใหม่ได้ ซึ่งช่วยลดความต้องการในการขุดแร่ซิลิคอน

2) การใช้ชิ้นส่วนซ้ำ (Reusing Components)

- การประเมินประสิทธิภาพ (Performance Assessment): แผงโซลาร์เซลล์ที่มีประสิทธิภาพลดลง แต่ยังสามารถใช้งานได้สามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องการพลังงานน้อย เช่น ระบบชาร์จแบตเตอรี่หรืออุปกรณ์ในชนบท
- การบูรณะ (Refurbishment): แผงที่เสียหายเล็กน้อยสามารถซ่อมแซมและนำกลับมาใช้งานใหม่ได้

3) การกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Waste Disposal)

- การควบคุมมลพิษ (Pollution Control): การกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ต้องทำในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุมเพื่อป้องกันการปล่อยสารพิษ เช่น ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ซึ่งเป็นสารอันตรายที่ใช้ในบางประเภทของแผงโซลาร์เซลล์
- การเผาทำลายอย่างปลอดภัย (Safe Incineration): สำหรับวัสดุที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ อาจต้องมีการเผาทำลายในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมเพื่อป้องกันการปล่อยมลพิษ⁴⁴

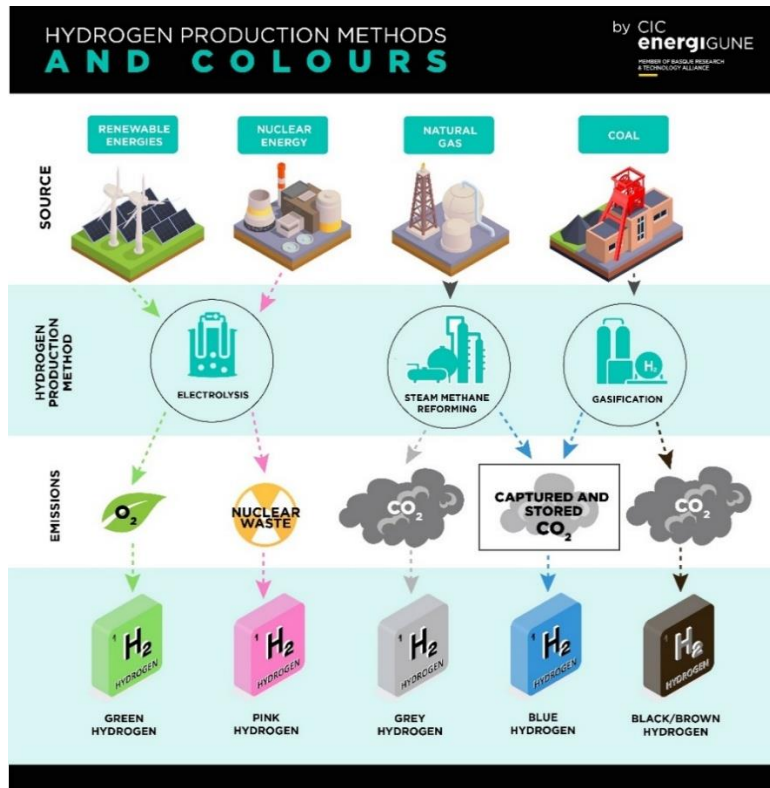
ระดับความพร้อมทางเทคโนโลยี	9 - 7 (การใช้ในเชิงพาณิชย์)	6 - 4 (การพัฒนาระบบต้นแบบ)	3 - 1 (การพัฒนาระบบต้นแบบและการวิจัยพื้นฐาน)
ความพร้อมของเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระดับนานาชาติ	Solar Energy		
	Nuclear Small Modular Reactor (SMR)		
	Hydropower		
	Wind Power		
	Geothermal Power		

รูปที่ 16 ความพร้อมของเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้า

⁴⁴ www.greenmatch.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling

3.3) ไฮโดรเจน (Hydrogen)

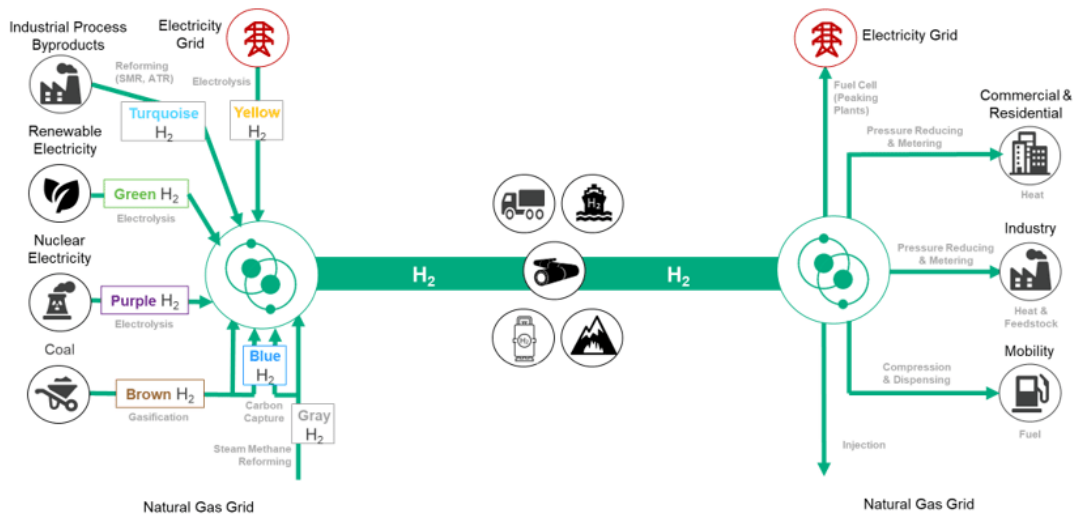
ห่วงโซ่คุณค่าของไฮโดรเจนจากการผลิตสู่การใช้งาน



รูปที่ 17 การจัดประเภทสีไฮโดรเจนโดยอิงจากวิธีการผลิตและแหล่งพลังงานที่ใช้ในการผลิต⁴⁵

ไฮโดรเจนสามารถแบ่งเป็นสีได้ทั้งหมด 12 สี ตามเทคโนโลยี วัตถุดิบ และแหล่งพลังงานที่ใช้ในการผลิต โดยในรายงานนี้จะกล่าวถึงไฮโดรเจน 5 สีหลัก ดังนี้ ไฮโดรเจนสีเทา ไฮโดรเจนสีน้ำตาล ไฮโดรเจนสีน้ำเงิน ไฮโดรเจนสีเขียว และไฮโดรเจนสีชมพู ดังแสดงในรูปที่ 17 ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำ (Steam Methane Reforming) โดยมีก๊าซธรรมชาติเป็นวัตถุดิบคือ ไฮโดรเจนสีเทา (Grey Hydrogen) การแปรสภาพถ่านหินเป็นก๊าซ (Gasification) เรียกว่าไฮโดรเจนสีดำหรือสีน้ำตาล (Black or Brown Hydrogen) ขึ้นอยู่กับคุณภาพของถ่านหิน เมื่อนำกระบวนการผลิตไฮโดรเจนทั้งสองแบบมารวมกับเทคโนโลยีการดักจับ การนำไปใช้ และการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Capture, Utilization, and Storage หรือ CCUS) เพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยจากกระบวนการ ไฮโดรเจนที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีนี้เรียกว่า ไฮโดรเจนสีน้ำเงิน (Blue Hydrogen) เมื่อเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนเป็นกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) โดยใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตมาจากพลังงานหมุนเวียนจะได้เป็นไฮโดรเจนสีเขียว (Green Hydrogen) และหากพลังงานไฟฟ้ามาจากพลังงานนิวเคลียร์จะเป็นไฮโดรเจนสีชมพู (Pink Hydrogen) ทั้งไฮโดรเจนสีเขียวและสีชมพูมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำหรือแทบไม่มีเลย ดังนั้นการเลือกเทคโนโลยี วัตถุดิบ และแหล่งพลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้

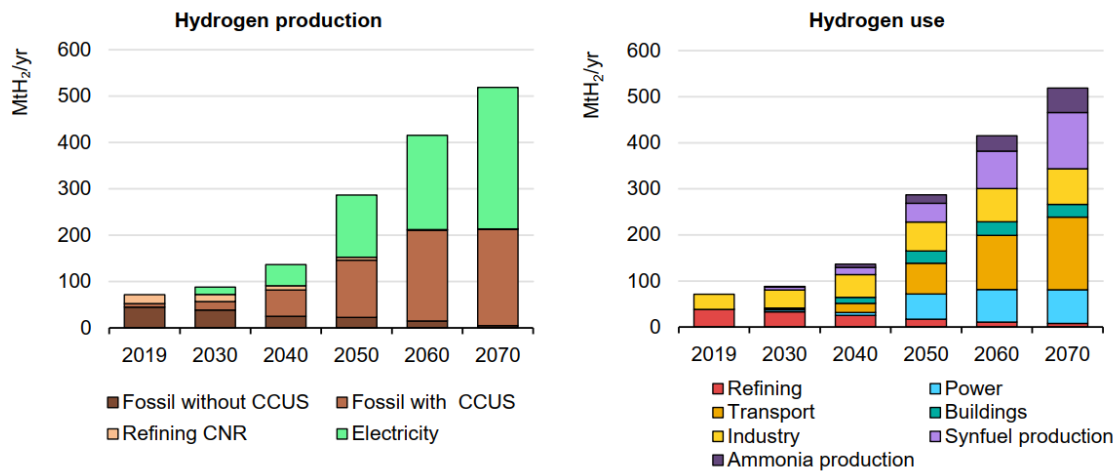
⁴⁵ "Hydrogen Production Methods and Its Colours."



รูปที่ 18 ห่วงโซ่คุณค่าของไฮโดรเจน⁴⁶

การลดการปล่อยคาร์บอนในการผลิตไฮโดรเจนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการบรรลุเป้าหมายพลังงานที่ยั่งยืนสำหรับอนาคต รวมถึงเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตไฮโดรเจนที่ปล่อยคาร์บอนต่ำและการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ในกระบวนการผลิต เช่น การผลิตไฮโดรเจนสีเขียวผ่านการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยแหล่งพลังงานหมุนเวียน (พลังงานแสงอาทิตย์ ลม น้ำ) และการผลิตไฮโดรเจนสีฟ้าที่ผสมผสานรวมกับการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Storage หรือ CCS) การเปลี่ยนจากการผลิตไฮโดรเจนแบบดั้งเดิมซึ่งครองตลาดในปัจจุบันและมีส่วนสำคัญในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก มาเป็นเทคโนโลยีขั้นสูงเหล่านี้ สามารถลดการปล่อยคาร์บอนจากการผลิตไฮโดรเจนได้อย่างมาก ทำให้ไฮโดรเจนคาร์บอนต่ำสามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานใหม่ในอนาคตและใช้งานได้หลากหลายภาคส่วน ตามการคาดการณ์การผลิตและการใช้งานไฮโดรเจนตามแผนงานความยั่งยืนโดย IEA แสดงในรูปที่ 19 เห็นได้ชัดว่าสัดส่วนของการผลิตแบบดั้งเดิมจะลดลง สุดท้ายจะถูกแทนที่ด้วยเทคโนโลยีสะอาด รวมทั้งความต้องการไฮโดรเจนจะเพิ่มมากขึ้นและกระจายไปหลายภาคส่วน เช่น การขนส่ง พลังงาน ครุภัณฑ์ การผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์และแอมโมเนีย โดยห่วงโซ่คุณค่าของไฮโดรเจนแสดงดังรูปที่ 18 ดังนั้นไฮโดรเจนจึงเป็นทั้งวัตถุดิบและเชื้อเพลิงคาร์บอนต่ำที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตและการพัฒนาประเทศเพื่อตอบสนองเป้าหมายทางสิ่งแวดล้อมและก้าวสู่ความยั่งยืนในอนาคต

⁴⁶ Cahill and Bromberek, "Improving Hydrogen Value Chain Performance."

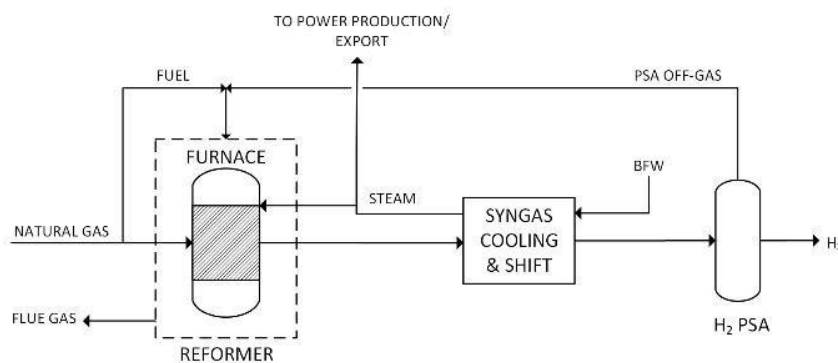


รูปที่ 19 เชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนและความต้องการก๊าซไฮโดรเจนในแต่ละภาคส่วนในแผนพัฒนาอย่างยั่งยืน⁴⁷

การผลิตไฮโดรเจนอย่างยั่งยืน: วิถีทางและการปฏิบัติ

การผลิตไฮโดรเจนมีเทคโนโลยีหลายหลายขึ้นอยู่กับกระบวนการ สารตั้งต้นและแหล่งพลังงานในการผลิต โดยกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ กระบวนการรีฟอร์มมิ่งก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำ (Steam Methane Reforming) กระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซ (Gasification) และกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) ที่กำลังได้รับความสนใจและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพราะเป็นเทคโนโลยีที่ไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมี ทั้งนี้ นอกเหนือจากเทคโนโลยี วัตถุดิบและแหล่งพลังงานก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตเช่นเดียวกัน

1. กระบวนการรีฟอร์มมิ่งก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำ (Steam Methane Reforming)



รูปที่ 20 แผนภาพการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำ⁴⁸

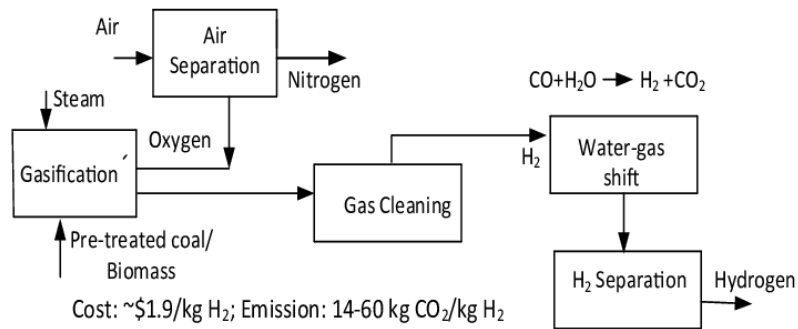
กระบวนการรีฟอร์มมิ่งก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำเป็นเทคโนโลยีที่แพร่หลายสำหรับการผลิตไฮโดรเจนในอุตสาหกรรม โดยใช้ก๊าซมีเทน (Methane หรือ CH₄) จากก๊าซธรรมชาติเป็นวัตถุดิบหลัก กระบวนการนี้จัดอยู่ในกลุ่มกระบวนการเคมีความร้อน

⁴⁷ Energy Technology Perspectives 2020 – Analysis - IEA. (2020b, September 1). IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>

⁴⁸ Martin et al., "Progress Update on the Allam Cycle: Commercialization of NET Power and the NET Power Demonstration Facility."

(Thermo-Chemical Process) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการผลิตไฮโดรเจน อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้มีข้อเสียสำคัญคือการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศในปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้จึงต้องการการปรับเปลี่ยนเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

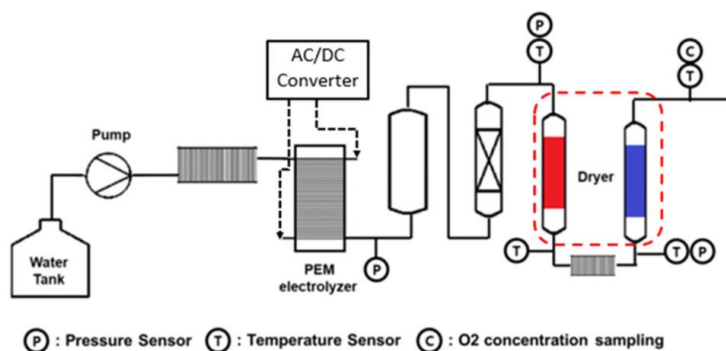
2. กระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซ (Gasification)



รูปที่ 21 แผนภาพการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซ (Gasification)⁴⁹

กระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซ (Gasification) เป็นทางเลือกหนึ่งในการผลิตไฮโดรเจน โดยสามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลาย เช่น ถ่านหิน หรือเชื้อเพลิงแข็งจากชีวมวล กระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซเริ่มจากการเผาวัตถุดิบให้กลายเป็นก๊าซ จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำเป็นก๊าซ (Water-Gas Shift Reaction) แล้วจึงแยกไฮโดรเจนออกจากก๊าซอื่นๆ ที่เกิดขึ้น กระบวนการนี้มีข้อดีในแง่ความยืดหยุ่นของวัตถุดิบและอาจเหมาะสมกับพื้นที่ที่มีทรัพยากรถ่านหินหรือชีวมวลมากกว่าก๊าซธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม กระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซก็ยังคงปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก จึงยังจำเป็นต้องหาวิธีลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากกระบวนการเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

3. กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)

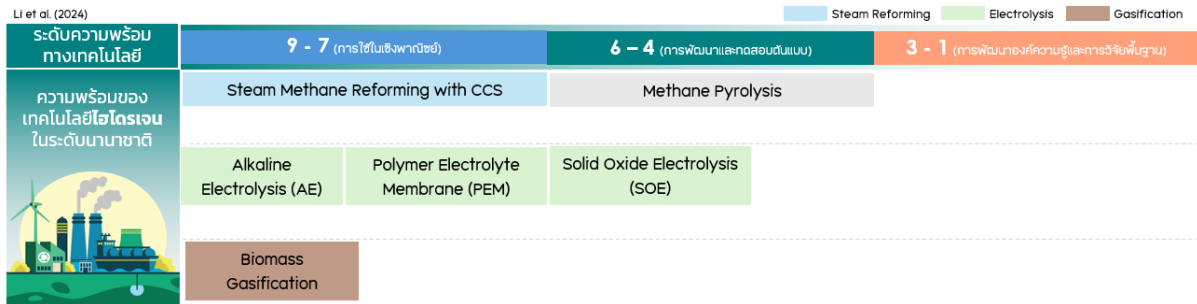


รูปที่ 22 แผนภาพการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)⁵⁰

⁴⁹ Demirel, "Technoeconomics and Sustainability of Renewable Methanol and Ammonia Productions Using Wind Power-Based Hydrogen."

⁵⁰ Kwon, Sooin, et al. "Development of an In-House Code for Dry Tower of Heat Transfer Analysis in Hydrogen Purification System." *Energies*, vol. 16, no. 13, June 2023, p. 5090. <https://doi.org/10.3390/en16135090>.

การผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าในการแยกน้ำเป็นก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และก๊าซออกซิเจน (O₂) นับเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตไฮโดรเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำพลังงานสะอาดมาใช้ในกระบวนการ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานหมุนเวียนอย่างแสงอาทิตย์ ลม และน้ำ หรือแม้แต่พลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งล้วนปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณต่ำ ข้อดีที่สำคัญของวิธีนี้คือไม่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรง จึงเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการผลิตไฮโดรเจน

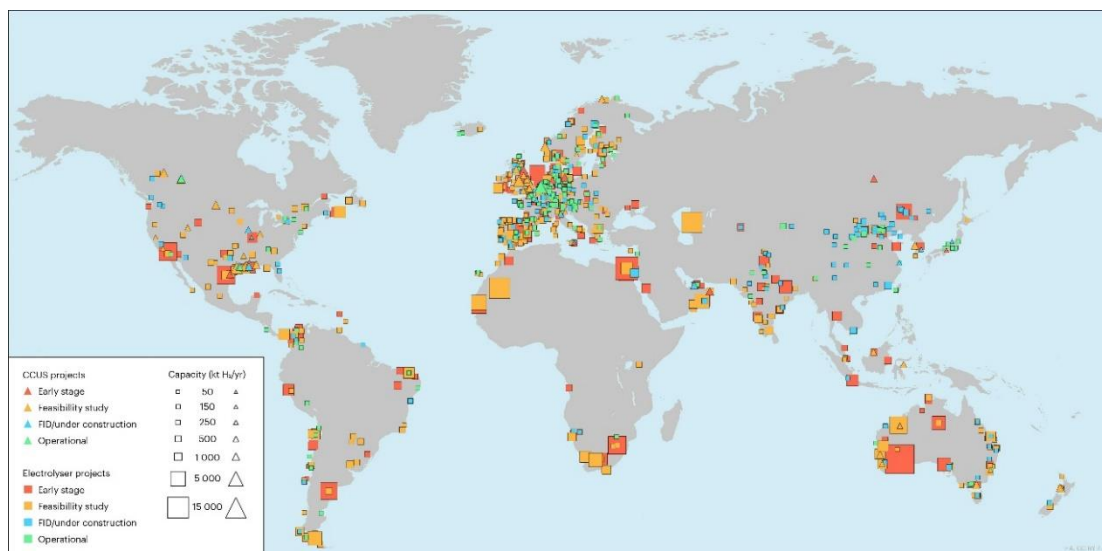


รูปที่ 23 ความพร้อมของเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจน⁵¹

เทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนได้วิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level หรือ TRL) อยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ (TRL 7 – 9) และยังมีเทคโนโลยีที่อยู่ในขั้นตอนการพัฒนาและทดสอบต้นแบบ (TRL 4 – 6) อยู่บางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 23 กระบวนการ Reforming ที่ใช้งานร่วมกับการดักจับและกักเก็บก๊าซคาร์บอน (Carbon Capture and Storage หรือ CCS) อยู่ในระดับ TRL 9 ซึ่งทำให้เป็นเทคโนโลยีที่ถูกใช้งานเชิงพาณิชย์แล้วในต่างประเทศ รวมถึงการแปรสภาพชีวมวลเป็นก๊าซ (Biomass Gasification) อยู่ในระดับ TRL 8 เช่นเดียวกับกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) ก็อยู่ในระดับ TRL สูงเช่นเดียวกับกระบวนการอื่นๆ เช่น Alkaline Electrolysis (AE) และ Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Electrolysis เป็นต้น

⁵¹ Li et al., "A Perspective on Three Sustainable Hydrogen Production Technologies with a Focus on Technology Readiness Level, Cost of Production and Life Cycle Environmental Impacts."

มุ่งสู่ความท้าทายในอนาคตของไฮโดรเจนในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต



รูปที่ 24 สถานที่ตั้งการพัฒนาโครงการการผลิตไฮโดรเจนปลดปล่อยคาร์บอนต่ำ⁵²

การพัฒนาโครงการผลิตไฮโดรเจนคาร์บอนต่ำกำลังเติบโตอย่างต่อเนื่องและกระจายอยู่ในหลายภูมิภาคทั่วโลก ดังแสดงในรูปที่ 24 โดยครอบคลุมทั้งการผลิตไฮโดรเจนสีน้ำเงินและสีเขียว โครงการส่วนใหญ่ที่เริ่มดำเนินการแล้วมักอยู่ในภูมิภาคยุโรป ตามข้อมูลจากองค์การพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency หรือ IEA⁵³) ตัวอย่างที่น่าสนใจคือโครงการผลิตไฮโดรเจนสีน้ำเงินที่โรงกลั่นน้ำมัน Pernis ประเทศเนเธอร์แลนด์ ซึ่งใช้กระบวนการแปรสภาพน้ำมันเตาเป็นก๊าซ (Gasification) (ดังแสดงในรูปที่ 25) โครงการนี้มีกำลังการผลิตไฮโดรเจน 10 กิโลตันต่อปี โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกดักจับและนำไปใช้ประโยชน์หรือกักเก็บในหลุมปิโตรเลียมในทะเลเหนือ กรณีนี้มีความคล้ายคลึงกับสถานการณ์ในประเทศไทย ซึ่งมีแหล่งกักเก็บปิโตรเลียมในอ่าวไทยและมีโครงสร้างพื้นฐานทางอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี รวมทั้งในปัจจุบันบริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม (PTTEP) ได้เริ่มทำการศึกษาและดำเนินการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณแหล่งอาทิตย์ ทำให้การผลิตไฮโดรเจนสีน้ำเงินในประเทศไทยมีความเป็นไปได้สูง หากได้รับการสนับสนุนที่เหมาะสม ในด้านไฮโดรเจนสีเขียว มีตัวอย่างโครงการที่น่าสนใจจากบริษัทแอร์ลิควิด (Air Liquide)⁵⁴ ในอุทยานวิทยาศาสตร์ซินจู๋ ประเทศไต้หวัน โครงการนี้มีกำลังการผลิตไฮโดรเจน 4 กิโลตันต่อปี ด้วยอิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) ขนาด 25 เมกะวัตต์เพื่อใช้อุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) โดยคาดว่าจะสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 35 กิโลตันต่อปี เมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตไฮโดรเจนแบบดั้งเดิม ในขณะเดียวกันบริษัทลินเด (Linde)⁵⁵ ได้ติดตั้งอิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) ขนาด 9 เมกะวัตต์ สำหรับการผลิตไฮโดรเจนสีเขียวเพื่อใช้อุตสาหกรรมเคมีในประเทศสิงคโปร์ โดยมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 1.8 กิโลตันต่อปี การส่งเสริมทางด้านธุรกิจไฮโดรเจนในประเทศไทยนำโดยบริษัท บางกอกอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด ได้ร่วมมือทางธุรกิจ⁵⁶ บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) กับ

⁵² "Executive Summary – Global Hydrogen Review 2023 – Analysis - IEA."

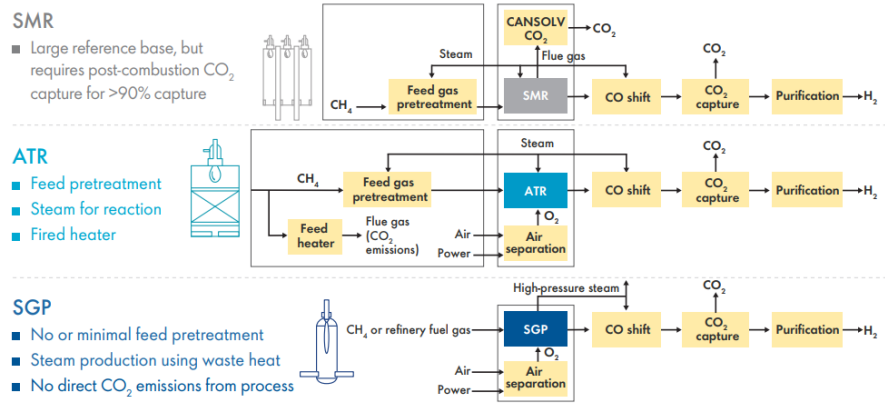
⁵³ "Hydrogen Production Projects Interactive Map – Data Tools - IEA."

⁵⁴ Liquide, "Air Liquide Completes the First Phase of Ultra-High Purity Low-Carbon H2 Electrolyzer Plants in Taiwan."

⁵⁵ "Linde to Supply Green Hydrogen to Evonik in Singapore," Linde, April 20, 2023, <https://www.linde.com/news-and-media/2023/linde-to-supply-green-hydrogen-to-evonik-in-singapore>.

⁵⁶ GC จับมือ ปตท. ร่วมผลักดันเศรษฐกิจไฮโดรเจน (Hydrogen Economy) ครั้งแรกในประเทศไทย ดึงศักยภาพของคาร์บอนต่ำ. (n.d.-b). <https://www.pttgcgroup.com/th/newsroom/news/1352/>

เพื่อส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพภาพเศรษฐกิจไฮโดรเจน (Hydrogen Economy) ในประเทศไทย มุ่งสู่การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพื่อตอบสนองเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ โครงการในประเทศและต่างประเทศเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นในระดับโลก

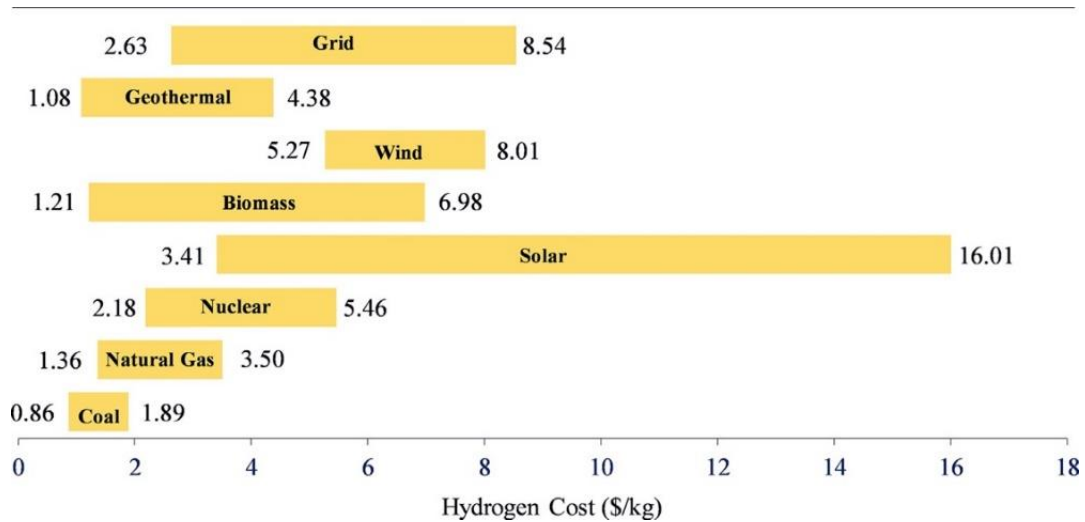


รูปที่ 25 กระบวนการผลิตไฮโดรเจนสีน้ำเงินด้วยวิธีการแปรสภาพเป็นก๊าซของรอยัลดัตช์เชลล์ (Shell)⁵⁷

การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตไฮโดรเจนของประเทศไทยมีทั้งโอกาสและความท้าทาย มีความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนจากไฮโดรเจนสีเทาเป็นสีน้ำเงิน เนื่องจากประเทศมีโครงสร้างพื้นฐานที่ดีในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี การนำเข้าก๊าซธรรมชาติ และได้รับการสนับสนุนจากทั้งภาครัฐและเอกชนในด้านเทคโนโลยี เช่น CCUS อีกทั้งยังมีได้มีการเริ่มศึกษาการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอ่าวไทยที่นำโดยบริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) อย่างไรก็ตาม การลงทุนในเทคโนโลยี CCUS และการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานมีต้นทุนสูง ดังนั้นการผลิตไฮโดรเจนสีน้ำเงินจึงต้องการแรงสนับสนุนจากภาครัฐและเอกชนในด้านความร่วมมือและเงินลงทุนเพื่อให้โครงการนี้เกิดขึ้นได้

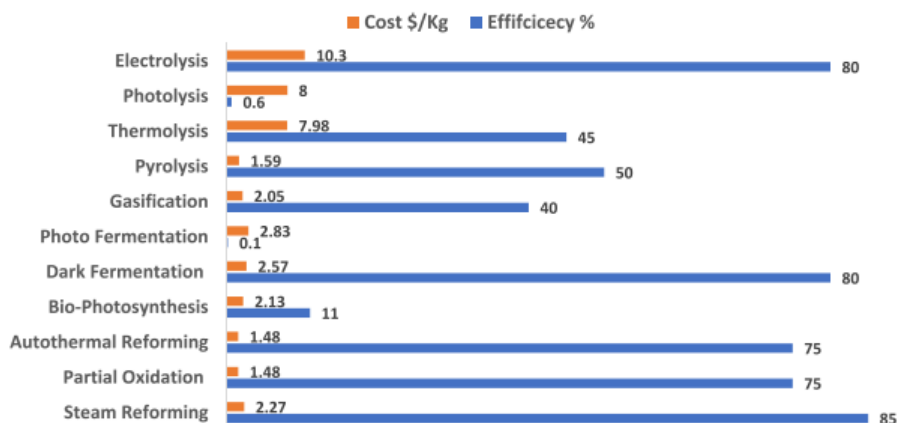
การผลิตไฮโดรเจนสีเขียวและสีชมพูยังคงมีความท้าทายหลายด้าน เช่น การพัฒนาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพสูง เงินลงทุนมหาศาลในโครงสร้างพื้นฐานของพลังงานหมุนเวียนและพลังงานนิวเคลียร์ รวมถึงข้อจำกัดด้านทรัพยากรและพื้นที่สำหรับติดตั้งแหล่งพลังงานหมุนเวียน นอกจากนี้ยังต้องอาศัยเวลาและความร่วมมือจากหลายภาคส่วน อาทิเช่น นโยบายและแผนการดำเนินงานที่เป็นรูปธรรมจากภาครัฐ การร่วมลงทุนของภาคเอกชน รวมถึงการสร้างการยอมรับจากประชาชนต่อพลังงานรูปแบบใหม่ โดยเฉพาะความกังวลด้านความปลอดภัยของพลังงานนิวเคลียร์ ดังนั้นการผลิตไฮโดรเจนสีเขียวและสีชมพูในระดับอุตสาหกรรมอาจต้องใช้ระยะเวลาในการพัฒนานานกว่าการผลิตไฮโดรเจนสีน้ำเงิน

⁵⁷ "Shell Blue Hydrogen Process | Shell Catalysts & Technologies' Glossary."



รูปที่ 26 ต้นทุนการผลิตไฮโดรเจนอิงจากแหล่งพลังงานในการผลิต⁵⁸

เมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตไฮโดรเจนในรูปที่ 26 พบว่าการผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีต้นทุนต่ำกว่าพลังงานทางเลือก ส่งผลให้การผลิตไฮโดรเจนสีเขียวหรือสีชมพูอาจเกิดขึ้นได้ช้า อย่างไรก็ตาม ทรัพยากรด้านพลังงานหมุนเวียนของประเทศไทยเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถส่งเสริมการผลิตไฮโดรเจนสีเขียวได้ เมื่อพิจารณาที่เทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจน จากรูปที่ 27 กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสมีประสิทธิภาพเทียบเคียงกับกระบวนการ Reforming อย่างไรก็ตาม ต้นทุนของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสแพงกว่ากระบวนการ Reforming และ Gasification ประมาณ 5 เท่า แต่เมื่อพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของทั้งสามเทคโนโลยี เห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเป็นเทคโนโลยีสะอาดเพราะไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมี การส่งเสริมการผลิตไฮโดรเจนคาร์บอนต่ำอาจส่งผลทั้งในเชิงบวกและลบต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่แตกต่างกัน ในด้านบวก นอกจากจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังส่งผลดีต่อภาคเศรษฐกิจและสังคมโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการสร้างมูลค่าเพิ่มในระบบเศรษฐกิจจากธุรกิจใหม่ ในขณะเดียวกัน อาจส่งผลเสียต่ออุตสาหกรรมที่พึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก



รูปที่ 27 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและต้นทุนของการผลิตไฮโดรเจนตามเทคโนโลยี⁵⁹

⁵⁸ El-Emam and Özcan, "Comprehensive Review on the Techno-Economics of Sustainable Large-Scale Clean Hydrogen Production."

⁵⁹ Farhana, Mahamude, and Kadirgama, "Comparing Hydrogen Fuel Cost of Production from Various Sources - a Competitive Analysis."

การเลือกเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนนั้นขึ้นอยู่กับแผนและนโยบายของภาครัฐ รวมถึงโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่เดิม ในอุตสาหกรรม เมื่อพิจารณารูปที่ 18 จะเห็นได้ว่าหากเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนในประเทศยังไม่ได้รับการพัฒนาและไม่พร้อมนำมาใช้งาน การนำเข้าไฮโดรเจนก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม การขนส่งไฮโดรเจนสามารถขนส่งได้หลายรูปแบบ โดยประเภทการขนส่งที่น่าสนใจคือ การเปลี่ยนไฮโดรเจนให้เป็นแอมโมเนีย (Ammonia) ซึ่งเป็นที่กล่าวถึงและปรากฏในนโยบายของหลายประเทศ ซึ่งแอมโมเนียสามารถนำไปใช้ได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการแปรกลับให้เป็นไฮโดรเจน เช่น การนำแอมโมเนียไปเผาโดยตรงซึ่งได้เริ่มมีการศึกษาและพัฒนาโครงการนี้มาโดย GPSC ที่ร่วมมือ Doosan⁶⁰ แต่ข้อจำกัดของการเผาแอมโมเนียคือการปล่อย NOx จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ หากต้องการแปรรูปแอมโมเนียกลับเป็นไฮโดรเจนจะต้องมีเทคโนโลยี Ammonia Cracker ที่ใช้ในการแปรรูปแอมโมเนียให้เป็นไฮโดรเจน นอกเหนือจากการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระบวนการแล้ว เพื่อให้เกิดการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างมีประสิทธิภาพจะต้องนำไฮโดรเจนมาใช้ในภาคส่วนอื่นๆ นอกเหนือจากกระบวนการผลิต เช่น การขนส่งหรือกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

⁶⁰ GPSC Teams up With Doosan to Develop Ammonia Co-Firing and CCUS Technology to Achieve Its Net Zero Target | Global Power Synergy Public Company Limited (GPSC), 2024

3.4) การปรับปรุงกระบวนการ (Process Improvement)

การปรับปรุงกระบวนการ (Process Improvement) คือ การเพิ่มประสิทธิภาพ ประสิทธิผล และความยั่งยืนของกระบวนการอุตสาหกรรมอย่างเป็นระบบ เป็นการมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงการดำเนินงานของระบบภายในเป็นหลักเพื่อลดการปล่อยมลพิษรวมถึงของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรตลอดจนพลังงาน

การปรับปรุงกระบวนการในอุตสาหกรรมเคมีโดยทั่วไปนั้นมุ่งเน้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน ลดต้นทุน และปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ เทคนิคการบูรณาการกระบวนการ (Process Integration) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมโยงของกระบวนการต่างๆ ในการลดของเสียและปรับปรุงการใช้ทรัพยากร ในขณะที่ การรวมกระบวนการ (Process Intensification) จะเป็นการใช้เทคนิคเชิงวิศวกรรมขั้นสูง เช่น เครื่องปฏิกรณ์ประสิทธิภาพสูงและการปรับปรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อให้ได้ผลผลิตที่ต้องการโดยใช้พลังงานและวัตถุดิบน้อยลง รวมไปถึงอุปกรณ์ขนาดเล็กลง นอกจากนี้ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีดิจิทัลในปัจจุบัน เช่น เทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัล (Digital Twin), เซ็นเซอร์อัจฉริยะ (Smart Sensors) และปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด (Generative AI) ช่วยให้เราสามารถจำลองสถานการณ์ต่างๆ ได้อย่างละเอียด แม่นยำมากขึ้น อีกทั้งช่วยในการจัดการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และการปรับกระบวนการแบบเรียลไทม์ได้อย่างเหมาะสม

ดังนั้นการปรับตัวให้สอดคล้องกับข้อกำหนดทางกฎหมายและความคาดหวังของสังคม เช่น การเข้าร่วมแผนแม่บทของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Ministry of Natural Resource and Environment หรือ MNRE) ของประเทศไทย การปฏิบัติตามพันธกรณีของกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change หรือ UNFCCC) และการบรรลุเป้าหมายความยั่งยืนตามที่กำหนดโดยข้อตกลงปารีส จะช่วยทำให้บริษัทและภาคอุตสาหกรรมต่างๆ สามารถมุ่งไปสู่การเป็นผู้นำทางด้านปฏิบัติการและการจัดการที่ยั่งยืนได้ ซึ่งการปรับปรุงกระบวนการด้วยเทคนิคต่างๆ ดังกล่าวจะเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญที่จะเสริมสร้างและเพิ่มความได้เปรียบทางการแข่งขันในตลาดโลกให้กับบริษัทและภาคอุตสาหกรรมได้อย่างยั่งยืน

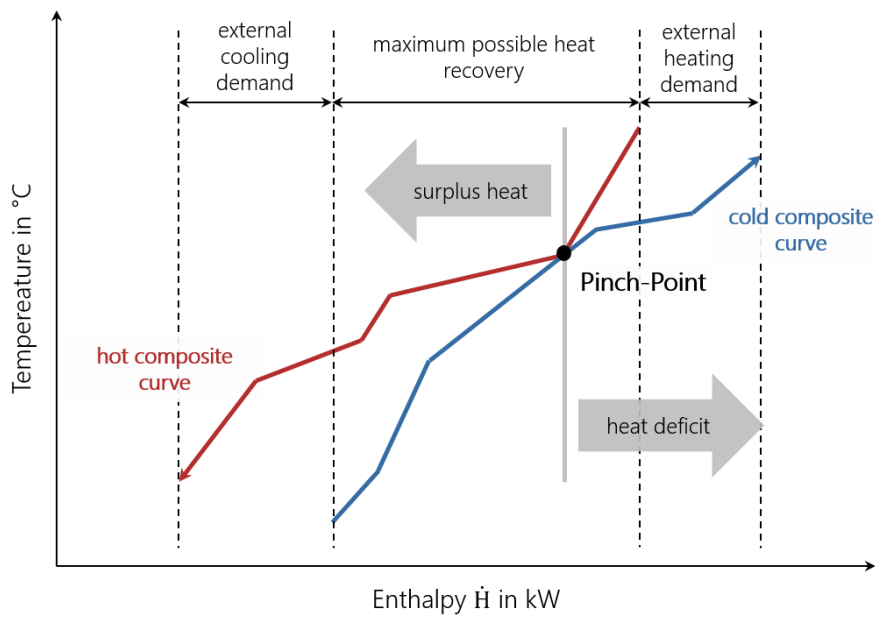
การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอย่างยั่งยืน (การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ)

เป้าหมายร่วมของเทคนิคการบูรณาการกระบวนการ (Process Integration) และการรวมกระบวนการ (Process Intensification) คือ การส่งเสริมการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอย่างยั่งยืน

1) การบูรณาการกระบวนการ (Process Integration)

การบูรณาการกระบวนการเป็นวิธีการที่มุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวม แทนที่จะพิจารณาหน่วยกระบวนการแต่ละหน่วยเป็นอิสระ การบูรณาการกระบวนการจะเป็นการวิเคราะห์ว่าชิ้นส่วนต่างๆ ของระบบการผลิตเชื่อมต่อและทำงานร่วมกันอย่างไร เพื่อแสวงหาโอกาสในการลดการใช้พลังงาน ลดของเสีย และลดต้นทุนโดยการใช้ประโยชน์จากการทำงานร่วมกันตลอดทั้งห่วงโซ่การผลิต ซึ่งหนึ่งในเครื่องมือหนึ่งที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในชุดเครื่องมือการบูรณาการกระบวนการคือ เทคนิค Pinch Analysis ซึ่งพัฒนาขึ้นสำหรับการออกแบบเครือข่ายระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และถูกนำไปใช้เพื่อบริหารจัดการกับทรัพยากรอื่นๆ ในหลากหลายรูปแบบ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบกราฟเพื่อระบุจุด "พินช์

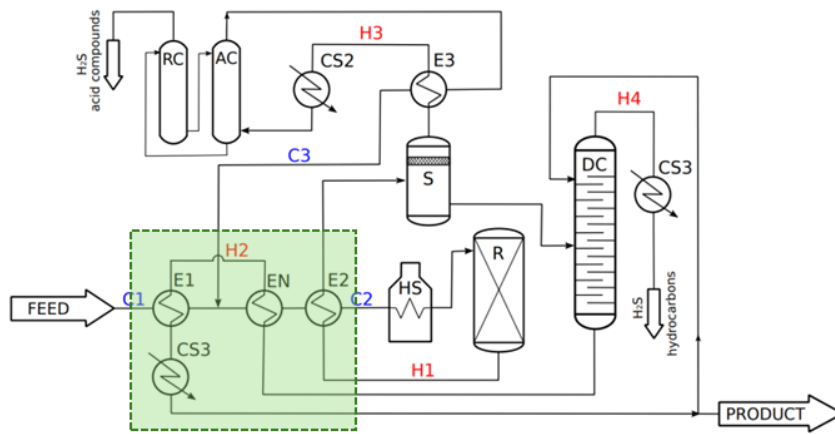
(Pinch)" ซึ่งแสดงถึงจุดที่เส้นโค้งของความต้องการพลังงานร้อน (Hot Composite Curve - เส้นสีแดง) และความต้องการพลังงานเย็น (Cold Composite Curve - เส้นสีน้ำเงิน) เข้ามาใกล้กันมากที่สุด ดังที่แสดงโดยแผนภาพในรูปที่ 28 จะช่วยให้สามารถทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในการจัดสรรทรัพยากรพลังงานความร้อนในระบบได้อย่างมีกลยุทธ์ เพราะเป็นจุดที่ไม่มีพลังงานส่วนเกินให้ถ่ายเทระหว่างกระบวนการร้อนและเย็นได้อีกต่อไป ยกตัวอย่างเช่น ในกระบวนการผลิต หากพบว่าจุดพินช์อยู่ที่อุณหภูมิหนึ่ง ผู้ปฏิบัติงานสามารถวางแผนใช้พลังงานร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่า และพลังงานเย็นจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยไม่ต้องใช้พลังงานภายนอกเพิ่มเติม ดังนั้นเทคนิคนี้จึงเป็นการช่วยลดการใช้พลังงานเพิ่มเติมที่ไม่จำเป็น และลดพลังงานที่สูญเสีย ทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากขึ้น



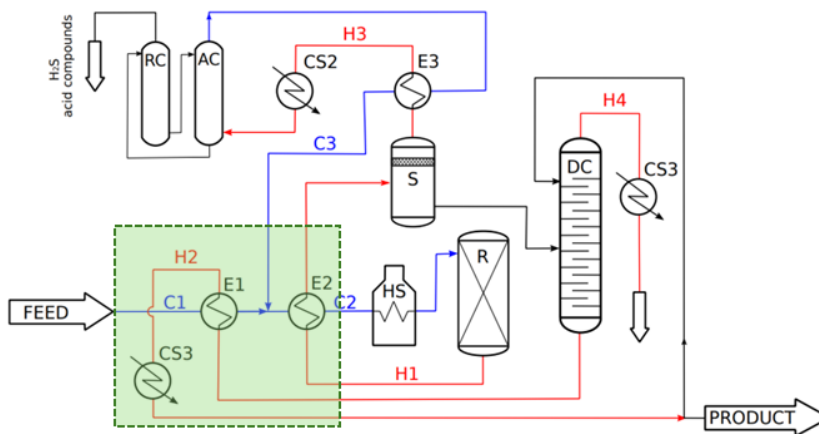
รูปที่ 28 การออกแบบเครือข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเทคนิค Pinch Analysis⁶¹

การบูรณาการเชิงความร้อนนั้นครอบคลุมถึงการใช้รูปแบบพลังงานที่แตกต่างกันอย่างมีกลยุทธ์ ตั้งแต่ความร้อนระดับต่ำไปจนถึงไอน้ำแรงดันสูงและไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น รูปที่ 29 แสดงถึงการใช้เทคนิค Pinch Analysis ในการออกแบบปรับปรุงเครือข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ของน้ำมัน โดยการมองกระบวนการแบบองค์รวม จากนั้นทำการจัดทำผังแสดงเส้นทางกระแสความร้อนที่จะช่วยให้สามารถปรับเส้นทางกระแสความร้อนเพื่อให้กระบวนการมีประสิทธิภาพทางพลังงานมากขึ้นพร้อมทั้งลดต้นทุนการดำเนินงานต่างๆไปพร้อมกัน

⁶¹ Brunner, F., Krummenacher, P., Wellig, B., Liem, P., Olsen, D., Morand, R., & Hodel, D. (2015). Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode. Bundesamt für Energie: Bern, Switzerland.



Before optimization



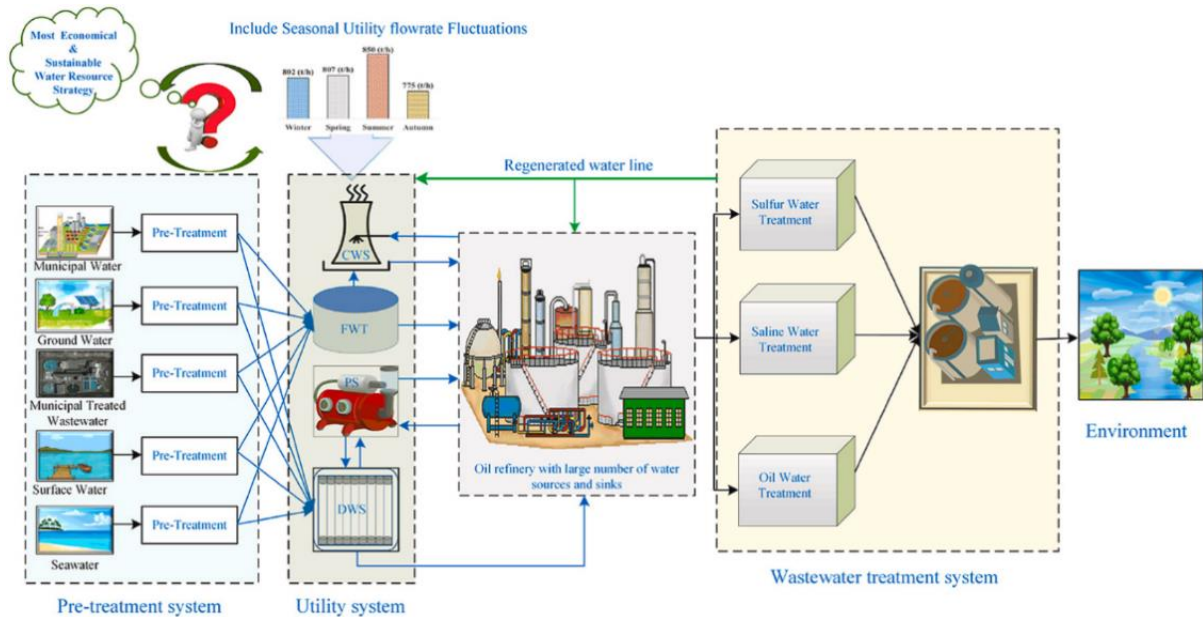
After optimization

รูปที่ 29 การออกแบบปรับปรุงเครือข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ของน้ำมัน⁶²

นอกเหนือจากความพยายามในการเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนเหลือทิ้ง การบูรณาการเชิงวัสดุ (Material Integration) ก็เป็นหัวข้อหลักของการทำ Pinch Analysis เช่นกัน ตัวอย่างที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือ แผนการบูรณาการเครือข่ายระบบน้ำที่มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำในระบบโรงงานเคมี ทั้งนี้การบูรณาการน้ำเริ่มมีความสำคัญมากยิ่งขึ้น เนื่องจากหลายอุตสาหกรรมกำลังเผชิญกับการขาดแคลนทรัพยากรน้ำที่เพิ่มขึ้น ด้วยการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบของแหล่งน้ำและจุดระบายภายในสถานประกอบการ จะช่วยให้เทคนิคอุตสาหกรรมสามารถลดการใช้น้ำจืดและลดการผลิตน้ำเสียได้อย่างมาก ตัวอย่างเช่น โครงการ Pearl GTL ในกาตาร์ ซึ่งเป็นนิคมอุตสาหกรรมครบวงจรทั้ง Upstream และ

⁶² Jegla, Z., & Freisleben, V. (2020). Practical energy retrofit of heat exchanger network not containing utility path. *Energies*, 13(11), 2711. <https://doi.org/10.3390/en13112711>

Downstream ได้บรรลุการเป้าหมายของการปล่อยของเหลวเกือบเป็นศูนย์ (Near-zero Liquid Discharge - near ZLD) ดังแสดงในรูปที่ 30



รูปที่ 30 ตัวอย่างแบบแผนการบูรณาการเครือข่ายระบบน้ำ⁶³

การบูรณาการกระบวนการมีบทบาทสำคัญในการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอุตสาหกรรม สามารถนำไปสู่การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วยการลดของเสียด้านพลังงานและวัสดุลง นอกจากนี้เทคนิคอื่นๆ เช่น การบูรณาการคาร์บอน กำลังถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับและใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วทั้งนิคมอุตสาหกรรม

ด้วยเหตุนี้ ในอนาคตการบูรณาการกระบวนการจะมีความสำคัญมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องด้วยอุตสาหกรรมต่างๆ ได้พยายามมุ่งสู่การสร้างความยั่งยืน การประยุกต์ใช้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อกำจัดของเสียและเพิ่มการใช้ทรัพยากรให้สูงสุด โดยสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์กับหลักการของการบูรณาการกระบวนการ ดังนั้นแนวทางแบบองค์รวมทั่วทั้งระบบของการบูรณาการกระบวนการจะเป็นเครื่องมือและหนึ่งกลไกสำคัญที่จำเป็นในการสร้างแนวปฏิบัติทางอุตสาหกรรมให้ยั่งยืนมากขึ้น เพื่อจัดการกับความท้าทายของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการขาดแคลนทรัพยากรที่กำลังจะเกิดขึ้น

2) การรวมกระบวนการ (Process Intensification)

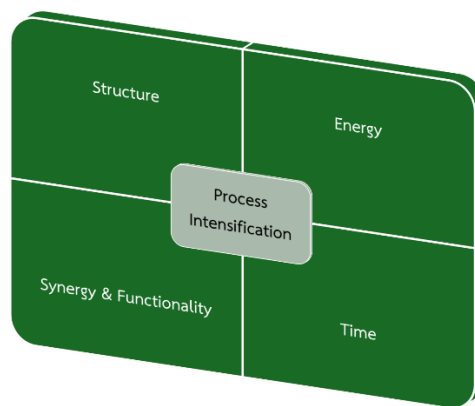
การรวมของกระบวนการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพหน่วยกระบวนการแต่ละหน่วยผ่านเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและลดขนาดอุปกรณ์ (รูปที่ 31) ซึ่งมีหลักการสำคัญ 4 ประการ ได้แก่

1. **โครงสร้าง:** มุ่งเน้นการออกแบบอุปกรณ์ที่มีขนาดกะทัดรัดมากขึ้นและสามารถทำงานได้หลายหน้าที่เพื่อให้กระบวนการเป็นไปอย่างราบรื่นและลดขนาดของอุปกรณ์

⁶³ Iqbal, K., Jiang, W., Ma, R., & Deng, C. (2022). Synthesis of large-scale total water network with multiple water resources under seasonal flow rate constraints. *Journal of Cleaner Production*, 337, 130462. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130462>

2. **พลังงาน:** เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานผ่านเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงาน
3. **การทำงานร่วมกันและฟังก์ชันการทำงาน:** รวมฟังก์ชันการทำงานต่างๆ เข้าด้วยกันในหน่วยที่ผนวกรวมกันได้ เพื่อใช้ประโยชน์จากการทำงานร่วมกันที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวม
4. **เวลา:** มุ่งเน้นการลดระยะเวลาของกระบวนการโดยการเร่งปฏิกิริยาและการปรับปรุงการดำเนินงานให้รวดเร็วยิ่งขึ้น

โดยหลักการเหล่านี้เมื่อรวมกันจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการใช้ทรัพยากร และลดต้นทุนการดำเนินงาน ส่งผลให้กระบวนการทางอุตสาหกรรมมีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากขึ้น



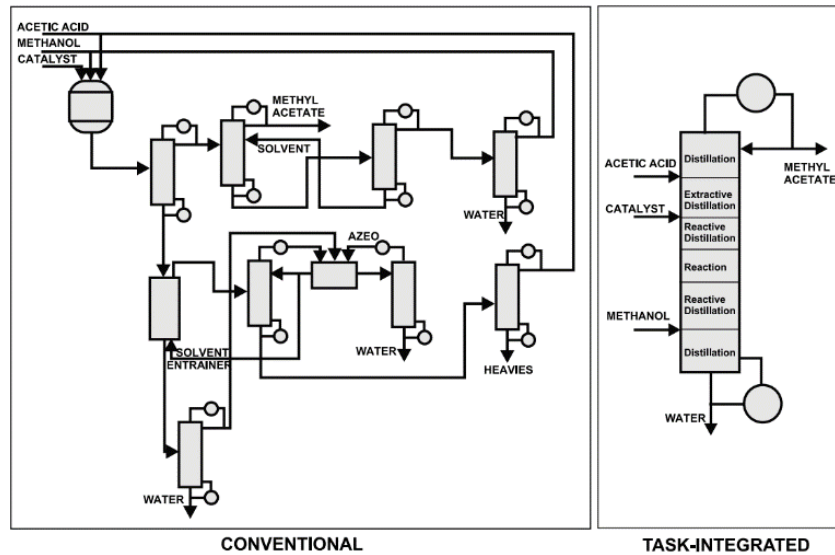
รูปที่ 31 ขอบเขตและหลักการสำคัญของการรวมกระบวนการ (Process Intensification)⁶⁴

โดยทั้งนี้มีความแตกต่างจากการบูรณาการกระบวนการซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานร่วมกันระหว่างหน่วยต่างๆ ภายในระบบการผลิต เพราะการรวมกระบวนการนั้นจะมุ่งเน้นการทำให้แต่ละหน่วยมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิผลมากขึ้นด้วยตัวเอง หลักการเหล่านี้นำไปสู่กระบวนการอุตสาหกรรมที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ประหยัดทรัพยากรมากขึ้น และคุ้มค่ามากขึ้น ตัวอย่างจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ได้แก่

- **หอกลั่นแบบมีปฏิกิริยา (Reactive Distillation Columns)**

การผสมผสานกระบวนการปฏิกิริยาและการแยกในหน่วยเดียว แทนที่จะต้องผ่านกระบวนการปฏิกิริยาและการแยกต่างหาก โดยหอกลั่นแบบมีปฏิกิริยานั้นได้รับการออกแบบให้มีส่วนปฏิกิริยาและส่วนแยก ซึ่งส่งผลให้พื้นที่การใช้เครื่องมืออุปกรณ์ลดลง ตัวอย่างเช่น บริษัท Eastman Chemical ได้ใช้หน่วยนี้ใช้ในการผลิตเมทิลแอซีเตท (รูปที่ 32)

⁶⁴ Adapted from Russo, V., & Tolvaren, P. (2022, January 14). Process intensification in chemical reaction engineering. <https://encyclopedia.pub/entry/18122>

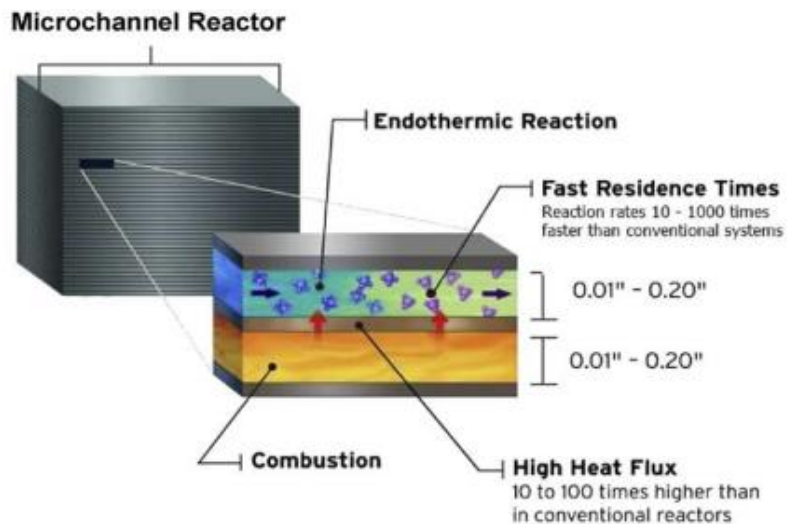


รูปที่ 32 การเปรียบเทียบระหว่างการผลิตแบบดั้งเดิม (ซ้าย) และแบบผนวกรวม (ขวา) สำหรับการผลิตเมทิลแอซีเตทของ Eastman Chemical⁶⁵

- เครื่องปฏิกรณ์ไมโครแชนแนล (Microchannel Reactors)

เป็นหน่วยทางกระบวนการที่มีขนาดความหนาประมาณ 0.1 - 5 มม. ซึ่งในทางปฏิบัติ เครื่องปฏิกรณ์ไมโครแชนแนลสามารถออกแบบให้ตรงกับความต้องการการผลิตโดยการประกอบหน่วยเล็กๆ ของไมโครแชนแนลในรูปแบบขนานหรืออนุกรม ด้วยขนาดเล็ก จึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครแชนแนลไม่ประสบปัญหาข้อจำกัดการถ่ายโอนมวล และยังได้รับประโยชน์จากระยะเวลาการพำนักของสาร (Residence time) ที่รวดเร็วและการถ่ายโอนความร้อนสูง โดยเทคโนโลยีนี้ถูกพัฒนาโดย Velocys สำหรับการสังเคราะห์ปฏิกิริยาฟิชเชอร์-ทรอปช์ (Fischer-Tropsch) ของการเปลี่ยนชีวมวลเป็นของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 33 เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ ฟิชเชอร์-ทรอปช์แบบดั้งเดิมที่มีความสูงถึง 60 เมตรพร้อมอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสม เครื่องปฏิกรณ์ไมโครแชนแนลใช้พื้นที่เพียงเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรและวางในแนวนอนจึง ทำให้ใช้พื้นที่น้อยลงกว่าแบบดั้งเดิม

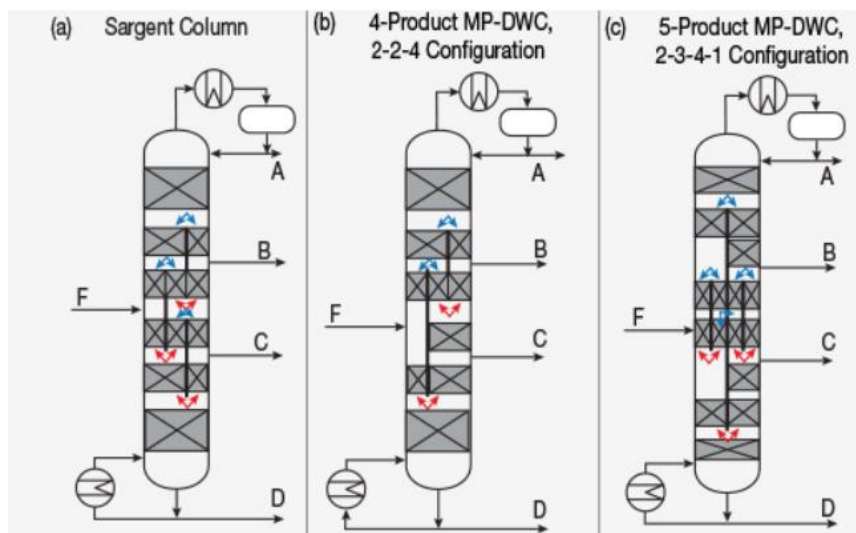
⁶⁵ Stankiewicz, A. (2003). Reactive separations for process intensification: an industrial perspective. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 42(3), 137-144. [https://doi.org/10.1016/s0255-2701\(02\)00084-3](https://doi.org/10.1016/s0255-2701(02)00084-3)



รูปที่ 33 เครื่องปฏิกรณ์ไมโครแชนแนลของ Velocys สำหรับการสังเคราะห์ฟิซเซอร์-ทรอปซ์⁶⁶

- คอลัมน์แบ่งผนัง (Dividing Wall Columns หรือ DWCs)

เป็นการประยุกต์ใช้หลักการของการรวมกระบวนการ ที่รวมคอลัมน์กลั่นหลายตัวในแนวนอนรวมทั้งทางกลและทางความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 34 ซึ่ง DWCs สามารถแยกสารออกได้สูงที่สุดถึง 6 ผลิตภัณฑ์ ด้วย DWCs เพียงหน่วยเดียว จึงทำให้สามารถลดต้นทุนการลงทุนและการใช้พลังงานได้มากถึง 30% นับตั้งแต่การใช้งานครั้งแรกในปี 1985 DWCs ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นและในปี 2020 มีการใช้งานมากกว่า 200 หน่วยของ DWCs



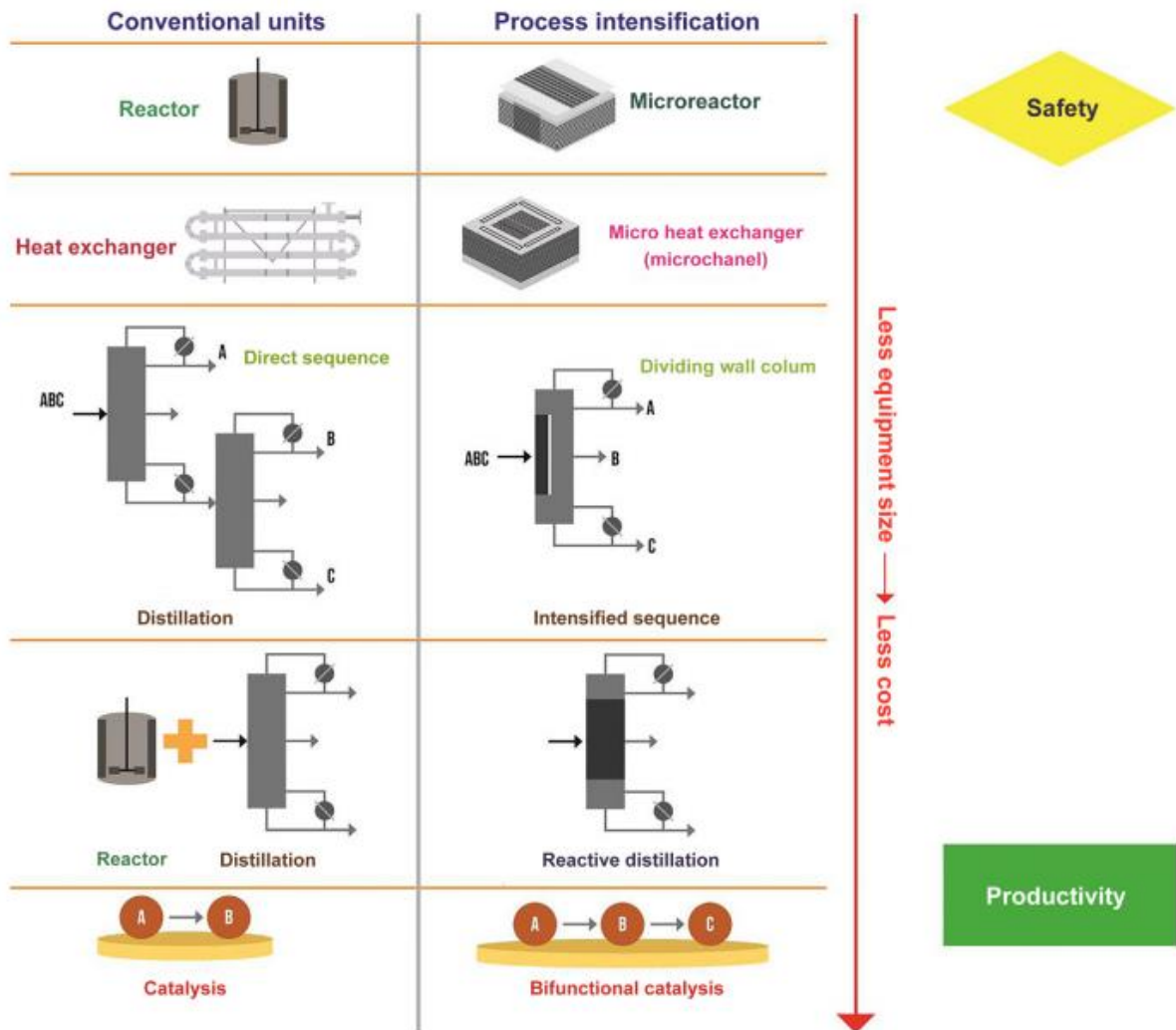
รูปที่ 34 ตัวอย่างการจัดเรียงรูปแบบต่าง ๆ ของ DWCs⁶⁷

แต่อย่างไรก็ดี ยังคงมีเทคโนโลยีภายใต้เทคนิคการรวมของกระบวนการในหลากหลายรูปแบบที่อาจไม่ได้กล่าวถึง โดยจากตัวอย่างทั้งสามที่กล่าวมาข้างต้น ได้แสดงให้เห็นถึงความก้าวหน้าทางด้านวิทยาการการรวมของ

⁶⁶ Lerou, J., Tonkovich, A., Silva, L., Perry, S., & McDaniel, J. (2010). Microchannel reactor architecture enables greener processes. *Chemical Engineering Science*, 65(1), 380–385. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.07.020>

⁶⁷ Introduction to Dual-Dividing-Wall columns. (2020, April 5). AIChE. <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2020/april/introduction-dual-dividing-wall-columns>

กระบวนการที่เน้นย้ำให้เห็นว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานควบคู่ไปกับการลดการใช้ทรัพยากร และลดการเกิดของเสียในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ



รูปที่ 35 การพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการแบบดั้งเดิม (ซ้าย) ด้วยเทคโนโลยี Intensification (ขวา) ในรูปแบบต่างๆ⁶⁸

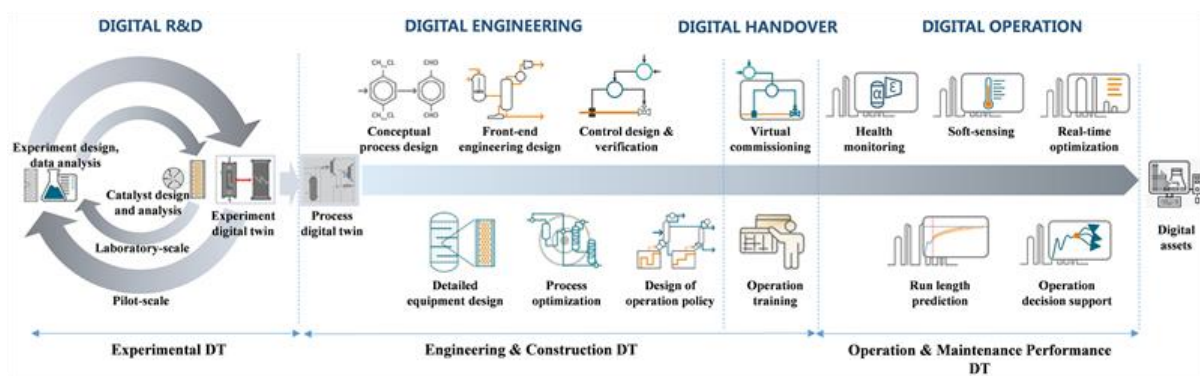
⁶⁸ Gutiérrez-Antonio, C., Romero-Izquierdo, A. G., Gómez-Castro, F. I., & Hernández, S. (2021). Process intensification and integration in the production of biojet fuel. In Elsevier eBooks (pp. 171–199). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819719-6.00006-7>

อุตสาหกรรม 4.0 ที่ยั่งยืน (การเปลี่ยนแปลงทางดิจิทัล)

อุตสาหกรรม 4.0 ที่ยั่งยืน คือ การประยุกต์ใช้ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีดิจิทัลต่างๆ ในอุตสาหกรรมกระบวนการ ผ่านการขับเคลื่อนด้วยข้อมูลขนาดใหญ่ วิทยาการการคำนวณขั้นสูง ระบบปัญญาประดิษฐ์ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ตลอดจนการจำลองเสมือนที่มีความแม่นยำและการตอบสนองที่รวดเร็ว

1) เทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัล (Digital Twin Technology)

เทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัลกำลังช่วยปฏิวัติอุตสาหกรรมเคมีโดยการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของทรัพย์สินทางกายภาพ กระบวนการ และระบบต่างๆ แบบจำลองเหล่านี้จะมีการอัปเดตอย่างต่อเนื่องด้วยข้อมูลเรียลไทม์จากเซ็นเซอร์และแหล่งข้อมูลอื่นๆ เพื่อให้ข้อมูลเชิงลึกที่ไม่อาจเข้าถึงได้จากการดำเนินงานของโรงงานแบบกายภาพดั้งเดิม เทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัลจะช่วยให้วิศวกรและผู้ปฏิบัติงานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ ทำนายความต้องการในการบำรุงรักษา และตัดสินใจอย่างมีข้อมูลโดยหลีกเลี่ยงความเสี่ยงต่อการหยุดชะงักของการผลิตจริง



รูปที่ 36 กรอบแนวคิดของกระบวนการทำงานของเทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัล⁶⁹

ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัลได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบห่วงโซ่คุณค่าทั้งหมด ตั้งแต่การวิจัยและพัฒนาไปจนถึงการผลิตและการจัดการห่วงโซ่อุปทาน สำหรับในช่วงการออกแบบวิศวกรสามารถใช้เทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัลเพื่อทดสอบและปรับแต่งการกำหนดค่าของกระบวนการ เพื่อให้มั่นใจถึงประสิทธิภาพที่ดีที่สุดก่อนที่จะมีการก่อสร้างจริง หรือแม้กระทั่งการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการดำเนินการอยู่ โดยโมเดลเสมือนเหล่านี้จะเข้าไปช่วยในการตรวจสอบและควบคุมระบบแบบเรียลไทม์รวมไปถึงช่วยให้สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างรวดเร็วเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพของกระบวนการ ยิ่งไปกว่านั้นเทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัลยังสามารถช่วยในการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์โดยการวิเคราะห์ข้อมูลการทำงานของอุปกรณ์เพื่อคาดการณ์ความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้น ลดเวลาการหยุดทำงานและต้นทุนการบำรุงรักษา

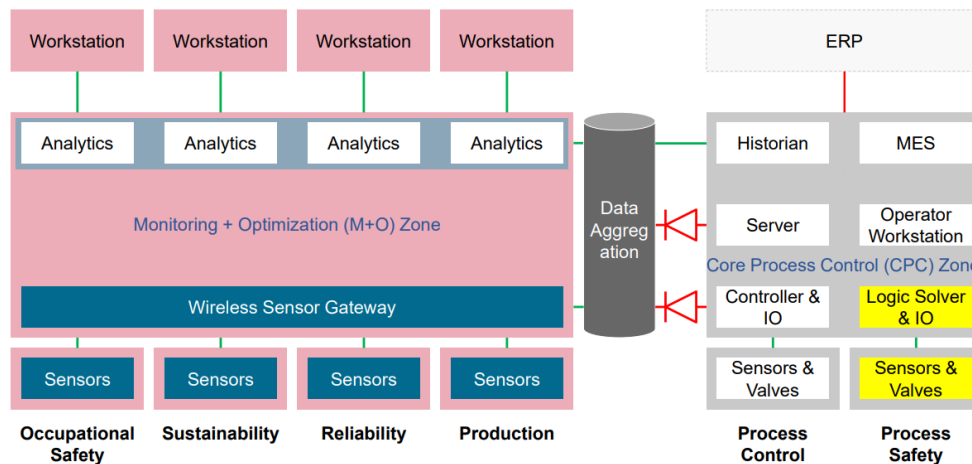
การผสมรวมเทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัลกับเทคโนโลยีขั้นสูงอื่นๆ เช่น ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) สามารถช่วยเพิ่มความสามารถของเทคโนโลยีนี้ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยอัลกอริทึม AI สามารถวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมากมหาศาลที่สร้างขึ้นโดยเทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัลเพื่อระบุรูปแบบและความผิดปกติที่

⁶⁹ Gao, L., Jia, M., & Liu, D. (2022). Process Digital Twin and its application in petrochemical industry. Journal of Software Engineering and Applications, 15(08), 308-324. <https://doi.org/10.4236/jsea.2022.158018>

ผู้ปฏิบัติงานอาจมองข้ามหรือไม่สามารถรับรู้ได้ทันทั่วถึงที่ ดังนั้นเทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัลนี้จึงช่วยขับเคลื่อนนวัตกรรมในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ การควบคุมคุณภาพ และการจัดการความปลอดภัย เมื่ออุตสาหกรรมเคมีต่างๆ เริ่มยอมรับการเปลี่ยนแปลงทางดิจิทัลมากขึ้น จึงทำให้เทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัลกำลังมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในการบรรลุระดับประสิทธิภาพ ความยั่งยืน และความสามารถในการแข่งขันทางธุรกิจที่สูงขึ้น

2) เซ็นเซอร์อัจฉริยะ (Smart Sensors)

เซ็นเซอร์อัจฉริยะกำลังช่วยในการปฏิวัติอุตสาหกรรมปิโตรเคมีโดยการให้การตรวจสอบกระบวนการที่ซับซ้อนแบบเรียลไทม์และที่มีความแม่นยำสูง โดยอุปกรณ์ดิจิทัลขั้นสูงเหล่านี้ได้รวมองค์ประกอบการตรวจวัดเข้ากับไมโครโปรเซสเซอร์แบบบูรณาการและความสามารถในการสื่อสารแบบไร้สาย จึงทำให้สามารถเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลอย่างต่อเนื่องในรูปแบบของพารามิเตอร์ชนิดต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และองค์ประกอบทางเคมี สำหรับอุตสาหกรรมโรงงานปิโตรเลียมและปิโตรเคมีนั้น สามารถนำ เซ็นเซอร์อัจฉริยะไปใช้งานได้ทั่วทั้งห่วงโซ่การผลิต ตั้งแต่การแปรรูปน้ำมันดิบไปจนถึงการกลั่นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน การรับรองคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการรักษามาตรฐานความปลอดภัย โดยเซ็นเซอร์ดังกล่าวจะช่วยในการตรวจจัดการเปลี่ยนแปลงของระบบแม้เล็กน้อยในสภาวะต่างๆ กระบวนการ ซึ่งเซ็นเซอร์เหล่านี้ยังช่วยให้สามารถจัดเตรียมการบำรุงรักษาเชิงรุก ลดเวลาหยุดทำงาน อีกทั้งตรวจจับและป้องกันความล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ ในกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



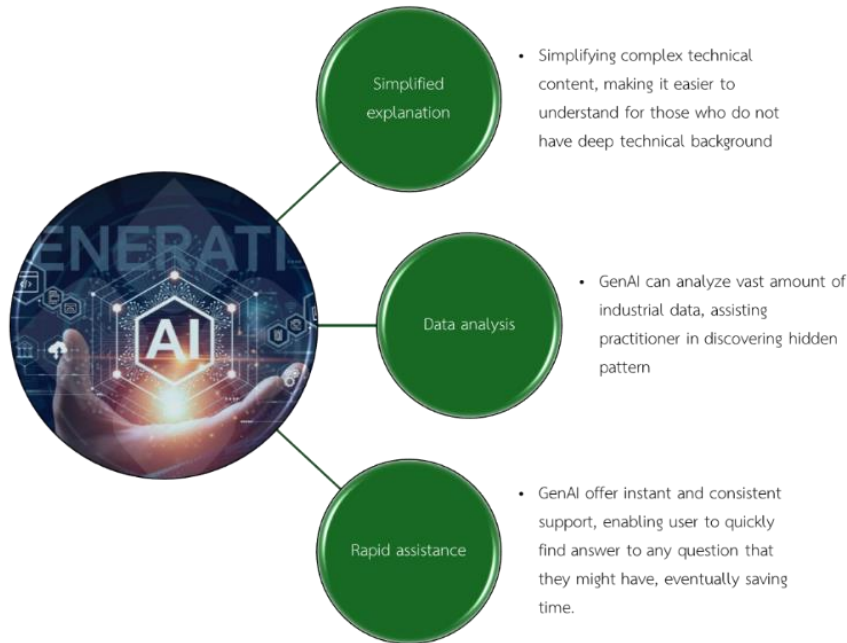
รูปที่ 37 ตัวอย่างแสดงกระบวนการและความสัมพันธ์ในระบบการทำงานของเซ็นเซอร์อัจฉริยะ⁷⁰

ดังนั้น การผสมรวมเซ็นเซอร์อัจฉริยะกับ AI ได้กำลังช่วยส่งเสริมการขยายขอบเขตของการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และประสิทธิภาพการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมปิโตรเคมี ตลอดจนอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เนื่องด้วยความสามารถของเทคโนโลยีในการส่งข้อมูลแบบไร้สายไปยังระบบควบคุมส่วนกลาง ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการตรวจสอบระยะไกลและการตัดสินใจอย่างรวดเร็ว นอกเหนือจากนี้การขับเคลื่อนของข้อมูลแบบเรียลไทม์นี้ยังช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถตัดสินใจอย่างมีประสิทธิภาพ และอย่างรวดเร็ว สามารถออกแบบและ

⁷⁰ Emerson Asia Pacific. (2024). Digital transformation for sustainability, safety, and more. The 3rd Thailand International Chemical Engineering & Chemical Technology Asia 2024, Pattaya, Thailand. https://tiche.org/tncheasia2024_presentation/

ปรับแต่งกระบวนการผลิต รวมไปถึงตอบสนองต่อปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ทัน่วงที ก่อนที่ปัญหาจะลุกลามและมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นข้อมูลจำนวนมหาศาลที่เก็บรวบรวมโดยเซ็นเซอร์เหล่านี้ยังให้ข้อมูลเชิงลึกที่เป็นประโยชน์สำหรับการปรับปรุงกระบวนการในระยะยาวและสร้างสรรค์นวัตกรรมใหม่ๆ ด้วยเหตุนี้เมื่ออุตสาหกรรมกำลังก้าวไปสู่การแปลงดิจิทัลและระบบอัตโนมัติมากขึ้น เซ็นเซอร์อัจฉริยะจึงกลายเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่จะช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพและสร้างความยั่งยืน และขยายขีดความสามารถในการแข่งขันที่สูงขึ้นในตลาดโลกที่มีความท้าทายเพิ่มขึ้น

3) ปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด (Generative AI) ในอุตสาหกรรมเคมี



รูปที่ 38 รูปแบบการประยุกต์ใช้งานที่เป็นไปได้ของปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด⁷¹

ปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด (Generative AI) กำลังกลายเป็นพลังขับเคลื่อนใหม่ที่เปลี่ยนแปลงอุตสาหกรรมกระบวนการโดยปฏิบัติการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ และการสนับสนุนการตัดสินใจ ซึ่งมีความแตกต่างจากปัญญาประดิษฐ์แบบดั้งเดิมที่มุ่งเน้นการทำงานตามกฎหรือแบบแผนที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เช่น การจำแนกรูปภาพหรือการทำนายผลลัพธ์ โดยปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดนั้นจะมีความสามารถเฉพาะในการสร้างสรรค์เนื้อหาและวิธีการแก้ปัญหาใหม่ๆ ในหลากหลายรูปแบบ

ปัญญาประดิษฐ์แบบดั้งเดิมนั้นพึ่งพาข้อมูลในอดีตเป็นหลักเพื่อทำการทำนายหรือการตัดสินใจภายในพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้อย่างชัดเจน เช่น การใช้แบบจำลองที่ผ่านการพัฒนาภายในขอบเขตของข้อมูลและกำหนดเงื่อนไขต่างๆ มาเป็นอย่างดี เพื่อช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตหรือทำนายความล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ ในกระบวนการ ในทางตรงกันข้ามปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดนั้นได้ก้าวข้ามการเพิ่มประสิทธิภาพแบบดังกล่าว ด้วยการสร้างวิธีการแก้ปัญหาและการออกแบบใหม่ๆ ที่เป็นผลมาจากการเรียนรู้และฝึกฝนบนชุดข้อมูลขนาดใหญ่ ปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด สามารถเข้าใจรูปแบบและ

⁷¹ Adapted from GoPomelo. (2024). Demystifying the black box of AI. The 3rd Thailand International Chemical Engineering & Chemical Technology Asia 2024, Pattaya, Thailand. https://tiche.org/tnccheasia2024_presentation/

โครงสร้าง จึงทำให้สามารถสร้างสรรค์เนื้อหาหรือความคิดใหม่ที่ไม่เคยมีมาก่อนได้ ตัวอย่างเช่น ความสามารถในการสร้างสรรค์สูตรทางเคมีใหม่หรือการออกแบบกระบวนการที่ปัญหาประดิษฐ์แบบดั้งเดิมไม่สามารถทำได้

ฉะนั้นเมื่ออุตสาหกรรมกระบวนการกำลังเผชิญกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นสำหรับนวัตกรรมและความยั่งยืน ปัญหาประดิษฐ์เชิงกำเนิดจึงกลายมาเป็นเทคโนโลยีและเครื่องมือที่สำคัญเพื่อช่วยสำหรับการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร และพัฒนาทางเลือกที่ยั่งยืน-รวมถึงยังสามารถช่วยขยายขอบเขตในงานด้านวิศวกรรมเคมีและอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ให้เกิดสิ่งที่เป็นไปได้ในรูปแบบที่สร้างสรรค์แบบใหม่

กรณีศึกษาทางอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพิ่มเติม

จากเทคโนโลยีการปรับปรุงกระบวนการที่ได้กล่าวถึงมาทั้งหมด - process integration, process intensification, digital twin technology, smart sensors, และ generative AI ล้วนแต่มีผลลัพธ์ที่แตกต่างกันเพื่อการบรรลุวัตถุประสงค์ในการลดการปล่อยคาร์บอนในอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งในหลายบริษัทได้นำ แนวทางเหล่านี้มาใช้ในรูปแบบต่างๆกัน ดังแสดงสรุปไว้เป็นตัวอย่างกรณีศึกษาโดยสังเขปในตารางที่ 7

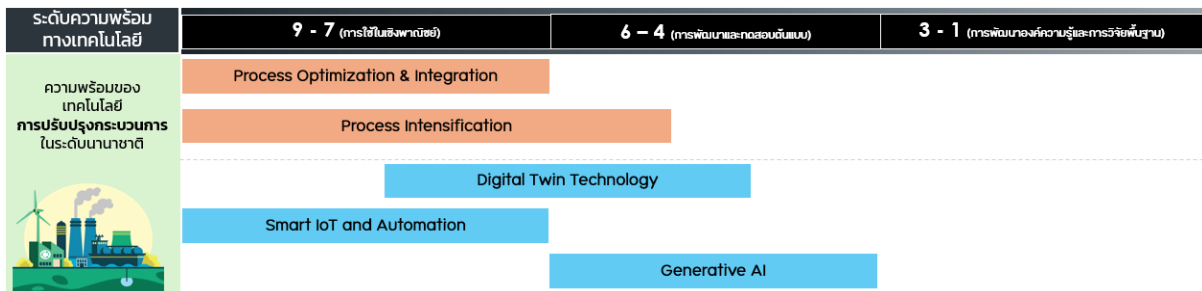
ตารางที่ 7 โครงการที่มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการปรับปรุงกระบวนการจากงาน TNChE 2024⁷²

โครงการ	รูปแบบการปรับปรุง	ขนาด/ขอบเขต	ผลลัพธ์
Sulzer 95+ Heater Technology	Intensification	เครื่องทำความร้อนแบบเชื้อเพลิง 220 MW	<ul style="list-style-type: none"> เพิ่มประสิทธิภาพการทำความร้อนประมาณ 5% ประหยัดเชื้อเพลิง: 19% ของการออกแบบเริ่มต้น ลดการปล่อย CO₂: 30 kTA
GC-TOYO Advanced Pinch Technology	Integration	โรงงาน GC Aromatic I และโรงงานฟินอล	<ul style="list-style-type: none"> ลดการใช้เชื้อเพลิง 34 ton/h + 1 MW ลดการปล่อย CO₂: 68 kT-CO₂
UNICAT Magcat Catalyst Technology	Intensification	เครื่องปฏิกรณ์ไอน้ำสำหรับการผลิต H ₂	<ul style="list-style-type: none"> ประหยัดเชื้อเพลิงสูงสุด 92500 m³/y ประหยัดฟีดสูงสุด 2566803 m³/y ลด CO₂ 1250-4000 ตัน/ปี (อายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา)
Aromatic Complex Integration	Integration	ความจุโรงงาน 1500 KTA	<ul style="list-style-type: none"> การผลิตไฟฟ้า 17-18 MW จากความร้อนที่เหลือทิ้ง ศักยภาพในการลด CO₂ มากกว่า 100 kMTA

⁷² Adapted from TNChE Presentations (2024). The 3rd Thailand International Chemical Engineering & Chemical Technology Asia 2024, Pattaya, Thailand. https://tiche.org/tncheaasia2024_presentation/

โครงการ	รูปแบบการปรับปรุง	ขนาด/ขอบเขต	ผลลัพธ์
SIEMENS, Comos Mobile Worker	Digital Twin	บริษัท O&G ในทะเลเหนือ มูลค่า 200 พันล้าน ดอลลาร์สหรัฐ	<ul style="list-style-type: none"> ● ไม่มีการเปิดเผยรายละเอียด
BASF, AI-driven Maintenance	Digital Twin	หน่วย Cracking Unit	<ul style="list-style-type: none"> ● ลดการใช้พลังงาน 12% ● ลดการปล่อยก๊าซ 15%
LyondellBasell, Predictive AI	Integration และ Digital Twin	ห่วงโซ่อุปทานตั้งแต่ต้นทาง ถึงปลายทาง	<ul style="list-style-type: none"> ● ลดต้นทุนโลจิสติกส์และการขนส่ง 18% ● ลดการปล่อยก๊าซ 10%

มุมมองความท้าทายและแนวโน้มในอนาคต



รูปที่ 39 ความพร้อมของเทคโนโลยีการปรับปรุงกระบวนการ

จากการนำเสนอรายละเอียดการปรับปรุงกระบวนการทั้งทางกายภาพและแบบดิจิทัลในข้างต้น และการวิเคราะห์ SWOT ในตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีการปรับปรุงกระบวนการเหล่านี้ถือว่าเป็นเส้นทางสำคัญสำหรับการมุ่งไปสู่การลดคาร์บอนในอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องจากการลดการใช้พลังงาน วัตถุดิบและของเสียเป็นสำคัญ แม้ว่าจะต้องการการลงทุนในระดับต่างๆ และมีระดับความพร้อมของเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน การนำเทคโนโลยีเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ร่วมกันอย่างเหมาะสมและสร้างสรรค์จะสามารถก่อให้เกิดการลดการใช้วัตถุดิบและพลังงาน การผลิตของเสียที่น้อยลง จนนำไปสู่การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนอย่างมาก ด้วยปัจจุบันและในสภาวะในอนาคตที่ในทุกอุตสาหกรรมกำลังต้องเผชิญกับแรงกดดันในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีเหล่านี้จึงกลายมามีบทบาทสำคัญมากขึ้นในการบรรลุเป้าหมายความยั่งยืนในขณะเดียวกันก็ช่วยรักษาความและเพิ่มสามารถในการแข่งขันในตลาดโลกได้

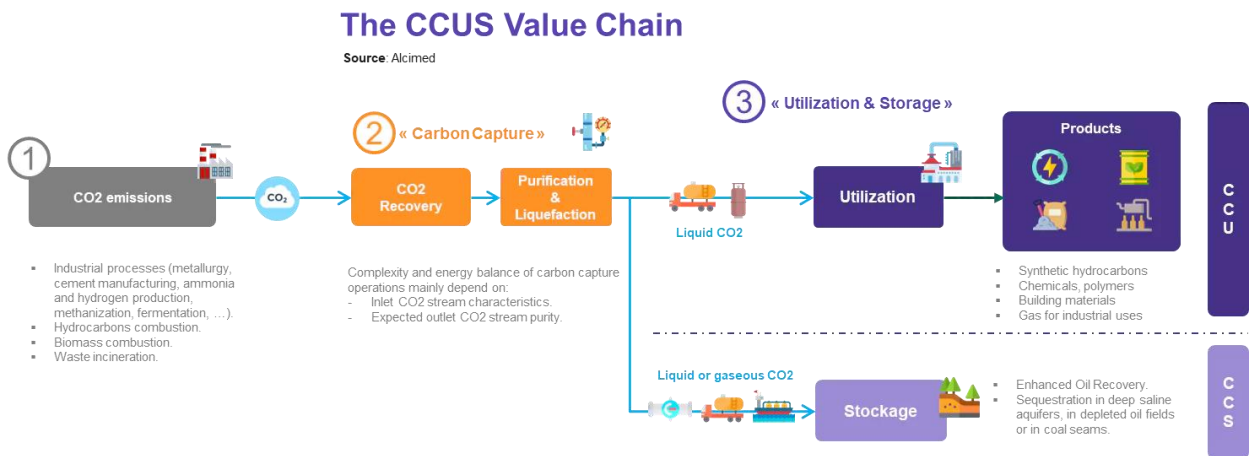
ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ SWOT ที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีการปรับปรุงกระบวนการและการประยุกต์ใช้งาน

มุมมองความท้าทาย	แนวโน้มในอนาคต
<p>จุดอ่อน (Weaknesses)</p> <ul style="list-style-type: none"> • ความซับซ้อนของระบบ: การบูรณาการที่ซับซ้อน อาจเพิ่มความเสี่ยงในการควบคุม • ต้นทุนสูง: ต้องการเงินลงทุนจำนวนมากสำหรับการติดตั้งและปรับปรุง • การต่อต้านการเปลี่ยนแปลง: พนักงานอาจต่อต้านการเปลี่ยนไปใช้เทคโนโลยีใหม่ • ความปลอดภัยไซเบอร์: การใช้ข้อมูลแบบเรียลไทม์ เพิ่มความเสี่ยงทางไซเบอร์ • ความถูกต้องของข้อมูล: ต้องการข้อมูลที่แม่นยำและครบถ้วน ซึ่งอาจเป็นปัญหาในบางอุตสาหกรรม 	<p>จุดแข็ง (Strengths)</p> <ul style="list-style-type: none"> • ประสิทธิภาพการดำเนินงาน: เพิ่มความเร็วและประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต • ลดการปล่อย CO₂: ลดการใช้พลังงานและวัตถุดิบ ลดการปล่อย CO₂ อย่างมีนัยสำคัญ • พยากรณ์และควบคุมได้ดีขึ้น: ปรับปรุงการพยากรณ์และควบคุมกระบวนการ ลดความผิดพลาด
<p>ภัยคุกคาม (Threats)</p> <ul style="list-style-type: none"> • เทคโนโลยีล้ำสมัยเร็ว: การพัฒนาเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว ทำให้ระบบปัจจุบันล้าสมัย • การแข่งขันในตลาด: การแข่งขันจากผู้ผลิตอื่นๆ อาจสร้างความท้าทายมากขึ้นหรือแทนที่เทคโนโลยีนี้ • ขาดแคลนบุคลากรที่มีทักษะ: การขาดบุคลากรที่เกี่ยวข้องอาจจำกัดการนำไปใช้ 	<p>โอกาส (Opportunities)</p> <ul style="list-style-type: none"> • ลดการใช้วัตถุดิบและพลังงาน: เทคโนโลยีใหม่ช่วยลดการใช้ทรัพยากรและเพิ่มประสิทธิภาพ • ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม: ความต้องการลด CO₂ ส่งเสริมบทบาทของเทคโนโลยีในอุตสาหกรรม • เพิ่มความสามารถในการแข่งขัน: เทคโนโลยีช่วยเพิ่มความยั่งยืนและแข่งขันในระดับโลกได้ดีขึ้น

3.5) เทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture Utilization and Storage หรือ CCUS)

ความสำคัญของเทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน

เทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture, Utilization, and Storage หรือ CCUS) มีบทบาทสำคัญในการลดการปล่อยคาร์บอนจากอุตสาหกรรมกระบวนการที่ยากต่อการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น การผลิตปูนซีเมนต์ เหล็ก เคมีภัณฑ์ และปิโตรเคมี อุตสาหกรรมเหล่านี้มีปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก เทคโนโลยี CCUS ทำให้อุตสาหกรรมสามารถดำเนินงานต่อไปได้โดยการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ เทคโนโลยี CCUS ยังมีบทบาทในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า และอุตสาหกรรมการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ เป็นต้น



รูปที่ 40 ช่วงโซ่คุณค่าของเทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน⁷³

ประโยชน์ของเทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน

1) การลดการปล่อยและการใช้ประโยชน์คาร์บอน

เทคโนโลยี CCUS จะช่วยดักจับคาร์บอนจากแหล่งกำเนิด เช่น โรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม ก่อนที่จะปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งช่วยลดการปล่อยคาร์บอนได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้คาร์บอนที่ดักจับได้สามารถนำมาใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น การผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Syngas) การผลิตพลาสติก และการใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับคาร์บอนที่ดักจับได้

⁷³ www.alcimed.com/en/insights/ccus-technology-co2-as-a-resource-or-a-waste/

2) การเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงานและโอกาสทางเศรษฐกิจ

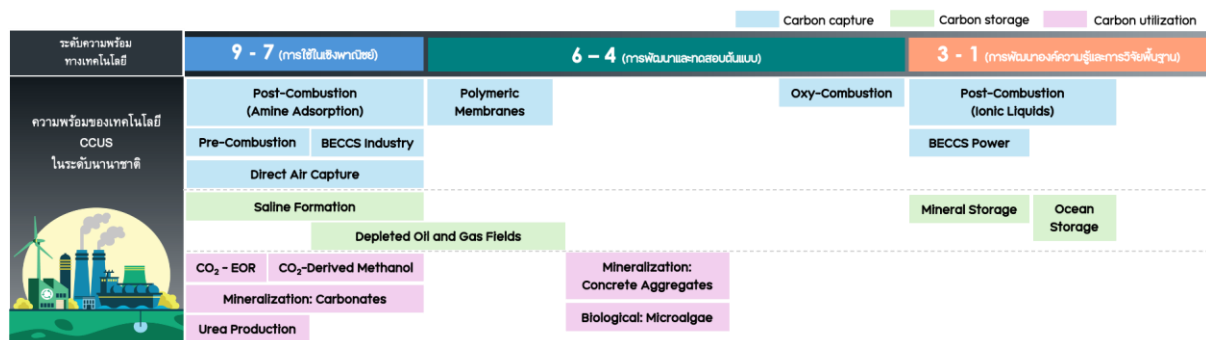
เทคโนโลยี CCUS สามารถเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงานโดยการสนับสนุนการผลิตเชื้อเพลิงคาร์บอนต่ำ เช่น ไฮโดรเจนและเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ที่ช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ลดปัญหาความผันผวนของราคา และสนับสนุนกลยุทธ์ในการกระจายพลังงาน

3. การสนับสนุนเป้าหมายด้านสภาพภูมิอากาศของโลก

เทคโนโลยี CCUS จะมีส่วนช่วยในลดการปล่อยคาร์บอนทั่วโลก ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเปลี่ยนผ่านไปสู่ระบบพลังงานที่ยั่งยืน โดยวิธีการดักจับและกักเก็บคาร์บอน

เทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน

เทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture, Utilization and Storage หรือ CCUS) เป็นเทคโนโลยีที่มีเป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ทั่วโลกต้องการพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยในปัจจุบันระดับความพร้อมทางเทคโนโลยี (Technology Readiness Level หรือ TRL) ของเทคโนโลยี CCUS ส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง TRL 6 ถึง TRL 8 กล่าวคือ เทคโนโลยีอยู่ในระดับของโครงการนำร่องและสร้างต้นแบบขนาดเล็ก จนถึงระดับการสาธิตและนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ โดยถูกขยายให้ใหญ่ขึ้นจนสามารถนำมาใช้ในสภาพแวดล้อมจริงได้ แต่อาจจะยังไม่ได้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างเป็นทางการ (TRL 9) อย่างไรก็ตาม มีบางกระบวนการ เช่น การดักจับคาร์บอนหลังการเผาไหม้ (Post-Combustion Capture) และการกักเก็บคาร์บอนในชั้นใต้ธรณีที่สามารถพัฒนาจนบรรลุ TRL 9 หรือสามารถนำเทคโนโลยีดังกล่าวไปใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างเป็นทางการได้แล้ว เช่น โครงการ Boundary Dam⁷⁴ ในประเทศแคนาดา และโครงการ Petra Nova⁷⁵ ในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นต้น โดยรูปที่ 41 แสดงตัวอย่างเทคโนโลยี CCUS ในระดับความพร้อมต่างๆ ในระดับนานาชาติ



รูปที่ 41 ตัวอย่างเทคโนโลยี CCUS ในระดับความพร้อมต่างๆ ในระดับชาติ⁷⁶

⁷⁴ unfccc.int/climate-action/momentum-for-change/activity-database/boundary-dam-carbon-capture-and-storage-project

⁷⁵ www.energy.gov/fecm/petra-nova-wa-parish-project

⁷⁶ Bajpai, Sushant & Shreyash, Nehil & Singh, Sukriti & Memon, Amir & Sonker, Muskan & Tiwary, Saurabh & Biswas, Susham. (2022). Opportunities, challenges and the way ahead for carbon capture, utilization and sequestration (CCUS) by the hydrocarbon industry: Towards a sustainable future. Energy Reports. 8. 15595-15616

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทั่วโลกเริ่มมีการดำเนินการเกี่ยวกับเทคโนโลยี CCUS ซึ่งโครงการ CCUS ขนาดใหญ่ที่ดำเนินงานอยู่ในปัจจุบันจากทั่วโลกกว่า 20 แห่ง สามารถดักจับและกักเก็บคาร์บอนได้ประมาณ 40 ล้านตันต่อปี นอกจากนี้โครงการที่อยู่ระหว่างพัฒนานั้น ภูมิภาคที่มีดำเนินการอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อเมริกาเหนือ ยุโรป และเอเชีย สำหรับประเทศในภูมิภาคอเมริกาเหนือ นั้น สหรัฐอเมริกาและแคนาดาเป็นผู้นำในโครงการ CCUS โดยได้รับแรงผลักดันจากนโยบายสนับสนุน เช่น เครดิตภาษี 45Q ของสหรัฐฯ⁷⁷ นอกจากนี้ในสหภาพยุโรปได้ตั้งเป้าหมายของ CCUS อย่างชัดเจน โดยนำเทคโนโลยี CCUS ให้เป็นส่วนหนึ่งของ European Green Deal⁷⁸ โดยมีโครงการใหญ่ที่ดำเนินการในประเทศนอร์เวย์ (Northern Lights)⁷⁹ และในสหราชอาณาจักร สำหรับภูมิภาคเอเชียนั้น ประเทศที่มีการลงทุนในเทคโนโลยี CCUS อย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ประเทศจีนและญี่ปุ่น โดยมีโครงการนำร่องและการวิจัยที่เน้นการบูรณาการของเทคโนโลยี CCUS กับโครงสร้างพื้นฐานของอุตสาหกรรมที่มีอยู่เดิม

สำหรับประเทศไทย มีเป้าหมายการลดการปล่อยคาร์บอนคือ ภายในปี ค.ศ. 2050 ประเทศไทยจะสามารถบรรลุความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ได้ และภายใน ค.ศ. 2065 จะสามารถบรรลุการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero GHG Emission) ได้ตามลำดับ ในปัจจุบันได้มีการเริ่มวิจัยและโครงการนำร่องของเทคโนโลยี CCUS ในหลายภาคส่วน ทั้งภาคเอกชนและภาคการศึกษา โดยในบทความนี้จะแบ่งเทคโนโลยี CCUS ที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของประเทศไทยออกเป็น 3 ส่วน คือ เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอน (Carbon Capture Technology) เทคโนโลยีการนำคาร์บอนไปใช้ประโยชน์ (Carbon Utilization Technology) และเทคโนโลยีการกักเก็บคาร์บอน (Carbon Storage Technology)

เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอน (Carbon Capture Technology) ที่สำคัญเพื่อให้ประเทศไทยเข้าสู่เป้าหมายการลดการปล่อยคาร์บอน และส่งเสริมการดำเนินการอย่างยั่งยืนสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการ สามารถแบ่งได้เป็น 3 เทคโนโลยีหลัก⁸⁰ (รูปที่ 42) คือ

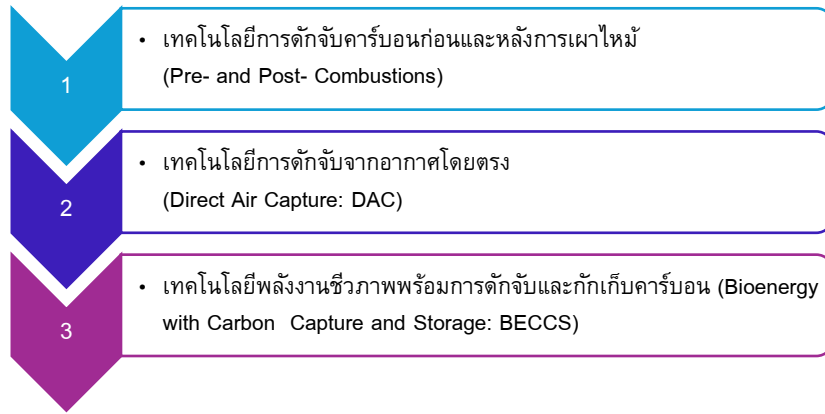
1. เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนก่อนและหลังการเผาไหม้ (Pre- and Post- Combustion Capture)
2. เทคโนโลยีการดักจับจากอากาศโดยตรง (Direct Air Capture หรือ DAC)
3. เทคโนโลยีพลังงานชีวภาพพร้อมการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Bioenergy with Carbon Capture and Storage หรือ BECCS)

⁷⁷ IEA (2020), *CCUS in Clean Energy Transitions*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>, Licence: CC BY 4.0

⁷⁸ energy.ec.europa.eu/topics/carbon-management-and-fossil-fuels/industrial-carbon-management_en

⁷⁹ ambition4climate.com/en/co2-transport-and-storage-project-the-northern-lights/

⁸⁰ www.nxpo.or.th/th/18841/



รูปที่ 42 ภาพรวมเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอน

1. เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนก่อนและหลังการเผาไหม้ (Pre- and Post- Combustion Capture)

a) เทคโนโลยีการดักจับก่อนการเผาไหม้ (Pre – Combustion Capture)

เป็นการดักจับคาร์บอนก่อนการเผาไหม้เป็นกระบวนการที่แยก CO₂ ออกจากเชื้อเพลิงฟอสซิลก่อนการเผาไหม้ โดยเปลี่ยนเชื้อเพลิงฟอสซิลให้เป็น H₂ และ CO₂ จากนั้น CO₂ จะนำมาแยกและดักจับ ส่วน H₂ จะถูกใช้ในการเผาไหม้หรือการใช้งานอื่นๆ สำหรับเทคโนโลยีดักจับก่อนการเผาไหม้นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงไฟฟ้าแบบวัฏจักรผสมการแปรสภาพเป็นก๊าซ (Integrated Gasification Combined Cycle หรือ IGCC) การผลิตก๊าซไฮโดรเจน หรือในกระบวนการอุตสาหกรรมกระบวนการ (Process Industry)

b) เทคโนโลยีการดักจับหลังการเผาไหม้ (Post – Combustion Capture)

การดักจับหลังการเผาไหม้คือวิธีการดักจับคาร์บอนหลังจากที่เชื้อเพลิงฟอสซิลหรือชีวมวลถูกเผาไหม้แล้ว ซึ่งเกี่ยวข้องกับสกัด CO₂ จากก๊าซไอเสีย (Flue gas) ที่ปล่อยออกมาจากโรงไฟฟ้าหรือกระบวนการอุตสาหกรรม เทคนิคที่พบบ่อยได้แก่ การดูดซับด้วยตัวทำละลาย (Absorption with Solvents) การดูดซับบนวัสดุของแข็ง (Adsorption on Solid Materials) และการแยกด้วยเยื่อกรอง (Membrane Separation)

ตัวอย่างบริษัทที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการดักจับหลังการเผาไหม้

- บริษัท Shell ได้มีการลงทุนในเทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอนในปี ค.ศ. 2023 โดยมีมูลค่าการลงทุนโดยประมาณ 340 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งเพิ่มขึ้น 55% จาก 220 ล้านดอลลาร์สหรัฐในปี ค.ศ. 2022
- โครงการดักจับและกักเก็บคาร์บอน Quest ซึ่งดำเนินการโดย Shell ที่โรงกลั่น Scotford ในประเทศแคนาดา ได้ดำเนินการดักจับและกักเก็บคาร์บอนมากกว่า 8.8 ล้านตัน นับตั้งแต่เริ่มดำเนินการในปี ค.ศ. 2015 และมีความเป็นไปได้ในการเพิ่มขีดความสามารถในการดักจับและกักเก็บคาร์บอนให้มากขึ้น

(reports.shell.com/sustainability-report/2023/achieving-net-zero-emissions/managing-greenhouse-gas-emissions/carbon-capture-and-storage.html)

2. เทคโนโลยีการดักจับจากอากาศโดยตรง (Direct Air Capture หรือ DAC)

เทคโนโลยีนี้จะดักจับคาร์บอนโดยตรงจากอากาศรอบตัว เป็นวิธีการที่สำคัญในการบรรลุการปล่อยคาร์บอนเป็นลบ เนื่องจากสามารถกักเก็บคาร์บอนที่มีอยู่แล้วในชั้นบรรยากาศ ระบบการดักจับคาร์บอนจากอากาศโดยตรงโดยทั่วไปจะใช้กระบวนการทางเคมี

ตัวอย่างบริษัทที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการดักจับจากอากาศโดยตรง

- บริษัท Climeworks ได้ก่อตั้งขึ้นในปี ค.ศ. 2009 ได้มุ่งเน้นในการเป็นผู้นำให้บริการเทคโนโลยีการดักจับจากอากาศโดยตรง ในปี ค.ศ. 2022 บริษัทได้ระดมทุนกว่า 650 ล้านดอลลาร์สหรัฐในการเพิ่มขีดความสามารถในการดักจับจากอากาศโดยตรง คาดว่าจะสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศได้ถึง 36,000 ตันต่อปี

(www.esgtoday.com/climeworks-announces-direct-air-capture-technology-breakthrough-to-scale-carbon-removal/)

3. เทคโนโลยีพลังงานชีวภาพพร้อมการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Bioenergy with Carbon Capture and Storage หรือ BECCS)

เทคโนโลยีพลังงานชีวภาพพร้อมการดักจับและกักเก็บคาร์บอน คือ เทคโนโลยีที่รวมการผลิตพลังงานจากชีวมวลเข้ากับเทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอน โดยชีวมวลจะถูกแปลงเป็นพลังงานชีวภาพ เช่น พลังงานความร้อน ไฟฟ้า หรือเชื้อเพลิงชีวภาพ ผ่านการเผาไหม้ หรือการหมัก ซึ่งในระหว่างกระบวนการผลิตพลังงานจะเกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และถูกดักจับออกจากกระบวนการโดยเทคโนโลยี CCS ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกขนส่งและนำไปกักเก็บในชั้นใต้ดิน

ตัวอย่างบริษัทที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีพลังงานชีวภาพด้วยการดักจับและกักเก็บคาร์บอน

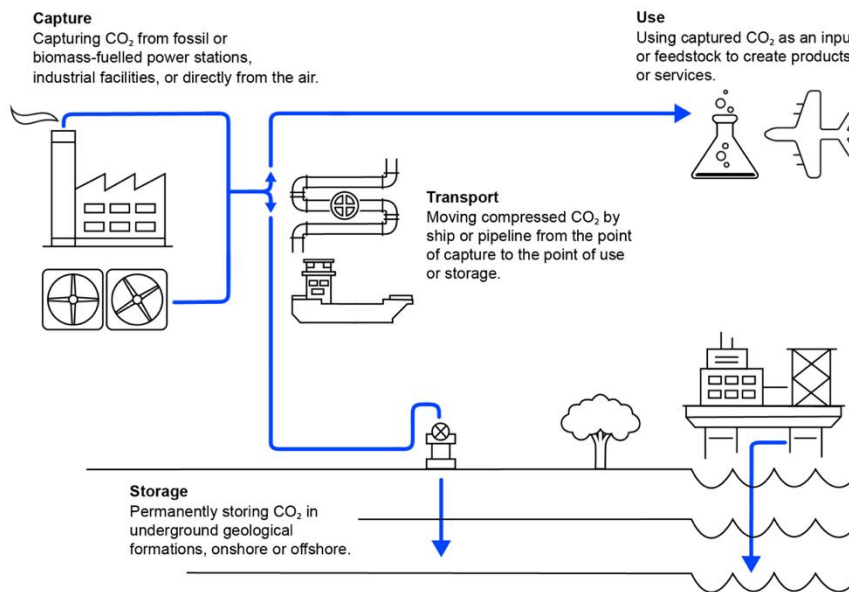
- บริษัท Drax เป็นบริษัทประเทศอังกฤษที่ดำเนินการโรงไฟฟ้าจากชีวมวล มีความสามารถในการผลิตไฟฟ้ากว่า 2.5 GW ซึ่งบริษัทได้มีการศึกษาและลงทุนในโครงการนำร่อง เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการใช้พลังงานชีวภาพร่วมกับการดักจับและกักเก็บคาร์บอน โดยมีเป้าหมายคาร์บอนดัดลบภายในปี ค.ศ. 2030

(Deployment of BECCUS value chains: IEA Bioenergy. Nov 2022)

สำหรับเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนในประเทศไทยนั้น ยังไม่มีการนำประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมกระบวนการมากนัก แต่มีการพัฒนาและวิจัยที่เพิ่มมากขึ้น เช่น มหาวิทยาลัยมหิดล ได้ทำการศึกษาวิธีการดักจับคาร์บอนด้วยเทคนิคไครโอเจนิค (Cryogenic Carbon Capture) โดยการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โรงงานให้เป็นของแข็งโดยการใช้อุณหภูมิต่ำ จากนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับจะนำไปผลิตเมทานอล⁸¹

⁸¹ www.nstda.or.th/sci2pub/cryogenic-carbon-capture/

หลังจากการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งปลดปล่อยแล้ว ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกบีบอัดและขนส่งผ่านท่อ เรือ รถไฟ หรือรถบรรทุกเพื่อนำไปใช้ในหลากหลายการใช้งานในอุตสาหกรรม (Carbon Utilization) หรือนำอัดกลับเข้าไปในชั้นใต้ดินธรณี (Carbon Storage) โดยเทคโนโลยีที่จะมาช่วยหลังการดักจับนั้นจะเกี่ยวกับเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์และกักเก็บคาร์บอน (Utilization and Storage) ดังแสดงรูปที่ 43 วิธีนี้เป็นวิธีเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการปล่อยคาร์บอน ซึ่งมีความสำคัญต่อการบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero GHG Emissions)



รูปที่ 43 แผนภาพ Carbon capture, utilization and storage (CCUS)⁸²

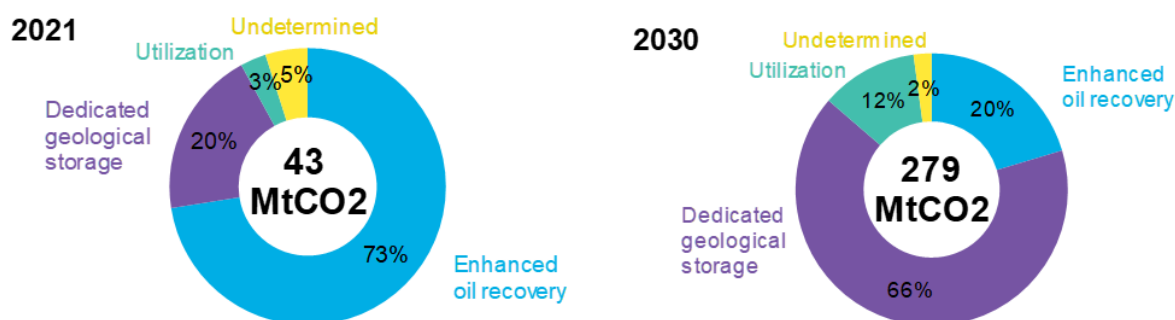
สำหรับการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับมาใช้ประโยชน์นั้น สามารถนำไปใช้ได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม กล่าวคือ การนำไปใช้ทางตรง เป็นการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น นำไปเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำมัน (Enhanced Oil Recovery หรือ EOR) ในขณะที่การนำไปใช้ทางอ้อม คือ การเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในทางเคมี เช่น การนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นสารตั้งต้นให้กับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น การผลิตก๊าซมีเทน หรือ กระบวนการผลิตคอนกรีต เป็นต้น สำหรับการนำเทคโนโลยีในการกักเก็บและนำคาร์บอนไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมคอนกรีต คือ การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และฉีดกลับเข้าไปในส่วนผสมคอนกรีตระหว่างการผลิตที่ยังไม่แข็งตัว เกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตและถูกกักเก็บไว้ในคอนกรีต⁸³

ปัจจุบันมีการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 43 ล้านตัน หรือร้อยละ 0.1 ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก จากการคาดการณ์ ภายในปี ค.ศ. 2030 หากโครงการการดักจับคาร์บอนที่มีการประกาศทั้งหมดทั่วโลกสามารถเปิดใช้งานได้ จะสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 279 ล้านตันต่อปี (ดังแสดงรูปที่ 44) คิดเป็นร้อยละ 0.6 ของการปล่อย

⁸² International Energy Agency (IEA)

⁸³ shorturl.at/X9W43

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลกในปัจจุบัน นอกจากนี้เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการนำไปเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำมันลดลงจากร้อยละ 73 เป็นร้อยละ 20 แต่เพิ่มสัดส่วนการกักเก็บในชั้นหินใต้ธรณี



รูปที่ 44 ความสามารถในการดักจับคาร์บอนทั่วโลก ณ ปี 2021 และ 2030⁸⁴

อย่างไรก็ดี เทคโนโลยีการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ในประเทศไทยนั้นโดยส่วนใหญ่อยู่ในระดับการพัฒนาและวิจัย เช่น ความร่วมมือระหว่างการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้พัฒนานวัตกรรม “การเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าเป็นเมทานอล” เป็นต้น แต่ก็มีบริษัทที่สามารถนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์แล้ว เช่น บริษัท จีเนียส อินทิเกรเตด โซลูชัน จำกัด ซึ่งนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่บรรยากาศกลับมาทำให้บริสุทธิ์ และใช้ในการผลิตโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ซึ่งสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ประมาณ 38,000 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี

ตัวอย่างบริษัทที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์

- บริษัท IHI พัฒนาเทคโนโลยีการผลิต e-methane เพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการดักจับและนำไปใช้ประโยชน์คาร์บอน (CCU) โดยกระบวนการ Methanation คาดการณ์ว่าสามารถลดการปล่อยคาร์บอนได้ 8 แสนตันภายในปี ค.ศ. 2030 และ 72.3 ล้านตันในปี ค.ศ. 2050
- บริษัท ปตท. สผ. มีโครงการนำร่องการเปลี่ยน Flare gas เป็น Carbon nanotubes (CNTs) โดยในปัจจุบันอยู่ในขั้นตอนการทดลองภาคสนาม (Field trial test)

(Alternative fuel toward carbon neutrality using IHI's standard methanation: TNChE Asia 2023)

สำหรับเทคโนโลยีการกักเก็บคาร์บอนในประเทศไทย ได้มีการเริ่มดำเนินการในเชิงพาณิชย์แล้ว คือโครงการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นำโดย บริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) (PTTEP) ได้เริ่มโครงการ CCS แรกของประเทศไทยที่แหล่งก๊าซธรรมชาติอ่าวไทย ซึ่งตั้งอยู่ห่างจากชายฝั่งจังหวัดสงขลา 230 กิโลเมตรในอ่าวไทย สถานีนี้จะใช้เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนด้วยเยื่อกรอง (Membrane Capture Technology) และอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งก๊าซธรรมชาติที่แท่นผลิต จากนั้นจะขนส่งไปเก็บอย่างถาวรในหลุมผลิต บริษัท ปตท. สผ. คาดว่าโรงงาน CCS ที่แหล่งก๊าซ

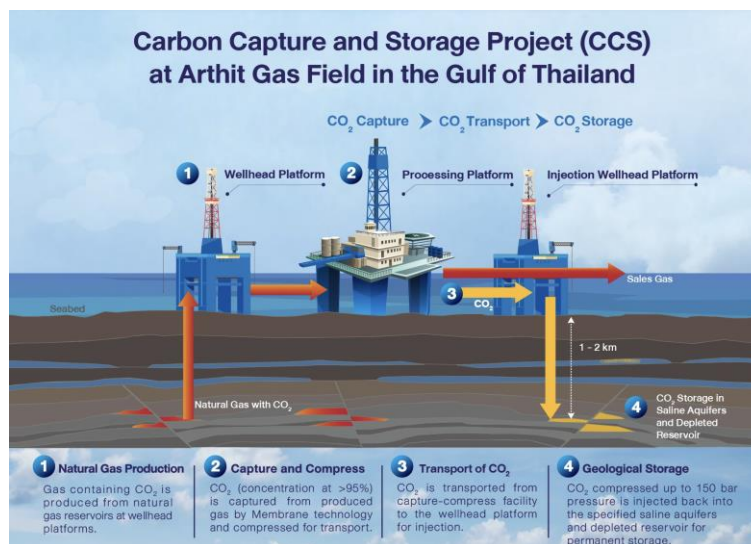
⁸⁴ BloombergNE. Global Carbon Capture Capacity Due to Rise Sixfold by 2030. October 18, 2022

ธรรมชาติอาทิตย์จะลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 0.7 – 1 ล้านตันต่อปี โดยในปัจจุบันการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ CCS นี้ได้เสร็จสมบูรณ์แล้ว และโครงการกำลังอยู่ในขั้นตอนการศึกษาด้านวิศวกรรมและออกแบบเบื้องต้น (Pre-FEED) โดยคาดว่าจะเริ่มดำเนินการ CCS ในปี ค.ศ. 2026

ตารางที่ 9 โครงการ CCS ที่กำลังดำเนินการในประเทศไทย

ชื่อโครงการ	ประเภทของโครงการ	สถานะสถานที่	สถานะการดำเนินงาน	ประเภทอุตสาหกรรม
1) PTTEP Arthit	เชิงพาณิชย์	พัฒนาในขั้นสูง	อยู่ระหว่างการดำเนินงาน	Natural Gas Processing
2) PTTEP Northern Gulf of Thailand CCS	เชิงพาณิชย์	กำลังพัฒนาในขั้นต้น	อยู่ระหว่างการดำเนินงาน	Storage

(รายงานโดย Global CCS Institute: <https://co2re.co/FacilityData>)



รูปที่ 45 เทคโนโลยีด้านการกักเก็บคาร์บอนโดยจากบริษัท PTTEP⁸⁵

นอกจากนี้ บริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) และบริษัทน้ำมันและก๊าซจากประเทศญี่ปุ่น INPEX ได้มีความร่วมมือกันเพื่อทำการศึกษาศักยภาพภาพขั้นหินธรณีวิทยาและความเป็นไปได้ของครบบั่วนในการจัดตั้งศูนย์กลางการเก็บกักคาร์บอนในอ่าวไทยตอนเหนือ ในรูปแบบ CCS Hub ซึ่งในปัจจุบัน บริษัท ปตท. สผ. ได้ร่วมมือกับบริษัท ภายในกลุ่ม ปตท. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี CCS ภายใต้โครงการ Eastern Thailand CCS Hub ซึ่งมุ่งเน้นการนำเทคโนโลยี CCS มาใช้เพื่อสนับสนุนการลดการปล่อยคาร์บอนในระยะยาว ในพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor หรือ EEC) แนวคิดของโครงการนี้คือ การรวบรวมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งอุตสาหกรรมตามชายฝั่งตะวันออกไว้ที่ศูนย์กลางก่อนที่จะขนส่งไปนอกชายฝั่งเพื่อจัดเก็บในอ่าวไทย โครงการนี้ถือเป็นโครงการสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมด้านปิโตรเลียมและปิโตรเคมีที่สามารถลดการปล่อยคาร์บอนได้อย่างมีนัยสำคัญ และเป็น

⁸⁵ การดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์. (n.d.). www.pttep.com/th/our-company/ep-net-zero-2050/carbon-capture-and-storage

โครงการสำคัญในการนำประเทศไทยสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ในอนาคต นอกจากนี้ โครงการนี้ยังนำไปสู่โอกาสในอนาคตด้านเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำของประเทศไทย โดยโครงการนี้ คาดว่าจะเริ่มดำเนินการในปี ค.ศ. 2033 และจะมีความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนได้ประมาณ 6 ล้านตันต่อปี



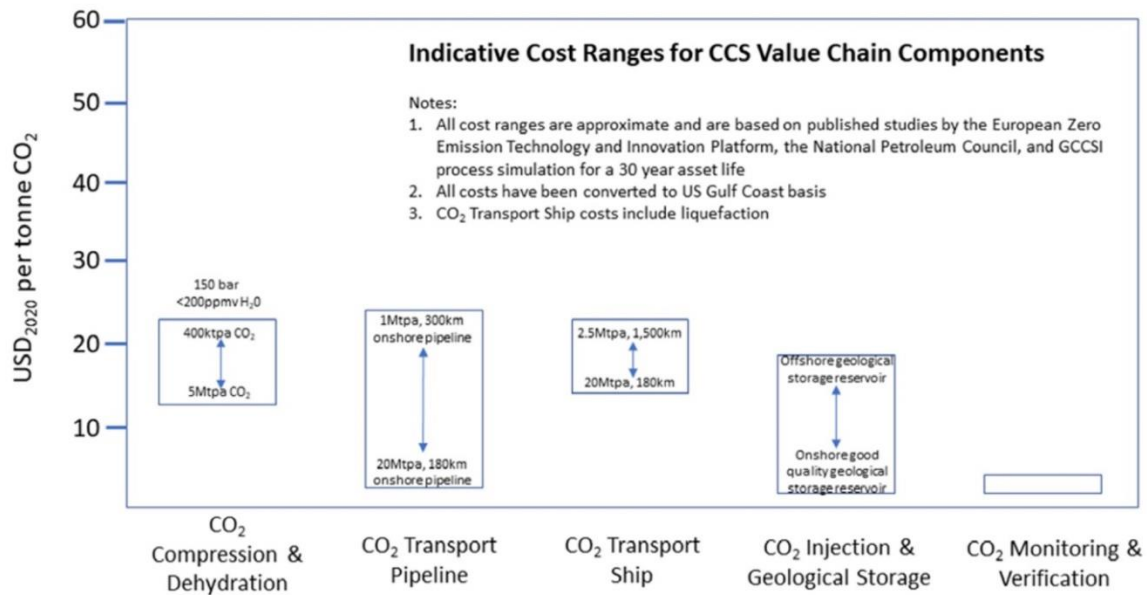
รูปที่ 46 แผนภาพกลุ่มอุตสาหกรรมในประเทศไทยในระบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC) ในโครงการ Eastern Thailand CCS Hub⁸⁶

ความท้าทายและโอกาสในอนาคต

เทคโนโลยีการดักจับ การใช้ประโยชน์ และการกักเก็บคาร์บอน (CCUS) เป็นหนึ่งในเครื่องมือสำคัญในการลดการปล่อยคาร์บอนและบรรลุเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero GHG Emissions) แต่อย่างไรก็ตาม การพัฒนาและนำเทคโนโลยีนี้มาใช้งานยังคงเผชิญกับความท้าทายหลายด้าน โดยเฉพาะเรื่องต้นทุนที่สูงในเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนจากแหล่งปล่อยขนาดใหญ่ และการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการขนส่งและการเก็บกักคาร์บอนที่ยังต้องการเงินลงทุนมหาศาลดังแสดงในรูปที่ 47 เริ่มต้นจากต้นทุนการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปฏิกิริยาการกำจัดน้ำ (Dehydration) ที่อยู่ในช่วงราคาประมาณ 12 – 22 ดอลลาร์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกขนส่งโดยระบบท่อหรือเรือ ซึ่งราคาต้นทุนอยู่ประมาณ 2 – 25 ดอลลาร์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์ และนำไปกักเก็บใต้ชั้นธรณี ซึ่งมีต้นทุนอยู่ประมาณ 2 – 20 ดอลลาร์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์ สุดท้ายการติดตามและตรวจสอบหลังจากการกักเก็บยังมี

⁸⁶ การดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์. (n.d.). www.pttep.com/th/our-company/ep-net-zero-2050/carbon-capture-and-storage

ต้นทุนอย่างต่อเนื่อง โดยมีต้นทุนประมาณ 2 – 5 ดอลลาร์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์ จากต้นทุนที่กล่าวมาข้างต้น ต้นทุนรวมสำหรับเทคโนโลยี CCUS อยู่ประมาณ 18 – 72 ดอลลาร์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์



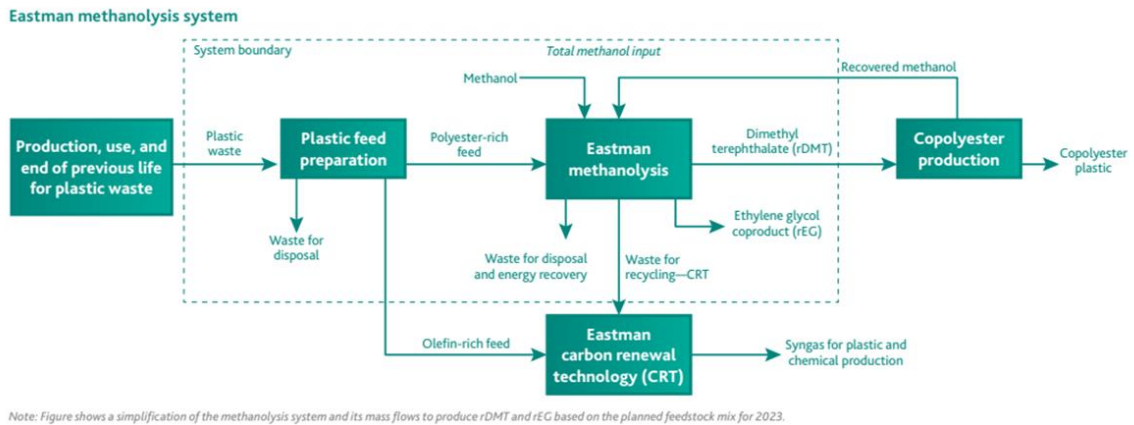
รูปที่ 47 ต้นทุนสำหรับห่วงโซ่คุณค่าของ CCS (ไม่รวมเทคโนโลยีการดักจับ) ของ US Gulf Coast⁸⁷

อีกหนึ่งความท้าทายสำคัญคือการขาดนโยบายสนับสนุนที่ชัดเจนจากรัฐบาล ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการกระตุ้นการลงทุนและการวิจัยในเทคโนโลยีนี้ นอกจากนี้ การยอมรับจากสาธารณะยังคงอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งอาจทำให้เกิดความลังเลในการดำเนินโครงการ CCUS ในหลายพื้นที่ การพัฒนาเทคโนโลยี CCUS ยังคงต้องการการวิจัยเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุน แม้จะมีความท้าทายมากมาย แต่โอกาสในอนาคตของเทคโนโลยี CCUS ก็น่าตื่นเต้น โดยเทคโนโลยี CCUS จะช่วยลดการปล่อยคาร์บอนจากแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อสิ่งแวดล้อม และการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ สารเคมี และวัสดุก่อสร้าง จะเพิ่มมูลค่าให้กับคาร์บอนและช่วยกระตุ้นเศรษฐกิจได้อีกด้วย นอกจากนี้ การสนับสนุนจากรัฐบาลและองค์กรระหว่างประเทศจะช่วยกระตุ้นการลงทุนและการวิจัยในเทคโนโลยีนี้ได้อย่างมีนัยสำคัญ

การรวมพลังงานหมุนเวียนเข้ากับกระบวนการ CCUS จะช่วยเพิ่มความยั่งยืนและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ ในขณะที่เดียวกันการพัฒนาอุตสาหกรรม CCUS ยังสามารถสร้างงานใหม่และกระตุ้นการพัฒนาเศรษฐกิจในหลายพื้นที่ ด้วยการสนับสนุนและความร่วมมือจากทุกภาคส่วน เทคโนโลยีนี้มีศักยภาพที่จะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงที่ยั่งยืนและสร้างอนาคตที่ดีกว่าสำหรับประเทศไทยและโลกของเรา

⁸⁷ Technology readiness and costs of CCS. Global CCS Institute. March 2021

3.6) เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)



รูปที่ 48 ภาพรวมและความสำคัญของเศรษฐกิจหมุนเวียน

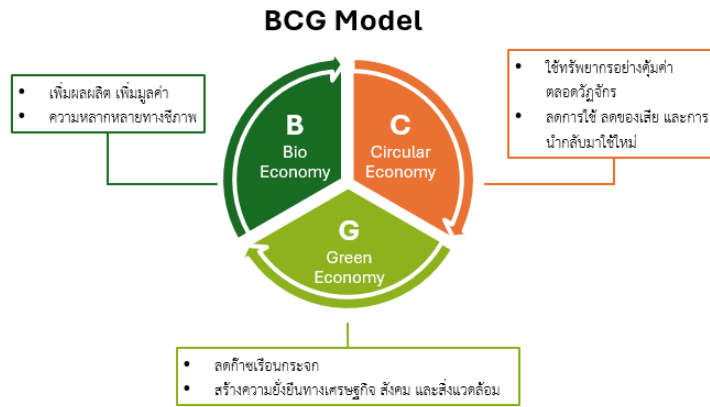
เศรษฐกิจหมุนเวียนระดับโลก (Global Circular Economy) เป็นการแก้ปัญหาการใช้ทรัพยากรที่ไม่ยั่งยืนและการจัดการของเสีย โดยมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 48) ซึ่งแนวคิดนี้มีบทบาทสำคัญในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม โดยสหภาพยุโรปได้นำแนวคิดนี้ไปปฏิบัติผ่านแผนปฏิบัติการเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy Action Plan หรือ CEAP) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของ European Green Deal โดยมีเป้าหมายในการลดแรงกดดันต่อทรัพยากรธรรมชาติ สร้างการเติบโตทางเศรษฐกิจที่ยั่งยืน และสนับสนุนเป้าหมายความเป็นกลางทางสภาพภูมิอากาศของสหภาพยุโรปภายในปี 2050 (EU's 2050 Climate Neutrality Target)⁸⁸ ซึ่งในประเทศไทยได้นำแนวคิดนี้มาประยุกต์ใช้ผ่านโมเดลเศรษฐกิจ BCG (Bio-Circular-Green Economy) ซึ่งมุ่งเน้นนโยบายเศรษฐกิจชีวภาพ (Bioeconomy) เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และเศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) ดังแสดงในรูปที่ 49 โดยในประเทศไทยได้นำมาใช้กับกลุ่มอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเกษตร รวมถึงการจัดการขยะและของเสียต่างๆ เช่น ขยะมูลฝอย ขยะพลาสติก เป็นต้น⁸⁹ ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมไทยได้นำแนวทาง 10R มาประยุกต์ใช้เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน เช่น การใช้ซ้ำ (Reuse) การลดการใช้ (Reduce) หรือการรีไซเคิล (Recycle) เป็นต้น⁹⁰ โดยสถานการณ์วงจรการเกิดขยะพลาสติกของประเทศดังแสดงในรูปที่ 50 พบว่าปริมาณการรีไซเคิลของขยะพลาสติกยังมีจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกต่างๆ ในประเทศ ดังนั้นจึงต้องมีแนวทางการจัดการสำหรับเศรษฐกิจหมุนเวียนซึ่งช่วยลดปัญหาขยะและของเสียต่างๆ และยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น การนำขยะทางการเกษตรมาผลิตพลังงานชีวมวล และการรีไซเคิลพลาสติกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การแปรรูปขยะเป็นพลังงาน⁹¹ เป็นต้น

⁸⁸ environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en

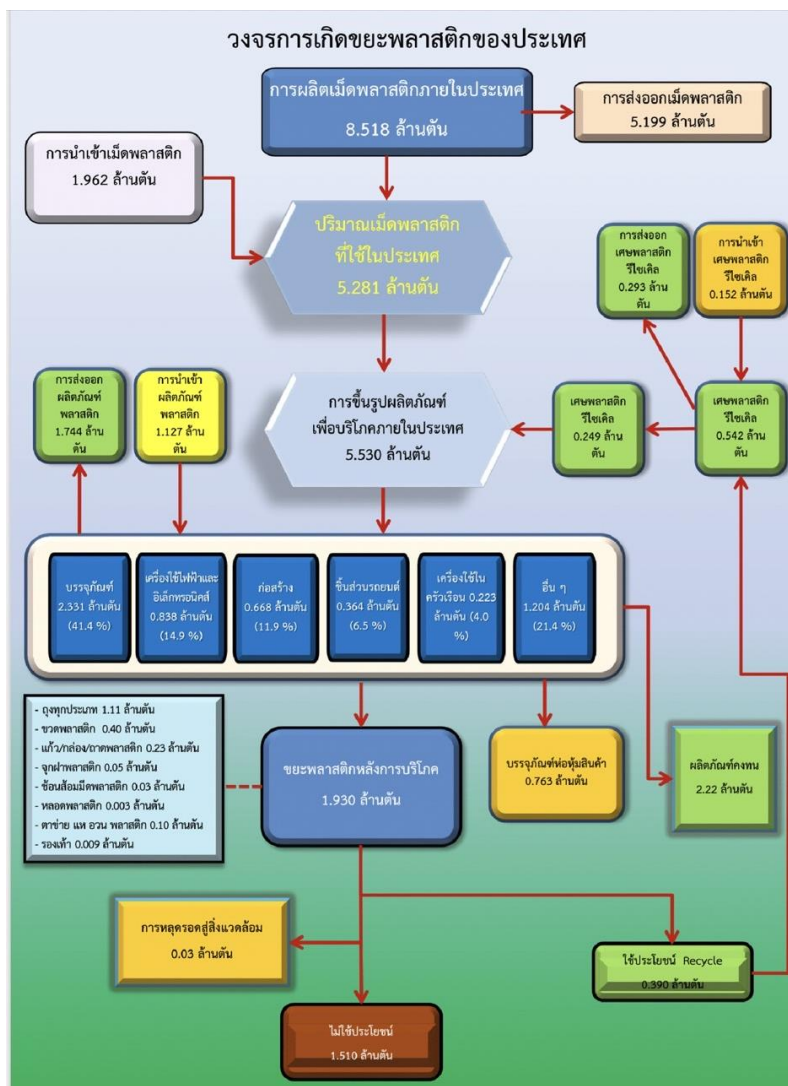
⁸⁹ www.industry.go.th/th/industrial-economy/7775

⁹⁰ petromat.org/home/circular-economy-model/

⁹¹ แนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมไทยตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy), กระทรวงอุตสาหกรรม, 2020



รูปที่ 49 โมเดล BCG ดัดแปลงจากโมเดล BCG ของกระทรวงอุตสาหกรรม

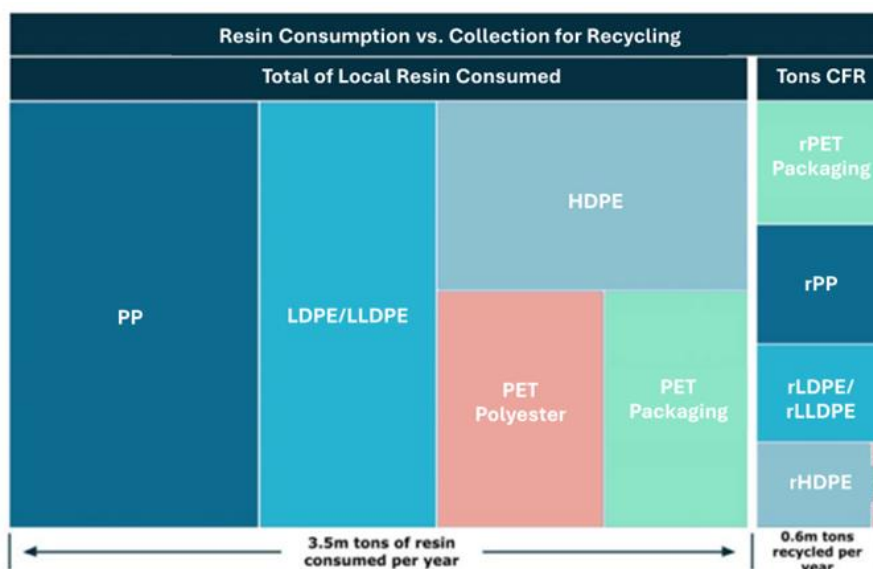


รูปที่ 50 วงจรการเกิดขยะพลาสติกของประเทศ⁹²

⁹² (ร่าง) Roadmap การจัดการขยะพลาสติก พ.ศ. ๒๕๖๑-๒๕๗๓, กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

แนวทางการจัดการสำหรับเศรษฐกิจหมุนเวียน

การคัดแยกขยะเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการรีไซเคิลและการจัดการของเสียอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับวัสดุพลาสติกซึ่งมีหลากหลายประเภทและคุณสมบัติแตกต่างกัน การคัดแยกขยะที่มีประสิทธิภาพช่วยเพิ่มอัตราการรีไซเคิลและลดปริมาณขยะที่ต้องกำจัดด้วยวิธีอื่น ซึ่งส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจหมุนเวียน



รูปที่ 51 ปริมาณการบริโภคเรซินพลาสติกแต่ละชนิดต่อการรีไซเคิลโดยประมาณต่อปี⁹³

จากรูปที่ 51 พบว่ามีช่องว่างปริมาณการบริโภคเรซินพลาสติก 3.5 ล้านตันต่อปี และปริมาณที่ถูกรีไซเคิล 0.6 ล้านตันต่อปี ซึ่งให้เห็นถึงความจำเป็นในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบการคัดแยกและรีไซเคิล โดยที่ผ่านมามีการคัดแยกขยะหลากหลายวิธี^{94,95,96} เช่น

1. การคัดแยกด้วยมือ (Manual Sorting) เป็นวิธีดั้งเดิมที่ใช้ลักษณะเฉพาะเช่น สี รูปร่าง และฉลาก ในการแยก แต่มีข้อจำกัดคือใช้แรงงานมากและอาจเกิดข้อผิดพลาดโดยเฉพาะกับพลาสติกที่มีลักษณะคล้ายกัน
2. การคัดแยกด้วยตะแกรง (Screen Sorting)
3. การคัดแยกด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Sorting) เป็นวิธีการคัดแยกโลหะที่ปนเปื้อนออกจากวัสดุอื่นโดยอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็ก

⁹³ Market Study for Thailand: Plastic Circularity Opportunities and Barriers

⁹⁴ Zhou Tao et al., 2023, Resource Recovery Technology for Municipal and Rural Solid Waste, Chapter 6 - Integrated mechanical separation for municipal solid waste

⁹⁵ Nutchana Taneepanichskul et al., 2022, A Review of Sorting and Separating Technologies Suitable for Compostable and Biodegradable Plastic Packaging

⁹⁶ Ville Lahtela et al., 2018, Mechanical Sorting Processing of Waste Material Before Composite Manufacturing – A Review

4. การคัดแยกโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravity-Based Sorting) เป็นวิธีการคัดแยกโดยอาศัยความแตกต่างของน้ำหนัก โดยมีส่วนหลักคือการบด ทำความสะอาด และร่อน ตามด้วยการแยกด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifugal Sorting) การจม-ลอยในน้ำ (Sink-Float Sorting) หรือการแยกด้วยอากาศ (Air-Gravity-Based Sorting)

5. การคัดแยกด้วยการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity-Based Sorting) เป็นวิธีการคัดแยกโดยอาศัยความแตกต่างในการนำไฟฟ้า โดยพลาสติกทั่วไปจะมีสมบัติไม่นำไฟฟ้าจึงง่ายต่อการแยกออกจะวัสดุอื่นที่นำไฟฟ้า

6. การคัดแยกด้วยภาพและแสง (Image-Based and Optical Sorting) เป็นเทคโนโลยีขั้นสูงที่ใช้ระบบการมองเห็นและการประมวลผลภาพในการคัดแยก เช่น การใช้คลื่นเนียร์อินฟราเรด (Near Infrared) และการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ ในการพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติต่างๆ

แต่ละเทคนิคมีข้อดีและข้อจำกัดที่ต่างกัน การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมหรือการผสมผสานหลายเทคนิคเข้าด้วยกันจึงเป็นกุญแจสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยกและรีไซเคิล ตัวอย่างเช่น บริษัท TOMRA ได้พัฒนาเทคโนโลยี Flying Beam⁹⁷ ซึ่งใช้เซ็นเซอร์เนียร์อินฟราเรดในการตรวจจับ และเทคโนโลยี Deep Learning⁹⁸ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดแยกขยะประเภทต่างๆ เช่น พลาสติก ไม้ กระดาษ ได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้อัตราการรีไซเคิลเพิ่มขึ้นและลดการปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ บริษัท AMP Robotics ได้นำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ในกระบวนการคัดแยกขยะรีไซเคิล โดยติดตั้งไว้เหนือสายพานลำเลียงก่อนคัดแยก ทำให้สามารถคัดแยกวัสดุรีไซเคิลด้วยความแม่นยำและความเร็วสูง⁹⁹ ยกตัวอย่างกรณีศึกษาของ AMP ONE Cleveland Plant ที่สามารถคัดแยกได้ถึง 50,000 ตันต่อปี สามารถทำงานได้ถึง 18 ชั่วโมงต่อวัน สูงสุด 6 วันต่อสัปดาห์ โดยไม่ต้องอาศัยการคัดแยกด้วยมือ¹⁰⁰ ซึ่งการนำเทคโนโลยีเหล่านี้มาใช้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยกขยะของไทยและส่งเสริมแนวทางการจัดการสำหรับเศรษฐกิจหมุนเวียน

1. การใช้ซ้ำ (Reuse) และการลดการใช้ (Reduce)

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการส่งออกสินค้าทางการเกษตรเป็นหลักทำให้เกิดขยะทางการเกษตรรวมถึงขยะพลาสติกที่มาจากบรรจุภัณฑ์ทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทำให้ต้องมีการจัดการของเสียเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยอาศัยวิธีการหรือเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อก่อให้เกิดการใช้ซ้ำ (Reuse) และการลดการใช้ (Reduce) ยกตัวอย่างเช่น การผลิตเม็ดพลาสติกด้วยเทคโนโลยี SMX ของบริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด (SCGC) โดยเทคโนโลยีนี้เป็นการทำให้เม็ดพลาสติกมีคุณสมบัติที่ทนทานและแข็งแรงกว่าเม็ดพลาสติกทั่วไป ทำให้บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตโดยเม็ดพลาสติกที่ผลิตด้วยเทคโนโลยี SMX¹⁰¹ มีคุณสมบัติทนต่อสภาพอากาศได้ดี ขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ได้ง่าย บางและน้ำหนักเบากว่าเม็ดพลาสติกทั่วไป รวมถึงสามารถนำไปผสมกับเม็ดพลาสติกรีไซเคิลได้มากถึงร้อยละ 30 โดยยังคงคุณสมบัติเทียบเท่าได้กับบรรจุภัณฑ์แบบเดิม ทำให้เกิดการลดการใช้เม็ดพลาสติกในการกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์ ลดการปล่อยก๊าซเรือน

⁹⁷ www.tomra.com/en/waste-metal-recycling/products/technologies/flying-beam

⁹⁸ www.tomra.com/en/waste-metal-recycling/products/technologies/deep-learning

⁹⁹ ampsortation.com/technologies

¹⁰⁰ Michaël Becidan, 2024, Advanced sorting technologies in the waste sector, Case studies compilation, Mar Edo (RISE), Linnea Granström (Swedish Plastic Recycling) and Carling Spelhaug and Carson Potter (AMP)

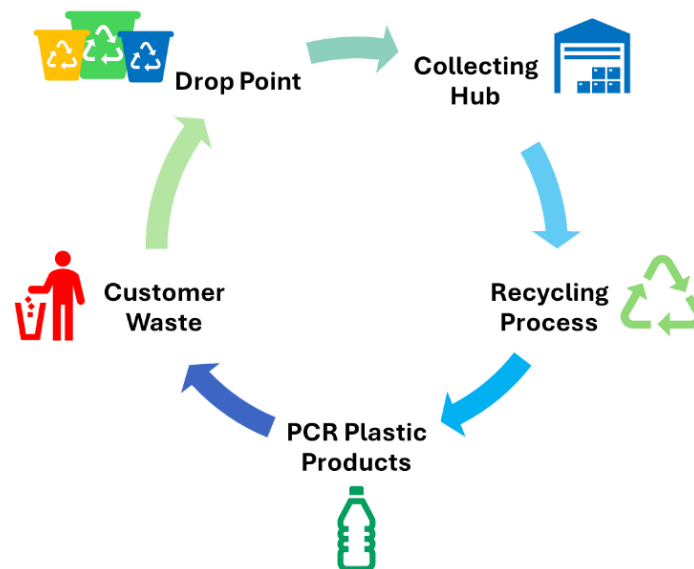
¹⁰¹ www.scgchemicals.com/en/articles/stories/1653740701

กระจกในระหว่างกระบวนการผลิตและยังลดพลังงานในการผลิตบรรจุภัณฑ์ จึงทำให้บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตด้วยเม็ดพลาสติกจากเทคโนโลยี SMX สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ เนื่องจากมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตโดยเม็ดพลาสติกทั่วไป¹⁰²

2. การรีไซเคิล (Recycle)

2.1 การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical Recycling)

การรีไซเคิลเชิงกลมีบทบาทสำคัญในด้านการลดขยะพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการนำพลาสติกที่ใช้งานแล้วมาผ่านกระบวนการรีไซเคิลและนำไปผลิตเป็นสินค้าหรือบรรจุภัณฑ์ต่างๆ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ซึ่งวิธีนี้จะมีขั้นตอนตั้งแต่การรวบรวมพลาสติกที่ใช้แล้วมาคัดแยกและทำความสะอาด จากนั้นทำการรีไซเคิลเป็นเม็ดพลาสติกเพื่อนำมาผสมกับเม็ดพลาสติกใหม่หรือผสมกับสารเติมแต่งเพื่อให้มีคุณสมบัติตามต้องการก่อนนำไปผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 52 ตัวอย่างเช่น เม็ดพลาสติกกรีไซเคิล Post-Consumer Recycled (PCR) ของบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) ผลิตโดยโรงงาน ENVICCO เช่น เม็ดพลาสติก PCR PET หรือ เม็ดพลาสติก PCR HDPE สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม ภายใต้แบรนด์ InnoEco ซึ่งโดยเม็ดพลาสติกเหล่านี้ได้รับการรับรองจากสำนักคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) และองค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกาว่าสามารถสัมผัสกับอาหารและเครื่องดื่มได้อย่างปลอดภัย¹⁰³ ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมได้มีการนำไปใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ต่างๆ มากมาย นอกจากนี้ยังช่วยในเรื่องการลดต้นทุนและพลังงานในการผลิต เนื่องจากเม็ดพลาสติกที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลนี้จะมีราคาที่ถูกกว่าเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ และยังช่วยในเรื่องของการอนุรักษ์ทรัพยากรและความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการฝังกลบและการเผาขยะพลาสติก ซึ่งสอดคล้องกับเศรษฐกิจหมุนเวียนในประเทศไทยที่วัดด้วยเรื่องของใช้ทรัพยากรอย่างต่อเนื่องและหมุนเวียน และลดของเสียที่จะสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 52 ขั้นตอนกระบวนการรีไซเคิลเชิงกล ดัดแปลงจาก กระบวนการรีไซเคิลเชิงกล ENVICCO

¹⁰² www.scgchemicals.com/uploads/Brochure_SMX_A411_15_09_2023.pdf

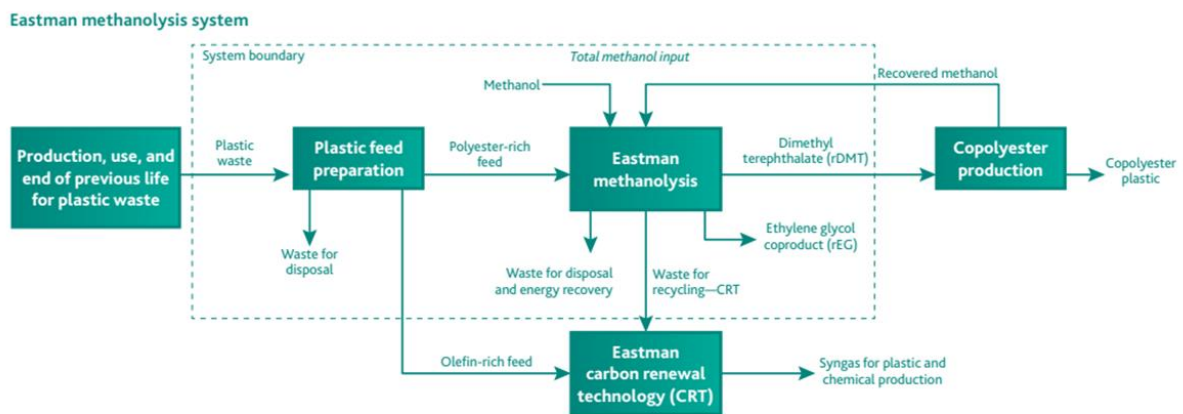
¹⁰³ sustainability.pttgcgroup.com/en/projects/945/envicco

2.2 การรีไซเคิลเชิงเคมี (Chemical Recycling)

การรีไซเคิลเชิงเคมีเป็นกระบวนการที่จัดการกับข้อจำกัดของการรีไซเคิลเชิงกล โดยทำการเปลี่ยนพลาสติกที่รีไซเคิลมาแล้วผ่านกระบวนการทางเคมีต่างๆ ที่เหมาะสม เช่น กระบวนการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) การทำให้แตกตัวด้วยตัวทำละลาย (Solvolysis) ให้กลายเป็นมอนอเมอร์ดั้งเดิมเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบหมุนเวียนในกระบวนการผลิต โดยแนวทางนี้ช่วยให้สามารถแยกพลาสติกผสมที่ซับซ้อนหรือพลาสติกที่ปนเปื้อน เช่น พลาสติกหลายชั้น (Multilayer Plastic) ซึ่งมักไม่เหมาะกับกระบวนการรีไซเคิลเชิงกล การรีไซเคิลเชิงเคมีจึงช่วยสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยการลดของเสียจากการฝังกลบ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่แทนการผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล

2.2.1 กระบวนการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization)

กระบวนการดีพอลิเมอร์ไรเซชันเป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์แตกตัวออกเป็นมอนอเมอร์โดยผ่านปฏิกิริยาเคมี วิธีนี้ช่วยให้สามารถรีไซเคิลขยะพลาสติกประเภทต่างๆ ได้ โดยผลผลิตมอนอเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์และมีคุณภาพสูงสามารถนำไปใช้สร้างพลาสติกใหม่ได้ เช่น บริษัท Eastman ได้ใช้เทคโนโลยี Polyester Renewal Technology (PRT)¹⁰⁴ มารีไซเคิลพอลิเอสเตอร์ด้วยกระบวนการไกลโคไลซิส (Glycolysis) หรือเมทานอลไลซิส (Methanolysis) เพื่อที่จะได้มอนอเมอร์ตั้งต้นเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตขั้นต่อไป และ Carbon Renewal Technology (CRT)¹⁰⁵ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์แตกตัวออกเป็นมอนอเมอร์เช่นเดียวกับ PRT ดังแสดงในรูปที่ 53 สามารถรีไซเคิลขยะพลาสติกผสม ขยะพลาสติกที่ซับซ้อนได้เป็นวงกว้างกว่า (ยกเว้นพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)) โดยทั้งสองวิธีนี้สามารถลดการฝังกลบ ลดการเผาขยะพลาสติก และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ยังลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อีกด้วย



Note: Figure shows a simplification of the methanolysis system and its mass flows to produce rDMT and rEG based on the planned feedstock mix for 2023.

รูปที่ 53 Carbon Renewal Technology (CRT)¹⁰⁶

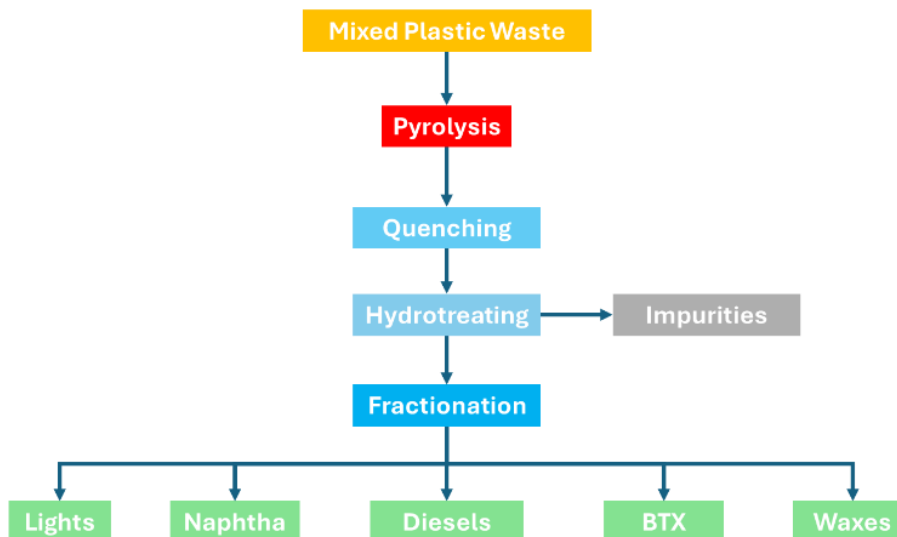
¹⁰⁴ eastman.com/en/sustainability/environmental/circularity/circular-solutions/polyester-renewal

¹⁰⁵ eastman.com/en/sustainability/environmental/circularity/circular-solutions/carbon-renewal-technology

¹⁰⁶ info.eastman.com/rs/820-JEE-456/images/PRT%20Methanolysis%20LCA%20Summary%20Report.pdf?mkt_tok=ODIwLUpFRS00NTYAAAG04zbxohYUnJhP0h-Tx4UCetv8G_Fhwfz5-HQIXtApUO1PYLp3IXs7VHy4GdY6EUw3KbG3PMYbkA1x02tHaOt_eVmsSfMYbNpMon9i7uva5dQ

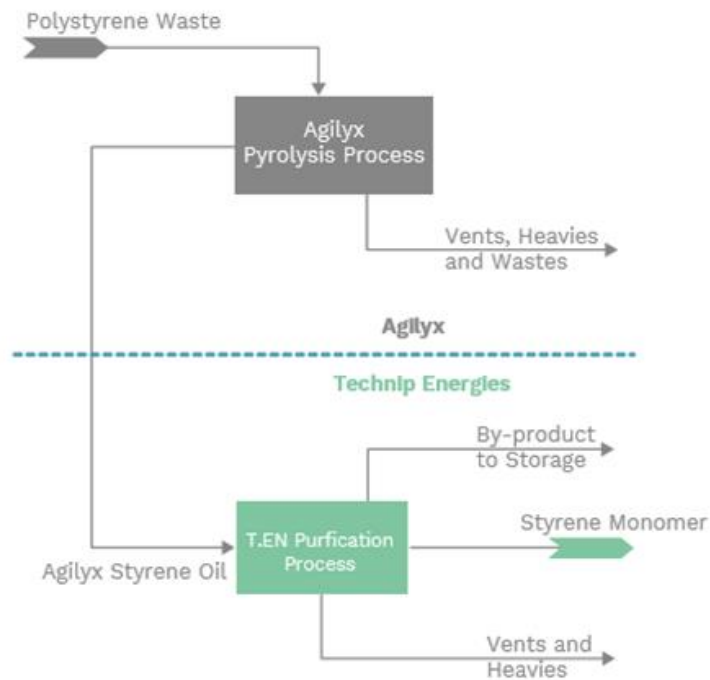
2.2.2 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกับขยะพลาสติกแบบไม่มีออกซิเจน โดยแปรสภาพจากโครงสร้างที่ซับซ้อนให้เป็นโมเลกุลที่เล็กลง อาจใช้หรือไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งถ้าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิสใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Pyrolysis) ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้เวลาในกระบวนการไพโรไลซิสสั้นลง ลดอุณหภูมิที่ใช้ในระหว่างกระบวนการทำให้ลดการใช้พลังงานในกระบวนการไพโรไลซิส โดยกระบวนการนี้สามารถจัดการกับพลาสติกได้หลากหลายประเภท รวมถึงพลาสติกผสมและพลาสติกที่ปนเปื้อน ทำให้มีความหลากหลายสูง ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากไพโรไลซิส เช่น น้ำมันไพโรไลซิสสามารถนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง หรือไฮโดรคาร์บอนจากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นทางเคมีหรือมอนอเมอร์สำหรับการผลิตพลาสติกใหม่ได้ ตัวอย่างเช่น บริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ได้ใช้กระบวนการไพโรไลซิสใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการรีไซเคิลขยะพลาสติกเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำพวกน้ำมันและก๊าซต่างๆ โดยได้มีความท้าทายในเรื่องของการพัฒนาตั้งร่งทั้งในด้านของควมมีเสถียรภาพและคุณภาพที่สูงขึ้น โดยต้องมีต้นทุนในการผลิตตัวเร่งต่ำ หรือกระบวนการไพโรไลซิสของบริษัท Sulzer¹⁰⁷ ได้นำกระบวนการนี้ไปใช้รีไซเคิลขยะพลาสติกผสมดังแสดงในรูปที่ 54 จากนั้นผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) ด้วยวิธีการไฮโดรทรีตติง (Hydrotreating) เพื่อกำจัดสิ่งเจือปน เช่น ซัลเฟอร์ คลอไรด์ ไนโตรเจน จากนั้นจะผ่านกระบวนการการแยก (Fractionation) ด้วยวิธีการกลั่น (Distillation) เพื่อที่จะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาใช้ในการผลิตในลำดับต่อไป หรือตัวอย่างของบริษัท agilyx และบริษัท เทคนิป เอ็นเนอร์จีส ได้นำกระบวนการไพโรไลซิสในการผลิตสไตรีนมอนอเมอร์จากขยะพลาสติกประเภทสไตรีนดังแสดงในรูปที่ 55 ดังนั้นกระบวนการไพโรไลซิสจึงช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมแทนการฝังกลบและการเผา นอกจากนี้ยังเป็นการสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียนโดยทำให้สามารถนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง



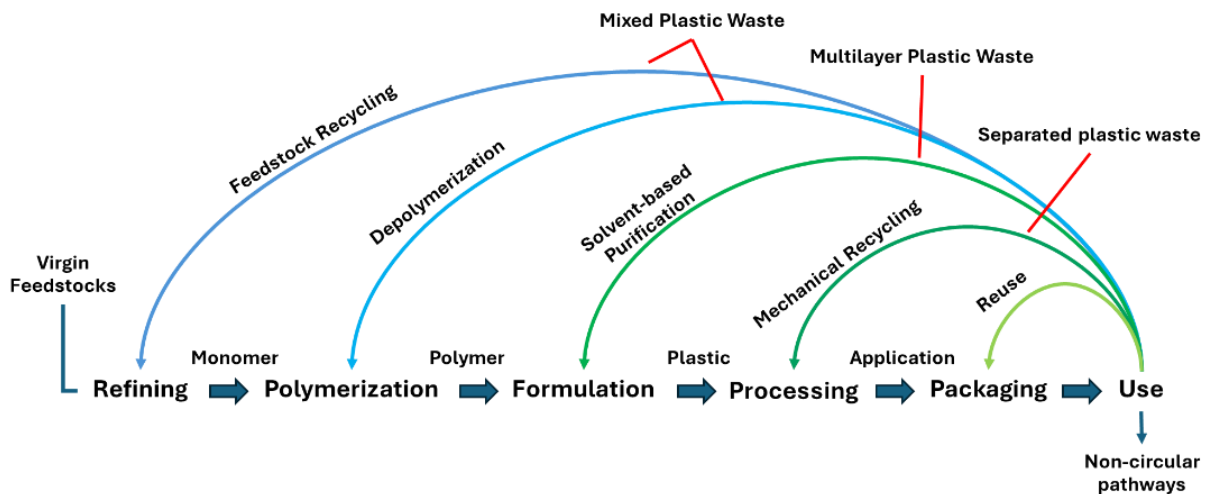
รูปที่ 54 การรีไซเคิลขยะพลาสติกผสมด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ดัดแปลงจาก Sulzer

¹⁰⁷ www.sulzer.com/en/shared/applications/mixed-plastics-pyrolysis



รูปที่ 55 การผลิตสไตรีนมอนอเมอร์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส¹⁰⁸

โดยที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปภาพรวมของกระบวนการรีไซเคิลได้ดังแสดงรูปที่ 56



รูปที่ 56 ภาพรวมการจัดการรีไซเคิลพลาสติกด้วยวิธีต่างๆ¹⁰⁹

¹⁰⁸ www.ten.com/sites/energies/files/2023-05/Brochure_TruStyrenyx.pdf

¹⁰⁹ Crippa et al., 2019, A circular economy for plastics – Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions, European Commission.

องค์ประกอบสำคัญอีกประการหนึ่งของกลยุทธ์การลดคาร์บอนและการช่วยลดต้นทุนและปริมาณวัสดุที่ใช้ในกระบวนการต่างๆ คือการนำวัสดุที่เหลือใช้ ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์หลัก หรือของเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อด้านอื่นๆ แทน ซึ่งช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) และลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติได้อย่างมาก ทั้งกระบวนการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อลดมลพิษและหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการ หรือเทคโนโลยีการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน โดยเปลี่ยนขยะอินทรีย์และขยะอุตสาหกรรมให้เป็นแหล่งพลังงานสะอาดหมุนเวียนและลดต้นทุนในการนำเข้าพลังงานที่จะใช้ในกระบวนการผลิต ยกตัวอย่างเช่น การใช้ก๊าซชีวภาพผลิตพลังงานสะอาดโดยการย่อยสลายขยะอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนจะทำให้เกิดก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานสะอาดได้อีกด้วย การนำผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้จากกระบวนการผลิต เช่น กากน้ำตาลจากอ้อย มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลซึ่งเป็นส่วนผสมในการผลิตแก๊สโซฮอล์ หรือนำขานอ้อยมาเข้าสู่กระบวนการผลิตพลังงานชีวมวล ผลิตกระแสไฟฟ้า¹¹⁰ เพื่อเป็นพลังงานทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั้งหมดนี้มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงไปสู่เศรษฐกิจหมุนเวียนและมีความยั่งยืนอีกด้วย

3. อัปไซเคิล (Upcycle)

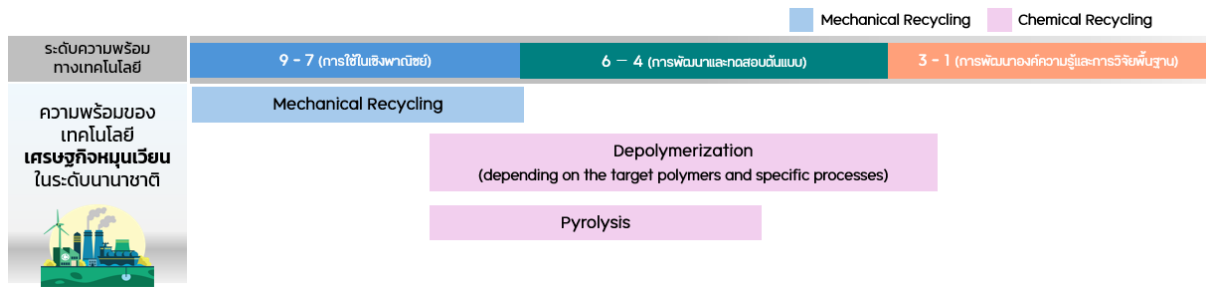
อัปไซเคิลคือกระบวนการที่เปลี่ยนวัสดุที่ใช้แล้วให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าและมีประโยชน์ใช้สอยที่สูงขึ้น โดยในประเทศไทยมีหลายบริษัทได้นำกระบวนการอัปไซเคิลไปใช้ยกตัวอย่างเช่น บริษัท พีทีที โกลบอลเคมีคอล จำกัด (มหาชน) ได้จัดทำโครงการ Upcycling to The Ocean, Thailand¹¹¹ โดยร่วมมือกับกรมเจ้าท่า (จท.) การท่าเรือแห่งประเทศไทย (กทท.) และ บริษัท ขอนแก่นแหวน จำกัด (KKF) โดยมีแนวคิดเพื่อลดปัญหาขยะพลาสติกจากแหล่งน้ำต่างๆ จากทะเลและชายฝั่ง เช่น ขวดพลาสติกประเภท PET เศษแหวน มาแปรรูปเป็นสินค้าแฟชั่นต่างๆ หรือการร่วมมือระหว่างพีแอนด์จีประเทศไทย บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) พร้อมด้วย บริษัท แสนสิริ จำกัด (มหาชน) ธุรกิจโลตัส ประเทศไทย และมูลนิธิที่อยู่อาศัย ประเทศไทย จัดทำโครงการ Upcycling Plastic House¹¹² โดยนำกล่องนมและถุงแชมพูชนิดเดิมมาผลิตเป็นหลังคาและผนังบ้าน นำฟิล์มพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน (PE) มาผสมกับผงไม้เพื่อผลิตเป็นวงกลม หน้าต่าง ประตู และนำขวดพลาสติกชนิดขุ่นมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อผลิตเป็นพื้นและผนังบ้าน เป็นต้น โดยแนวคิดเหล่านี้จะช่วยในเรื่องของการลดขยะพลาสติก มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียนอีกด้วย

¹¹⁰ www.mitrphol.com/pdf/MITR-PHOL-SD-report-2017-EN.pdf

¹¹¹ sustainability.pttgcgroup.com/en/projects/10/the-upcycling-the-oceans-thailand-project

¹¹² www.pttgcgroup.com/en/newsroom/news/1260/p-and-g-collaborates-with-gc-to-deliver-the-upcycling-plastic-house-made-from-recycled-materials-promoting-sustainability-and-equality-together-with-partners-sansiri-lotus-s-and-habitat-group-they-continue-to-uphold-the-sustainability-vision

ความพร้อมในประเทศไทย



รูปที่ 57 ความพร้อมของเทคโนโลยีสำหรับเศรษฐกิจหมุนเวียน

ประเทศไทยมีความพร้อมในด้านการจัดการและความพร้อมทางด้านเทคโนโลยีโดยมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในหลาย ๆ บริษัท ทั้งการใช้ซ้ำ (Reuse) การรีไซเคิล (Recycle) โดยในประเทศไทยในหลายบริษัทได้มีการจัดการอย่างเป็นรูปแบบ มีการวิจัยและพัฒนาความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีตลอดเวลาเป็นอย่างมาก เพื่อส่งเสริมการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนลดการใช้พลังงานระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ลดต้นทุนในการผลิต ซึ่งในหลายบริษัทมีการลงทุนในเทคโนโลยีเหล่านี้เพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายการจัดการอย่างยั่งยืนและสอดคล้องกับเศรษฐกิจแบบ BCG ซึ่งผลตอบแทนที่ได้จากเทคโนโลยีเหล่านี้มีความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เนื่องจากจะเปลี่ยนขยะพลาสติกให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าต่างๆ และยังช่วยลดการใช้พลาสติกบริสุทธิ์ที่สังเคราะห์จากเชื้อเพลิงฟอสซิล และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นอย่างมาก ซึ่งสามารถยกตัวอย่างความพร้อมกระบวนการรีไซเคิลต่อเม็ดพลาสติกชนิดต่างๆ ดังแสดงตารางที่ 10 โดยมีความท้าทายในอนาคต เช่น การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกำลังดำเนินการอยู่เพื่อปรับปรุงกระบวนการให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นและใช้ต้นทุนที่น้อยลง และการลงทุนระหว่างภาครัฐและเอกชนเพื่อขับเคลื่อนประเทศไทยไปสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำและอนาคตที่ยั่งยืน

ตารางที่ 10 ตัวอย่างความพร้อมของกระบวนการรีไซเคิลต่อเม็ดพลาสติกชนิดต่างๆ¹¹³

Recycling Technology	Mechanical Recycling	Depolymerization	Pyrolysis
PET	4	3	2
PU	2	3	3
PA	1	3	3
PS	4	3	4
PE	4	1	4
PP	4	1	4

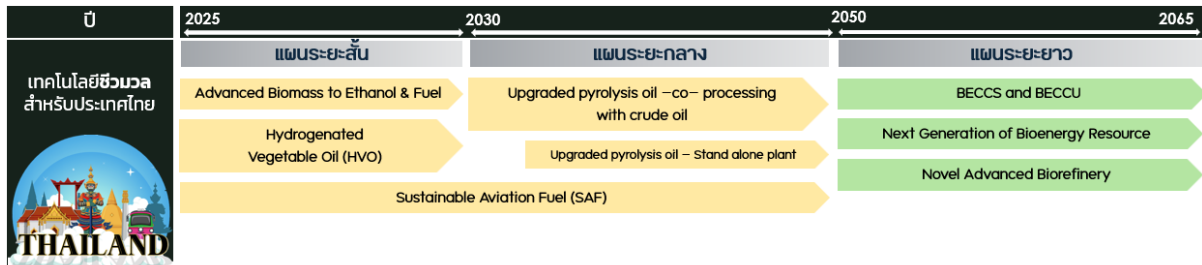
Potential level: 4 = High, 3 = Medium, 2 = Low, 1 = very Low
 Highlight = Currently applied technologies

¹¹³ Boston Consulting Group (BCG), Solving the circularity challenges in plastics value chain

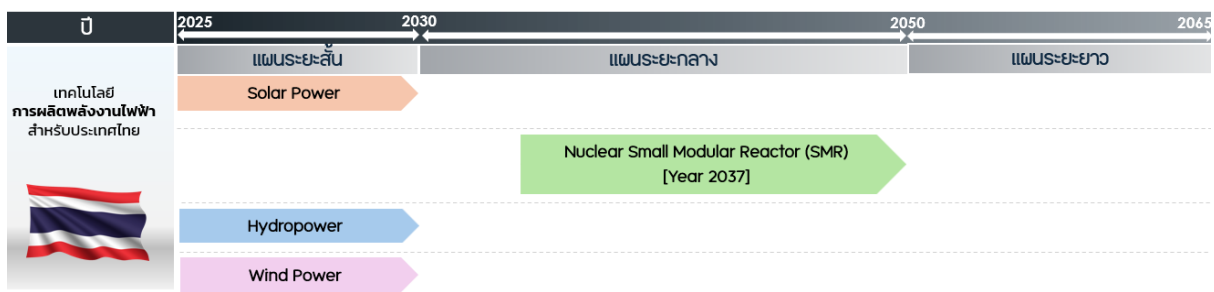
บทที่ 4

ทิศทางเทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมกระบวนการของประเทศไทยอย่างยั่งยืน

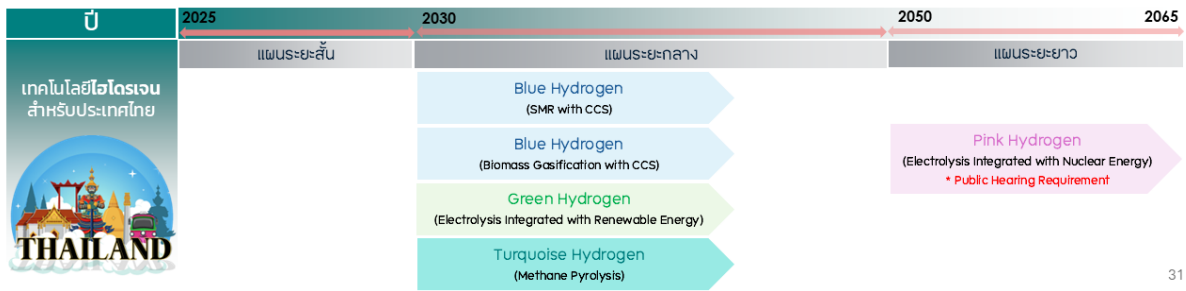
จากความท้าทายในการแก้ไขและจัดการกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ในหลายประเทศทั่วโลก ที่เป็นแรงผลักดันให้เกิดการพัฒนาและการนำเทคโนโลยีการลดปริมาณการผลิตและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Decarbonization Technology) ไปประยุกต์ใช้ โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมกระบวนการที่มีการนำเทคโนโลยีไปปรับใช้และการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตเพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการดำเนินการด้านการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้ จะส่งผลในเชิงบวกต่อการดำเนินธุรกิจ เช่น ส่งเสริมเศรษฐกิจสีเขียว และยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันในการส่งออกผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมกระบวนการ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติกและปิโตรเคมี (Plastic and Petrochemical Industries) อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive Industry) และอุตสาหกรรมซีเมนต์ (Cement Industry) อย่างไรก็ตาม ต้นทุนการผลิตสินค้าที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลกระทบเชิงลบที่เกิดขึ้นได้ หากพิจารณาถึงความต้องการในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แต่เพียงอย่างเดียวโดยไม่พิจารณาถึงปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นแล้ว การนำเทคโนโลยีการลดปริมาณการผลิตและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Decarbonization Technology) มาใช้อย่างยั่งยืน ต้องพิจารณาให้ครบถ้วนทุกประเด็น เช่น ด้านเทคโนโลยีวิศวกรรม ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์



รูปที่ 58 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของเทคโนโลยีชีวมวล

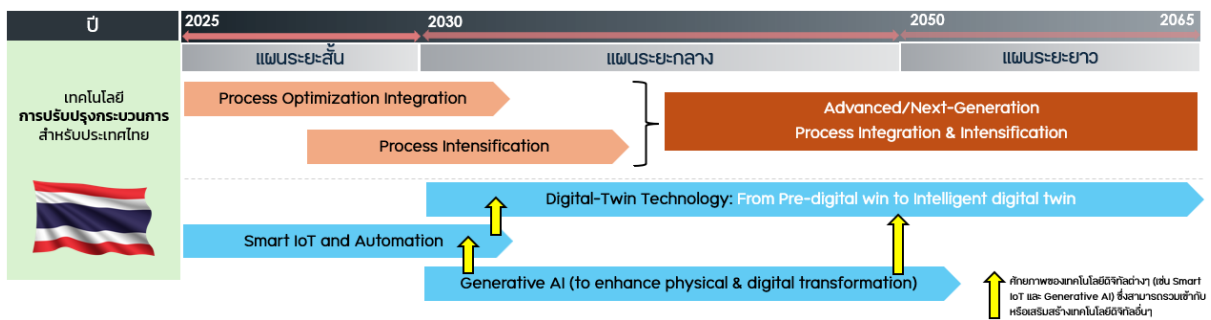


รูปที่ 59 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้า

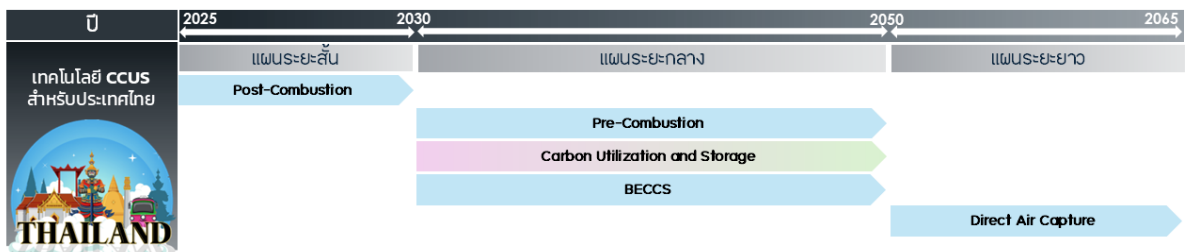


31

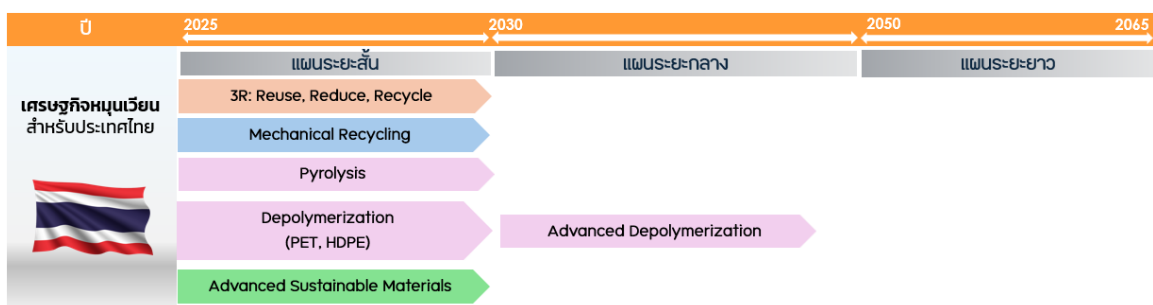
รูปที่ 60 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของเทคโนโลยีไฮโดรเจน



รูปที่ 61 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของเทคโนโลยีการปรับปรุงกระบวนการ

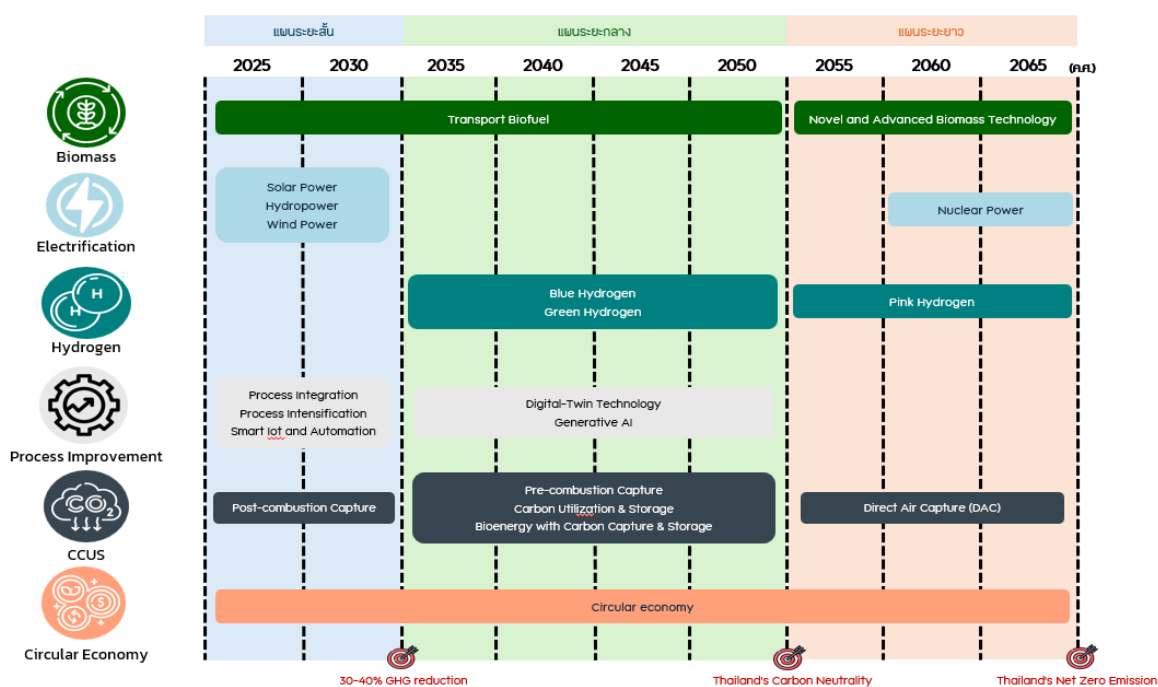


รูปที่ 62 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของเทคโนโลยีการดักจับ การใช้ประโยชน์ และการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 63 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการของเทคโนโลยีเศรษฐกิจหมุนเวียน

การลดปริมาณการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมกระบวนการสามารถกำหนดกรอบตามแผนการดำเนินงานเพื่อบรรลุเป้าหมายของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามเป้าหมายของประเทศ โดยแบ่งระยะเวลาเป็น 3 ช่วงตามเป้าหมายของประเทศดังนี้ แผนระยะสั้น 5 ปี หรือ การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงร้อยละ 30 – 40 (30 – 40% GHG Reduction) ในปี 2030 ตามด้วยแผนระยะกลาง 10 – 20 ปี หรือ ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ในปี 2050 และแผนระยะยาว 30 – 50 ปี หรือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ (Net Zero GHG Emissions) ในปี 2065 ซึ่งแนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการ 6 กลุ่มเทคโนโลยีที่สามารถเชื่อมประสานกัน (Building Blocks) ได้แก่ ชีวมวล (รูปที่ 58), การผลิตพลังงานไฟฟ้า (รูปที่ 59), ไฮโดรเจน (รูปที่ 60), การปรับปรุงกระบวนการ (รูปที่ 61), การดักจับ การใช้ประโยชน์ และการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (รูปที่ 62), และ เศรษฐกิจหมุนเวียน (รูปที่ 63) แต่ละเทคโนโลยีมีความเหมาะสมกับบทบาทของประเทศแตกต่างกัน เนื่องจากต้องการแรงสนับสนุนและความพร้อมหลายด้าน เช่น ความพร้อมเทคโนโลยี เงินลงทุน โครงสร้างพื้นฐาน การสนับสนุนจากภาครัฐ เอกชน และประชาชน



รูปที่ 64 แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการเพื่อตอบสนองเป้าหมายของประเทศ

โดยศักยภาพและความเป็นได้ของเทคโนโลยีการลดปริมาณการผลิตและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในแต่ละช่วงระยะเวลาเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามแผนการดำเนินงานของไทย แสดงในรูปที่ 64 สำหรับแผนระยะสั้น 5 ปี เพื่อตอบสนองเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงร้อยละ 30 – 40 นั้น (30 – 40% GHG Reduction) ภายในปี 2030 การใช้งานเทคโนโลยีที่ปล่อยคาร์บอนต่ำจะต้องมีความเป็นรูปธรรมและความพร้อมที่สามารถดำเนินการได้ทันที ซึ่งจะในรูปแบบที่สามารถนำมาใช้ได้เดียวกับกระบวนการผลิตเดิมโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการ (Drop In) จากการปรับเปลี่ยนเชื้อเพลิงหรือการใช้แหล่งพลังงานทดแทน ได้แก่ เทคโนโลยีชีวมวลที่ยั่งยืน (Sustainable Feedstock) เพื่อ

เป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสำหรับการผลิตพลังงานที่ทดแทนการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงมีวัสดุเหลือใช้และของเสียจากการทำเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมการเกษตรซึ่งจัดเป็นแหล่งเชื้อเพลิงและวัตถุดิบที่มีศักยภาพ และการสนับสนุนการใช้ชีวมวลก่อให้เกิดการกระจายตัวของเศรษฐกิจในประเทศอีกด้วย นอกจากนี้ เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ หรือโซลาร์เซลล์ (Solar Cell) เพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ นั้น จัดได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมในวงกว้าง มีการพัฒนามาอย่างยาวนานและก้าวกระโดดทั้งในเรื่อง วัสดุ ประสิทธิภาพ ขนาด พื้นที่ และต้นทุนที่ถูกลง แต่อย่างไรก็ตาม การจัดการซากโซลาร์เซลล์หลังหมดอายุการใช้งานเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาถึงผลรวมสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดได้

เทคโนโลยีการเพิ่มและปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิต (Process Improvement) ที่ปัจจุบันมีการพัฒนาไปอย่างก้าวกระโดดและควบคู่ไปกับเทคโนโลยีดิจิทัล เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต การลดการใช้พลังงาน และการลดของเสีย ซึ่งหลายนวัตกรรมสามารถดำเนินการได้ทันทีด้วยการตัดสินใจของภาคอุตสาหกรรมและเห็นผลอย่างเป็นรูปธรรม ไม่ต้องรอการสนับสนุนจากภาครัฐ เช่น Process Integration และ Process Intensification อีกทั้งนวัตกรรมเทคโนโลยีแบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัล (Digital Twin) ที่นำระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence หรือ AI) มาประยุกต์เข้ากับกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และเทคโนโลยีเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy หรือ CE) ที่สามารถหมุนเวียนวัสดุเหลือใช้และของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในรูปของวัตถุดิบ (Material) และพลังงาน (Energy) กลับเข้าสู่กระบวนการผลิต ที่ประเทศไทยได้มีการรณรงค์ในหลายภาคส่วนภายใต้นโยบาย เศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว (Bio-Circular-Green Economy หรือ BCG) ซึ่งเป็นโมเดลเศรษฐกิจสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนของประเทศไทย

พร้อมกันนี้เทคโนโลยีดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-Combustion Capture) หรือเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนฯ สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้สู่ชั้นบรรยากาศได้ เนื่องจากโรงงานบางประเภทมีการนำเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนฯ มาปรับเปลี่ยนร่วมกับระบบโรงงานเดิมได้ เช่น โรงไฟฟ้าถ่านหิน (Coal-Fired Power Plant) โรงไฟฟ้าน้ำมันและก๊าซ (Oil-and-Gas-Fired Power Plant) โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Combined-Cycle Power Plant) และโรงไฟฟ้าชีวมวล (Biomass-Fired Power Plant) โดยตัวอย่างบริษัทที่มีการนำเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนฯ มาประยุกต์ใช้กับโรงงานเดิมอยู่แล้ว คือ บริษัท Toshiba จำกัด โดยประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน (Thermal Power Plant) จากก๊าซไอเสีย (Flue Gas)¹¹⁴ ซึ่งเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนฯ นี้เป็นทางเลือกที่ยืดหยุ่นสำหรับโรงงานที่มีอยู่เดิม นอกจากนี้ เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนฯ ด้วยสารละลายเอมีน เป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาและปรับปรุงมาอย่างยาวนาน จึงทำให้มีความรู้และความเข้าใจเป็นอย่างดี และเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ดี ความท้าทายของเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนฯ ด้วยสารละลายเอมีน ยังมีปัญหาที่ต้องคำนึงในหลายด้าน เช่น ความต้องการด้านพลังงานในการฟื้นฟูสารละลายเอมีนหลังจากการดูดซับคาร์บอน การเสื่อมสภาพทางความร้อนของสารละลายเอมีน เนื่องจากกระบวนการฟื้นฟูสารละลายเอมีน (Amine Regeneration Process) ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนที่ลดลง ข้อกังวลด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพเนื่องจากสารละลายเอมีนสามารถระเหยออกสู่บรรยากาศได้ อีกทั้งสารละลายเอมีนมีฤทธิ์กัดกร่อนจึงต้องคำนึงถึงการ

¹¹⁴ www.global.toshiba/ww/products-solutions/thermal/products-technical-services/zero-emissions.html

ดำเนินงานและบำรุงรักษาเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะส่งผลต่อต้นทุนการดำเนินงานที่สูงตามไปด้วย ซึ่งความท้าทายดังกล่าวต้องการการสนับสนุนจากทางภาครัฐ ทั้งด้านเงินลงทุนและด้านนโยบายที่ครอบคลุมในทุกด้าน และความร่วมมือจากภาคเอกชนในการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อให้ตอบโจทย์ความท้าทาย ความพยายามเหล่านี้จะมีส่วนช่วยอย่างมีนัยสำคัญต่อเป้าหมายการลดการผลิตและการปล่อยคาร์บอนของประเทศไทยในระยะสั้น

เพื่อบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี 2050 การเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีที่อาศัยเชื้อเพลิงฟอสซิลหรือใช้วัตถุดิบที่มาจากปิโตรเลียม (Petroleum-Based Feedstocks) ไปยังเทคโนโลยีที่ใช้เชื้อเพลิงสะอาดหรือวัตถุดิบที่มาจากชีวมวล (Bio-Based Feedstocks) เช่น ไบโอรีไฟน์เนอรี (Biorefinery) นอกจากนี้การนำเทคโนโลยีขั้นสูงมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมกระบวนการ เช่น การผลิตไฮโดรเจนสีน้ำเงิน (Blue Hydrogen) ซึ่งเป็นการผลิตไฮโดรเจนจากก๊าซธรรมชาติพร้อมกับเทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอนหลังการเผาไหม้ (Post-Combustion Carbon Capture and Storage) โดยการรวบรวมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการผลิต และส่งไปกักเก็บในหลุมผลิตปิโตรเลียมบริเวณอ่าวไทย ปัจจุบันในประเทศไทย กลุ่ม ปตท. ได้ศึกษาต้นแบบเทคโนโลยี CCS Hub Model ความเป็นได้ของโครงสร้างทางธรณีเพื่อรองรับการกักเก็บคาร์บอน แต่อีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือ เทคโนโลยีการรวบรวมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งต่างๆ ผ่านระบบท่อส่ง เพื่อนำไปกักเก็บในหลุมผลิตต่อไปนั้น ต้องการเม็ดเงินในการลงทุนเพื่อพัฒนาโครงการที่ค่อนข้างสูงและต้องอาศัยความร่วมมือจากการพัฒนานโยบายของภาครัฐและการลงทุนของภาคเอกชน พร้อมกันนี้โครงการเทคโนโลยีการผลิตพลังงานชีวภาพด้วยเทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Bioenergy with Carbon Capture and Storage หรือ BECCS) ที่เป็นการใช้ชีวมวลผลิตเป็นเชื้อเพลิงพร้อมกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก็เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมกระบวนการของประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตาม การนำเทคโนโลยีเหล่านี้มาประยุกต์ใช้นั้นยังมีข้อจำกัดในหลายด้าน แม้ว่าหลายเทคโนโลยีจะมีความพร้อมในการดำเนินการ แต่การปรับเปลี่ยนโครงสร้างการผลิต และความพร้อมในการลงทุน ยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง อีกทั้งนโยบายภาครัฐที่สนับสนุนต่อภาคอุตสาหกรรมในการพัฒนาและการลงทุนเทคโนโลยี รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีและการเงินเพื่อรองรับตลาดคาร์บอน จากการซื้อขายเครดิตและมาตรการด้านภาษีและบทลงโทษจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นประเด็นประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้เทคโนโลยีการลดการผลิตปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังกล่าว

ในแผนการระยะยาวของประเทศไทยสำหรับการเข้าสู่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ (Net Zero GHG Emissions) ภายในปี 2065 อุตสาหกรรมการผลิตในประเทศจะต้องปรับตัวโดยอาศัยการเปลี่ยนผ่านของเทคโนโลยีและความพร้อมของเทคโนโลยีในอนาคตที่ไม่ก่อให้เกิดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ตลอดจนมีการกักเก็บก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นและนำมาใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม เทคโนโลยีที่อาศัยเชื้อเพลิงฟอสซิลจะถูกใช้งานลดลงหรือไม่มีการใช้งาน การใช้เทคโนโลยีพลังงานทางเลือกและหมุนเวียน (Alternative and Renewable Energy) ต่างๆ จะต้องคำนึงถึงผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ สำหรับอนาคต เทคโนโลยีนิวเคลียร์ฟิชชันที่เป็นพลังงานสะอาดและปลอดภัย อาจใช้เป็นหนึ่งในทางเลือกหลักสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าควบคู่กับพลังงานทางเลือกอื่น แต่ยังคงมีอุปสรรคและความท้าทายอยู่อีกมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของต้นทุน การเพิ่มปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ ปัญหาการบำบัดกำจัดกากเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และความกังวลของประชาชนในประเทศ อนึ่ง พลังงานหมุนเวียนและพลังงานนิวเคลียร์เหล่านี้ ยังสามารถนำมาใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการผลิตไฮโดรเจนสีเขียวและสีชมพูสำหรับอนาคต ซึ่งจะสามารถผลิตไฮโดรเจนที่ไม่มีการ

ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ การใช้เทคโนโลยี CCUS ยังคงดำเนินการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะเทคโนโลยีการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ (Carbon Capture and Utilization หรือ CCU) ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรม อย่างเป็นรูปธรรม นอกจากนี้ เทคโนโลยีดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศโดยตรง (Direct Air Capture หรือ DAC) หรืออาจเรียกว่า โรงกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ที่อยู่ในระหว่างวิจัยและพัฒนาในระดับการทดสอบเสมือนจริงในหลายประเทศทั่วโลก อย่างไรก็ตาม แม้ว่าในปัจจุบันผลการทดสอบหน่วยต้นแบบ รวมถึงขยายขนาดเป็นโรงงานต้นแบบ ในต่างประเทศถือได้ว่าประสบความสำเร็จในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรงจากอากาศและการควบคุมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ แต่ทว่าประโยชน์ที่ได้รับจากการลงทุนโดยเฉพาะสำหรับภาคอุตสาหกรรม ยังต้องอาศัยปัจจัยทางด้านการพัฒนาเทคโนโลยี ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ และความร่วมมือจากหลายภาคส่วน เพื่อให้เกิดความสำเร็จต่อการเข้าใกล้การบรรลุเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์อย่างยั่งยืนต่อไป

ตลอดช่วงเวลาตั้งแต่การบรรลุเป้าหมายการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ เทคโนโลยีที่มีการนำไปใช้และเกิดความคุ้มค่าต่อการลงทุนของภาคเอกชนเพื่อลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างเป็นรูปธรรม เช่น เทคโนโลยีการเพิ่มและปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิต (Process Improvement) เทคโนโลยีพลังงานทางเลือก จากชีวมวลและพลังงานหมุนเวียน เทคโนโลยีตามหลักของเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) สามารถนำไปใช้ตั้งแต่แผนการดำเนินการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระยะสั้น ดำเนินการต่อเนื่องด้วยแผนการดำเนินงานในระยะกลางจนถึงระยะยาว แนวทางนี้จะช่วยลดของเสีย และสนับสนุนการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมการผลิตของประเทศ โดยการดำเนินงานตามแผนการดำเนินงานดังกล่าว การพัฒนากระบวนการในโรงงาน รวมถึงการนำเทคโนโลยีขั้นสูง มาใช้ จะทำให้อุตสาหกรรมกระบวนการผลิตของประเทศไทยสามารถลดการปล่อยคาร์บอนได้อย่างเป็นระบบ เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต และสอดคล้องกับความพยายามด้านความยั่งยืนระดับโลก

แผนงานนี้ไม่เพียงแต่จะวางรากฐานและเส้นทางสู่อนาคตของอุตสาหกรรมกระบวนการคาร์บอนต่ำ แต่ยังทำให้ประเทศไทยเป็นผู้นำและพัฒนาเทคโนโลยีด้านการลดการผลิตและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืน โดยยึดหลักการของโมเดล BCG (Bio-Circular-Green) ซึ่งเน้นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด การนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ และการสร้างเศรษฐกิจที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในภาคอุตสาหกรรมกระบวนการของประเทศไทย แผนงานนี้จะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาและนำเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำมาใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ ลดการใช้พลังงาน และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ด้วยการสนับสนุนจากรัฐและเอกชน การขับเคลื่อนอุตสาหกรรมกระบวนการให้เข้าสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศไทยในตลาดโลก อีกทั้งยังสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของประเทศและสร้างความเข้มแข็งให้กับห่วงโซ่อุปทานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในระดับสากล หากแผนงานนี้สามารถดำเนินการได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ เช่น การปรับปรุงกฎระเบียบที่เอื้อต่อการลงทุนในเทคโนโลยีสะอาด การให้แรงจูงใจทางเศรษฐกิจ และการสร้างความร่วมมือระหว่างภาครัฐ ภาคเอกชน และประชาชน ด้วยการสนับสนุนและดำเนินการอย่างเป็นระบบภายใต้กรอบโมเดล BCG แผนงานนี้มีศักยภาพในการเปลี่ยนแปลงอุตสาหกรรมกระบวนการของประเทศไทยอย่างแท้จริง และหากเงื่อนไขของแผนงานได้รับการปฏิบัติอย่างเคร่งครัด แนวคิดนี้อาจเป็นก้าวสำคัญที่ปูทางให้ประเทศไทยบรรลุเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ได้ในอนาคต

การลดการปล่อยคาร์บอนสำหรับอุตสาหกรรมกระบวนการในประเทศไทยจะเกิดขึ้นได้ ไม่เพียงแต่ปัจจัยด้านความพร้อมของเทคโนโลยีที่ต้องพร้อมนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรม เทคโนโลยีบางประเภทยังต้องการการสนับสนุนจากหลากหลายภาคส่วน เช่น การสนับสนุนจากทางภาครัฐ ความร่วมมือกันระหว่างภาครัฐกับภาคอุตสาหกรรม รวมถึงภาคอุตสาหกรรมด้วยตนเอง ไม่ว่าจะเป็นการสนับสนุนการลงทุน การวางโครงสร้างพื้นฐานใหม่ควบคู่กับการปรับปรุงและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเดิมให้พร้อมสำหรับกันใช้งานกับเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำ อีกทั้งการประชาสัมพันธ์ให้ภาคประชาชนเข้าใจและตระหนักถึงบทบาทของตนเองและครัวเรือนในการลดการปล่อยคาร์บอน ตลอดจนการลดการปล่อยคาร์บอนในภาคอุตสาหกรรมและประเทศเพื่อตอบสนองเป้าหมายของการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ โดยความท้าทายและช่องว่างของเทคโนโลยีที่เป็นข้อจำกัดแต่ละประเภทที่กล่าวถึงในรายงานเล่มนี้ มีดังนี้

1. ชีวมวล (Biomass)

การพัฒนาเทคโนโลยีชีวมวลในประเทศไทยประสบความสำเร็จหลายประการที่สำคัญ โดยในด้านเทคโนโลยีและโครงสร้างพื้นฐาน พบว่าเทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลส่วนใหญ่ยังอยู่ในระยะเริ่มต้นของการพัฒนา และยังคงขาดประสิทธิภาพในเชิงพาณิชย์ การบูรณาการเข้ากับโครงสร้างพื้นฐานอุตสาหกรรมที่มีอยู่เดิมยังคงเป็นความท้าทายสำคัญ เนื่องจากความหลากหลายของวัตถุดิบและระบบการจัดการ อีกทั้งความพร้อมใช้งานของชีวมวลยังมีข้อจำกัดด้านฤดูกาลและพื้นที่ ด้านนโยบายและกฎหมาย ปัจจุบันเทคโนโลยีชีวมวลประสบปัญหาการขาดกฎระเบียบที่ชัดเจนและครอบคลุมในการส่งเสริมเทคโนโลยีชีวมวลในทุกภูมิภาค แม้ว่าภาครัฐได้แสดงเจตจำนงผ่าน PDP2018 โดยกำหนดเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล 5,790 เมกะวัตต์ และจากก๊าซชีวภาพ 1,565 เมกะวัตต์ อย่างไรก็ตาม ร่างแผน PDP2024 กลับสะท้อนภาพที่แตกต่างออกไป ร่างแผนฉบับใหม่จะมีการปรับเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทางเลือกในภาพรวมจากร้อยละ 37 เป็นร้อยละ 51 แต่กลับพบว่าเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลถูกปรับลดลงเหลือ 1,046 เมกะวัตต์ และจากก๊าซชีวภาพลดลงเหลือ 936 เมกะวัตต์^{115,116} การปรับลดเป้าหมายการผลิตอย่างมีนัยสำคัญนี้ ถึงแม้ว่าพลังงานชีวมวลจะยังคงเป็นส่วนหนึ่งของร่างแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย แต่ก็ได้สร้างความกังวลให้แก่ผู้มีส่วนร่วมกับผลกระทบบต่อความยั่งยืนของภาคการเกษตรและระบบเศรษฐกิจด้วยเช่นกัน ด้านการเงินและเศรษฐกิจ พบว่าต้นทุนวัตถุดิบชีวมวลภายในประเทศสูงกว่าวัตถุดิบชีวมวลนำเข้า แม้จะรวมต้นทุนการนำเข้าแล้วก็ตาม ส่งผลให้ขาดแรงจูงใจในการลงทุนและมีความเสี่ยงสูง นอกจากนี้ มีการประเมินโรงไฟฟ้าชีวมวลประเภทต่างๆ โดยโรงไฟฟ้าชีวมวลจากขานอ้อยให้ผลตอบแทนและระยะเวลาคืนทุนที่ดีที่สุด ขณะที่โรงไฟฟ้าชีวมวลจากไม้สับให้ผลตอบแทนต่ำสุดและคืนทุนช้าที่สุด¹¹⁷ แสดงถึงปัจจัยที่นักลงทุนควรพิจารณาจุดเด่นและจุดด้อยของโรงไฟฟ้าชีวมวลในแต่ละประเภท รวมถึงพื้นที่ที่มีศักยภาพที่เหมาะสมจะลงทุน ร่วมด้วย สำหรับด้านการมีส่วนร่วมของสาธารณะและผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ยังพบข้อจำกัดในด้านการรับรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับประโยชน์และความท้าทายของพลังงานชีวมวล การมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียยังอยู่ในวงจำกัด และขาดความโปร่งใสในการดำเนินงาน จึงจำเป็นต้องเร่งสร้างความตระหนักแก่สาธารณชน พัฒนารอบการทำงานแบบมีส่วนร่วม และส่งเสริมความโปร่งใสในการดำเนินโครงการชีวมวลอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้การพัฒนาพลังงานชีวมวลเป็นไปอย่างยั่งยืนและได้รับการยอมรับจากทุกภาคส่วน

¹¹⁵ Bangkok post - <https://www.bangkokpost.com/business/general/2827819/federation-of-thai-industries-disappointed-by-new-power-plan>

¹¹⁶ Krungthai - https://krungthai.com/Download/economyresources/EconomyResourcesDownload_496PDP.pdf

¹¹⁷ Krungthai - https://krungthai.com/Download/economyresources/EconomyResourcesDownload_643Research_Note_05_01_64.pdf

2. การผลิตพลังงานไฟฟ้า (Electrification)

2.1 เทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบโมดูลาร์ขนาดเล็ก (Nuclear Small Nuclear Modular Reactors)

การพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบโมดูลาร์ขนาดเล็ก (Nuclear SMRs) ในประเทศไทยยังคงมีอุปสรรคหลายประการ ทั้งด้านโครงสร้างพื้นฐานและเทคโนโลยีเฉพาะทางที่ยังขาดแคลนอย่างมาก เนื่องจากประเทศไทยขาดแคลนบุคลากรที่มีทักษะเฉพาะด้านนิวเคลียร์ และเทคโนโลยีที่จำเป็นในการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กนี้ยังไม่เพียงพอ เนื่องจากประเทศไทยไม่เคยมีโรงงานไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ ถึงแม้ว่าประเทศไทยมีการบรรจุโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าตั้งแต่ พ.ศ. 2550 – 2564 (PDP2007) แต่มีการทบทวนการจัดตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ใหม่อีกครั้งหลังอุบัติเหตุโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ฟูกูชิมะในญี่ปุ่น เมื่อวันที่ 11 มี.ค. 2554 เพื่อให้การผลิตไฟฟ้าโดยพลังงานนิวเคลียร์เกิดขึ้นจริง นโยบายและกฎหมายจากภาครัฐจึงมีส่วนสำคัญอย่างมาก แม้ว่าประเทศไทยจะยังไม่มีกรอบกฎหมายที่ชัดเจนในการกำกับดูแลการใช้เทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบโมดูลาร์ขนาดเล็ก (Nuclear SMRs) อย่างเต็มรูปแบบ แต่เทคโนโลยี Nuclear SMRs ได้ถูกบรรจุอยู่ในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (PDP 2024) โดยยังไม่ระบุจำนวนโรงและกำลังการผลิต ซึ่งสะท้อนถึงการมองเห็นศักยภาพของพลังงานนิวเคลียร์ขนาดเล็กในการเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานในอนาคตที่จะบรรลุเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าพลังงานสะอาดเป็นสัดส่วน 51% ในปี ค.ศ. 2037 (พ.ศ. 2580) อย่างไรก็ตามการใช้ Nuclear SMRs ตามแผนยังมีสัดส่วนที่น้อยเพียง 1% ปัจจุบันแผน PDP2024 เพียงแต่กำหนดทิศทางเบื้องต้นในการสำรวจความเป็นไปได้ในการใช้ Nuclear SMRs ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนานโยบายและกฎหมายที่เฉพาะเจาะจงเพื่อสนับสนุนการนำเทคโนโลยีนี้มาใช้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ ซึ่งส่งผลอย่างมากด้านการสร้างความเชื่อมั่นเรื่องความปลอดภัยของเทคโนโลยี Nuclear SMRs ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากปัจจุบัน ประชาชนยังมีความกังวลเกี่ยวกับความปลอดภัยของเทคโนโลยีนิวเคลียร์ โดยเฉพาะผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในกรณีเกิดอุบัติเหตุ เพื่อให้ประชาชนเข้าใจถึงมาตรการด้านความปลอดภัยที่มีอยู่ การสื่อสารข้อมูลอย่างโปร่งใสเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งควรให้ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยี Nuclear SMRs ว่ามีระบบป้องกันหลายชั้นที่สามารถจำกัดผลกระทบจากการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีและลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุอย่างมากเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่แบบในอดีต

2.2 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy)

การพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยยังมีช่องว่างที่ต้องปรับปรุง โดยเฉพาะด้านเทคโนโลยีและโครงสร้างพื้นฐาน แม้จะมีการพัฒนาแล้ว แต่เทคโนโลยีที่ใช้ยังไม่ทันสมัยเท่ามาตรฐานสากล เช่น แผงโซลาร์เซลล์และระบบกักเก็บพลังงาน สำหรับประเทศไทย ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่ถูกกว่าการผลิตจากก๊าซธรรมชาติแล้ว ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพในการลดต้นทุนค่าไฟในระยะยาว ภาครัฐจึงควรเร่งส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานนี้อย่างเป็นระบบ เพื่อความยั่งยืนและลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล อย่างไรก็ตาม แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า (PDP2024) กลับมุ่งเน้นการเพิ่มโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติอีก 8 แห่ง และโรงไฟฟ้าน้ำขนาดใหญ่ 3 แห่ง ซึ่งเกิดจากการคาดการณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูงเกินจริง ต้นทุนจากการสร้างโรงไฟฟ้าเหล่านี้จึงกลายเป็นภาระต้นทุนการผลิต ส่งผลโดยตรงให้ค่าไฟฟ้าแพงขึ้น โดยแทนที่จะหันมาลงทุนในพลังงานสะอาดที่มีต้นทุนการผลิตต่ำลงอย่างต่อเนื่อง เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่ ที่ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ต้นทุนของพลังงานแสงอาทิตย์ลดลงถึง 87% และ

แบตเตอรี่ลดลงถึง 85% ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพและความคุ้มค่าในระยะยาว การไม่ให้ความสำคัญกับเทคโนโลยีนี้ถือเป็นการประเมินศักยภาพของ Energy Technology ต่ำเกินไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในอนาคต ในส่วนของนโยบายและกฎหมาย แม้ว่าพลังงานแสงอาทิตย์จะถูกรวมอยู่ในแผน PDP2024 แต่กลับขาดการสนับสนุนโซลาร์ ให้ประชาชนสามารถมีส่วนร่วมในการผลิตพลังงานสะอาด เช่น การติดตั้งโซลาร์รูฟท็อปในภาคครัวเรือน หรือการเข้าร่วมในโครงการพลังงานหมุนเวียนในระบบ Smart Grid ซึ่งเป็นอีกส่วนที่มีความท้าทายในการพัฒนาระบบให้เท่าทันสำหรับการรองรับการเปลี่ยนการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยจากก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพในระบบ Smart Grid ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งในการลดต้นทุนค่าไฟฟ้าและเสริมสร้างความยั่งยืนในระยะยาวของประเทศไทย

3. ไฮโดรเจน (Hydrogen)

การนำเทคโนโลยีไฮโดรเจนมาใช้ในอุตสาหกรรมกระบวนการมีความท้าทายด้านต้นทุนและโครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีการผลิต การเก็บและการขนส่งไฮโดรเจน เนื่องจากปัจจุบัน ไฮโดรเจนในอุตสาหกรรมกระบวนการส่วนใหญ่ใช้งานในบางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี เป็นต้น การเริ่มใช้งานไฮโดรเจนในทางอื่นๆ โดยอุตสาหกรรมกระบวนการเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมีความยากลำบากจากโครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีไฮโดรเจน เช่น การขนส่งไฮโดรเจน การกักเก็บไฮโดรเจน และเทคโนโลยีที่ใช้ไฮโดรเจนโดยตรง อีกทั้งปัจจุบันการผลิตไฮโดรเจนใช้ในอุตสาหกรรมกระบวนการในประเทศยังพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไฮโดรเจน ดังนั้นการนำเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนที่มีการปล่อยคาร์บอนต่ำมาใช้ในอุตสาหกรรมมีข้อจำกัดคือ ต้นทุนของเทคโนโลยี เช่น อิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) นั้นยังมีราคาสูงเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการผลิตแบบดั้งเดิม เช่น Steam Methane Reforming ถึงแม้โครงการ CCUS ได้มีการเริ่มศึกษาและพัฒนาซึ่งนำโดยภาคเอกชน แต่ก็ยังไม่พร้อมสำหรับนำมาใช้กับเทคโนโลยีการผลิตแบบดั้งเดิม การนำไปใช้ในกระบวนการผลิตเดิมเองก็มีความยากลำบากเนื่องจากการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลักของภาคอุตสาหกรรม การจะทำให้เทคโนโลยีไฮโดรเจนพัฒนาและใช้งานอย่างแพร่หลายต้องได้รับการสนับสนุนจากทางภาครัฐ เช่น การวางนโยบายที่ชัดเจนสำหรับเทคโนโลยีไฮโดรเจนเพื่อให้ภาคเอกชนปรับตัวตามนโยบายทางด้านไฮโดรเจนของประเทศ หรืออาจมีการสนับสนุนด้านการลงทุนทางด้านโครงสร้างพื้นฐาน ของเทคโนโลยีไฮโดรเจนสำหรับใช้เป็นกรณีศึกษาสำหรับภาคประชาชนและเอกชน

4. การปรับปรุงกระบวนการ (Process Improvement)

สำหรับเทคโนโลยีการปรับปรุงกระบวนการนั้นพบว่ามีข้อท้าทายสำคัญในหลายด้าน เช่นกัน ได้แก่ การขาดการพัฒนาและบูรณาการเทคโนโลยีดิจิทัล เช่น AI และ Digital Twin อย่างทั่วถึงในกระบวนการทางอุตสาหกรรม ทำให้การนำข้อมูลมาวิเคราะห์และปรับปรุงยังมีข้อจำกัด ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการและการลดการใช้พลังงาน นอกจากนี้ ยังมีปัญหาการขาดแคลนการลงทุนในโครงสร้างพื้นฐาน ด้านเทคโนโลยีใหม่ๆ เช่น IoT และระบบอัตโนมัติที่จำเป็นสำหรับการปรับปรุงกระบวนการในระดับอุตสาหกรรม ทำให้การพัฒนาและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างค่อนข้างล่าช้า อีกทั้งยังพบว่า การบังคับใช้กฎหมายและนโยบาย ในการสนับสนุนเทคโนโลยีขั้นสูง เช่น การใช้เทคโนโลยีเชิงคาดการณ์และเทคโนโลยีตรวจสอบกระบวนการแบบเรียลไทม์ ยังไม่ครอบคลุมและเข้มงวดเพียงพอ ทำให้ผู้ประกอบการขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMEs) ประสบกับความยากลำบากในการเข้าถึงทรัพยากรและโอกาสในการพัฒนา การขาดการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วน

ได้ส่วนเสีย และการสื่อสารระหว่างภาครัฐและภาคเอกชนในด้านการนำเทคโนโลยีใหม่มาใช้ยังไม่เพียงพอ ส่งผลให้การพัฒนาต่อเนื่องของกระบวนการผลิตถูกจำกัด แนวทางการแก้ไขปัญหาล่าช้า ควบคู่กันไปที่การสนับสนุน การลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานทางเทคโนโลยี โดยเฉพาะการลงทุนในระบบ IoT, Digital Twin และ AI ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการจัดการข้อมูลและคาดการณ์การทำงานของกระบวนการแบบเรียลไทม์ พร้อมทั้งสนับสนุน การปรับปรุงกรอบกฎหมาย เพื่อส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในภาคอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนการสร้างความร่วมมือ ระหว่างภาครัฐ ภาคเอกชน และผู้ประกอบการทุกระดับ เพื่อให้เกิดการลงทุนและการพัฒนาที่สอดคล้องกัน จะช่วยให้เทคโนโลยีเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในวงกว้างและมีผลกระทบต่อ การปรับปรุงกระบวนการอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน

5. การดักจับ การใช้ประโยชน์ และการกักเก็บคาร์บอน (Carbon capture, Utilization, and Storage หรือ CCUS)

ความท้าทายและช่องว่างของเทคโนโลยีการดักจับ การใช้ประโยชน์ และการกักเก็บคาร์บอนในประเทศไทยนั้นยังมีอยู่มาก สำหรับช่องว่างของเทคโนโลยีการกักเก็บคาร์บอน (CCS) นั้น เริ่มจากนโยบายและกรอบกฎหมายในปัจจุบันของประเทศไทย ยังขาดกฎหมายและนโยบายเฉพาะสำหรับเทคโนโลยี CCS โดยมุ่งเน้นที่การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกผ่านการใช้พลังงานหมุนเวียนมากกว่า ดังนั้นประเทศไทยจึงจำเป็นต้องมีกฎหมายและนโยบายที่ชัดเจนเกี่ยวกับเทคโนโลยี CCS รวมถึงสิ่งจูงใจทางการเงิน เพื่อส่งเสริมโครงการ CCUS ในประเทศ นอกจากนี้ความพร้อมทางเทคโนโลยีในปัจจุบันของประเทศไทยยังอยู่ในระยะเริ่มต้น มีเพียงโครงการนำร่อง และยังคงขาดความเชี่ยวชาญในการกักเก็บคาร์บอนในระยะยาว ดังนั้นประเทศไทยจึงต้องการการลงทุนขนาดใหญ่ เพื่อขยายเทคโนโลยีและโครงสร้างพื้นฐานสำหรับ CCS อย่างไรก็ตาม ต้นทุนของเทคโนโลยี CCS ยังสูงมากและยังไม่มีกำหนดราคาคาร์บอนหรือสิ่งจูงใจทางการเงินที่ชัดเจน ดังนั้นจึงต้องการการวางแผนทางเศรษฐกิจและสิ่งจูงใจเพื่อลดต้นทุนและส่งเสริมโครงการ CCS นอกจากนี้ การประเมินทางธรณีวิทยาเกี่ยวกับพื้นที่กักเก็บยังไม่ครอบคลุมและชัดเจนและความสามารถในการกักเก็บไม่เพียงพอ จึงต้องการการสำรวจพื้นที่เพิ่มเติม เพื่อระบุพื้นที่ที่เหมาะสมในการกักเก็บคาร์บอน สุดท้ายสาธารณชนยังมีความรู้เกี่ยวกับ CCS น้อย และมีความกังวลเกี่ยวกับความปลอดภัยของการกักเก็บคาร์บอนใต้ดิน จึงจำเป็นต้องให้ความรู้แก่สาธารณชนเพื่อเพิ่มความเข้าใจและยอมรับเกี่ยวกับเทคโนโลยี CCS ให้มากขึ้น

สำหรับช่องว่างของเทคโนโลยีการนำคาร์บอนไปใช้ประโยชน์ (CCU) นั้น จะมีความคล้ายคลึงกับเทคโนโลยี CCS ในหลายด้าน เช่น ด้านนโยบายและกรอบกฎหมาย ที่ในปัจจุบันประเทศไทยยังมีนโยบายที่สนับสนุนเทคโนโลยี CCU น้อย ยังไม่มีมาตรฐานอุตสาหกรรมที่ชัดเจนในการนำเทคโนโลยี CCU มาใช้ในกระบวนการผลิต การกำหนดมาตรฐานและแนวทางปฏิบัติที่เหมาะสม จะช่วยให้อุตสาหกรรมมีความมั่นใจในการนำเทคโนโลยีมาใช้ และลดความเสี่ยงจากการลงทุนในเทคโนโลยีที่ยังไม่มีการยืนยันประสิทธิภาพอย่างเต็มที่ การมีมาตรฐานที่ชัดเจนยังช่วยส่งเสริมความโปร่งใสและสร้างความมั่นใจให้กับผู้บริโภคและนักลงทุน นอกจากนี้ ประเทศไทยมีความพร้อมทางเทคโนโลยีในระดับที่ยังเป็นโครงการวิจัยพัฒนาและขาดการสาธิตการใช้งาน CCU ในระดับเล็กๆ เช่น การผลิตเคมีภัณฑ์ ก็ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย เป็นต้น ดังนั้นประเทศไทยจึงจำเป็นต้องลงทุนในโครงการนำร่องและการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อขยายการใช้ประโยชน์จาก CO₂ อย่างไรก็ตาม การใช้ CO₂ ในการผลิตสินค้า เช่น เชื้อเพลิงหรือวัสดุก่อสร้าง ยังมีผลตอบแทนทางเศรษฐกิจที่น้อยเมื่อเทียบกับต้นทุน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องค้นหาวិธีการใช้ CO₂ ที่ให้มูลค่าทางเศรษฐกิจสูงขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลง CO₂ ไปใช้ประโยชน์ อีกช่องว่างสำหรับเทคโนโลยี CCU คือ

อุตสาหกรรมบางส่วนในประเทศไทย เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เคมีภัณฑ์ และพลังงาน ได้เริ่มมีการสำรวจและทดลองการใช้เทคโนโลยี CCU ในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก แต่อย่างไรก็ตาม การมีส่วนร่วมของภาคอุตสาหกรรมในวงกว้างยังมีน้อย เนื่องจากข้อจำกัดด้านต้นทุน ความพร้อมด้านเทคโนโลยี และการขาดสิ่งจูงใจทางเศรษฐกิจที่ชัดเจน ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จากช่องว่างทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อที่จะบูรณาการเทคโนโลยี CCUS เข้ากับกลยุทธ์ด้านพลังงานและสภาพอากาศของประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีความพยายามอย่างจริงจังในการแก้ไขช่องว่างในด้านเทคโนโลยี นโยบาย การเงิน และการมีส่วนร่วมของสาธารณะ การปิดช่องว่างเหล่านี้จะช่วยให้ประเทศไทยสามารถก้าวขึ้นเป็นผู้นำด้านการปฏิบัติพลังงานที่ยั่งยืนในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

6. เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

การพัฒนาเศรษฐกิจหมุนเวียนและการจัดการขยะในประเทศไทยยังคงเผชิญความท้าทายด้านต้นทุนและโครงสร้างพื้นฐาน สำหรับการนำเทคโนโลยีการรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ในอุตสาหกรรมก็ยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุน ซึ่งมีราคาสูงเมื่อเทียบกับวิธีการจัดการขยะแบบดั้งเดิม เช่น การฝังกลบขยะพลาสติก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นหนึ่งในสาเหตุของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจำพวกมีเทน อย่างไรก็ตามตลาดสำหรับวัสดุรีไซเคิลในประเทศยังมีข้อจำกัดและมีความท้าทายต่อภาคอุตสาหกรรมด้านการสร้างความเชื่อมั่นในคุณภาพและราคาของวัสดุรีไซเคิล ดังนั้นการพัฒนาเศรษฐกิจหมุนเวียนและระบบการจัดการขยะที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องได้รับการสนับสนุนอย่างจริงจังจากภาครัฐ ทั้งในด้านการกำหนดนโยบายที่ชัดเจน การสนับสนุนด้านการลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานและการสร้างความตระหนักรู้ในหมู่ประชาชน การสร้างความร่วมมือระหว่างภาครัฐ เอกชน และประชาชนจึงเป็นกุญแจสำคัญในการพัฒนาระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนที่ยั่งยืน ซึ่งจะช่วยให้ภาคเอกชนสามารถปรับตัวและลงทุนในเทคโนโลยีที่เหมาะสม รวมถึงการส่งเสริมให้ประชาชนมีส่วนร่วมในการลดและจำแนกประเภทขยะและสนับสนุนการรีไซเคิลอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การใช้ผลิตภัณฑ์จากวัสดุรีไซเคิลผ่านมาตรฐานทางนโยบายและการสร้างแรงจูงใจทางเศรษฐกิจจะช่วยขยายตลาดและสร้างความยั่งยืนให้กับอุตสาหกรรมรีไซเคิลในระยะยาวอีกด้วย

ภาคผนวก

ตารางที่ 11 แผนพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

แผนพลังงาน	ประเด็นสาระสำคัญ เทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
<p>แผนพลังงานชาติ (National Energy Plan หรือ NEP) สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน</p>	<p>แผนพลังงานแห่งชาติเป็นแผนใหญ่ที่จะเป็นกรอบภาพรวมการทำงาน และเป้าหมายการดำเนินการจัดการด้านพลังงานตั้งแต่ปี 2566-2580 ที่มีเป้าหมายมุ่งสู่พลังงานสะอาด ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในปี 2580 ซึ่งประกอบด้วย 5 แผนสำคัญได้แก่ แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ (PDP) แผนบริหารจัดการก๊าซธรรมชาติ (Gas Plan) แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP) แผนอนุรักษ์พลังงาน (EEP) และแผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง (Oil Plan)</p>
<p>แผนบูรณาการพลังงานระยะยาว พ.ศ.2558 – 2579 (Thailand Integrated Energy Blueprint หรือ TIEB) สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน</p>	<p>กระทรวงพลังงานจัดทำแผนบูรณาการในภาพรวมระยะยาว คือ การรวบรวมแผนบริหารจัดการพลังงานของประเทศทั้ง 5 แผนเข้าไว้ในแผนเดียว เพื่อให้ครอบคลุมทุกมิติทางด้านพลังงาน โดยให้มีระยะเวลาของแผนสอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (สศช.)</p>
<p>แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558 – 2579 (Power Development Plan หรือ PDP) สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.)</p>	<p>แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ (Power Development Plan : PDP) เป็นแผนแม่บทในการผลิตไฟฟ้าของประเทศ ว่าด้วยการจัดหาพลังงานไฟฟ้าในระยะยาว 15 - 20 ปี เพื่อสร้างความมั่นคงและความเพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้า</p> <ul style="list-style-type: none"> - (ร่าง) แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2567-2580 (PDP2024) โครงสร้างการผลิตไฟฟ้าให้มีสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนอยู่ประมาณ 50% ของกำลังการผลิตไฟทั้งหมด เพื่อเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ ซึ่งประกอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงาน

	<p>ชีวมวล ซึ่งนับรวมไปถึงการใช้เทคโนโลยีการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Capture Utilization and Storage) และพลังงานทางเลือกใหม่อย่างพลังงานไฮโดรเจน ได้ตั้งเป้าสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าไว้ประมาณ 5% และรวมทั้งพลังงานนิวเคลียร์รูปแบบ Small Modular Reactor (SMR)</p>
<p>แผนอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2561 – 2580 (Energy Efficiency Plan หรือ EEP 2018) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.)</p>	<p>เป้าหมายการลดพลังงานซึ่งคิดเป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ได้ 106 MtCO₂ ในปี พ.ศ. 2580 โดยมีสัดส่วนการลดการใช้พลังงานจากภาคอุตสาหกรรมร้อยละ 35</p>
<p>แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (Alternative Energy Development Plan หรือ AEDP 2015)</p>	<p>มีเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน ที่สามารถนำมาพัฒนาได้ทั้งในรูปของพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ คิดเป็นร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในปี พ.ศ. 2579</p>
<p>แผนบริหารจัดการก๊าซธรรมชาติ พ.ศ. 2561 – 2580 (Gas Plan 2018)</p>	<p>มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อจัดหา ก๊าซธรรมชาติให้เพียงพอกับความต้องการใช้ของประเทศ ในราคาที่เป็นธรรม</p> <ul style="list-style-type: none"> - (ร่าง) แผนบริหารจัดการก๊าซธรรมชาติ พ.ศ. 2567-2580 (Gas Plan 2024) ประมาณการความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติในระยะยาว ภาพรวมความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติลดลงในปี 2580 จากการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนและไฮโดรเจน การใช้ในโรงแยกก๊าซธรรมชาติที่ลดลงตามปริมาณก๊าซธรรมชาติในอ่าวไทย
<p>แผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง พ.ศ. 2561 – 2580 (Oil Plan:2018) กรมธุรกิจพลังงาน</p>	<p>มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อจัดหาน้ำมันเชื้อเพลิงให้เพียงพอสำหรับรองรับความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ</p> <ul style="list-style-type: none"> - (ร่าง) แผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง พ.ศ. 2567-2580 (Oil Plan หรือ 2018) มีการส่งเสริมการใช้และการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพและเชื้อเพลิงสะอาดที่มีวัตถุดิบในประเทศ ส่งเสริมธุรกิจปิโตรเคมีและพลาสติกชีวภาพ เชื้อเพลิงอากาศยานยั่งยืน เช่น SAF และน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพ