



สมุดปกขาว

# กลยุทธ์เชิงรุกในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มาใช้ประโยชน์เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน





สมุดปกขาว

# กลยุทธ์เชิงรุกในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มาใช้ประโยชน์เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน

มูลนิธิสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์  
และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (บวท.)

มิถุนายน 2564

## สารประธานคณะกรรมการบริหาร บัณฑิตยสภาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ภาวะโลกร้อน (Global warming) เป็นปัญหาสำคัญที่ได้สร้างผลกระทบต่อโลกในวงกว้าง รวมถึงประเทศไทย สาเหตุหลักเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศโลกเนื่องจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ถือเป็นปัญหาระดับโลกที่ต้องการความร่วมมือในการแก้ไขในหลากหลายมิติ บัณฑิตยสภาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (บวท.) ในฐานะเป็นองค์กรที่ไม่ใช่ของรัฐ (Non-government agency) ประกอบด้วย การรวมตัวกันของนักวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีผลงานต่อเนื่องในวิชาชีพของตนมาเป็นเวลานานและมีความสนใจในการนำประสบการณ์ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาใช้ในการพัฒนาประเทศ เล็งเห็นความสำคัญในการระดมความรู้และความเชี่ยวชาญจากสมาชิกในการจัดทำสมุดปกขาว “กลยุทธ์เชิงรุกในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน” ฉบับนี้ขึ้น เพื่อเป็นการสรุปภาพรวมเกี่ยวกับสถานการณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มาตรการ เทคโนโลยี และแนวทางการพัฒนาการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้เริ่มดำเนินการไปแล้วในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย นอกจากนี้ สมุดปกขาวฉบับนี้ยังนำเสนอนโยบายและมาตรการสำหรับภาครัฐในการส่งเสริมและผลักดันเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืนสำหรับประเทศไทย

ผมเชื่อมั่นว่าสมุดปกขาวฉบับนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อประเทศไทยที่นำมาสู่ความตระหนักรู้ของสังคมไทยในวงกว้างเกี่ยวกับปัญหาภาวะโลกร้อน รวมทั้งเห็นแนวทางในการมีส่วนร่วมในการแก้ปัญหา และภาครัฐสามารถนำข้อเสนอแนะในการกำหนดนโยบาย มาตรการ และแนวทางดำเนินการ เพื่อขับเคลื่อนการดำเนินงานทั้งการส่งเสริมและผลักดันเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เกิดขึ้นในประเทศไทยเพื่อเกิดผลอย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งจะส่งผลดีต่อการพัฒนาประเทศไทยอย่างยั่งยืนต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.ศักรินทร์ ภูมิรัตน

ประธานคณะกรรมการบริหาร

บัณฑิตยสภาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

# คำนำ

ปัจจุบันโลกกำลังเผชิญผลกระทบของสภาวะโลกร้อนจากปริมาณก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมาก นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศทั่วโลก รวมทั้งในประเทศไทย จากการตั้งกล่าว IPCC (International Panel on Climate Change) ได้คาดการณ์ว่าอีก 80 ปี โลกจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 1.9 องศาเซลเซียส และจะส่งผลให้ระดับน้ำทะเลสูงขึ้นจนถึงขั้นเป็นอันตรายต่อการดำรงชีพในพื้นที่ชายฝั่ง เช่น กรุงเทพมหานคร และจังหวัดที่อยู่ติดทะเลทั้งด้านอ่าวไทยและฝั่งอันดามัน ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ IPCC ระบุให้เป็นภูมิภาคที่มีความเปราะบางสูงต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งรวมถึงประเทศไทยด้วยเช่นกันที่ต้องเผชิญกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระยะยาว ดังนั้นเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการแก้ปัญหาตั้งกล่าว สมุดปกขาว “กลยุทธ์เชิงรุกในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน” จึงได้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อเป็นการสรุปภาพรวมของสถานการณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มาตรการเทคโนโลยี และแนวทางการพัฒนาการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน เพื่อเป็นการพึ่งพาตนเองและให้ประเทศไทยหลุดพ้นจากกับดักรายได้ปานกลางในอนาคต

สมุดปกขาว “กลยุทธ์เชิงรุกในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน” ประกอบด้วยเนื้อหาหลัก 4 ส่วน คือ (1) สถานการณ์ก๊าซเรือนกระจกบนฐานของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโลกและภูมิภาคอาเซียน รวมทั้งการมีส่วนร่วมในการจัดการปัญหาก๊าซเรือนกระจกของประเทศต่างๆ ทั่วโลก ซึ่งนำไปสู่ *ความตกลงปารีส (Paris Agreement)* (2) แนวทางการลดก๊าซเรือนกระจกที่ประเทศต่าง ๆ ได้มีการนำมาใช้แล้วและที่อยู่ระหว่างการวิจัยพัฒนา (3) การใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน โดยการเปลี่ยนเป็นสารเคมีมูลค่าเพิ่มและพลังงานทดแทน และ (4) นโยบายและมาตรการสำหรับภาครัฐ ในการส่งเสริมและผลักดันเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ มูลนิธิบัณฑิตยสภาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (บวท.) หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษาการวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.) และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่มีส่วนร่วมในการสนับสนุนการจัดทำสมุดปกขาว “กลยุทธ์เชิงรุกในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน” ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า สมุดปกขาวฉบับนี้จะมีส่วนร่วมในการนำพาประเทศไทยให้มีการพัฒนาการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน ท้ายสุดนี้หากมีข้อผิดพลาดประการใด ทางคณะผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ  
มิถุนายน 2564

# สารบัญ

	หน้า
คำนำ	
<b>บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ</b>	1
1.1 สถานการณ์ก๊าซเรือนกระจกบนฐานของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์: CO <sub>2</sub> Pain point	1
1.2 แหล่งที่มาของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	4
1.3 ความตกลงปารีส (Paris Agreement)	5
1.4 แผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2564–2573	7
<b>บทที่ 2 แนวทางการลดก๊าซเรือนกระจก</b>	10
2.1 การดักจับ การกักเก็บ และการใช้ประโยชน์จากคาร์บอนไดออกไซด์	10
2.2 การใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความท้าทายในการสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจ	23
<b>บทที่ 3 กลยุทธ์เชิงรุกในการนำก๊าซ CO<sub>2</sub> มาใช้ประโยชน์—Thailand’s Situation</b>	30
3.1 การผลิตเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	30
3.2 การผลิตโอเลฟินส์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	40
3.3 การผลิตกรดฟอร์มิกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	52
3.4 การผลิตปุ๋ยยูเรียจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย	58
3.5 การผลิตโพลีเอทิลีนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	65
3.6 การผลิตคาร์บอนเนตจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	75
3.7 เทคโนโลยีการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นวัสดุฐานคาร์บอน	81
3.8 การผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน	91
3.9 การผลิตไฮโดรเจนสีเขียวจากการอิเล็กโทรไลซิสของไอน้ำผ่านเซลล์อิเล็กโทรไลซิส	99
3.10 การพัฒนาการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากจุลสาหร่าย	110
3.11 เทคโนโลยีแห่งอนาคตสำหรับการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารเคมีและวัสดุที่มีประโยชน์	120
<b>บทที่ 4 นโยบายและมาตรการสำหรับภาครัฐในการส่งเสริมและผลักดันเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน</b>	126
4.1 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย	127
4.2 มาตรการสำหรับภาครัฐในการส่งเสริมและผลักดันเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน	128
4.3 แนวทางดำเนินการและผลที่คาดว่าจะได้รับ	129
<b>บทที่ 5 บทสรุปเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนเพื่อสร้างความสามารถในการแข่งขันทางเศรษฐกิจและความมั่นคงด้านพลังงาน</b>	133

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สถานะทั่วโลกของการดักจับและการกักเก็บคาร์บอน	12
2.2	สถานะทั่วโลกของการดักจับและการใช้คาร์บอนของอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน	14
2.3	การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการปลูกป่า	18
2.4	เป้าหมายและมาตรการต่าง ๆ ของประเทศที่กำหนดการปล่อยมลพิษสุทธิเป็นศูนย์ที่มีผลผูกพันตามกฎหมาย	20
2.5	ประเทศที่มีเป้าหมายหรืออยู่ระหว่างพิจารณาเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions)	21
2.6	สรุปมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในประเทศต่าง ๆ	22
2.7	ความท้าทายในการสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจและข้อมูลสำคัญในการนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์	25
2.8	อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นสารตั้งต้นของผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง	27
3.1.1	ข้อดีและข้อเสียของการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นเมทานอลด้วยวิธีต่าง ๆ	32
3.1.2	โรงงานผลิต e-methanol ที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน และมีแผนการสร้างในอนาคต	35
3.2.1	สมมติฐานข้อมูลโรงงาน ราคาวัตถุดิบและค่าสาธารณูปโภคที่ใช้ประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม	42
3.4.1	ลักษณะจำเพาะของปุ๋ยยูเรียเม็ดโพลัมและปุ๋ยยูเรียเม็ดสาคุ	59
3.5.1	สมบัติทางกายภาพของวัสดุโพลีเอทิลีนแบบยืดหยุ่นที่เตรียมได้จากโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตโพลีเอทิลีน (CO <sub>2</sub> 10.5% โดยน้ำหนัก) และเตรียมโดยใช้โพลีเอทิลีนโพลีเอทิลีนแบบดั้งเดิมจากแหล่งปิโตรเลียม โดยใช้ขั้นตอนและกระบวนการเดียวกัน	66
3.6.1	$\Delta H^\circ$ และ $\Delta G^\circ$ ในการสังเคราะห์คาร์บอนไดออกไซด์อินทรีย์จากแอลกอฮอล์และคาร์บอนไดออกไซด์	77
3.9.1	ปัญหาและความท้าทายที่พบจากการใช้งานเซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบออกไซด์ของแข็งและแนวทางในการแก้ปัญหาและการพัฒนาต่อยอด	103
3.10.1	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตรึงได้จากการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายของบริษัทในต่างประเทศ	114
3.10.2	ประเด็นการพัฒนาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่าย	115
3.10.3	โรงงานหรือกิจกรรมที่ควรมุ่งเป้าเพื่อพัฒนาการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่าย	117

# สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	คาดการณ์อุณหภูมิของโลกที่เพิ่มขึ้นในอนาคต	1
1.2	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุดของประเทศไทย (ปี พ.ศ 2494-2562)	2
1.3	ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีของทั่วโลก	3
1.4	ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีของกลุ่มอาเซียน	3
1.5	แหล่งที่มาของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทย (ข้อมูลปี พ.ศ. 2559)	4
1.6	การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในประเทศไทย	4
1.7	ร่างแผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ปี พ.ศ. 2564–2573	7
2.1	แนวคิดของเทคนิคการดักจับและกักเก็บคาร์บอน	10
2.2	ระบบดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	11
2.3	ดักจับอากาศโดยตรงโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์	15
2.4	ภาพรวมแผนผังของการเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นต่างของมหาสมุทร	16
2.5	แผนผังของการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และการผลิตพลังงานชีวภาพโดย Microalgae	17
2.6	เทคนิควิศวกรรมภูมิสารสนเทศที่เสนอ	18
2.7	การเติบโตของความต้องการคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก (ซ้าย) และการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (ขวา)	23
2.8	การนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ทั้งทางตรงและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและชีวภาพ	24
2.9	ขนาดของตลาดการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก	25
2.10	กระบวนการของเทคโนโลยีของ ANTECY ในการผลิตเมทานอล	26
3.1.1	แนวโน้มตลาดของเมทานอลทั่วโลก	30
3.1.2	ผลการสืบค้นฐานข้อมูล Orbit Insight ด้วยคำสืบค้น Methanol และ CO <sub>2</sub> hydrogenation (ก) จำนวนการยื่นขอจดสิทธิบัตรในช่วงปี พ.ศ. 2539 ถึง 2561 (ข) จำนวนสิทธิบัตรที่ถือครองโดยบริษัท 9 อันดับแรก (ค) จำนวนสิทธิบัตรที่ได้รับการคุ้มครองในประเทศต่าง ๆ	31
3.1.3	สารตั้งต้นและกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนประเภทต่าง ๆ เป็นตัวกำหนดอัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ของกระบวนการผลิตเมทานอล	33
3.1.4	กระบวนการผลิตเมทานอลจากพลังงานทดแทนและ Green H <sub>2</sub> (e-methanol)	34
3.1.5	ความก้าวหน้าในประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์และความหนาแน่นกระแสของกระบวนการ CO <sub>2</sub> RR เพื่อเปลี่ยน CO <sub>2</sub> เป็นเมทานอล เอทานอล และโพรพานอล ที่มีรายงานในวรรณกรรม	36
3.2.1	ตลาดและความต้องการของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ	41
3.2.2	แผนภาพกระบวนการผลิตไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับจากก๊าซทิ้งของโรงไฟฟ้าถ่านหิน และก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตโดยใช้เชื้อเพลิงจากพลังงานหมุนเวียน	42
3.2.3	สัดส่วนต้นทุนการผลิตไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม จากกระบวนการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน โดย FOC = Fixed Operating Costs, VOC = Variable Operating Costs, ACI = Annualized Capital Cost, RR = Replacement and Refill materials (make-up materials), CW = Cooling Water, HPS = High Pressure Steam, Elec. = Electricity	43

## สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.2.4	แผนผังกระบวนการรีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical CO <sub>2</sub> reduction reaction, CO <sub>2</sub> RR)	44
3.2.5	ความก้าวหน้าในประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ของกระบวนการ CO <sub>2</sub> RR เพื่อเปลี่ยน CO <sub>2</sub> เป็น (ก) ผลิตภัณฑ์ C1 และ (ข) ผลิตภัณฑ์ C2 ที่มีรายงานในวรรณกรรม และ (ค) ผู้ถือครองสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ CO <sub>2</sub> RR เพื่อผลิตเอทิลีน	45
3.2.6	ราคาประเมินต้นทุนการผลิตเอทิลีนจากกระบวนการ CO <sub>2</sub> RR (ก) เมื่อใช้เซลล์ไฟฟ้าประเภท Membrane electrode assemble (MEA) ที่ pH เป็นกลาง และเมื่อใช้เซลล์ไฟฟ้าในสภาวะอัลคาไลน์ (ข) การประเมินต้นทุนของระบบปฏิบัติการแบบแทนเต็มที่ผสมผสานเซลล์ไฟฟ้าแบบ Solid oxide และอัลคาไลน์ (พิจารณาจากเซลล์อุดมคติที่มีประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ 90 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน 53 เปอร์เซ็นต์ และ Single-pass conversion 53 เปอร์เซ็นต์) (ค) โดยต้นทุนของเอทิลีนขึ้นกับประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ของทั้งเซลล์ไฟฟ้า Solid oxide และเซลล์อัลคาไลน์ เส้นประสีดาคือราคาต้นทุนของเอทิลีนที่ 1,000 ดอลลาร์ต่อตัน	46
3.2.7	แผนภาพต้นทุนการผลิตไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตามการปรับเปลี่ยนราคาในส่วนต่าง ๆ	47
3.2.8	แผนภาพต้นทุนการผลิตไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ก) เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากแหล่งวัตถุดิบต่าง ๆ และ (ข) เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตจากการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า โดยใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนในภูมิภาคต่าง ๆ	48
3.3.1	สรุปภาพรวมของกรดพอร์มิกในตลาดโลก	53
3.3.2	แผนผังกระบวนการรีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical CO <sub>2</sub> reduction reaction, CO <sub>2</sub> RR) ไปเป็นกรดพอร์มิก โดยพลังงานทดแทน (Renewable energy)	54
3.3.3	การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตกรดพอร์มิก (ก) การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) ของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการผลิตกรดพอร์มิกโดยพิจารณาเซลล์ไฟฟ้าพื้นฐาน (Base case) ที่มีประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ 94% Single-pass conversion 50% และค่าไฟฟ้า \$0.06/kWh (ข) การเปรียบเทียบราคาประเมินต้นทุนการผลิตเอทิลีนจากกระบวนการ CO <sub>2</sub> RR ของเซลล์ไฟฟ้าพื้นฐานและเซลล์ไฟฟ้าอุดมคติที่มีประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ 9% Single-pass conversion 75% และค่าไฟฟ้า \$0.03/kWh โดยพิจารณามิติทางด้านสิ่งแวดล้อม (CO <sub>2</sub> emission cost \$100/tonne)	55
3.4.1	(ก) ร้อยละการใช้ประโยชน์จากยูเรีย (ข) ความต้องการใช้ยูเรียแต่ละทวีป	58
3.4.2	กระบวนการสังเคราะห์ยูเรีย	60
3.4.3	ปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการสังเคราะห์ยูเรีย	62
3.5.1	ตลาดของโพสิโวลในระดับโลกแบ่งตามภูมิภาค	67
3.5.2	หน่วย CCUS ขนาดใหญ่ (World large-scale CCUS facilities)	72



## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.6.1	โครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนนาโนทิวส์แบบซิงเกิ้ล (a) และแบบวง (b)	75
3.6.2	การประยุกต์ใช้งานของ (a) ไดอัลคิลคาร์บอนเนต (b) ไซคลิกคาร์บอนเนต	76
3.6.3	สรุปภาพรวมของโดเมนคาร์บอนเนตในตลาดโลก	77
3.6.4	แผนภาพการผลิตไดเอทิลคาร์บอนเนตจาก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเอทานอลใช้เทคนิคเมมเบรนเพอร์เมปเพอร์เรนซ์ในการแยกน้ำออกจากกระแสผลิตภัณฑ์ขาออก	78
3.7.1	ภาพรวมของธุรกิจการผลิตวัสดุคาร์บอนทั่วโลก และบริษัท Start-up ชั้นนำในการผลิตวัสดุคาร์บอน	81
3.7.2	ภาพรวมของตลาดโลกของท่อคาร์บอน โดยจำแนกเป็นประเภทต่าง ๆ	83
3.7.3	แผนภาพเทคโนโลยี C2CNT (Carbon dioxide into carbon nanotubes) สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตท่อคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis)	87
3.8.1	กระบวนการสำหรับการใช้ประโยชน์ของก๊าซสังเคราะห์	92
3.8.2	แนวโน้มความต้องการก๊าซสังเคราะห์ทั่วโลก	92
3.8.3	ผลการสืบค้นฐานข้อมูล Orbit Insight ด้วยคำสืบค้น syngas (or synthesis gas, carbon monoxide) and electrolysis (หรือ electrolyzer, electrocatalysis) and carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ) (ก) จำนวนการยื่นขอจดสิทธิบัตรในช่วงปี พ.ศ. 2539 ถึง 2561 (ข) จำนวนสิทธิบัตรที่ได้รับการคุ้มครองในประเทศต่าง ๆ (ค) จำนวนสิทธิบัตรที่ถือครองโดยบริษัท 9 อันดับแรก	93
3.8.4	(ก) การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สภาวะค่าไฟฟ้าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน และราคาตลาดต่าง ๆ กัน (ข) การวิเคราะห์ความอ่อนของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	95
3.9.1	การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการต่าง ๆ	100
3.9.2	เซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide electrolysis cell: SOEC)	102
3.10.1	ระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย (a) บ่อน้ำวน (b) บ่อวงกลมกลางแจ้ง (c) แบบท่อยาว (d) แบบทรงกระบอกแนวตั้ง (e) แบบแผ่นแบน (f) ถังพลาสติก (g) แบบท่อยาวที่ขดเป็นรูปกรวยและ (h) แบบ Thin-layer cascade	112
3.10.2	แนวความคิดการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ	114
3.11.1	สถิติข้อมูลทรัพย์สินทางปัญญาเมื่อใช้คำค้น “Artificial Photosynthesis” (ก) จำนวนสิทธิบัตร (ข้อมูลจาก Clarivate Analytics, Derwent Innovation ช่วงเวลาการค้นหาค้นหาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542-2560) (ข) จำนวนสิ่งตีพิมพ์ (ข้อมูลจาก Scopus ช่วงเวลาการค้นหาค้นหาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2503-2560) ประเทศที่มีผลงานตีพิมพ์สูงที่สุด (ข้อมูลจาก Scopus ช่วงเวลาการค้นหาค้นหาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2503-2560) (ง) แผนที่ความเข้มข้นของงานวิจัยด้าน AP ตามพื้นที่ต่าง ๆ ของโลก (ข้อมูลจาก Scopus ช่วงเวลาการค้นหาค้นหาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2562)	121

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

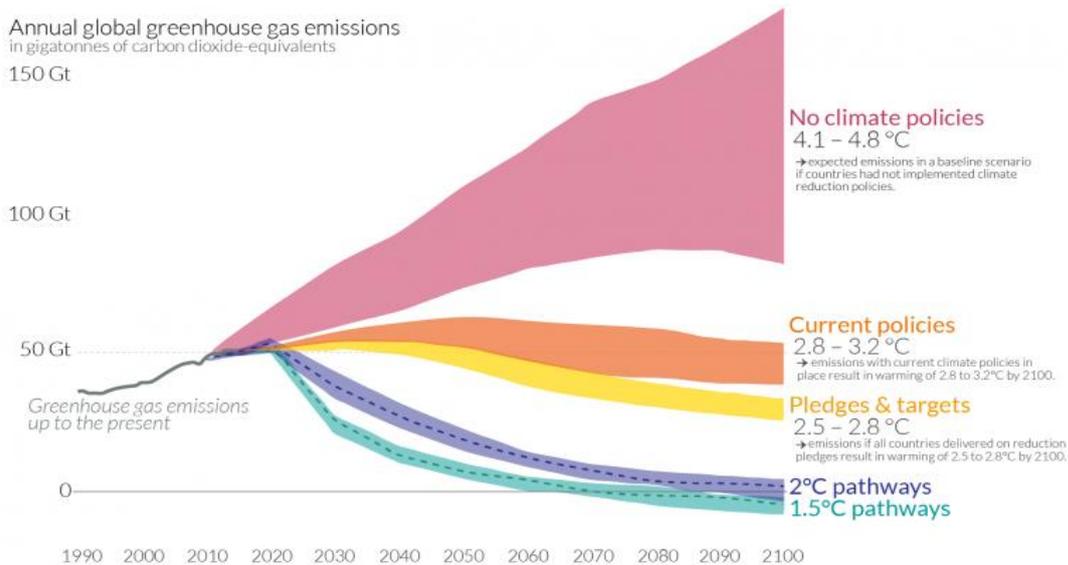
รูปที่		หน้า
3.11.2	แผนภาพเปรียบเทียบกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นใน NP และ AP	122
3.11.3	ก) สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ข) ความกว้างและตำแหน่งของแถบนำและแถบวาเลนซ์ของตัวอย่างสารกึ่งตัวนำต่าง ๆ ที่มีสมบัติเป็นตัวกระตุ้นเชิงแสง	123
3.11.4	การทำงานของระบบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สารกึ่งตัวนำมากกว่าหนึ่งชนิด ( $\text{TiO}_2+\text{WO}_3$ )	123
3.11.5	ก) ขั้นตอนการแบ่งตัว-เติบโตและการแทรก CdS nanoparticles ลงไปใน <i>Moorella thermoacetica</i> เพื่อนำไปใช้ในปฏิกิริยา AP ข) กลไกการทำงานของระบบ CdS nanoparticles- <i>Moorella thermoacetica</i> ค-ง) ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา AP ของตัวเร่งปฏิกิริยา CdS nanoparticles- <i>Moorella thermoacetica</i>	124
4.1	การสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561–2580	126
4.2	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศโลก	129
4.3	กลไกและมาตรการสำหรับภาครัฐในการส่งเสริมและผลักดันเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน	130

# 1 ที่มาและความสำคัญ



## 1.1 สถานการณ์ก๊าซเรือนกระจกบนฐานของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์: CO<sub>2</sub> Pain point

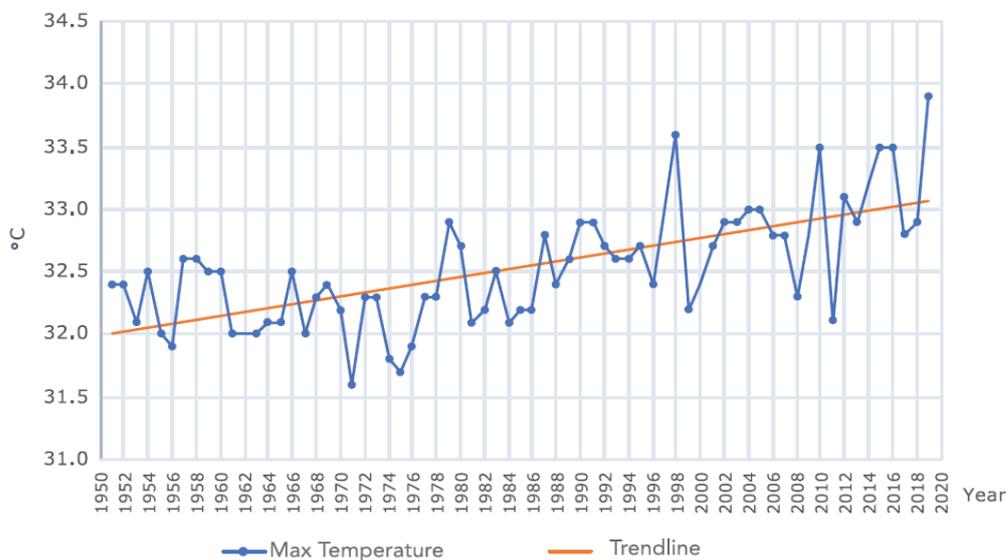
เป็นที่ทราบกันดีว่าโลกกำลังเผชิญผลกระทบของภาวะโลกร้อน (Global warming effect) จากปริมาณก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases, GHGs) ที่ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมาก นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศทั่วโลก ก๊าซเรือนกระจกประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ประมาณร้อยละ 70 [1] ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในภาคอุตสาหกรรมและการขนส่งเป็นหลัก หลังจากการปฏิวัติอุตสาหกรรมในช่วงปี พ.ศ. 2393 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดดจาก 280 ppm เป็นประมาณ 400 ppm ในปัจจุบัน ด้วยสาเหตุหลักจากปรากฏการณ์เรือนกระจกทำให้ชั้นบรรยากาศโลกกักเก็บความร้อนไว้มากขึ้นจนส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของโลกพบว่าตั้งแต่ทศวรรษ 2393 จนถึงทศวรรษ 2553 อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นประมาณ 0.6–1 องศาเซลเซียส [2] คณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (International Panel on Climate Change, IPCC) ได้คาดการณ์ว่าภายในปี พ.ศ. 2643 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศจะเพิ่มขึ้นถึง 570 ppm [3] ด้วยนโยบายและแนวปฏิบัติในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทั่วโลกใช้อยู่ในปัจจุบัน โลกจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 2.8-3.2 องศาเซลเซียส ในปี พ.ศ. 2643 (รูปที่ 1.1) [4] แต่ถ้าทุกประเทศร่วมมือกันอย่างจริงจังในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิจะสูงขึ้นประมาณ 2.5-2.8 องศาเซลเซียส ในขณะที่ความตกลงปารีส (Paris Agreement) ได้ตั้งเป้าไว้ที่ 2 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นเป้าหมายที่ท้าทายอย่างมาก และต้องการความร่วมมืออย่างแข็งขันจากทุกประเทศ โดยเฉพาะจากจีนและสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 1.1 คาดการณ์อุณหภูมิของโลกที่เพิ่มขึ้นในอนาคต

ที่มา: Ritchie และคณะ (2017) [4]

รูปที่ 1.2 แสดงค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุดในรอบปีของประเทศไทย เก็บข้อมูลในช่วงปี พ.ศ. 2494-2562 จะเห็นว่าช่วงปี พ.ศ. 2555-2562 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดสูงกว่าช่วงปีก่อน ๆ อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในเดือนเมษายน พ.ศ. 2559 ไทยมีอุณหภูมิสูงสุดที่เป็นประวัติการณ์คือ 44.6 องศาเซลเซียส วัดได้ที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน ในช่วงปี พ.ศ. 2554-2562 อุณหภูมิสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.09 องศาเซลเซียสต่อปี ดูจากเส้นแนวโน้มแล้วเห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2494 ถึงปี พ.ศ. 2562 [5]

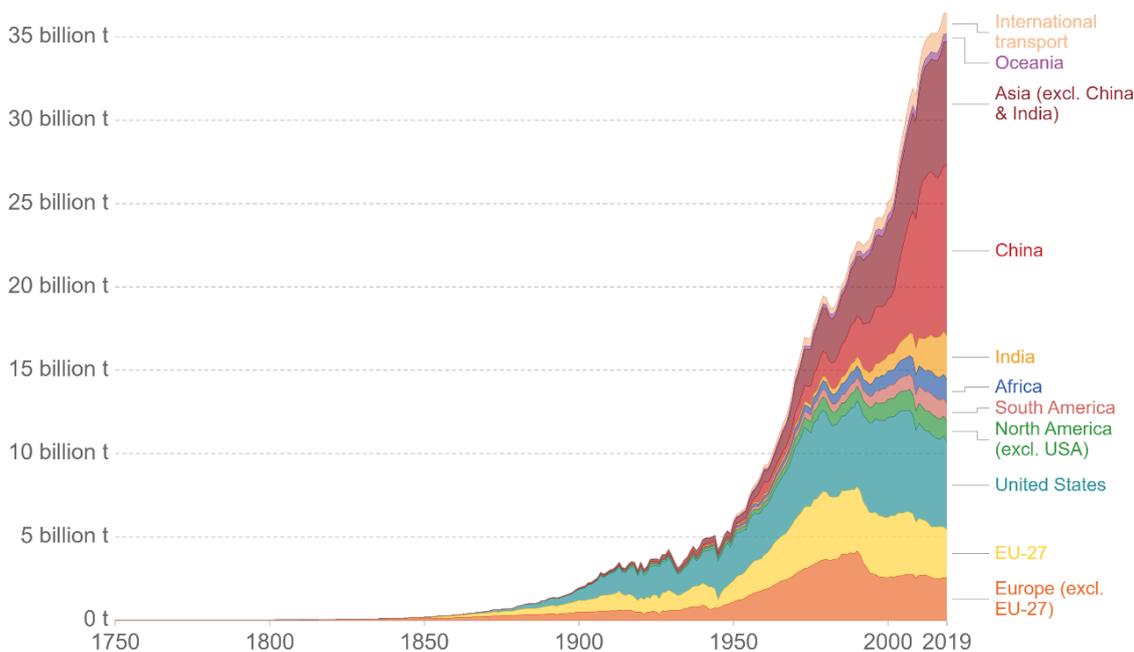


รูปที่ 1.2 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุดของประเทศไทย (ปี พ.ศ. 2494-2562)

ที่มา: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2021) [5]

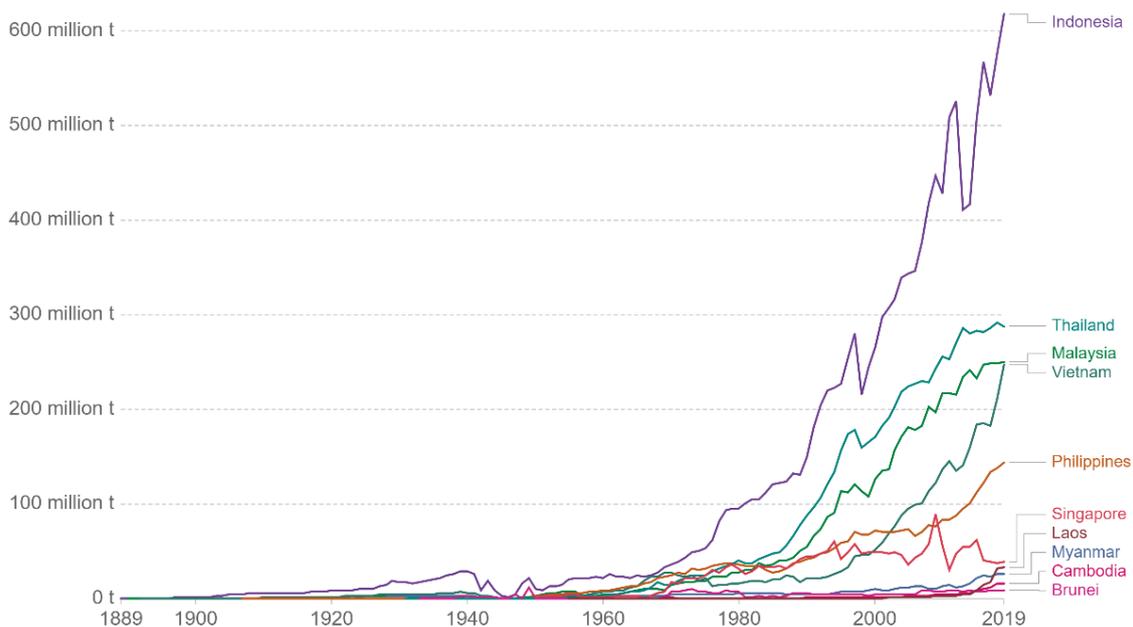
ข้อมูลในปี พ.ศ. 2562 จีนและสหรัฐอเมริกาเป็น 2 ประเทศที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดในโลก โดยจีนเป็นอันดับที่ 1 ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 10.2 พันล้านตันต่อปี รองลงมาคือสหรัฐฯ ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5.3 พันล้านตันต่อปี (คิดเฉพาะจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์) (รูปที่ 1.3) แต่ถ้านับยอดสะสมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2293 จนถึงปี พ.ศ. 2562 สหรัฐฯ เป็นประเทศที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 24.8 ของทั้งโลก สำหรับภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ IPCC ระบุให้เป็นภูมิภาคที่มีความเปราะบางสูงต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สำหรับประเทศไทยได้รับการจัดลำดับจากองค์กร Germanwatch ให้เป็นหนึ่งในสิบประเทศที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระยะยาว ขณะเดียวกันในฐานะที่ไทยเป็นประเทศกำลังพัฒนา ที่ยังคงพึ่งพาการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก และมีการเติบโตของพื้นที่เขตเมืองอย่างต่อเนื่อง จึงมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2543 ประเทศไทยปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ไม่รวมภาคการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและป่าไม้) คิดเป็น 226 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และเพิ่มเป็น 318.66 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าในปี พ.ศ. 2556 ข้อมูลล่าสุดในปี พ.ศ. 2562 ไทยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 288 ล้านตัน จัดเป็นอันดับที่ 2 ในกลุ่มอาเซียนรองจากอินโดนีเซีย (618 ล้านตัน) (รูปที่ 1.4) แต่ถ้าพิจารณาปริมาณต่อหัวประชากร (Per capita) ไทยอยู่ในอันดับที่ 4 รองจากบรูไน มาเลเซีย และสิงคโปร์





รูปที่ 1.3 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีของทั่วโลก

ที่มา: Ritchie และคณะ (2017) [4]

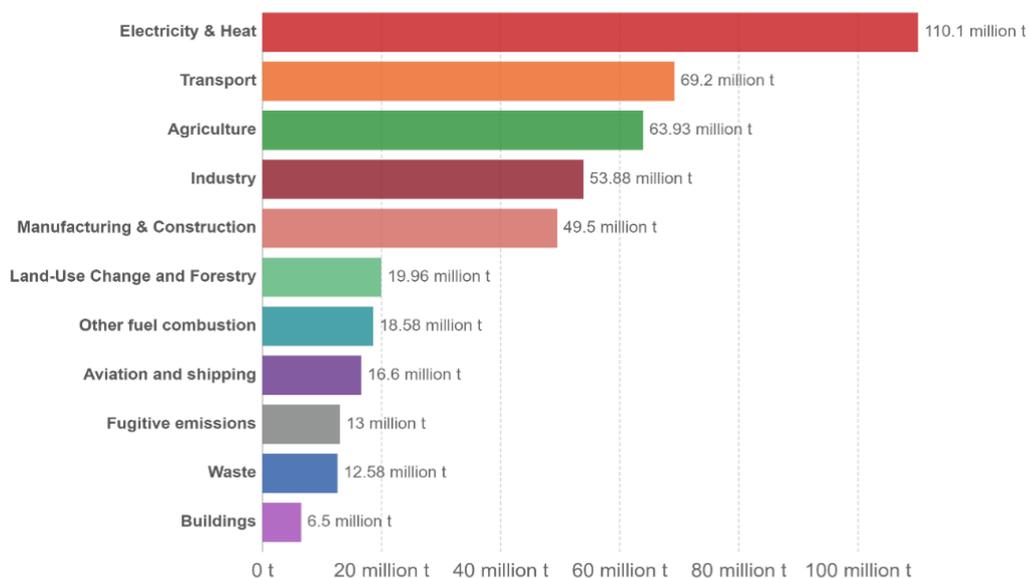


รูปที่ 1.4 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีของกลุ่มอาเซียน

ที่มา: Ritchie และคณะ (2017) [4]

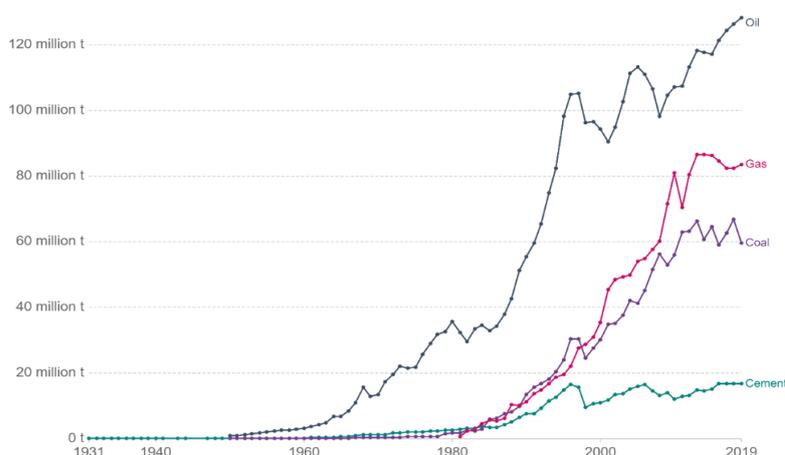
## 1.2 แหล่งที่มาของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ข้อมูลที่เผยแพร่ในเว็บไซต์ ourworldindata.org [6] รายงานว่า ที่มาของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทยมาจาก 5 แหล่งหลัก ได้แก่ การผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อน การคมนาคมและขนส่ง การเกษตร อุตสาหกรรม และการผลิตและการก่อสร้างตามลำดับ (รูปที่ 1.5) ทั้ง 5 แหล่งเป็นต้นมาของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมกันถึงร้อยละ 80 ของทั้งหมด (ข้อมูลปี พ.ศ. 2559)



**รูปที่ 1.5** แหล่งที่มาของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทย (ข้อมูลปี พ.ศ. 2559)  
ที่มา: Ritchie และคณะ (2017) [4]

จะเห็นว่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงานความร้อน เมื่อจำแนกให้ละเอียดมากขึ้นถึงชนิดของเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ พบว่ามีอยู่ 4 ชนิด คือ น้ำมันปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และเชื้อเพลิงที่ใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์เรียงตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 1.6 ในปี พ.ศ. 2562 การเผาไหม้น้ำมันปิโตรเลียมปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 128.29 ล้านตัน ถัดมาคือ ก๊าซธรรมชาติ 83.65 ล้านตัน ถ่านหิน 59.60 ล้านตัน และอุตสาหกรรมซีเมนต์ 16.74 ล้านตัน [4]



**รูปที่ 1.6** การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในประเทศไทย  
ที่มา: Ritchie และคณะ (2017) [4]

### 1.3 ความตกลงปารีส (Paris Agreement)<sup>1</sup>

ความตกลงปารีส (Paris Agreement) เป็นความตกลงตามกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) เพื่อกำหนดมาตรการลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ตั้งแต่พ.ศ. 2563 ความตกลงดังกล่าวเกิดจากการเจรจาในช่วงการประชุมภาคีสมาชิกของ UNFCCC ครั้งที่ 21 (COP 21) ณ กรุงปารีส สาธารณรัฐฝรั่งเศส ได้รับรองความตกลงปารีสเมื่อวันที่ 12 ธันวาคม พ.ศ. 2558 โดยเป็นตราสารกฎหมายที่รับรองภายใต้กรอบอนุสัญญา UNFCCC ฉบับล่าสุดต่อจากพิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) และข้อแก้ไขโดฮา (Doha Amendment) [6,7] เพื่อกำหนดกฎกติกา ระหว่างประเทศที่มีความมุ่งมั่นมากยิ่งขึ้น สำหรับการมีส่วนร่วมของภาคีในการแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยมุ่งเสริมสร้างการตอบสนองต่อภัยคุกคามจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศระดับโลก ในบริบทของการพัฒนาที่ยั่งยืนและความพยายาม ในการจัดความยากจน รวมถึงการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1. ควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกให้ต่ำกว่า 2 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับยุคก่อนอุตสาหกรรมและพยายามจำกัด การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไม่ให้เกิน 1.5 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับยุคก่อนอุตสาหกรรม โดยคำนึงว่าการดำเนินการตามนี้ จะลดความเสี่ยง และผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ

2. เพิ่มขีดความสามารถในการปรับตัวต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการส่งเสริม การสร้างภูมิ ด้านทานและความสามารถในการฟื้นตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการพัฒนาประเทศที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ โดยไม่ กระทบต่อการผลิตอาหาร

3. ทำให้เกิดเงินทุนหมุนเวียนที่มีความสอดคล้องกับแนวทางที่นำไปสู่การพัฒนาที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำและการพัฒนาให้มี ภูมิด้านทานและความสามารถในการฟื้นตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ในด้านการลดก๊าซเรือนกระจก เพื่อที่จะบรรลุเป้าหมายอุณหภูมิระยะยาวที่ได้กำหนดไว้ ภาคีฯ ตั้งเป้าที่จะมุ่งสู่การปล่อยก๊าซ เรือนกระจกของโลกในระดับสูงสุด (Global peaking) โดยเร็วที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ และหลังจากนั้นจะดำเนินการลดก๊าซเรือนกระจกลง อย่างรวดเร็ว ตามวิทยาศาสตร์ที่ดีที่สุดที่มีอยู่ เพื่อให้เกิดสมดุลระหว่างการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยมนุษย์จากแหล่งกำเนิด และการ กำจัดโดยการดูดซับก๊าซเรือนกระจกในช่วงครึ่งหลังของศตวรรษนี้ [7]

องค์ประกอบของความตกลงปารีส คือ การดำเนินงานด้านการลดก๊าซเรือนกระจก (Mitigation) การปรับตัวต่อผลกระทบจาก การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Adaptation) การรับมือกับความสูญเสียและความเสียหาย (Loss and damage) และการยกระดับ การให้การสนับสนุนด้านการเงิน การพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยี และการเสริมสร้างศักยภาพ (Means of Implementation: finance, technology development and transfer, and capacity-building) พร้อมทั้งวางกรอบเพื่อรับรองความโปร่งใสของการ ดำเนินงานและการสนับสนุน (Transparency of action and support) และกำหนดให้มีการทบทวนสถานการณ์และการดำเนินงาน ระดับโลก (Global stocktake) เป็นระยะเพื่อประเมินความก้าวหน้าต่อการบรรลุวัตถุประสงค์และเป้าหมายระยะยาวของความตกลงนี้

<sup>1</sup> คัดลอกและดัดแปลงจากเว็บไซต์ ศูนย์สารสนเทศสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม <https://www.deqp.go.th/new/ความตกลงปารีส-paris-agreement/> เข้าถึงเมื่อวันที่ 18 มีนาคม 2564



### การมีส่วนร่วมของรัฐภาคี

สำหรับการมีส่วนร่วมของแต่ละภาคี เป็นไปตามที่ประเทศกำหนด โดยข้อ 4 ของความตกลงปารีสกำหนดให้แต่ละภาคีต้องจัดทำ แจ้าง และจัดให้มีการมีส่วนร่วมที่ประเทศกำหนด (Nationally Determined Contributions: NDCs) อย่างต่อเนื่อง โดยแจ้างทุก ๆ 5 ปี ซึ่งจะแสดงถึงความก้าวหน้าที่เพิ่มขึ้น และสะท้อนให้เห็นถึงความพยายามที่เป็นไปได้สูงสุด ตามหลักความรับผิดชอบร่วมกันในระดับที่แตกต่างกันโดยคำนึงถึงขีดความสามารถของแต่ละภาคี (Common but differentiated responsibilities and respective capabilities, in the light of different national circumstances)

โดยภาคีประเทศพัฒนาแล้วควรยังคงความเป็นผู้นำ โดยจัดทำเป้าหมายลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้จริงและครอบคลุมทุกภาคเศรษฐกิจ (Economy-wide absolute emission reduction targets) สำหรับภาคีประเทศกำลังพัฒนา ควรยกระดับความพยายามในการลดก๊าซเรือนกระจกและได้รับการส่งเสริมเพื่อมุ่งสู่การจัดทำเป้าหมายการลด หรือจำกัดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ครอบคลุมทุกภาคเศรษฐกิจ (Economy-wide emission reduction or limitation targets) ในอนาคตที่เป็นไปตามสถานการณ์ของแต่ละประเทศที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ ความตกลงปารีสได้รับรองการใช้แนวทางความร่วมมือโดยสมัครใจ ที่มีการใช้ผลการลดก๊าซเรือนกระจกที่ถ่ายโอนระหว่างประเทศ (Internationally transferred mitigation outcome) ในการบรรลุ NDCs โดยภาคีจะต้องดำเนินงานสอดคล้องกับคำแนะนำที่รับรองโดยที่ประชุมรัฐภาคีความตกลงปารีส (The Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement: CMA) และได้จัดตั้งกลไกเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืน ภายใต้อำนาจและคำแนะนำของ CMA โดยแนวทางความร่วมมือ และกลไกนี้ อาจรวมถึงและนำไปสู่การใช้กลไกตลาดภายใต้ข้อตกลงฉบับใหม่นี้ ต่อไป

ประเทศไทยโดยนายกรัฐมนตรีได้ยื่นสัตยาบันสารเข้าร่วมเป็นภาคีความตกลงปารีส เมื่อวันที่ 21 กันยายน พ.ศ. 2559 ระหว่างการประชุมสมัชชาสหประชาชาติ สมัยสามัญ ครั้งที่ 71 ณ นครนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา โดยปัจจุบันมีประเทศที่ยื่นสัตยาบันสารเข้าเป็นภาคีจำนวนทั้งสิ้น 184 ประเทศ จากประเทศภาคีสมาชิก UNFCCC 197 ประเทศ [8] คิดเป็นก๊าซเรือนกระจกมากกว่าร้อยละ 55 ของโลก (ข้อมูล ณ วันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 2561) และได้กำหนดเป้าหมาย NDCs ที่จะดำเนินการภายใต้ความตกลง ซึ่งเป้าหมายของประเทศไทยตามข้อตกลงปารีส คือ ประเทศไทยจะลดก๊าซเรือนกระจกลง ร้อยละ 20–25 ภายในปี พ.ศ. 2573 ในสาขาพลังงาน การคมนาคมขนส่ง กระบวนการทางอุตสาหกรรม และการจัดการของเสีย สำหรับเป้าหมายการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ประกอบด้วย

- ส่งเสริมการบริหารจัดการน้ำแบบผสมผสาน
- สร้างความมั่นคงทางอาหารภายใต้ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง
- ส่งเสริมการเกษตรอย่างยั่งยืนและการผลิตทางการเกษตรที่ดีและเหมาะสม
- สร้างศักยภาพในการจัดการผลกระทบต่อสุขภาพ
- เพิ่มพื้นที่ป่าเป็นร้อยละ 40
- ป้องกันผลกระทบต่อความหลากหลายทางชีวภาพและฟื้นคืนความยั่งยืนทางนิเวศ
- ส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์และการท่องเที่ยวยั่งยืน
- ลดความรุนแรงจากภัยพิบัติและความเปราะบางของประชากร
- เสริมสร้างศักยภาพในการใช้แบบจำลองระบบภูมิอากาศ
- ติดตั้งระบบเตือนภัยล่วงหน้าที่มีประสิทธิภาพ
- ตั้งศูนย์ความรู้ในระดับภูมิภาค







ในการดำเนินการเพื่อเป็นไปตามเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกที่ร้อยละ 20 ภายในปี พ.ศ. 2573 นั้น คณะทำงานจัดทำแผนการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศโดยมีสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมทำหน้าที่เป็นฝ่ายเลขานุการ คณะทำงานฯ ได้ยกร่างแผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ปี พ.ศ. 2564–2573 สาขาพลังงานและขนส่ง สาขากระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ และสาขาการจัดการของเสีย โดยมีการจัดประชุมคณะทำงานฯ ทั้งสิ้น 5 ครั้งและได้ข้อสรุปว่า สาขาพลังงานและขนส่ง สาขากระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ และสาขาการจัดการของเสีย เป็นสาขาที่แผนหลักของหน่วยงานมีความพร้อม และมีศักยภาพในการดำเนินงานที่สามารถสนับสนุนการลดก๊าซเรือนกระจกได้ คิดเป็นศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจก ณ ปี พ.ศ. 2573 รวมทั้งสิ้น 115.6 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกที่ 111 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า หรือร้อยละ 20 จากกรณีปกติ โดยมาตรการตามแผนงานที่จะส่งผลกระทบต่อการลดก๊าซเรือนกระจกประกอบด้วย 15 มาตรการ โดยแบ่งเป็นมาตรการในสาขาพลังงานและขนส่ง 9 มาตรการจากการผลิตไฟฟ้า (ลด 24 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) การใช้พลังงานในครัวเรือน (ลด 4 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) การใช้พลังงานในอาคารเชิงพาณิชย์ (รวมอาคารรัฐ) (ลด 1 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมการผลิต (ลด 43 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) และการใช้พลังงานในการคมนาคมขนส่ง (ลด 41 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) มาตรการในสาขาการจัดการของเสีย ประกอบด้วย 4 มาตรการจากการจัดการขยะและการจัดการน้ำเสีย (ลด 2 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) และมาตรการในสาขากระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ 2 มาตรการจากการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม (ลด 0.6 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า)



## เอกสารอ้างอิง

- [1] C2ES. Global Anthropogenic GHG Emissions by Gas. Available from: [http:// www.c2es.org/facts-figures/international-emissions/gas,2005](http://www.c2es.org/facts-figures/international-emissions/gas,2005) (accessed date: June 09, 2021).
- [2] C. Stewart, M. Hessami, A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration—the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach, *Energy Conversion and Management* 46, 2005, 403–420.
- [3] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151.
- [4] H. Ritchie and M. Roser, 2017, "CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/CO2-and-other-greenhouse-gas-emissions>' [Online Resource] (accessed date: June 09, 2021).
- [5] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2021, “รายงานความก้าวหน้ารายสองปี ฉบับที่ 3 (Third Biennial Update Report)”. <https://www.onep.go.th/book/%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%81%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A7%E0%B8%AB%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%AA/> เข้าถึงเมื่อวันที่ 9 มิถุนายน 2564.
- [6] <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> เข้าถึงเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2564
- [7] ศูนย์สารสนเทศสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. <https://www.deqp.go.th/new/ความตกลงปารีส-paris-agreement/> เข้าถึงเมื่อวันที่ 18 มีนาคม 2564.
- [8] <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification> เข้าถึงเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2564.
- [9] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2019, “แผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ปี พ.ศ. 2564-2573 (Thailand’s Nationally Determined Contribution Roadmap on Mitigation 2021-2030)”. <https://www.onep.go.th/book/%E0%B9%81%E0%B8%9C%E0%B8%99%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%99%E0%B8%B3%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A5%E0%B8%94%E0%B8%81%E0%B9%8A%E0%B8%B2%E0%B8%8B%E0%B9%80%E0%B8%A3/> เข้าถึงเมื่อวันที่ 9 มิถุนายน 2564.

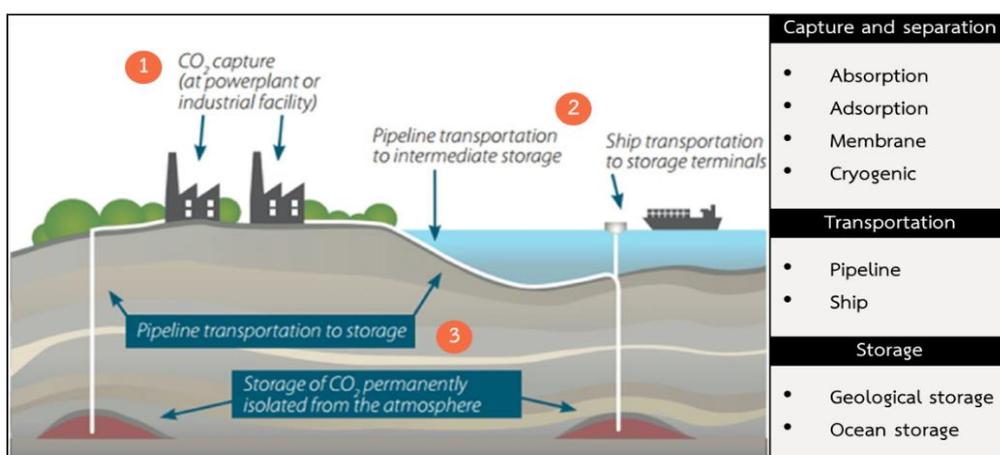
## 2 แนวทางการลดก๊าซเรือนกระจก

### 2.1. การดักจับ การกักเก็บ และการใช้ประโยชน์จากคาร์บอนไดออกไซด์

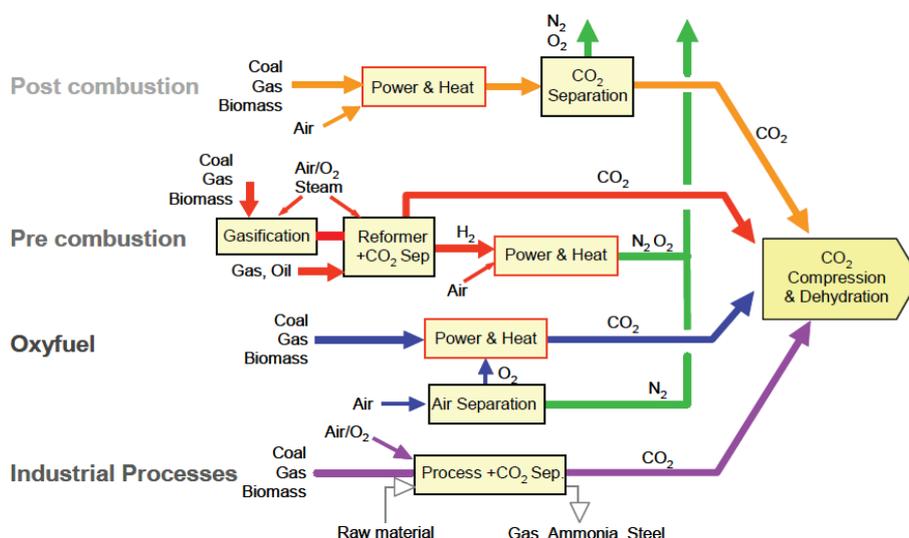
การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีสาเหตุหลักมาจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากระบบทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ โดยในปี พ.ศ. 2558 ข้อตกลงปารีส (Paris Agreement) ได้เปิดตัวโดยมีวัตถุประสงค์หลักในการจำกัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกเป็น 2 องศาเซลเซียส ภายในปี พ.ศ. 2643 [1] เนื่องจากโลกมีพื้นที่ที่จัดเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 700 จิกะตันซึ่งพื้นที่จัดเก็บส่วนใหญ่มากกว่า 300 จิกะตัน ตั้งอยู่ในยุโรป ดังนั้นพื้นที่ที่มีอยู่เพียงพอที่จะสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของข้อตกลงปารีสได้ [2] จากความพยายามที่จะลดภาวะโลกร้อนทำให้หน่วยงานรัฐบาล ผู้ผลิตในภาคอุตสาหกรรม และสถาบันทางวิทยาศาสตร์ได้เสนอแผนและเทคโนโลยีการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากมาย ตัวอย่างแนวทางการดำเนินงาน ได้แก่

#### 2.1.1. Carbon Capture and Storage (CCS)

การดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Storage: CCS) เป็นหนึ่งในวิธีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สำคัญ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่จากภาคพลังงานที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลจะถูกดักจับและกักเก็บไว้ในระยะยาว (ดังรูปที่ 2.1) เทคโนโลยีการดักจับสามารถจำแนกได้เป็นสามประเภทหลัก คือ ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion) หลังการเผาไหม้ (Post-combustion) และการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน (Oxyfuel combustion) (ดังรูปที่ 2.2) ซึ่งข้อได้เปรียบหลักของเทคนิคก่อนการเผาไหม้คือ ผลิตเชื้อเพลิงที่ปราศจากคาร์บอนซึ่งในระหว่างการเผาไหม้จะไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ในขณะที่ข้อได้เปรียบหลักของการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน คือ ไม่มีส่วนประกอบของ NO<sub>x</sub> และ SO<sub>x</sub> ในก๊าซไอเสีย [3] โดยเทคโนโลยีการดักจับหลังการเผาไหม้เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและมีการใช้งานที่หลากหลาย [1] อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีที่ใช้ในปัจจุบันยังคงมีราคาแพงมาก และยังมีข้อเสียบางประการของวิธีการดักจับและการกักเก็บคาร์บอน ได้แก่ ความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บและความเป็นไปได้ที่จะเกิดปัญหาการรั่วไหล [1,2]



รูปที่ 2.1 แนวคิดของเทคนิคการดักจับและกักเก็บคาร์บอน  
ที่มา: Teir และคณะ (2013) [4]



รูปที่ 2.2 ระบบดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ที่มา: Holloway และคณะ (2006) [5]

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้สามารถขนส่งได้หลายวิธี อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงปริมาณการขนส่งที่เกี่ยวข้องกับเทคนิค CCS ทำให้การขนส่งทางท่อและเรือเป็นตัวเลือกที่ใช้งานได้จริงและประหยัดที่สุด [6] การลำเลียงก๊าซผ่านท่อเป็นวิธีที่ประหยัดในระยะทางไม่เกิน 1,000-1,500 กม. ซึ่งค่าใช้จ่ายสำหรับท่อขนส่งบนบกนั้นต่ำกว่าการขนส่งทางอื่น อีกทั้งโรงงานที่ใช้วิธี CCS ส่วนใหญ่ยังคงดำเนินการขนส่งด้วยท่อส่งก๊าซบนบกเป็นหลัก [2]

สำหรับการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเลือกเก็บได้ทั้งในอ่างเก็บน้ำทางธรณีวิทยาและในมหาสมุทร วิธีการจัดเก็บโดยใช้อ่างเก็บน้ำทางธรณีวิทยานั้นดีกว่าการจัดเก็บในมหาสมุทร เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บในมหาสมุทร (5-30 ดอลลาร์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์) นั้นสูงกว่าต้นทุนการจัดเก็บทางธรณีวิทยาอยู่หลายเท่า (0.5-8 ดอลลาร์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์) [2] ซึ่งวิธีการจัดเก็บทางธรณีวิทยามีอยู่หลายวิธี ได้แก่ Enhanced oil recovery (EOR) และ Coal-bed methane recovery (ECBM) เป็นต้น สำหรับวิธี EOR สามารถดำเนินการโดยฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีแรงดันสูงเข้าไปในชั้นน้ำมันเพื่อเพิ่มการผลิตน้ำมันออกมาและในเวลาเดียวกันก็สามารถกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปด้วย ในขณะที่วิธี ECBM ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกฉีดเข้าไปในตะกอนชั้นหินหรือที่อื่น โดยเทคนิค ECBM นี้ยังไม่สามารถใช้งานได้เชิงเศรษฐกิจศาสตร์ ในทางกลับกัน EOR พบว่าถูกใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันมานานกว่า 40 ปีแล้ว [3]

ตารางที่ 2.1 แสดงสถานะของ CCS ในอุตสาหกรรมตามฐานข้อมูลของ Global CCS Institute จนถึงปี พ.ศ. 2561 พบว่า โรงงาน CCS ขนาดใหญ่ 19 แห่งได้เปิดดำเนินการแล้ว โดยสามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เกือบ 40 ล้านตันต่อปี นอกจากนี้ยังมีโครงการ CCS 15 โครงการที่อยู่ระหว่างการพัฒนา และอีก 28 โครงการอยู่ในระดับนำร่องและการสาธิต ซึ่งกระบวนการเหล่านี้สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากถึง 3 ล้านตันต่อปี [3]



## ตารางที่ 2.1 สถานะทั่วโลกของการดักจับและการกักเก็บคาร์บอน

โครงการ	ประเทศ	ขนาด	สถานะ	ปีที่ พ.ศ. ดำเนินการ	กำลังการผลิต CO <sub>2</sub> (ตันต่อปี)	โรงงาน
Illinois Industrial Carbon Capture and Storage	อเมริกา	ใหญ่	ดำเนินการอยู่	2560	1,000,000	การผลิตเอทานอล
Norway Full Chain CCS	นอร์เวย์	ใหญ่	การพัฒนาขั้นสูง	2566-2567	800,000	การผลิตปูนซีเมนต์
Occidental/White Energy	อเมริกา	การสาธิต	ดำเนินการอยู่	2564	600,000-700,000	การผลิตเอทานอล
Russel CO <sub>2</sub> injection plant	อเมริกา	การสาธิตและนำร่อง	สมบูรณ์แล้ว	2546-2548	7,700	การผลิตเอทานอล
Arkalon CO <sub>2</sub> Compression Facility	อเมริกา	การสาธิตและนำร่อง	ดำเนินการอยู่	2552	290,000	การผลิตเอทานอล
Bonanza BioEnergy CCUS EOR	อเมริกา	การสาธิตและนำร่อง	ดำเนินการอยู่	2555	100,000	การผลิตเอทานอล
Husky Energy Lashburn and Tangleflags CO <sub>2</sub> Injection in Heavy Oil Reservoirs Project	แคนาดา	การสาธิตและนำร่อง	ดำเนินการอยู่	2555	90,000	การผลิตเอทานอล
Mikawa Post Combustion Capture Demonstration Plant	ญี่ปุ่น	การสาธิต	วางแผนการพัฒนา	2563	180,000	การผลิตพลังงาน
Drax bioenergy carbon capture storage (BECCS) project	อังกฤษ	การนำร่อง	วางแผนการพัฒนา	2561	330	การผลิตพลังงาน
CPER Artenay project	ฝรั่งเศส	การสาธิตและนำร่อง	วางแผนการพัฒนา	-	45,000	การผลิตเอทานอล
Biorecro/EERC project	อเมริกา	การสาธิตและนำร่อง	วางแผนการพัฒนา	-	1,000- 5,000	การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล
OCAP	เนเธอร์แลนด์	การใช้ประโยชน์	ดำเนินการอยู่	2554	400,000	การผลิตเอทานอลและโรงกลั่นน้ำมัน

**ตารางที่ 2.1** สถานะทั่วโลกของการดักจับและการกักเก็บคาร์บอน (ต่อ)

โครงการ	ประเทศ	ขนาด	สถานะ	ปีที่ พ.ศ. ดำเนินการ	กำลังการผลิต CO <sub>2</sub> (ตันต่อปี)	โรงงาน
Lantmännen Agroethanol purification facility	สวีเดน	การใช้ ประโยชน์	ดำเนินการอยู่	2558	200,000	การผลิต เอทานอล
Calgren Renewable Fuels CO <sub>2</sub> recovery plant	อเมริกา	การใช้ ประโยชน์	ดำเนินการอยู่	2558	150,000	การผลิต เอทานอล
Alco BioFuel (ABF) bio- refinery CO <sub>2</sub> recovery plant	เบลเยียม	การใช้ ประโยชน์	ดำเนินการอยู่	2559	100,000	การผลิต เอทานอล
Cargill wheat processing CO <sub>2</sub> purification plant	อังกฤษ	การใช้ ประโยชน์	ดำเนินการอยู่	2559	100,000	การผลิต เอทานอล
Saga City Waste Incineration Plant	ญี่ปุ่น	การใช้ ประโยชน์	ดำเนินการอยู่	2559	3,000	ขยะเป็น พลังงาน
Saint-Felicien Pulp Mill and Greenhouse Carbon Capture Project	แคนาดา	การใช้ ประโยชน์	วางแผนการพัฒนา	2561	11,000	เยื่อและ กระดาษ

ที่มา: Consoli (2019) [7]



### 2.1.2. Carbon Capture and Utilization (CCU)

การดักจับและใช้คาร์บอน (Carbon Capture and Utilization: CCU) ได้รับการเสนอให้เป็นกลยุทธ์การลดคาร์บอนไดออกไซด์ที่สำคัญ เมื่อเทียบกับวิธีการก่อนหน้านี้ CCU จะมุ่งเน้นไปที่การใช้ทรัพยากรจำนวนมากของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จับได้นั้นสามารถใช้ได้โดยตรงและทางอ้อมสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกันโดยการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นสารเคมีและเชื้อเพลิงทดแทนชนิดต่าง ๆ แทนการถ่ายโอนไปยังพื้นที่สำหรับการจัดเก็บในระยะยาว [2] ปัจจุบันมีหลายทางเลือกในการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวอย่างเช่น การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มซึ่งคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 11 ล้านตันต่อปีของการใช้งานส่วนนี้ [3] นอกจากนี้ยังสามารถนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงได้หลากหลาย ผ่านกระบวนการทางเคมี Electrocatalysis หรือ Photocatalysis เป็นต้น การผลิตสารเคมีจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวิธีการใช้ประโยชน์ที่สำคัญซึ่งมีศักยภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดใหญ่ประมาณ 500 ล้านตันต่อปี สารเคมีหลากหลายชนิดที่สามารถผลิตได้ เช่น ยูเรีย กรดฟอร์มิก (Formic acid) กรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) และสารเคมีชนิดอื่น ในบรรดาสารเหล่านี้ ยูเรียจัดเป็นปุ๋ยทางการเกษตรชนิดดีที่มีขนาดตลาดใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับสารเคมีชนิดอื่น โดยให้ผลผลิตสูงสุด 150 ล้านตันต่อปี และอัตราการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 112 ล้านตันต่อปี [2]

### ตารางที่ 2.2 สถานะทั่วโลกของการดักจับและใช้คาร์บอนของอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน

โครงการ	ปี	ประเทศ	โรงงาน	กำลังการผลิต CO <sub>2</sub> (ล้านตันต่อปี)
The CNPC Jilin Oil Field project	2561	จีน	การแปรรูปก๊าซธรรมชาติ	0.6
Petra Nova Carbon Capture	2560	อเมริกา	การผลิตพลังงาน	1.4
Abu Dhabi CCS	2559	สหรัฐอาหรับเอมิเรตส์	การผลิตเหล็กและเหล็กกล้า	0.8
Uthmaniyah CO <sub>2</sub> -EOR demsontration	2558	ซาอุดีอาระเบีย	การแปรรูปก๊าซธรรมชาติ	0.8
Boundary DAM CCS	2557	แคนาดา	การผลิตพลังงาน	1
Petrobas Santos Basin Pre-salt Oil Field CCS	2556	อเมริกา	การแปรรูปก๊าซธรรมชาติ	3
Coffeyville Gasification Plant	2556	อเมริกา	การผลิตปุ๋ย	1
Air Products Steam Methane Reformer	2556	อเมริกา	การผลิตไฮโดรเจน	1
Lost Cabin Gas Plant	2556	อเมริกา	การแปรรูปก๊าซธรรมชาติ	0.9
Century Plant	2553	อเมริกา	การแปรรูปก๊าซธรรมชาติ	8.4
Great Plains Synfuels Plant and Weyburn-Midale	2543	อเมริกา	ก๊าซธรรมชาติสังเคราะห์	3
Shute Creek Gas Processing Plant	2529	อเมริกา	การแปรรูปก๊าซธรรมชาติ	7
Enid Fertiliser	2525	อเมริกา	การผลิตปุ๋ย	0.7
Terrel Natural Gas Processing Plant	2515	อเมริกา	การแปรรูปก๊าซธรรมชาติ	0.4-0.5

ที่มา: Ghiat และ Al-Ansari (2021) [3]



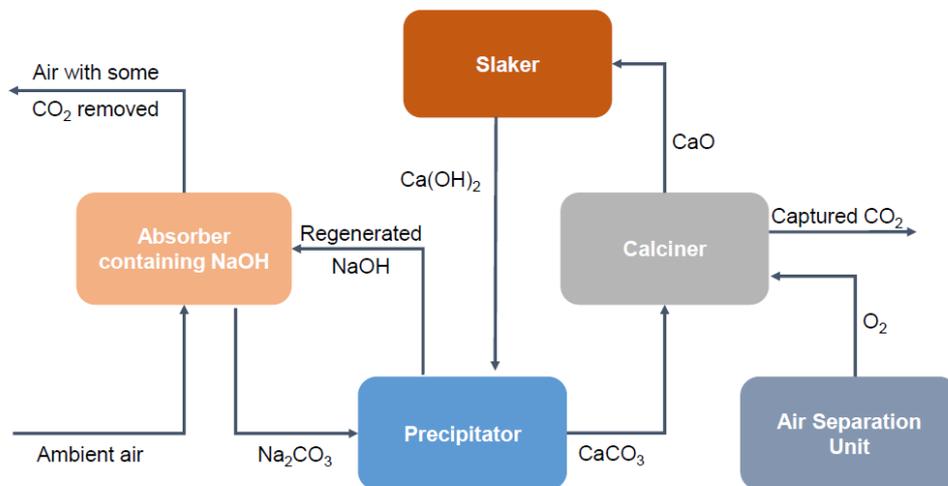
จากตารางที่ 2.2 แสดงสถานะของภาคอุตสาหกรรมโดยใช้วิธี CCU อย่างไรก็ตามจากสถานการณ์ทั่วโลกของโควิด-19 อาจทำให้ความก้าวหน้าในการวิจัย พัฒนา และการนำวิธี CCU ไปปฏิบัติต้องหยุดชะงักเนื่องจากภาวะเศรษฐกิจตกต่ำ แต่ในทางกลับกันอาจเป็นโอกาสพิเศษในการสร้างฐานเศรษฐกิจใหม่ที่ยั่งยืนยิ่งขึ้นผ่านการวางแผนรับมือโควิด-19 เพื่อบรรเทาผลกระทบและการเปลี่ยนแปลงพลังงานสีเขียวเป็นแกนหลัก

### 2.1.3. Direct Air Capture with Carbon Capture and Storage (DACCS)

แม้ว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่ได้มีความเข้มข้นสูงในบรรยากาศ (400 ppmv) แต่แนวคิดพื้นฐานของ DACCS สามารถกำจัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงได้ทุกปี กระบวนการที่แสดงในรูปที่ 2.3 เกี่ยวข้องกับการป้อนอากาศปริมาณมากให้สัมผัสกับตัวดูดซับ จากนั้นจะมีกระบวนการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกปล่อยออกจากตัวดูดซับแล้วกักเก็บในอ่างเก็บน้ำทางธรณีวิทยา ตัวดูดซับที่ใช้เก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น [8]

ปัจจุบันเทคโนโลยี DACCS ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เช่น บริษัท Carbon Engineering ในแคนาดา บริษัท ClimeWorks ในสวีเดน และบริษัท Global Thermostat ในสหรัฐอเมริกาที่ศึกษาการออกแบบพัฒนาที่สามารถหมุนเวียนอากาศได้ในปริมาณมาก นอกจากนี้ยังมีกรออกแบบอีกรูปแบบหนึ่ง นั่นคือ ต้นไม้ประดิษฐ์ (Artificial trees) ของมหาวิทยาลัยแห่งรัฐไอโชนาที่พยายามเสนอวิธีลดต้นทุนโดยรวมด้วยกลยุทธ์หลายประการ เช่น การพัฒนาพื้นผิวขนาดใหญ่ของตัวดูดซับที่ใช้สัมผัสกับอากาศ [8,9] เป็นต้น

อย่างไรก็ตามกระบวนการ DACCS เป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในขั้นตอนการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ยังต้องการพลังงานสำหรับพัดลม บีบ และคอมเพรสเซอร์ เพื่อเพิ่มแรงดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้วิธี DACCS นี้ใช้พลังงานมากกว่าการดักจับคาร์บอนแบบดั้งเดิมถึง 3 เท่าต่อการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หนึ่งตัน [1]



รูปที่ 2.3 ดักจับอากาศโดยตรงโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

ที่มา: Gambhir และ Tavoni (2019) [8]

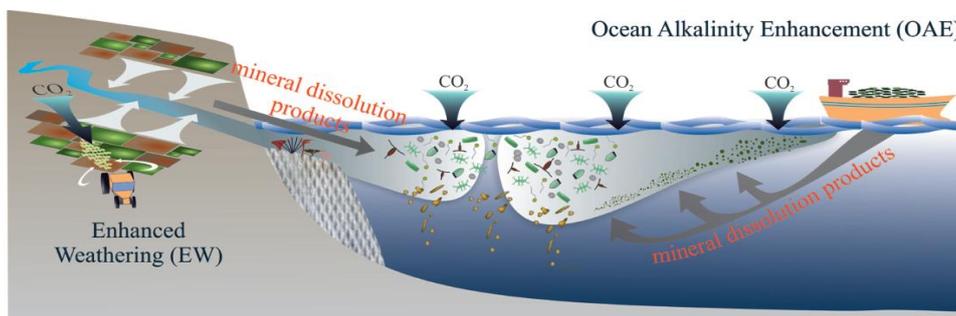
### 2.1.4. Ocean fertilization

การเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับมหาสมุทรเป็นกระบวนการในการเพิ่มสารอาหาร เช่น ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน และเหล็ก ที่พื้นผิวด้านบนของมหาสมุทร เพื่อเพิ่มการดูดซับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยส่งเสริมกิจกรรมทางชีวภาพ [1] แม้ว่าองค์ประกอบทั่วไปและหน้าที่การทำงานของวิธีการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับมหาสมุทรจะเป็นที่ทราบกันดี อย่างไรก็ตามปัจจัยทางธรณีฟิสิกส์และชีวภาพที่มีรายละเอียดและซับซ้อนมาก ส่งผลให้ยังมีข้อมูลไม่เพียงพอที่จะทำให้เข้าใจได้อย่างชัดเจน

การเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับมหาสมุทรโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ด้วยธาตุเหล็ก ได้รับการแนะนำโดยผู้ผลิตว่าเป็นกลยุทธ์ที่คุ้มค่าในการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [10] แม้ว่าจะไม่มีข้อมูลมากนักในเอกสารที่เกี่ยวกับศักยภาพสำหรับการกำจัดคาร์บอนด้วยวิธีนี้ แต่คาดว่า การเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับมหาสมุทรจะสามารถส่งผลให้เกิดการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 3.7 จิกะตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปีภายในปี พ.ศ. 2643 โดยมีกำลังการดูดซึมทั่วโลกอยู่ที่ 70 ถึง 300 จิกะตันคาร์บอนไดออกไซด์ [1] และคาดว่าจะมีราคาต้นทุนในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 1 ถึง 15 ดอลลาร์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์ และอาจสูงถึงประมาณ 22 ถึง 119 ดอลลาร์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์ [11]

### 2.1.5. Ocean alkalinity enhancement

ปัจจุบันมหาสมุทรก็เก็บคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 140,000 จิกะตันคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านสองเส้นทางหลัก คือ ผ่านการดูดซึมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศสู่มหาสมุทรโดยตรง อีกเส้นทางคือ การสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช การเพิ่มความเข้มข้นของมหาสมุทรเป็นวิธีที่ถกเถียงกันอยู่โดยสามารถลดความดันบางส่วนของพื้นผิวมหาสมุทรเพื่อส่งเสริมการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในมหาสมุทร ซึ่งมีผลข้างเคียงที่สำคัญของการลดความเป็นกรดของมหาสมุทร [1]



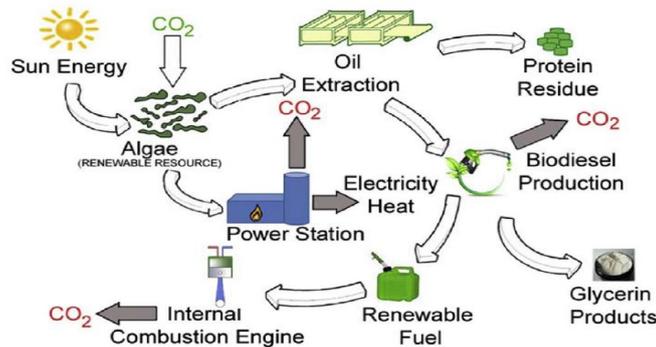
**รูปที่ 2.4** ภาพรวมแผนผังของการเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นต่างของมหาสมุทร  
ที่มา: Bach และคณะ (2019) [12]

การเพิ่มความเข้มข้นของมหาสมุทร (รูปที่ 2.4) โดยการสัมผัสกับแร่ธาตุที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยเพิ่มปฏิกิริยาของสารเคมีโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ แร่ธาตุที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความเข้มข้นของมหาสมุทร เช่น แร่โอลิวีน (Olivine) ที่อุดมด้วยแมกเนเซียม ( $Mg_2SiO_4$ ) แร่ดังกล่าวอาจดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงถึง 1 จิกะตันทุก 1 ถึง 2 จิกะตันของหินที่อุดมด้วยแร่โอลิวีน [12] สำหรับต้นทุนในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นต่างของมหาสมุทรอยู่ที่ประมาณ 10 ถึง 190 ดอลลาร์ต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์ [1] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนพลังงานที่สูงที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการขุด การบด และการจัดจำหน่าย ทำให้คาร์บอนเน็ตที่ได้จากกรรมวิธีทางอุตสาหกรรม เช่น ปูนขาว ( $CaO$ ) อาจเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ [12] แต่อย่างไรก็ตาม กฎหมายและสนธิสัญญาระหว่างประเทศในปัจจุบันไม่อนุญาตให้ทิ้งสารเคมีลงสู่มหาสมุทร ดังนั้นหากต้องการดำเนินการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นต่างของมหาสมุทรจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในแง่ต่าง ๆ สำรวจข้อมูลกฎระเบียบระหว่างประเทศ และอาจรวมถึงการเปลี่ยนแปลงข้อกฎหมายระหว่างประเทศ [9]



### 2.1.6. Bioenergy production from microalgae and seaweed

ในช่วง 3 ทศวรรษที่ผ่านมา มีการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพและไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็ก เนื่องจากสาหร่ายมีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงและให้ผลผลิตชีวมวลสูง [9] การสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายเป็นวิธีการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น่าสนใจ โดยสาหร่ายขนาดเล็กสามารถเปลี่ยนน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นสารประกอบอินทรีย์ และสร้างเชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็กส่วนใหญ่สามารถเติบโตเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าภายใน 24 ชั่วโมง ซึ่งการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กหนึ่งตันเทียบเท่ากับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 1.8 ตัน [2] ทำให้การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายสูงกว่าพืชที่ปลูกบนบกอยู่ประมาณ 50 เท่า และมีการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดระหว่างชั้นบรรยากาศและพื้นดินผ่านการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงสุดประมาณ 440 จิกะตันต่อปีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [3]



รูปที่ 2.5 แผนผังของการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และการผลิตพลังงานชีวภาพโดย Microalgae  
ที่มา: Wang และคณะ (2020) [2]

ในปี พ.ศ. 2557 บริษัท ENN group ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ 600,000 ตันที่ปล่อยออกมาจากการผลิตเมทานอลและคาร์บอนไดออกไซด์ 400,000 ตันที่ปล่อยออกมาจากการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ที่ได้จากบริษัท Xinneng Energy Co., Ltd. เพื่อร่วมผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็กยังคงไม่คุ้มทุนในเชิงเศรษฐศาสตร์ [2] ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะปรับปรุงกระบวนการนี้โดยการนำสาหร่ายไปงานให้หลากหลายเพิ่มขึ้น เช่น การผลิตสาหร่ายสำหรับอาหาร เครื่องสำอาง และยา [9] ที่มีราคาสูงกว่าราคาของเชื้อเพลิงชีวภาพ

### 2.1.7. Afforestation and reforestation

สำหรับวิธีการนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดักจับจากชั้นบรรยากาศระหว่างการเจริญเติบโตของพืช การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อาจใช้เวลา 20 ถึง 100 ปีจนกว่าต้นไม้จะโตเต็มที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของต้นไม้ [1] จากข้อมูลของ O'Driscoll การปลูกป่า การลดการตัดไม้ทำลายป่า และการจัดการป่าอย่างมีประสิทธิภาพจัดเป็นตัวช่วยเพิ่มการจัดเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดี ในขณะที่เดียวกันก็เป็นการจัดหาผลิตภัณฑ์ไม้ที่ยั่งยืนเพื่อทดแทนผลิตภัณฑ์คาร์บอนสูงในห่วงโซ่อุปทานต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการก่อสร้าง [13]

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเก็บไว้ในป่าได้ยาวนานมาก อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้อาจไม่คงทนถาวรเนื่องจากปัญหาภัยพิบัติทางธรรมชาติและผลจากกิจกรรมของมนุษย์ ตารางที่ 2.3 แสดงศักยภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านป่าไม้ในภูมิภาคต่างกัน พบว่าการป้องกันการตัดไม้ทำลายป่า การปลูกป่า และการจัดการที่ดีโดยปล่อยให้พืชมีการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ที่สามารถกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากจากชั้นบรรยากาศได้ [9] ซึ่งศักยภาพในการบรรเทาผลกระทบโดยรวมของการปลูกป่าทั้งหมดอยู่ในช่วง 1.9 ถึง 5.5 จิกะตันของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในปี พ.ศ. 2583 [13]

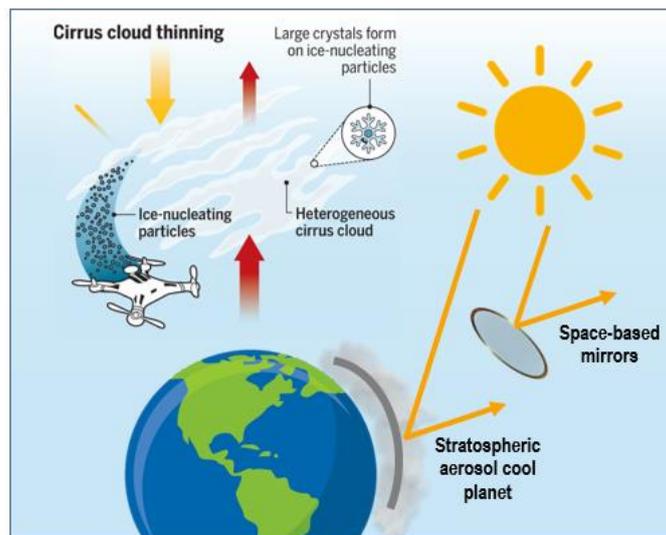
**ตารางที่ 2.3** การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการปลูกป่า

ภูมิภาค	การปลูกป่า (ล้านตัน CO <sub>2</sub> /ปี)	การลดตัดไม้ทำลายป่า (ล้านตัน CO <sub>2</sub> /ปี)	การจัดการป่าไม้ (ล้านตัน CO <sub>2</sub> /ปี)
แอฟริกา	665	1,160	100
อเมริกากลางและอเมริกาใต้	750	1,845	550
สหรัฐอเมริกา	445	10	1,590
เอเชียตะวันออก	605	110	1,200
ภูมิภาคเอเชียที่เหลือ	745	670	960
ตะวันออกกลาง	60	30	45
OECD แปซิฟิก	115	30	110
ยุโรป	115	10	170

ที่มา: O'Driscoll (2018) [13]

**2.1.8. เทคนิคการจัดการกับรังสีจากดวงอาทิตย์**

วิธีการ Geoengineering คือ การลดภาวะโลกร้อนโดยการลดการดูดกลืนรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ส่งเข้ามาถึงพื้นโลก หรือที่เรียกว่า เทคนิคการจัดการกับรังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar Radiation Management: SRM) จุดมุ่งหมายของวิธี SRM คือ การลดแรงในการแผ่รังสี (Radiative forcing) โดยการเพิ่มแรงการสะท้อนของโลก ตัวอย่างของ SRM แสดงดังในรูปที่ 2.6



**รูปที่ 2.6** เทคนิควิศวกรรมภูมิสารสนเทศที่เสนอ

ที่มา: Lohmann และ Gasparini (2017) [14]

**Cirrus cloud thinning**

วิธีการนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มการแผ่รังสีคลื่นยาวที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิวโลกสู่อวกาศ เป็นการรักษาเสถียรภาพหรือลดอุณหภูมิของโลก เมฆเซอร์รัส (Cirrus) ที่ปกติก่อตัวในชั้นโทรโปสเฟียร์มีบทบาทสำคัญในการกำหนดการแผ่รังสีของโลก หลักการพื้นฐานของเทคนิคนี้คือ การฉีดละอองเย็นที่มีประสิทธิภาพสูงเข้าไปในเมฆเซอร์รัส [1] โดยสิ่งนี้ทำให้เกิดการเยือกแข็งของหยดน้ำที่เย็นจัดและกระตุ้นการก่อตัวของอนุภาคน้ำแข็งขนาดใหญ่ ซึ่งจะช่วยลดความหนาของแสง และอายุเฉลี่ยของเมฆชนิดนี้ [15] ซึ่งผลของความหนาของแสงที่ลดลงจะเป็นการเพิ่มการแผ่รังสีจากพื้นโลกสู่อวกาศ

### Space-based mirrors for reducing solar radiation

อุปกรณ์บังแสงที่ใช้กระจกสำหรับอวกาศเป็นเทคนิคการจัดการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อสะท้อนปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังโลกเพื่อลดอุณหภูมิโลก โดยการวางอุปกรณ์บังแสงในอวกาศเพื่อสะท้อนหรือเบี่ยงเบนรังสีของดวงอาทิตย์ [16] ข้อเสียเปรียบหลักที่เกี่ยวข้องกับแนวทางนี้คือ ความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจของการขนส่งวัสดุไปยังอวกาศ เพื่อให้เทคโนโลยีนี้มีศักยภาพทางเศรษฐกิจ ต้นทุนการขนส่งวัสดุต้องลดลงจากประมาณ 10,000 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม ให้เหลือน้อยกว่า 100 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม [1]

### Stratospheric aerosol injection

การฉีดสเปรย์บนชั้นบรรยากาศ เป็นเทคโนโลยีควบคุมการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อเลียนแบบผลการทำความเย็นที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ เนื่องจากถ้าภูเขาไฟที่เกิดขึ้นไปปิดกั้นแสงอาทิตย์เอาไว้ สำหรับวิธีการนี้เป็นกรณีต่อนุภาคละอองสะท้อนแสงในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) [1] การฉีดอนุภาคละอองสะท้อนแสงอาจเพิ่มการสะท้อนแสงของดวงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวโลกลดลง

ปัจจุบันมีการนำเสนออนุภาคหลายประเภทสำหรับใช้ฉีดในชั้นสตราโตสเฟียร์ วัสดุแต่ละชนิดมีข้อดีและความท้าทายต่างกันไป เช่น การใช้อนุภาคแคลไซต์ (Calcite) อนุภาคดังกล่าวมีข้อดีคือ ไม่เป็นพิษ นอกจากนี้ ยังไม่สร้างความร้อนเพิ่มในชั้นของสตราโตสเฟียร์ และอาจมีส่วนช่วยในการต่อต้านการสูญเสียชั้นโอโซนในสตราโตสเฟียร์อีกด้วย [15] เมื่อไม่นานมานี้งานส่วนใหญ่ได้เน้นการศึกษาไปที่ละอองลอยซัลเฟตด้วยเหตุผลที่ดีหลายประการ ซึ่งในอดีตความเย็นของโลกเกิดจากละอองของภูเขาไฟซัลเฟต ดังนั้นสิ่งนี้จึงเป็นข้อพิสูจน์โดยตรงว่าอนุภาคเหล่านี้มีอิทธิพลต่อความเย็นอย่างมาก งานวิจัยที่ตีพิมพ์ส่วนใหญ่ที่เกี่ยวกับการออกแบบกระบวนการฉีดสเปรย์บนชั้นบรรยากาศจึงมุ่งเน้นไปที่อนุภาคซัลเฟต [16]

ดังที่กล่าวมา วิธีการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถดำเนินการได้หลากหลายวิธี นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เช่น การปรับปรุงสภาพดินฟ้าอากาศ (Enhanced terrestrial weathering) การกักเก็บคาร์บอนในดิน (Soil carbon sequestration) และการแปรรูปก๊าซเป็นแร่คาร์บอเนต (Mineral carbonation) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันไป โดยหนึ่งในปัจจัยที่ทำให้ภาคอุตสาหกรรมพยายามหาวิธีหรือแนวทางในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดหรือกฎหมายด้านสิ่งแวดล้อมของแต่ละประเทศ ซึ่งปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะออกกฎหมายและนโยบายที่เกี่ยวข้องกับการลดก๊าซเรือนกระจกเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง

### เป้าหมาย มาตรการ และการสนับสนุนในการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศต่าง ๆ

ประเทศเศรษฐกิจต่าง ๆ ได้ให้ความสำคัญกับการลดก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้น โดยการกำหนดเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) เพื่อหยุดยั้งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกให้อยู่ที่ 1.5 องศาเซลเซียสก่อนยุคอุตสาหกรรมตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ในข้อตกลงปารีส ปี พ.ศ. 2558 ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงจากปัญหาโลกร้อนและผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) โดยในปัจจุบันพบว่าประเทศที่กำหนดเป้าหมายการปล่อยมลพิษสุทธิเป็นศูนย์ สามารถดำเนินการได้สำเร็จจำนวน 2 ประเทศ คือ ประเทศภูฏาน ในทวีปเอเชียใต้ และประเทศซูรินาเม ในทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งสามารถดูดซับก๊าซเรือนกระจกได้มากกว่าที่ปล่อยออกมาได้สำเร็จ และมีประเทศที่กำหนดเป้าหมายการปล่อยมลพิษสุทธิเป็นศูนย์ที่มีผลผูกพันตามกฎหมายจำนวนทั้งสิ้น 6 ประเทศ [17] ซึ่งแต่ละประเทศได้กำหนดเป้าหมายและมาตรการที่เข้มงวดเพื่อบรรลุเป้าหมายการปล่อยมลพิษสุทธิเป็นศูนย์ มาตรการและเป้าหมายต่าง ๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.4

## ตารางที่ 2.4 เป้าหมายและมาตรการต่าง ๆ ของประเทศที่กำหนดการปล่อยมลพิษสุทธิเป็นศูนย์ที่มีผลผูกพันตามกฎหมาย

ประเทศ	เป้าหมายและมาตรการในการลดการปล่อยมลพิษสุทธิเป็นศูนย์
สวีเดน	<ul style="list-style-type: none"> <li>ประกาศกฎหมายว่าจะบรรลุการปล่อยมลพิษสุทธิเป็นศูนย์ในปี พ.ศ. 2597 ซึ่งเป็นประเทศแรกที่กำหนดเส้นเวลาอย่างชัดเจนเพื่อให้แน่ใจว่าอยู่เหนือเป้าหมายของข้อตกลงปารีส</li> <li>มีแผนจะลดการปล่อยมลพิษลง 85 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับในปี พ.ศ. 2533 โดยที่เหลืออีก 15 เปอร์เซ็นต์จะถูกกำจัดผ่านการลงทุนในโครงการที่ช่วยลดมลพิษในสวีเดนและที่อื่น ๆ ทั่วโลก</li> <li>เพิ่มการลงทุนในแหล่งพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ นอกจากนี้ยังมีกรเก็บภาษีคาร์บอนเพื่อสนับสนุนให้เกิดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล</li> </ul>
สหราชอาณาจักร	<ul style="list-style-type: none"> <li>สหราชอาณาจักรตั้งเป้าหมายในการปล่อยมลพิษสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี พ.ศ. 2593</li> <li>สร้างเป้าหมายในการลดการปล่อยมลพิษลง 80 เปอร์เซ็นต์ในอีกสามทศวรรษข้างหน้า ส่วนหนึ่งของความพยายามพบว่า การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสหราชอาณาจักรลดลง 29 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 354 ล้านตันในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา</li> <li>รัฐบาลสหราชอาณาจักรยังมีนโยบายยุติการจำหน่ายรถยนต์เชื้อเพลิงฟอสซิลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2573</li> </ul>
ฝรั่งเศส	<ul style="list-style-type: none"> <li>ประกาศกฎหมายเพื่อให้ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี พ.ศ. 2593</li> <li>ในกฎหมายเพิ่มเป้าหมายการลดใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลลงจาก 30 เปอร์เซ็นต์เป็น 40 เปอร์เซ็นต์ภายในปี พ.ศ. 2573</li> <li>มองหาแหล่งพลังงานทดแทนที่มีคาร์บอนต่ำหรือพลังงานไฮโดรเจนเพื่อทดแทนแหล่งพลังงานนิวเคลียร์ เนื่องจากฝรั่งเศสเป็นประเทศที่ใช้พลังงานนิวเคลียร์เป็นส่วนใหญ่</li> <li>ตั้งเป้าหมายที่จะเลิกใช้โรงไฟฟ้าถ่านหินภายในปี พ.ศ. 2565</li> <li>ดำเนินมาตรการเพื่อปรับปรุงที่อยู่อาศัยจำนวน 7.2 ล้านครัวเรือน เนื่องจากในภาคที่อยู่อาศัยคิดเป็นประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานซึ่งมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 25 เปอร์เซ็นต์</li> </ul>
เดนมาร์ก	<ul style="list-style-type: none"> <li>รัฐบาลเดนมาร์กได้กำหนดกฎหมายที่จะบรรลุการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี พ.ศ. 2593</li> <li>เนื่องจาก 47 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานภายในประเทศนั้นสร้างขึ้นจากพลังงานลมเพียงอย่างเดียว ดังนั้นเดนมาร์กได้เพิ่มมาตรการลดการปล่อยมลพิษถึง 40 เปอร์เซ็นต์จากยุคก่อนอุตสาหกรรม ซึ่งจะสามารถลดการปล่อยมลพิษได้ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ภายในปี พ.ศ. 2573</li> <li>ตั้งเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าของประเทศจะปราศจากเชื้อเพลิงฟอสซิลภายในปี พ.ศ. 2573</li> </ul>
นิวซีแลนด์	<ul style="list-style-type: none"> <li>ประกาศกฎหมายในเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2562 เพื่อให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี พ.ศ. 2593</li> <li>ประเทศนิวซีแลนด์เป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งในภาคเกษตรกรรมมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงคิดเป็นสัดส่วนเกือบครึ่งหนึ่งของประเทศ และการปล่อยก๊าซมีเทนจากสัตว์เคี้ยวเอื้องคิดเป็นประมาณหนึ่งในสามของการปล่อยทั้งหมด ซึ่งก๊าซมีเทนสามารถดักจับความร้อนในชั้นบรรยากาศได้มากถึง 30 เท่าเมื่อเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นรัฐบาลนิวซีแลนด์ได้มีมาตรการเพิ่มเติมเกี่ยวกับการลดการปล่อยก๊าซมีเทนลง 10 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับในปี พ.ศ. 2560 ภายในปี พ.ศ. 2573</li> </ul>
ฮังการี	<ul style="list-style-type: none"> <li>ตั้งเป้าหมายที่มีผลผูกพันตามกฎหมายที่จะปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้เป็นศูนย์ภายในปี พ.ศ. 2593</li> <li>เป้าหมายของกฎหมายเพื่อลดการปล่อยมลพิษลง 40 เปอร์เซ็นต์จากระดับในปี พ.ศ. 2533</li> <li>ฮังการีจะปิดโรงไฟฟ้าถ่านหินแห่งสุดท้ายที่เหลืออยู่ภายในปี พ.ศ. 2568 และเพิ่มขนาดของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ทดแทน</li> </ul>

ที่มา: <https://www.nsenerybusiness.com/news/countries-net-zero-emissions/> (accessed date: June 04, 2021) [17]

นอกจากนี้ ยังมี 6 ประเทศที่อยู่ระหว่างการพิจารณากฎหมาย เช่น ในประเทศแคนาดาอยู่ระหว่างการพิจารณากฎหมาย Canadian Net-Zero Emissions Accountability Act [18] ซึ่งมีเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี พ.ศ. 2593 และอีก 14 ประเทศ มีกรอบนโยบายที่ชัดเจนเพื่อจะมุ่งสู่การลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ได้มากที่สุด โดยสร้างภาวะสมดุลระหว่างก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกมากับการดำเนินมาตรการต่าง ๆ เพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่สะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศโลก เช่น ในประเทศจีนที่มีนโยบายและจุดยืนที่ชัดเจนที่จะลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ให้ได้ภายในปี พ.ศ. 2603 ซึ่งนับเป็นเป้าหมายที่ท้าทายอย่างยิ่งสำหรับประเทศจีนในฐานะที่เป็นประเทศปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดในโลก ส่วนประเทศที่เหลืออยู่ระหว่างการพิจารณาและกำหนดเป้าหมายซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 2.5

**ตารางที่ 2.5** ประเทศที่มีเป้าหมายหรืออยู่ระหว่างพิจารณาเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions)

บรรลุเป้าหมาย (2 ประเทศ)	มีผลผูกพันตามกฎหมาย (6 ประเทศ)	อยู่ระหว่างการพิจารณา กฎหมาย (6 ประเทศ)	มีนโยบายที่ชัดเจน (14 ประเทศ)
ญี่ปุ่น	เดนมาร์ก	แคนาดา	ออสเตรเลีย
ซูรินาม	ฝรั่งเศส	ชิลี	จีน
	ฮังการี	สเปน	คอสตาริกา
	นิวซีแลนด์	เกาหลีใต้	ฟินแลนด์
	สวีเดน	ฟิจิ	เยอรมัน
	สหราชอาณาจักร	สหภาพยุโรป	ไอซ์แลนด์
			ไอร์แลนด์
			หมู่เกาะมาร์แชลล์
			นอร์เวย์
			โปรตุเกส
			สโลวีเนีย
			แอฟริกาใต้
			สวีตเซอร์แลนด์
			ญี่ปุ่น

ที่มา: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> (accessed date: June 04, 2021) [19]

ปัจจุบันมีประเทศที่มีการแสดงความร่วมมือที่จะแก้ไข บรรเทาปัญหาสิ่งแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พร้อมทั้งกำหนดเป้าหมายที่ท้าทายอย่างมากในการลดก๊าซเรือนกระจก ซึ่งประเทศเหล่านี้จะดำเนินมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวดมากขึ้น โดยเฉพาะในกลุ่มประเทศอุตสาหกรรมชั้นนำ 7 ประเทศ (G7) และประเทศที่พัฒนาแล้วนอกกลุ่ม G7 ตัวอย่างเช่น แคนาดา และเกาหลีใต้ เนื่องจากมีพันธสัญญาในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่งผลให้ผู้ผลิตในประเทศเหล่านี้มีต้นทุนในการผลิตที่สูงกว่าผู้ผลิตสินค้าในประเทศกำลังพัฒนาซึ่งมักไม่มีพันธสัญญาเรื่องการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [18] ความแตกต่างทางด้านต้นทุนการผลิตส่งผลให้มีมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อรักษาความสามารถในการแข่งขันทางการค้าของผู้ผลิตภายในประเทศของตนโดยมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ๆ ซึ่งแต่ละประเทศได้เลือกใช้มาตรการต่าง ๆ ที่แตกต่างกันไปโดยสรุปไว้ในตารางที่ 2.6

**การติดฉลากคาร์บอน (Carbon Label/Carbon Footprint Label) [20]** ซึ่งแสดงปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์ตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การขนส่ง และการกำจัดผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน ซึ่งทำให้ผู้บริโภคทราบข้อมูลว่าผลิตภัณฑ์นั้น ๆ มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมามากน้อยเพียงใดซึ่งจะช่วยในการตัดสินใจของผู้บริโภคและกระตุ้นให้ผู้ประกอบการปรับเปลี่ยนเทคโนโลยีในการผลิตให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น

**กฎระเบียบเกี่ยวกับเศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของสหภาพยุโรป (Waste from Electrical and Electronics Equipment : WEEE) [16]** มีจุดประสงค์เพื่อต้องการหาผู้รับผิดชอบในการสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการจัดการขยะที่เกิดจากเครื่องใช้ไฟฟ้าและผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สิ้นสุดอายุการใช้งานแล้ว โดยภายใต้ระเบียบ WEEE ผู้ผลิตสินค้าหรือผู้ส่งออกจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบในการสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการจัดการขยะที่เกิดจากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยการรับผิดชอบอาจจะมีลักษณะของการนำกลับประเทศต้นทางเพื่อนำไปทำลาย นำกลับมาใช้ซ้ำหรืออุดหนุนค่าใช้จ่ายให้กับผู้ดำเนินการจัดการขยะในประเทศที่นำเข้าสินค้า

กฎระเบียบว่าด้วยการใช้สารอันตรายบางชนิดในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Restrictions on Hazardous Substances: RoHS) [18] เป็นข้อกำหนดของสหภาพยุโรปที่มีจุดประสงค์มุ่งเน้นการจำกัดการใช้สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมที่ต้นเหตุ โดยจำกัดการใช้สารอันตรายบางประเภทในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากสารอันตรายเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันกำหนดสารอันตรายไว้ 6 ชนิด ดังนี้ ตะกั่ว (Pb), ปรอท (Hg), แคดเมียม (Cd), เฮกซะวาเลนต์ (Cr-VI), โพลีโบรมิเนตไบเฟนิลส์ (PBB) และโพลีโบรมิเนตไดเฟนิลอีเธอร์ (PBDE)

มาตรการส่งเสริมรถยนต์พลังงานไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) เพื่อส่งเสริมการใช้รถยนต์พลังงานไฟฟ้าซึ่งปล่อยมลพิษในระดับต่ำซึ่งเป็นผลดีโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการลดมลพิษทางอากาศและก๊าซเรือนกระจก โดยมีมาตรการทางการด้านการยกเว้นภาษี การให้เงินสนับสนุน และการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน เช่น สถานีชาร์จไฟฟ้าให้ครอบคลุม ในบางประเทศให้สิทธิพิเศษสำหรับผู้ประกอบการรถยนต์ไฟฟ้า เช่น การไม่เสียค่าที่จอดรถ การใช้เลนพิเศษสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อส่งเสริมการใช้รถยนต์ไฟฟ้าแทนการใช้รถยนต์พลังงานเชื้อเพลิง

มาตรฐานการระบายไอเสียของรถยนต์ (EURO Standard) [18] ใช้ในการควบคุมการระบายไอเสียของรถยนต์ โดยปัจจุบันมีตั้งแต่มาตรฐาน EURO 1 ถึง EURO 6 โดยมาตรฐาน EURO 6 มีความเข้มงวดในการควบคุมการระบายมลพิษสูงสุด โดยครอบคลุมสารมลพิษรวมทั้งสิ้น 4 ชนิด ใน 6 รูปแบบ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (HC) ไฮโดรคาร์บอนรวมกับไนโตรเจนออกไซด์ (HC+NO<sub>x</sub>) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate Matter: PM) และจำนวนอนุภาคของฝุ่นละออง (Particulate Number: PN)

**ตารางที่ 2.6** สรุปมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในประเทศต่าง ๆ

การติดฉลากคาร์บอน (Carbon Label/Carbon Footprint Label)	สหราชอาณาจักร ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส สวิตเซอร์แลนด์ สวีเดน เยอรมนี สเปน เนเธอร์แลนด์ แคนาดา ออสเตรเลีย เกาหลีใต้
กฎระเบียบ WEEE	สหภาพยุโรป
กฎระเบียบ RoHS	สหภาพยุโรป จีน
มาตรการส่งเสริมรถยนต์พลังงานไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV)	นอร์เวย์ เดนมาร์ก ไช้แลนด์ เยอรมนี เนเธอร์แลนด์ ไอร์แลนด์ สกอตแลนด์ ฝรั่งเศส สเปน โปรตุเกส สหราชอาณาจักร
มาตรฐานการระบายไอเสียของรถยนต์ (EURO Standard)	สหภาพยุโรป สิงคโปร์ ออสเตรเลีย รัสเซีย ฮองกง เกาหลีใต้ จีน มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ เวียดนาม อินโดนีเซีย ศรีลังกา ปากีสถาน บังกลาเทศ

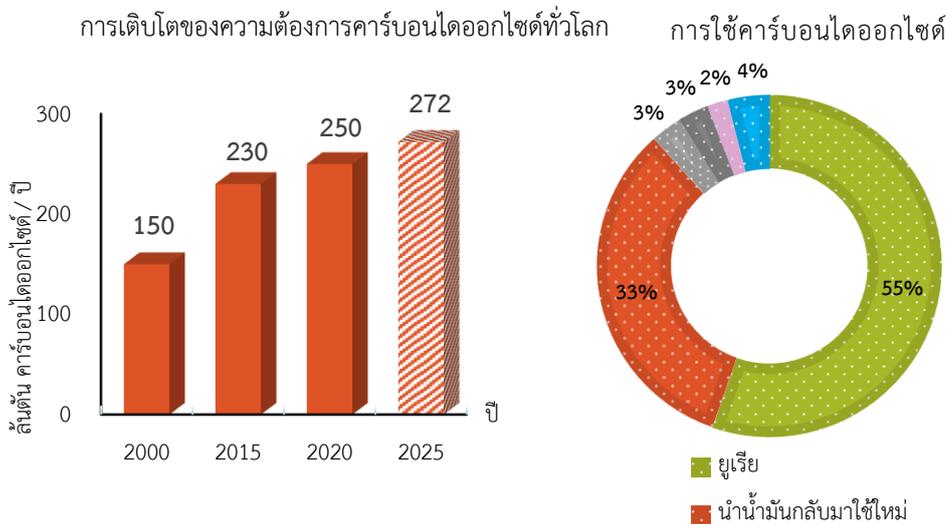
ที่มา: <https://krungthai.com/th/financial-partner/economy-resources/business-digest> (accessed date: June 04, 2021). [18]





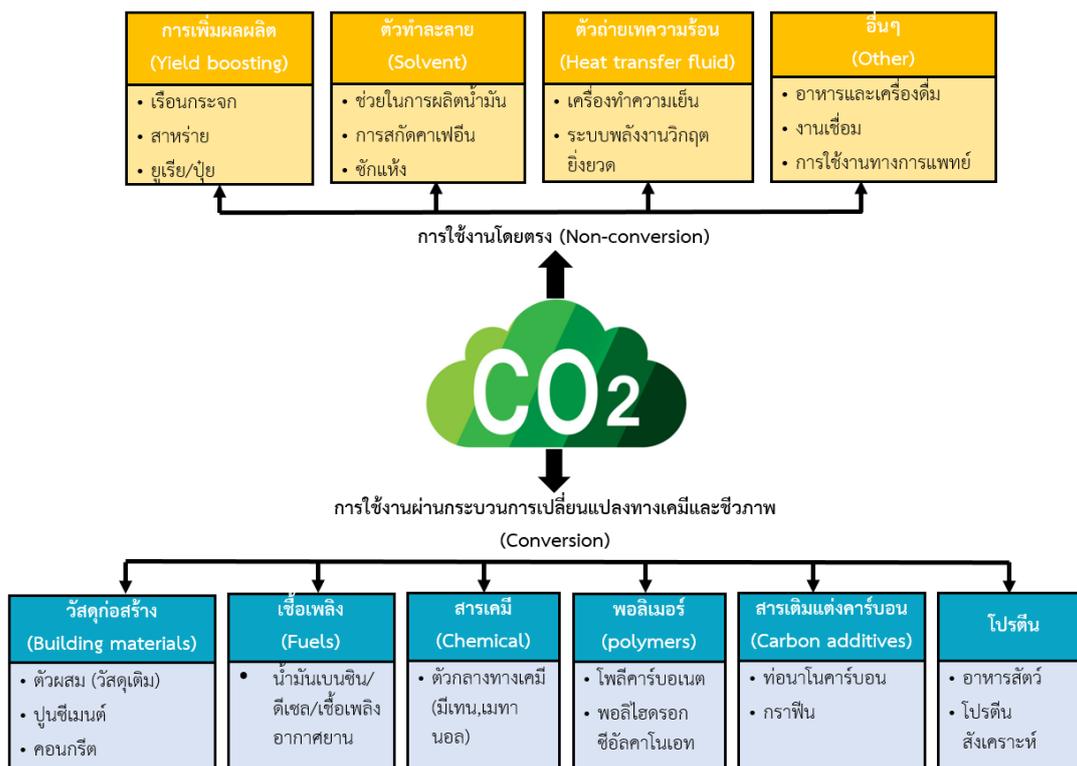
## 2.2 การใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความท้าทายในการสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจ

ในปี พ.ศ. 2563 ที่ผ่านมาทั่วโลกมีการนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ ประมาณ 250 ล้านตัน และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ด้านซ้าย) ซึ่งองค์การ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ได้คาดการณ์ไว้ว่าภายในปี พ.ศ. 2573 การประยุกต์ใช้คาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศโลกลดลงถึง 83 เพอร์เซ็นต์ [21] คาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับหรือกักเก็บไว้จากกระบวนการ CCUS สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายดังแผนผังในรูปที่ 2.8 การนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้งานสามารถใช้งานได้โดยตรงโดยที่คาร์บอนไดออกไซด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (Non-conversion) ซึ่งผู้บริโภครายใหญ่ที่สุดคือ อุตสาหกรรมปุ๋ยโดยใช้ในการผลิตยูเรียประมาณ 130 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี (55 เพอร์เซ็นต์) รองลงมาคือ ภาคน้ำมัน โดยมีปริมาณการใช้ 70 ถึง 80 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี (33 เพอร์เซ็นต์) สำหรับการนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่ (EOR) การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ก็แพร่หลายในการผลิตอาหารและเครื่องดื่ม การแปรรูปโลหะ การหล่อเย็นและอื่น ๆ [21] (รูปที่ 2.7 (ด้านขวา)) นอกจากนี้ การนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ผ่านการแปลงผัน (Conversion) ผ่านกระบวนการทางเคมีและชีวภาพไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้น เช่น เชื้อเพลิง เคมี วัสดุก่อสร้าง สารเติมแต่งคาร์บอน พอลิเมอร์ และโปรตีนสังเคราะห์ ซึ่งการนำคาร์บอนไดออกไซด์ [22] ไปใช้ในทางนี้กำลังดึงดูดความสนใจจากอุตสาหกรรม การสนับสนุนจากรัฐบาล และนักลงทุนเพิ่มขึ้น เพื่อผลักดันให้มีความเป็นไปได้และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ การแปลงคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นสารเคมีที่สำคัญ ๆ จำเป็นต้องก้าวผ่านปัญหาและอุปสรรคซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเติบโตของความต้องการคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก (ซ้าย) และการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (ขวา)  
ที่มา: International Energy Agency (2019) [21]





รูปที่ 2.8 การนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ทั้งทางตรงและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและชีวภาพ ที่มา: International Energy Agency (2019) [21]

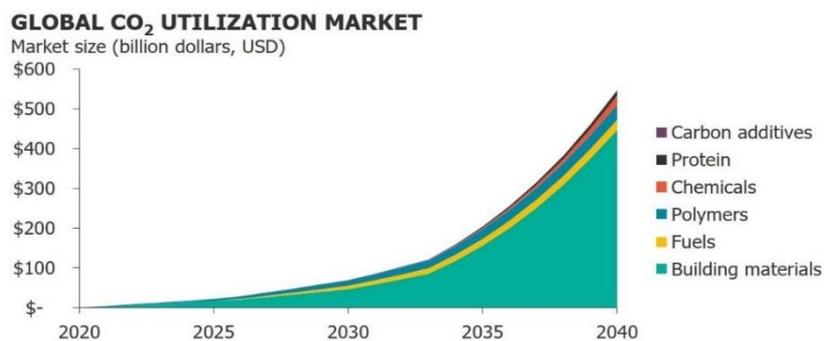
จากรายงานในบทสรุปผู้บริหารในหัวข้อ CO<sub>2</sub> CAPTURE & UTILIZATION (The Emergence of a Carbon Economy) คาดว่าขนาดของตลาดทั่วโลกสำหรับการนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงจะมีมูลค่าตลาดสูงถึง 70 พันล้านดอลลาร์ภายในปี พ.ศ. 2573 ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเป็น 550 พันล้านดอลลาร์ในปี พ.ศ. 2583 (รูปที่ 2.9) โดยวัสดุก่อสร้างจะเป็นภาคส่วนที่ใหญ่ที่สุดของการใช้คาร์บอนไดออกไซด์คิดเป็น 86 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่าตลาดโดยรวมในปี พ.ศ. 2563 ที่ผ่านมา เนื่องจากเทคโนโลยีการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างมีอุปสรรคทางเทคนิคต่ำและวงจรของคาร์บอนเป็นแบบปิดทำให้อุตสาหกรรมนี้เป็นอุตสาหกรรมที่มีความยั่งยืนในภาคส่วนการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกลางทางเคมีในการผลิตสารเคมี เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ เมทานอลและกรดฟอร์มิกนั้น คาร์บอนไดออกไซด์ช่วยให้อุตสาหกรรมเคมีมีแหล่งวัตถุดิบคาร์บอนที่จำเป็นที่สามารถทดแทนคาร์บอนจากแหล่งพลังงานฟอสซิลได้ ซึ่งถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงแต่อยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนา เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานสูง ดังนั้นจึงต้องการแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีราคาถูกและเป็นความท้าทายอย่างมากสำหรับนักวิจัยและพัฒนา



**ตารางที่ 2.7** ความท้าทายในการสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจและข้อมูลสำคัญในการนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์

การนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์	ความท้าทายในการสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจ	ข้อมูลสำคัญ
วัสดุก่อสร้าง	<ul style="list-style-type: none"> <li>เติบโตได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีอุปสรรคด้านเทคโนโลยีต่ำ</li> </ul>	สิทธิบัตรจำนวน 500 ฉบับด้านวัสดุที่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้น รวมถึงอีกกว่า 40 สิทธิบัตรที่ยื่นในปี พ.ศ. 2563 ที่ผ่านมา
สารเคมี	<ul style="list-style-type: none"> <li>กระบวนการที่ใช้ต้องการพลังงานสูง</li> <li>ต้องหาแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีราคาถูกลง</li> </ul>	สิ่งพิมพ์ทางวิชาการด้านเคมีภัณฑ์ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้น 6,700 ฉบับ และมี 1,200 ฉบับที่ตีพิมพ์ในปี พ.ศ. 2563 ที่ผ่านมา
การผลิตสารเติมแต่งคาร์บอน	<ul style="list-style-type: none"> <li>การพัฒนาด้านความแข็งแกร่งในการประยุกต์ใช้</li> <li>การลดต้นทุน และคุณภาพ</li> </ul>	4 เมตริกตัน ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์โดยประมาณที่จำเป็นในการผลิตสารเติมแต่งคาร์บอนหนึ่งเมตริกตัน
เชื้อเพลิงสังเคราะห์	<ul style="list-style-type: none"> <li>ขาดการสนับสนุนด้านเทคโนโลยี</li> <li>ความสำเร็จของอุตสาหกรรมขึ้นอยู่กับ การสนับสนุนของภาคการขนส่ง</li> </ul>	เชื้อเพลิงสังเคราะห์ทั้งหมด 110 ล้านลิตรกำลังการผลิต ประกาศว่าจะเปิดตัวในอีก 5 ปีข้างหน้า
พอลิเมอร์	<ul style="list-style-type: none"> <li>ความต้องการของตลาด</li> <li>มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอน</li> </ul>	โรงงาน Covestro ผลิตพอลิเมอร์โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศเยอรมนี โดยใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้สำเร็จซึ่งมีกำลังการผลิต 5,000 เมตริกตันต่อปี
โปรตีนเซลล์	<ul style="list-style-type: none"> <li>การผลิตในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่</li> <li>ต้องการเงินทุนจำนวนมาก</li> <li>ความท้าทายทางเทคโนโลยี</li> </ul>	จำนวนการตีพิมพ์สิทธิบัตร 1,700 รายการ ในด้านโปรตีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก รวมถึงสิทธิบัตรกว่า 100 รายการที่ได้รับการจดสิทธิบัตรในปี พ.ศ. 2563 ที่ผ่านมา

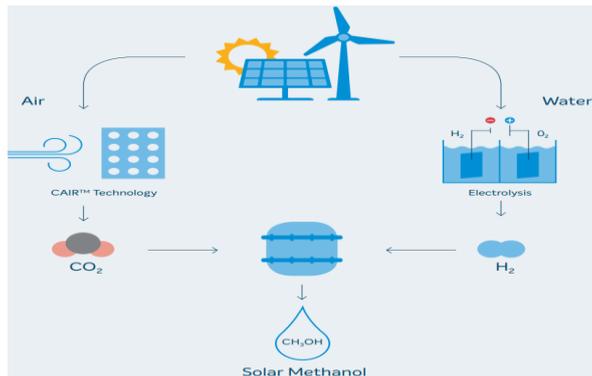
ที่มา: <https://www.luxresearchinc.com/the-emergence-of-a-carbon-economy-executive-summary> (accessed date: June 04, 2021) [22]



**รูปที่ 2.9** ขนาดของตลาดการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก

ที่มา: <https://www.luxresearchinc.com/the-emergence-of-a-carbon-economy-executive-summary> (accessed date: June 04, 2021) [22]

บริษัท Opus 12 ในประเทศสหรัฐอเมริกา [23] ซึ่งเป็นโรงงานเริ่มต้นในการพัฒนาการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาพแวดล้อมมาเป็นผลิตภัณฑ์เคมีที่สำคัญเพียงใช้น้ำและไฟฟ้าเป็นปัจจัยในการผลิตเท่านั้นซึ่งเป็นการก้าวผ่านความท้าทายทางเศรษฐกิจได้สำเร็จ การพัฒนาเทคโนโลยีของ Opus12 นำไปสู่ต้นแบบที่มีประสิทธิภาพไปจนถึงการขยายขนาดกำลังการผลิต โดยเมื่อปี พ.ศ. 2560 ที่ผ่านมามีได้เปิดตัวหน่วยการค้าแห่งแรกเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในประเทศเนเธอร์แลนด์ได้มีการตั้งโรงงานผลิตเมทานอลจากแสงอาทิตย์โดยบริษัท ANTECY [23] ซึ่งกระบวนการของเทคโนโลยีของ ANTECY (รูปที่ 2.10) จะนำคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ได้จากการดักจับจากอากาศและไฮโดรเจนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงและสารเคมี เทคโนโลยีการดักจับอากาศ (CAIRTM) ของ ANTECY สามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งในกรณีที่มีความเข้มข้นต่ำ (<10 เปอร์เซ็นต์) และความเข้มข้นสูง (>99.5 เปอร์เซ็นต์) ราคาสำหรับการดักจับอยู่ที่ประมาณ 50 ดอลลาร์ต่อตัน ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ ซึ่งเทคโนโลยีนี้ถือว่ามีประสิทธิภาพในการแข่งขันทางเศรษฐกิจสูงมาก ยิ่งไปกว่านั้นกระบวนการโดยรวมเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถลดต้นทุนด้านพลังงานได้ นอกจากนี้การนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้สำหรับการทดแทนหรือเสริมวัตถุดิบที่ไม่หมุนเวียนในการผลิตพอลิเมอร์ได้รับการพิสูจน์ในเชิงพาณิชย์และนำไปใช้ได้สำเร็จในระดับต่าง ๆ เช่น ในโรงงาน Covestro ประเทศเยอรมัน [23] ซึ่งมีความพร้อมทางเทคโนโลยีอยู่ในระดับ 9 (TRL-9) นักวิจัยของ Covestro ได้เปลี่ยนแปลงของเสียพลังงานต่ำอย่างคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณค่าซึ่งสามารถทำให้มันเป็นไปได้ที่จะรวมคาร์บอนไดออกไซด์ในโพลียูรีเทนและชิ้นส่วนพลาสติกอื่น ๆ เมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้เริ่มทำการผลิตโพลียูรีเทนกรรมโดยมีน้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์ในโพลียูรีเทนสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ความท้าทายที่สำคัญคือ เมื่อโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ๆ ต้องใช้พลังงานมากเกินไปทำให้ปฏิกิริยานี้ไม่คุ้มค่า อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยและผู้พัฒนาของ Covestro ประสบความสำเร็จในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ ช่วยให้การตอบสนองที่มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานโดยมีรายรับต่อปีอยู่ที่ 12.1 พันล้านยูโร (ปี พ.ศ. 2558) ซึ่งนอกเหนือจากนี้ยังมีอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั่วโลก (ตารางที่ 2.8) ที่กำลังผลักดันและพัฒนากระบวนการที่จะนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้เป็นสารตั้งต้นของผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดและสามารถลดก๊าซเรือนกระจกที่กำลังเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน



รูปที่ 2.10 กระบวนการของเทคโนโลยีของ ANTECY ในการผลิตเมทานอล ที่มา: Zimmermann และคณะ (2017) [23]



ตารางที่ 2.8 อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นสารตั้งต้นของผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง

การนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์	บริษัท	ประเทศ	ข้อมูลอื่น ๆ	กำลังการผลิต	อ้างอิง
โพลีคาร์บอนเนต	AsahiKASEI	ญี่ปุ่น	คาร์บอนไดออกไซด์ถูกนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตโพลีคาร์บอนเนตเพื่อทำขวดพลาสติก และเคลือบผิวเลนส์ นอกจากนี้ยังถูกนำไปผลิตสารโพลีออลส์ซึ่งเป็นโมเลกุลที่เป็นโครงสร้างของน้ำตาลเพื่อสร้างวัสดุประเภทโพลียูรีเทนที่ใช้ในการทำกาวและใช้เคลือบวัตถุอื่น เช่น เคลือบกระจกป้องกันกระสุน และเสริมความคงทนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	660,000 ตัน/ปี	[24]
เมทานอล	Icelandic company	ไอซ์แลนด์	คาร์บอนไดออกไซด์ถูกเปลี่ยนเป็นเมทานอลโดยให้คาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้มาจากหินคาร์บอนเนตและไฮโดรเจนจากน้ำ	5 ล้านลิตร/ปี	[25]
เมทานอล	Carbon recycling international	เยอรมัน	คาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพคาร์บอนไดออกไซด์ถูกทำให้บริสุทธิ์เพื่อให้เหมาะสำหรับการสังเคราะห์เมทานอล ไฮโดรเจนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าและคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากันเพื่อสร้างเมทานอล การทำให้บริสุทธิ์และการกำจัดน้ำโดยการกลั่นซึ่งใช้น้ำความร้อนใต้พิภพเป็นกระบวนการสุดท้าย เทคโนโลยีนี้ไม่ก่อให้เกิดผลพลอยได้ที่เป็นพิษ เนื่องจากสารเคมีเพียงอย่างเดียวที่ปล่อยออกมา คือ ออกซิเจน	1,300 – 4,000 ตัน/ปี	[26]
คอนกรีต	Carbon Cure	อเมริกาเหนือ	เทคโนโลยีในการผลิตคอนกรีตของ Carbon Cure คือการนำคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่เพื่อลดคาร์บอนในกระบวนการผลิตคอนกรีตซึ่งยังคงสมรรถนะของคอนกรีตไว้ เทคโนโลยีนี้ได้รับการยอมรับและถูกติดตั้งในโรงงานคอนกรีตทั่วมัณฑลอเมริกาเหนือและส่วนต่าง ๆ ทั่วโลก	149 ล้านตัน/ปี	[27]



## เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Fawzy, A.I. Osman, J. Doran, and D.W. Rooney, Strategies for mitigation of climate change: A review, *Environmental Chemistry Letters* 18, 2020, 2069-2094.
- [2] H. Wang, Y. Liu, A. Laaksonen, A. Krook-Riekkola, Z. Yang, X. Lu, and X. Ji, Carbon recycling—An immense resource and key to a smart climate engineering: A survey of technologies, cost and impurity impact, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 131, 2020, 1-21.
- [3] I. Ghat and T. Al-Ansari, A review of carbon capture and utilisation as a CO<sub>2</sub> abatement opportunity within the EWF nexus, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 45, 2021, 1-14.
- [4] S. Teir, L. Kujanpää, M. Suomalainen, K. Kankkunen, M. Kojo, J. Kärki, M. Sonck, R. Zevenhoven, S. Eloneva, and K. Myöhänen, CCSP carbon capture and storage program: Mid-term report 2011-2013, Finland: VTT Technology 125, 2013, 1-76.
- [5] S. Holloway, A. Karimjee, M. Akai, R. Pipatti, and K. Rypdal, Carbon dioxide transport, injection and geological storage, in IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, France: OECD, 2006, 5.1-5.32.
- [6] U. Berge, M. Gjerset, B. Kristoffersen, M. Lindberg, T. Palm, T. Risberg, and C. Svendsen Skriung, Carbon capture and storage, Norway: Zero Emission Resource Organization, 2016, 1-49.
- [7] C. Consoli, Bioenergy and carbon capture and storage, Global CCS Institute, Australia: Global CCS Institute, 2019, 1-13.
- [8] A. Gambhir and M. Tavoni, Direct air carbon capture and sequestration: How It works and how it could contribute to climate-change mitigation, *One Earth* 1(4), 2019, 405-409.
- [9] R. de Richter, S. Caillol, and T. Ming, Geoengineering: Sunlight reflection methods and negative emissions technologies for greenhouse gas removal, in *Managing Global Warming*, London, UK: Academic Press, 2019, 581-636.
- [10] S. Hennige, J.M. Roberts, and P. Williamson, An updated synthesis of the impacts of ocean acidification on marine biodiversity, *CBD Technical Series* 75, 2014, 1-99.
- [11] A. Harding and J.B. Moreno-Cruz, The economics of geoengineering, in *Managing global warming*, London, UK: Academic Press, 2019, 729-750.
- [12] L.T. Bach, S.J. Gill, R.E.M. Rickaby, S. Gore, and P. Renforth, CO<sub>2</sub> removal with enhanced weathering and ocean alkalinity enhancement: Potential risks and co-benefits for marine pelagic ecosystems, *Frontiers in Climate* 1, 2019, 1-21.
- [13] D. O'Driscoll, Carbon abatement potential of reforestation, K4D Helpdesk, Brighton, UK: Institute of Development Studies, 2018, 1-23.
- [14] U. Lohmann and B. Gasparini, A cirrus cloud climate dial?, *Science* 357(6348), 2017, 248-249.
- [15] M.G. Lawrence, S. Schafer, H. Muri, V. Scott, A. Oschlies, N.E. Vaughan, O. Boucher, H. Schmidt, J. Haywood, and J. Scheffran, Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals, *Nature Communications* 9(1), 2018, 1-19.
- [16] J.G. hepherd, *Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty*, UK: The Royal Society, 2009, 1-81.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [17] <https://www.nsenerybusiness.com/news/countries-net-zero-emissions/> (accessed date: June 04, 2021).
- [18] <https://krungthai.com/th/financial-partner/economy-resources/business-digest> (accessed date: June 04, 2021).
- [19] <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> (accessed date: June 04, 2021).
- [20] <http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y0hKdlpVmpkSE5mYVhNPQ> (accessed date: June 04, 2021).
- [21] <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use> (accessed date: June 04, 2021).
- [22] <https://www.luxresearchinc.com/the-emergence-of-a-carbon-economy-executive-summary> (accessed date: June 04, 2021).
- [23] A. Zimmermann, M. Kant, T. Strunge, E. Tzimas, W. Leitner, W. Arlt, P. Styring, K. Arning, M. Ziefle, and R. Meys, CO<sub>2</sub> utilisation today: Report 2017, Berlin: Technischen Universität Berlin, 2017, 1-45.
- [24] <https://www.asahi-kasei.com/> (accessed date: June 04, 2021).
- [25] <https://www.government.is/topics/business-and-industry/establishing-a-business-in-iceland/> (accessed date: June 04, 2021).
- [26] <https://www.carbonrecycling.is/> (accessed date: June 04, 2021).
- [27] <https://www.carboncure.com/> (accessed date: June 04, 2021)

# 3 กลยุทธ์เชิงรุกในการนำก๊าซ CO<sub>2</sub> มาใช้ประโยชน์: Thailand's Situation



## 3.1 การผลิตเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

### ตลาดและการแข่งขัน

เมทานอล เป็นสารเคมีพื้นฐานที่สำคัญในอุตสาหกรรมเคมีต่าง ๆ ได้แก่ การผลิตกรดแอสติค คลอโรมีเทน (Chloromethane) เมทิลเทอร์เทอริบิวทิลอีเทอร์ (Methyl Tert-Butyl Ether: MTBE) อัลคิลเฮไลด์ (Alkyl halide) และฟอร์มัลดีไฮด์ รวมถึงใช้เป็นตัวทำละลายในการผลิตสี หมึกพิมพ์ น้ำมันขัดเงา สารเคลือบผิว สารเคลือบแผ่นซีดี และยังสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนได้อีกด้วย โดยสารแปรรูปของเมทานอลจะถูกนำไปผสมกับ LPG เพื่อใช้ในครัวเรือน หรือผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันร้อยละ 15 เพื่อทำเป็นไบโอดีเซล นอกจากนี้เมทานอลยังสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซโซลีนผ่านกระบวนการ MTG (Methanol to Gasoline) ได้อีกด้วย [1-3] จากความหลากหลายด้านการใช้ประโยชน์ข้างต้นและการเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมเคมี จึงทำให้เมทานอลเป็นที่ต้องการในตลาดโลกและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (ดังรูปที่ 3.1.1) ในส่วนของประเทศไทย เมทานอลเป็นสารเคมีที่มีการนำเข้าอันดับต้น ๆ โดยจากข้อมูลการนำเข้าของกรมโรงงานอุตสาหกรรมในปี พ.ศ. 2563 [4] มีปริมาณการนำเข้าของเมทานอลมากกว่า 1,000 ล้านลิตรต่อปี หรือราว 2 ล้านกิโลกรัมต่อวัน ซึ่งถูกนำเข้ามาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมหลัก ได้แก่ อุตสาหกรรมตัวทำละลาย/สี และอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล ทั้งนี้ประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าเมทานอลจากต่างประเทศเนื่องจากยังไม่สามารถผลิตได้เองทำให้ต้องสูญเสียเงินตราต่างประเทศอย่างมาก

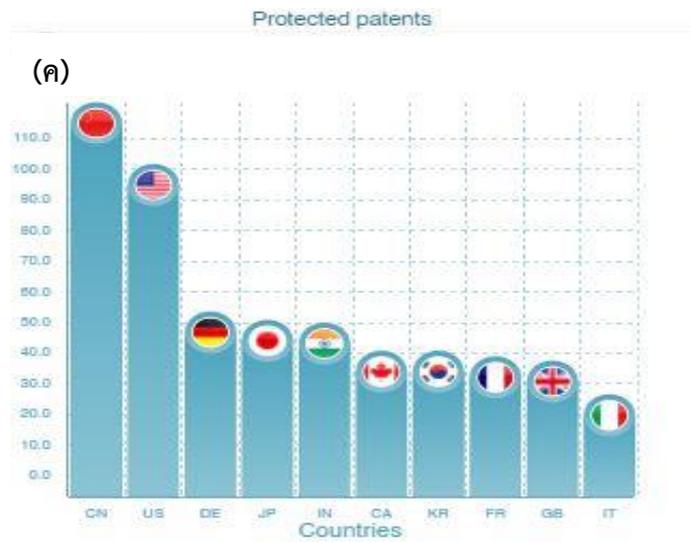
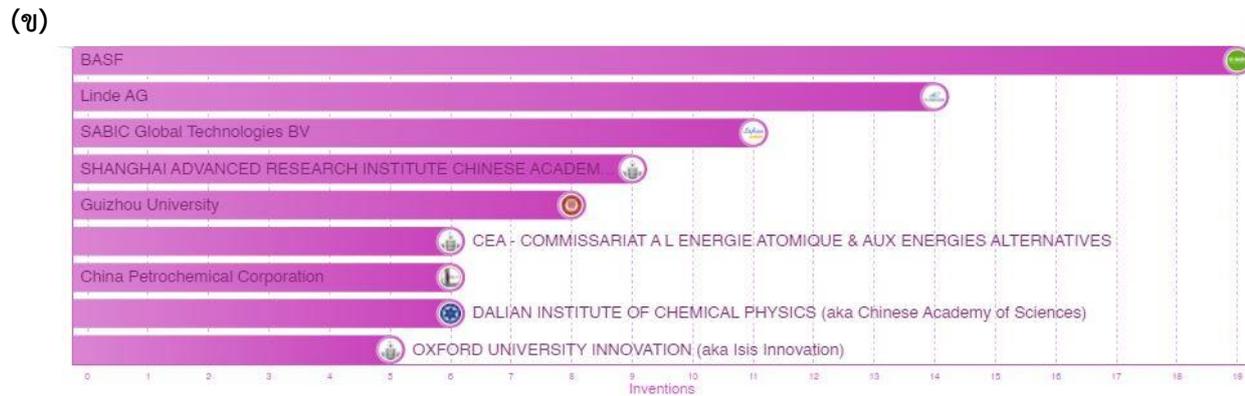
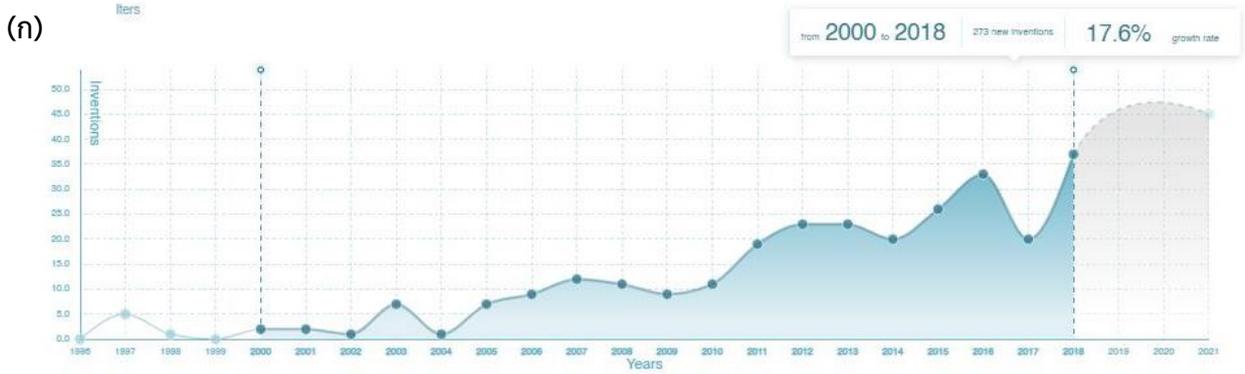
ในการแข่งขันด้านเทคโนโลยีการผลิตเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงยี่สิบปีที่ผ่านมา เห็นได้ว่าการลงทุนและส่งเสริมงานวิจัยด้านนี้เพิ่มมากขึ้น สังเกตได้จากจำนวนการจดสิทธิบัตร (รูป 3.1.2n) ซึ่งบริษัทที่มีการยื่นจดสิทธิบัตรในงานด้านนี้ 3 อันดับแรก คือ BASF, Linde และ SABIC Global Technologies BV (รูป 3.1.2ข) โดยประเทศที่ครอบครองทรัพย์สินทางปัญญาและมีความพร้อมในศาสตร์ด้านนี้ 3 อันดับแรกคือ จีน สหรัฐอเมริกา และเยอรมัน (ดังแสดงในรูป 3.1.2ค) ในขณะที่ประเทศไทยมีการตื่นตัวเกี่ยวกับเทคโนโลยีแห่งอนาคตนี้ช้ากว่ามาก



รูปที่ 3.1.1 แนวโน้มตลาดของเมทานอลทั่วโลก

ที่มา: <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/methanol-market> (accessed date: June 05, 2021) [5]





รูปที่ 3.1.2 ผลการสืบค้นฐานข้อมูล Orbit Insight ด้วยคำสืบค้น Methanol และ CO<sub>2</sub> hydrogenation (ก) จำนวนการยื่นขอจดสิทธิบัตรในช่วงปี พ.ศ. 2539 ถึง 2561 (ข) จำนวนสิทธิบัตรที่ถือครองโดยบริษัท 9 อันดับแรก (ค) จำนวนสิทธิบัตรที่ได้รับการคุ้มครองในประเทศต่าง ๆ

โดยปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมที่สามารถผลิตเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวอย่างเช่น Carbon Recycling International ประเทศไอซ์แลนด์ ซึ่งมีกำลังการผลิตเมทานอล 50,000-100,000 ตันต่อปี [6], Fairway Methanol ของบริษัท Mitsui & Co. ประเทศญี่ปุ่น ร่วมกับ Celanese Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีกำลังการผลิตเมทานอล 130,000 ตันต่อปีโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการปล่อยของโรงงานอุตสาหกรรมใกล้เคียง (ประมาณ 180,000 ตันต่อปี) [7] สำหรับประเทศไทย บริษัท บีแอลซีพีเพาเวอร์ จำกัด (BLCP) และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ได้ลงนามความร่วมมือทางวิชาการ วิจัยและพัฒนาการผลิตเมทานอลจากของเหลือทิ้งโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยทิ้งของโรงผลิตไฟฟ้าถ่านหินมารวมกับก๊าซไฮโดรเจนที่ได้มาจากการบวนการเช่นกันในการผลิตเมทานอลระดับ 100 ลิตรต่อวัน โดยมีเป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับ 55 ตันต่อปี และได้ผลผลิตเมทานอลในระดับ 57 ตันต่อปี เพื่อใช้เป็นแนวทางในการต่อยอดในระดับการสร้างโรงงานต่อไป

### ความพร้อมทางด้านเทคโนโลยีในปัจจุบัน (Technology readiness level) และการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรม

การเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นเมทานอลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) ซึ่งเป็นวิธีทางเคมีและความร้อน วิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical conversion) ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า มีการจ่ายและรับอิเล็กตรอน และวิธีทางโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalytic conversion) ซึ่งเป็นการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ทั้งนี้แต่ละกระบวนการมีข้อดีข้อเสียหรือความท้าทายที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3.1.1

ตารางที่ 3.1.1 ข้อดีและข้อเสียของการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นเมทานอลด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นเมทานอล	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีทางเคมีความร้อน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เข้าใกล้เชิงพาณิชย์</li> <li>- การขยายขนาด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การใช้พลังงาน</li> <li>- ต้องใช้ไฮโดรเจนในปฏิกิริยา โดยควรเป็นไฮโดรเจนที่ผลิตจากกระบวนการที่ไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์</li> </ul>
วิธีทางเคมีไฟฟ้า	<ul style="list-style-type: none"> <li>- โอกาสในการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียน</li> <li>- มีช่วงของสภาวะการปฏิบัติที่กว้าง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การใช้พลังงาน</li> <li>- การขยายขนาด</li> </ul>
วิธีทางโฟโตคะตะลิสต์	<ul style="list-style-type: none"> <li>- โอกาสในการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียน</li> <li>- สามารถเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสม</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การขยายขนาด</li> <li>- มีอัตราผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่ำ และมีสารผลิตภัณฑ์ข้างเคียงอื่นที่หลากหลาย ทำให้ส่งผลต่อกระบวนการแยก</li> </ul>

ในส่วนของการผลิตเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีความร้อน เป็นวิธีที่สามารถขยายกำลังการผลิตและเข้าใกล้เชิงพาณิชย์มากที่สุด โดยเมทานอลสามารถสังเคราะห์ได้โดยตรงจากปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> hydrogenation) ซึ่งมีปฏิกิริยาหลัก คือ ปฏิกิริยาการเกิดเมทานอล (Methanol formation) และมีปฏิกิริยาที่เกิดแข่งขัน ได้แก่ ปฏิกิริยา Reverse water-gas-shift รวมไปถึงปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation) เกิดขึ้นควบคู่กันไปด้วย ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ [8-9]

ปฏิกิริยาการเกิดเมทานอล (Methanol formation)



ปฏิกิริยา Reverse water-gas-shift reaction

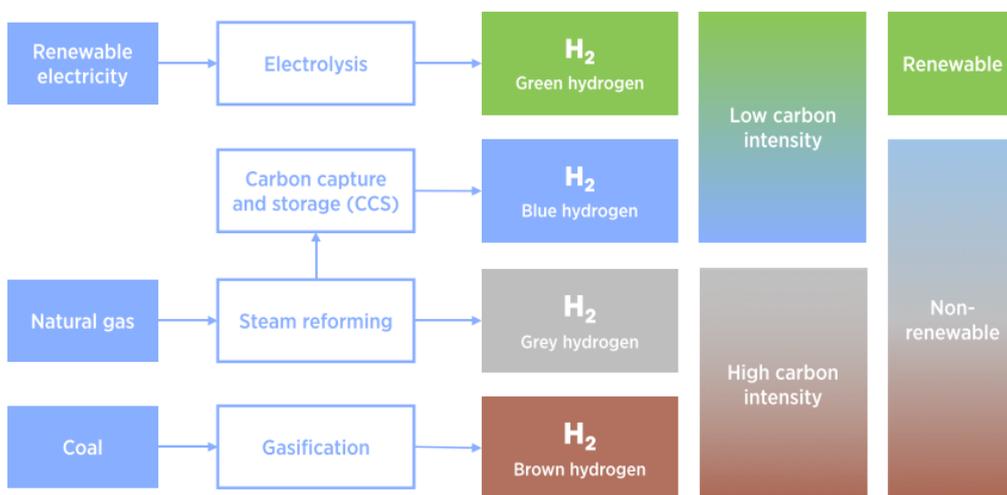


ปฏิกิริยาการเกิดมีเทน (Methanation)



อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่สำคัญที่สุดของการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนมาใช้ประโยชน์ คือ ค่าการแปลงผันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> conversion) และผลได้ของผลิตภัณฑ์จำพวกเมทานอลค่อนข้างต่ำโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดทิศทางการเกิดปฏิกิริยาว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ใดเป็นหลัก โดยการสังเคราะห์เมทานอลผ่านทางปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรเจนชั้นเชิงพาณิชย์นั้น นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฐานโลหะทองแดง CuO-ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งให้ค่าการแปลงผันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 50-100 บาร์และอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส [8,10] โดยกระบวนการนี้ ปัจจัยที่ต้องคำนึง คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเมทานอล รวมถึงระบบการผลิตที่มีส่วนสำคัญต่อการขยายขนาดเพื่อให้กระบวนการมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนสูงที่สุด

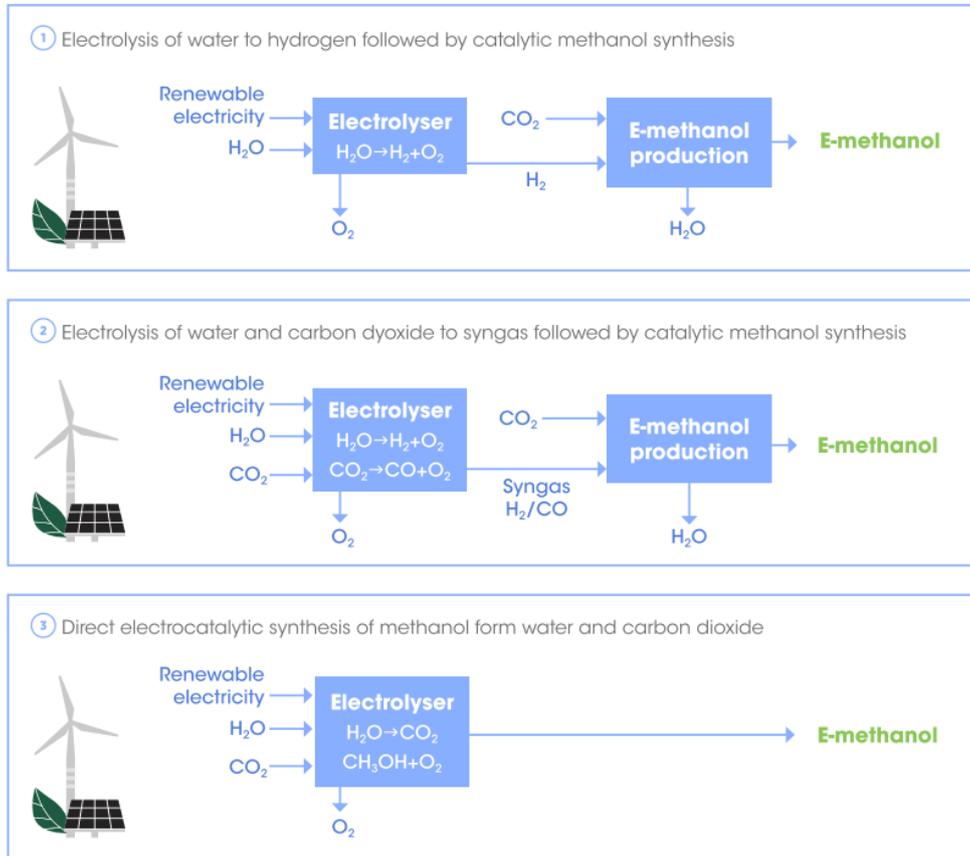
อีกหนึ่งเทคโนโลยีที่น่าสนใจคือ การผลิตเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยปฏิกิริยารีดักชันเชิงเคมีไฟฟ้าโดยใช้น้ำเป็นตัวรีดิวซ์และไฟฟ้าเป็นพลังงานขับเคลื่อน หรือทางอ้อมจากการใช้ syngas (ก๊าซผสมของ CO และ H<sub>2</sub>) เป็นสารตั้งต้นซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน ดังนั้นคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon footprint) ของกระบวนการเมทานอลจึงขึ้นอยู่กับแหล่งผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามแหล่งผลิตดังแสดงในรูปที่ 3.1.3 เพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน จำต้องมีการผลักดันเพื่อให้เปลี่ยนผ่านการใช้ Brown H<sub>2</sub> ที่ผลิตจากถ่านหินไปสู่ Green H<sub>2</sub> ที่ผลิตจากกระบวนการแยกน้ำเชิงเคมีไฟฟ้าที่ยังคงมีราคาสูงในปัจจุบัน Blue H<sub>2</sub> จึงได้รับความสนใจจากภาคอุตสาหกรรมมากที่สุด เนื่องจากมีความพร้อมเชิงเทคโนโลยีเพียงพอที่จะนำไปสู่การผลิตระดับกิกะวัตต์ ตัวอย่างเช่น โครงการ H2Teesside ของบริษัท British Petroleum (BP) ซึ่งจะเป็นโรงงานผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากก๊าซธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดในประเทศอังกฤษ โดยมีเป้าอัตราการผลิตที่ 1 GW ภายใน ปี พ.ศ. 2573 [11] เป็นต้น



รูปที่ 3.1.3 สารตั้งต้นและกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนประเภทต่าง ๆ เป็นตัวกำหนดอัตราการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของกระบวนการผลิตเมทานอล

ที่มา: IRENA (2121) [12]

แต่ทั้งนี้ เพื่อความยั่งยืนเชิงพลังงานและสิ่งแวดล้อมจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเมทานอลที่สะอาดอย่างแท้จริงจากพลังงานทางเลือก (e-methanol) ซึ่งสามารถทำได้ผ่านกระบวนการผลิต 3 แบบ ได้แก่ (1) ปฏิกริยาไฮโดรจิเนชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากการแยกน้ำด้วยเคมีไฟฟ้า (2) เปลี่ยน Syngas จากปฏิกริยารีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrochemical CO<sub>2</sub> reduction, CO<sub>2</sub>RR) และ (3) การผลิตเมทานอลจาก CO<sub>2</sub>RR โดยตรงในขั้นตอนเดียว



รูปที่ 3.1.4 กระบวนการผลิตเมทานอลจากพลังงานทดแทนและ Green H<sub>2</sub> (e-methanol)  
ที่มา: IRENA (2121) [12]



ในปัจจุบัน ปฏิบัติการไฮโดรเจนชั้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากการแยกน้ำด้วยเคมีไฟฟ้า เป็นกระบวนการเดียวที่สามารถดำเนินการได้ในเชิงพาณิชย์ และนำไปสู่การตั้งโรงงานต้นแบบทั่วโลก ดังแสดงในตารางที่ 3.1.2 ซึ่งเมื่อโครงการทั้งหมดแล้วเสร็จจะนำไปสู่การผลิต e-methanol มากถึง 700,000 ตันต่อปี ซึ่งโรงงานเกือบทั้งหมดตั้งอยู่ในทวีปยุโรปอันเป็นผลมาจากการผลักดันนโยบายอันเข้มแข็งและการใช้พลังงานทดแทนอย่างแพร่หลายในภูมิภาคนี้

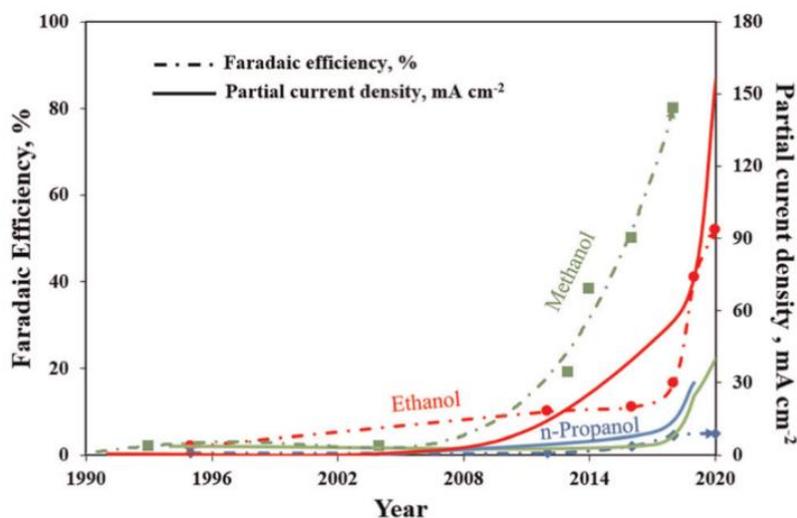
**ตารางที่ 3.1.2** โรงงานผลิต e-methanol ที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบันและมีแผนการสร้างในอนาคต

ประเทศ	บริษัท	ปี พ.ศ. ที่เริ่ม	กำลังการผลิต	สารตั้งต้น	อ้างอิง
ไอซ์แลนด์	Carbon Recycling International (CRI)	2554	4,000 ตัน/ปี	CO <sub>2</sub> ได้พิภพและ H <sub>2</sub> จากน้ำ ขับเคลื่อนด้วยพลังงานความร้อนได้พิภพ	[13]
จีน	Dalian Institute of Chemicals Physics	2563	1,000 ตัน/ปี	CO <sub>2</sub> และ H <sub>2</sub> จากน้ำ ขับเคลื่อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	[14]
สวีเดน	Liquid Wind	2566 (สร้างโรงงาน 6 แห่งภายใน ปี พ.ศ. 2573)	45,000 ตัน/ปี	CO <sub>2</sub> จากอุตสาหกรรม และ H <sub>2</sub> จากน้ำ ขับเคลื่อนด้วย พลังงานลม	[15]
ออสเตรเลีย	ABEL	2566	60,000 ตัน/ปี	CO <sub>2</sub> ชีวภาพ และ H <sub>2</sub> จากน้ำ ขับเคลื่อนด้วย พลังงานแสงอาทิตย์	[16]
นอร์เวย์	Swiss Liquid Future/Thyssenkrupp	ไม่มีข้อมูล	80,000 ตัน/ปี	CO <sub>2</sub> จากโรงงาน FeSi (ส่วนผสมของเหล็กกล้า) และ H <sub>2</sub> จากน้ำ ขับเคลื่อน ด้วยพลังงานน้ำ	[17]
นอร์เวย์	Consortium/CRI	2567	100,000	CO <sub>2</sub> และ H <sub>2</sub> จากน้ำ	[18]
แคนาดา	Renewable Hydrogen Canada (RH <sub>2</sub> C)	ไม่มีข้อมูล	120,000 ตัน/ปี	CO <sub>2</sub> และ H <sub>2</sub> จากน้ำ ขับเคลื่อนด้วยพลังงานน้ำ	[19]
เบลเยียม	Consortium at the port of Antwerp	ไม่มีข้อมูล	8,000 ตัน/ปี	CO <sub>2</sub> และ H <sub>2</sub> จากน้ำ	[20]
เบลเยียม	Consortium at the port of Ghent	ไม่มีข้อมูล	46,000- 180,000 ตัน/ปี	CO <sub>2</sub> จากอุตสาหกรรม และ H <sub>2</sub> จากน้ำ	[21]
เนเธอร์แลนด์	Consortium Nouryon/ Gasunie/BioMCN และอีก 3 บริษัท	ไม่มีข้อมูล	15,000 ตัน/ปี	CO <sub>2</sub> และ H <sub>2</sub> จากน้ำ	[22]

**ตารางที่ 3.1.2** โรงงานผลิต e-methanol ที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบันและมีแผนการสร้างในอนาคต (ต่อ)

ประเทศ	บริษัท	ปี พ.ศ. ที่เริ่ม	กำลังการผลิต	สารตั้งต้น	อ้างอิง
เยอรมนี	Dow	ไม่มีข้อมูล	200,000 ตัน/ปี	CO <sub>2</sub> และ H <sub>2</sub> จากน้ำ	[23]
เดนมาร์ก	Consortium บริษัทเอกชน	2566-2573	ไม่มีข้อมูล	CO <sub>2</sub> จากโรงไฟฟ้าขยะและชีวมวล และ H <sub>2</sub> จากน้ำขับเคลื่อนด้วยพลังงานลม	[24]
เยอรมนี	Consortium	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล	CO <sub>2</sub> จากโรงปูน และ H <sub>2</sub> จากน้ำ ขับเคลื่อนด้วยพลังงานลม	[25]

ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันผนวกกับอิเล็กโทรไลซิสจะมีความพร้อมเชิงเทคโนโลยีในระดับสูงมาก (TRL 8-9) แต่กระบวนการผลิตเมทานอลด้วยเคมีไฟฟ้าแบบขั้นตอนเดียวผ่านปฏิกิริยา CO<sub>2</sub>RR ยังคงมีความน่าสนใจทั้งในเชิงเทคโนโลยีและเชิงเศรษฐศาสตร์เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวมีศักยภาพในการลดต้นทุน CapEx ลงได้จากการลดทอนขั้นตอนการผลิตและการหลีกเลี่ยงการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่เสี่ยงต่อการระเบิด แต่เนื่องจากความพร้อมทางเทคโนโลยีของกระบวนการดังกล่าวยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำ (TRL 2-4) ทำให้ขาดข้อมูลที่เป็นสำหรับการประเมินค่าความคุ้มค่าของเทคโนโลยีดังกล่าวได้ ในปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการ CO<sub>2</sub>RR เพื่อผลิตเมทานอลนั้นมุ่งไปที่การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความจำเพาะสูง ซึ่งเทียบเคียงจากค่าประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ (Faradaic efficiency) และระบบการทำปฏิกิริยาที่ให้อัตราการผลิตสูง ดังแสดงจากค่าความหนาแน่นกระแสของผลิตภัณฑ์ (Partial current density) ดังแสดงในรูปที่ 3.1.5 ประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ของผลิตภัณฑ์เมทานอลมีแนวโน้มสูงขึ้นจากงานวิจัยเชิงวิชาการ โดยเฉพาะเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสม เช่น Cu/ZnO [26] PdCu [27] และ CuSe [28] ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เติม Ionic liquid แต่กระนั้นความหนาแน่นกระแสของผลิตภัณฑ์ยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ห่างไกลจากเป้าอัตราการผลิตที่คุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจที่ >200 mA/cm<sup>2</sup> ความหนาแน่นกระแสที่ต่ำนั้นแสดงถึงประสิทธิภาพการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำและการเกิดผลิตภัณฑ์ในปริมาณน้อย ซึ่งจะเพิ่มความซับซ้อนในการแยกผลิตภัณฑ์และเพิ่มราคาต้นทุนของกระบวนการทั้งหมด



**รูปที่ 3.1.5** ความก้าวหน้าในประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์และความหนาแน่นกระแสของกระบวนการ CO<sub>2</sub>RR เพื่อเปลี่ยน CO<sub>2</sub> เป็นเมทานอล เอทานอล และโพรพานอล ที่มีรายงานในวรรณกรรม  
ที่มา: Guzmán และคณะ (2121) [29]

## ช่องว่างการพัฒนาที่สำคัญ

สำหรับการผลักดันให้การผลิตเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีความร้อน มีความเป็นไปได้และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์นั้นจำเป็นต้องจัดการกับปัญหาและอุปสรรคที่สำคัญซึ่งส่งผลกระทบต่อแรงจูงใจและความคุ้มค่าในการลงทุน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พลังงานที่ใช้ในกระบวนการแปลงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แหล่งที่มาและต้นทุนการผลิตไฮโดรเจน รวมถึงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ในส่วนของช่องว่างการพัฒนาที่สำคัญของ e-methanol ในประเทศไทยคือการพัฒนาาระบบอิเล็กทรอนิกส์ขนาดใหญ่ ซึ่งยังไม่ปรากฏในอุตสาหกรรมไทย ประกอบกับการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนให้สูงขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อการใช้ไฟฟ้าของประเทศและเหลือใช้สำหรับการผลิตสารเคมี ช่องว่างเหล่านี้คือ คอขวดที่สำคัญที่เป็นอุปสรรคต่อเทคโนโลยีการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้เป็นสารเคมีที่จับวาง เพราะหากประเทศไทยไม่มีการเปลี่ยนผ่านจากพลังงานปิโตรเลียม การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ การวิจัยพัฒนาปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันและ CO<sub>2</sub>RR ที่เป็นเทคโนโลยีของไทยย่อมสามารถเพิ่มเติมต่อให้อุตสาหกรรมไทยสามารถลดอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างยั่งยืน

## กลยุทธ์การพัฒนาเพื่อการพลิกผัน Pain point to gain point/Opportunity

ประเด็นหลักที่ต้องคำนึงในส่วนของการผลิตเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คือ ต้นทุนการผลิตทั้งในส่วนของค่าไฟฟ้าและก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจำเป็นต้องหาแหล่งผลิตที่ต้นทุนต่ำเพื่อให้กระบวนการถึงจุดคุ้มทุนและคุ้มค่าต่อการลงทุน

## แนวทางดำเนินการและผลที่คาดว่าจะได้รับ

การเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเมทานอลจำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือจากหลายภาคส่วนในการวิจัยพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการผลิต ตลอดจนการนำผลงานวิจัยระดับห้องปฏิบัติการไปขยายผลและต่อยอดสู่เชิงพาณิชย์เพื่อลดการนำเข้าเมทานอลจากต่างประเทศและตอบโจทย์ในแง่ของเศรษฐกิจหมุนเวียน เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มและใช้ประโยชน์จากของเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน ซึ่งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับนอกจากจะช่วยลดการเกิดภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศแล้วยังสร้างเสถียรภาพด้านวัตถุดิบเพื่อความยั่งยืนของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีในประเทศไทย รวมถึงการสร้างงาน สร้างรายได้ให้กับประชากร และเพิ่มสภาพคล่องทางเศรษฐกิจ

## ประเด็นที่มุ่งเน้น: โอกาสของภาคอุตสาหกรรม (Issue in Focus: Industrial sector opportunities)

ปัจจุบันหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนได้เริ่มให้ความสำคัญกับการศึกษาวิจัยการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืนโดยการเปลี่ยนเป็นสารมูลค่าเพิ่ม โดยคาดว่าในอนาคตอันใกล้ประเทศไทยจะสามารถต่อยอดในการสร้างโรงงานผลิตเมทานอลซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมเคมีและเพิ่มเสถียรภาพด้านพลังงานอันเนื่องมาจากการลดการนำเข้าเมทานอลจากต่างประเทศ



## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Bowker, Methanol Synthesis from CO<sub>2</sub> Hydrogenation, ChemCatChem 11, 2019, 4238-4246.
- [2] G. Wang, D. Mao, X. Guo and J. Yu, Methanol synthesis from CO<sub>2</sub> hydrogenation over CuO-ZnO-ZrO<sub>2</sub>-M<sub>x</sub>O<sub>y</sub> catalysts (M=Cr, Mo and W), International Journal of Hydrogen Energy 44, 2019, 4197-4207.
- [3] T. Zhang, ZnO-ZrO<sub>2</sub> solid solution catalyst for highly selective hydrogenation of CO<sub>2</sub> to methanol, Chinese Journal of Catalysis 38, 2017, 1781-1783.
- [4] <http://opms.diw.go.th/ReportHaz/Jan-Dec2020.pdf> (accessed date: June 05, 2021).
- [5] <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/methanol-market> (accessed date: June 05, 2021).
- [6] <https://www.carbonrecycling.is/> (accessed date: June 05, 2021).
- [7] <https://www.mitsui.com/jp/en/index.html> (accessed date: June 05, 2021).
- [8] H. Zhang, L. Wang, J. Van herle, F. Maréchal and U. Desideri, Techno-Economic Optimization of CO<sub>2</sub>-to-Methanol with Solid-Oxide Electrolyzer, Energies 12, 2019.
- [9] L. Guo, J. Sun, Q. Ge and N. Tsubaki, Recent advances in direct catalytic hydrogenation of carbon dioxide to valuable C<sub>2+</sub> hydrocarbons, Journal of Materials Chemistry A 6, 2018, 23244-23262.
- [10] J. Zhong, X. Yang, Z. Wu, B. Liang, Y. Huang and T. Zhang, State of the art and perspectives in heterogeneous catalysis of CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol, Chem Soc Rev 49, 2020, 1385-1413.
- [11] <https://energyindustryreview.com/oil-gas/h2teesside-uks-largest-blue-hydrogen-project/> (accessed date: May 16, 2021).
- [12] IRENA, Innovation Outlook: Renewable Methanol, 2021.
- [13] <https://www.carbonrecycling.is/> (accessed date: May 16, 2021).
- [14] [https://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2020-01/caos-tsd011620.php#:~:text=The world's first demonstration project,liquid fuels from solar energy](https://www.eurekalert.org/pub_releases/2020-01/caos-tsd011620.php#:~:text=The world's first demonstration project,liquid fuels from solar energy) (accessed date: May 16, 2021).
- [15] <https://www.liquidwind.se/> (accessed date: May 16, 2021).
- [16] <https://www.abelenergy.com.au/> (accessed date: May 16, 2021).
- [17] <https://www.swiss-liquid-future.ch/> (accessed date: May 16, 2021).
- [18] CRI, Commercial scale CO<sub>2</sub>-to-methanol plant in Norway, CO<sub>2</sub> Value EU workshop on Innovation Fund Brussels, 2019.
- [19] <http://www.renewableh2canada.ca/> (accessed date: May 16, 2021).
- [20] <https://www.inovyn.com/news/inovyn-plays-role-in-ambitious-power-to-methanol-project-at-antwerp/> (accessed date: May 16, 2021).
- [21] AET, Towards a new carbon-neutral economy in the Ghent area of North Sea Port, 2019.
- [22] <https://www.nouryon.com/news-and-events/news-overview/2020/nouryon-led-consortium-wins-eu-backing-for-pioneering-green-hydrogen-project/> (accessed date: May 16, 2021).
- [23] J. Schmidt, Large scale renewable methanol- Chances and challenges from an industrial producers view, Methanol: a sustainable, scalable, storable energy carrier, A joint initiative by Lund university and the fastwater consortium, 2020.
- [24] Maersk, Leading Danish companies join forces on an ambitious sustainable fuel project, 2020.
- [25] <https://www.westkueste100.de/en/news/> (accessed date: May 16, 2021).



## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

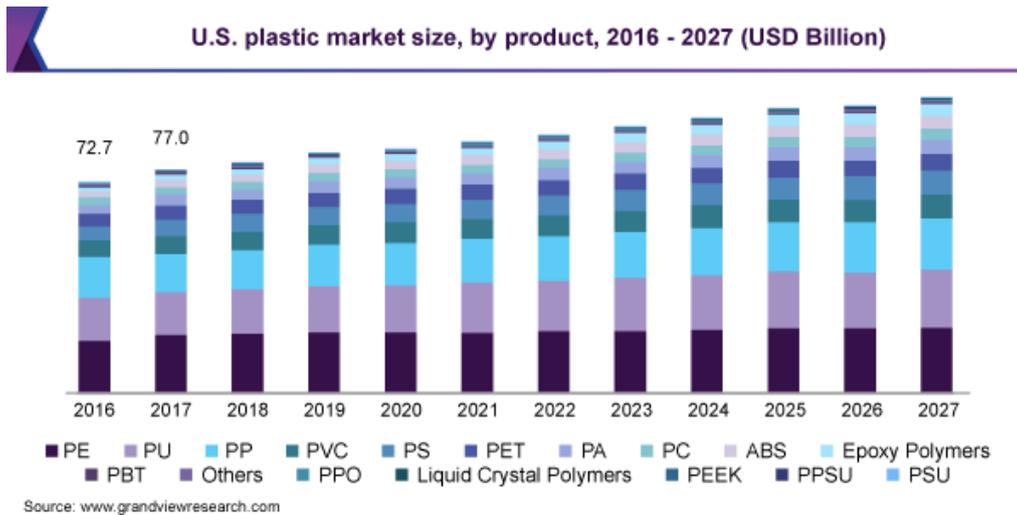
- [26] J. Albo and A. Irbien, Cu<sub>2</sub>O-loaded gas diffusion electrodes for the continuous electrochemical reduction of CO<sub>2</sub> to methanol, *Journal of Catalysis* 343, 2016, 232-239.
- [27] L. Lu, X. Sun, J. Ma, D. Yang, H. Wu, B. Zhang, J. Zhang and B. Han, Highly Efficient Electroreduction of CO<sub>2</sub> to Methanol on Palladium–Copper Bimetallic Aerogels, *Angewandte Chemie-International Edition* 57, 2018, 14149-14153.
- [28] D. Yang, Q. Zhu, C. Chen, H. Liu, Z. Liu, Z. Zhao, X. Zhang, S. Liu and B. Han, Selective electroreduction of carbon dioxide to methanol on copper selenide nanocatalysts, *Nature Communications* 10, 2019, 677.
- [29] H. Guzmán, N. Russo and S. Hernández, CO<sub>2</sub> valorisation towards alcohols by Cu-based electrocatalysts: challenges and perspectives, *Green Chemistry* 23, 2021, 1896-1920.



## 3.2 การผลิตโอเลฟินส์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

### ตลาดและการแข่งขัน

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อย่างหลากหลาย โดยเฉพาะใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าต่าง ๆ ได้แก่ เคมีภัณฑ์ สารเคมี และเชื้อเพลิงสังเคราะห์ เช่น พอลิเมอร์ ยูเรีย เมทานอล และไดเมทิลอีเทอร์ อย่างไรก็ตามวัฏจักรการผลิต/ใช้งานของผลิตภัณฑ์บางชนิดยังคงมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ เช่น การใช้ปุ๋ยที่ผลิตจากยูเรีย รวมถึงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง นับเป็นจุดอ่อนสำคัญที่ทำให้เป้าหมายในการทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิเป็นศูนย์นั้นไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงแตกต่างจากการใช้ผลิตภัณฑ์จำพวกพอลิเมอร์ที่ไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับเข้าสู่บรรยากาศ จึงมีความน่าสนใจมากกว่า เพราะนอกจากจะเป็นการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพแล้วยังไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นอีกด้วย ปัจจุบันหลายบริษัททั่วโลกประสบความสำเร็จในการพัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่อเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น บริษัท Asahi Kasei ของญี่ปุ่น ผลิตโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) (660,000 ตัน/ปี) จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อใช้ผลิตขวดพลาสติกและเคลือบผิวเลนส์ [1] ขณะที่บริษัท Covestro ในเยอรมนี พัฒนานวัตกรรมในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการทำปฏิกิริยาร่วมกับเอทิลีนออกไซด์เกิดเป็นโพลีออล (Polyol) ที่ใช้เป็นสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเพื่อผลิตโพลียูรีเทน (Polyurethane, PU) ภายใต้แบรนด์ Cardyon ด้วยกำลังผลิต 5,000 ตัน/ปี ซึ่งถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตที่นอน พื้นสนามกีฬา เส้นใยสังเคราะห์ และส่วนประกอบของอุปกรณ์ตกแต่งภายในรถยนต์ [2,3] เนื่องจากโพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) และโพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) มีความต้องการในตลาดสูงเป็นลำดับต้น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น (รูปที่ 3.2.1) [4] การแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเอทิลีนและโพรพิลีนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักในกลุ่ม “โอเลฟินส์” ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีนจึงเป็นอีกหนึ่งเป้าหมายสำคัญที่ทำหายอย่างมากของหลาย ๆ บริษัท ล่าสุดในปี พ.ศ. 2563 บริษัท L’Oreal ประสบความสำเร็จในการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรม เพื่อผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับใส่เครื่องสำอาง โดยร่วมมือกับบริษัท LanzaTech ซึ่งทำหน้าที่ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากภาคอุตสาหกรรม และเปลี่ยนเป็นเอทานอลด้วยกระบวนการทางชีววิทยา และบริษัท Total ที่พัฒนานวัตกรรมร่วมกับ IFP Axens ในการเปลี่ยนเอทานอลเป็นเอทิลีนด้วยกระบวนการดึงน้ำออกเพื่อผลิตโพลีเอทิลีนหรือพลาสติกสังเคราะห์ให้กับ L’Oreal ที่นำโพลีเอทิลีนไปผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับใส่เครื่องสำอาง [5] สำหรับประเทศไทย โรงผลิตโอเลฟินส์ (เอทิลีน, โพรพิลีน และบิวทิลีน) หลักในประเทศทั้งของบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล, บริษัท ไทยโอเลฟินส์ และบริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ ยังใช้วัตถุดิบจากโรงแยกก๊าซธรรมชาติ (อีเทน, โพรเพน, ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG), ก๊าซธรรมชาติเหลว (NGL) และโรงกลั่นน้ำมัน (แนฟทา)) เป็นสารตั้งต้นในการผลิต อย่างไรก็ตาม หลายปัจจัยผลักดันให้กลุ่มธุรกิจดังกล่าวเริ่มปรับกลยุทธ์การดำเนินงาน เพื่อเพิ่มศักยภาพด้านการแข่งขัน ทั้งความผันผวนของราคาน้ำมันดิบ สถานการณ์การขาดแคลนแหล่งปิโตรเลียม กรณีพิพาททางการค้าระหว่างสหรัฐฯ และจีน รวมถึงกระแสของโลกในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยมุ่งเน้นการควบคุม/ลดต้นทุนการผลิต ผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น รวมถึงมองหาแหล่งวัตถุดิบอื่นเพื่อสร้างความได้เปรียบในด้านวัตถุดิบ ซึ่งถ้ากลุ่มธุรกิจดังกล่าวสามารถพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคยเป็นเพียงก๊าซเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตให้เกิดเป็นโอเลฟินส์ที่สามารถต่อยอดและเพิ่มมูลค่าเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยมีต้นทุนการผลิตที่สามารถแข่งขันได้กับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ การลงทุนกับเรื่องนี้ก็คงเป็นสิ่งที่ไม่ไกลเกินความจริง สามารถตอบโจทย์และครอบคลุมการแก้ปัญหาอย่างรอบด้านและจะเป็นจุดเปลี่ยนสำคัญของอุตสาหกรรมโรงกลั่นและปิโตรเคมีของไทยในอนาคตอีกด้วย



รูปที่ 3.2.1 ตลาดและความต้องการของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

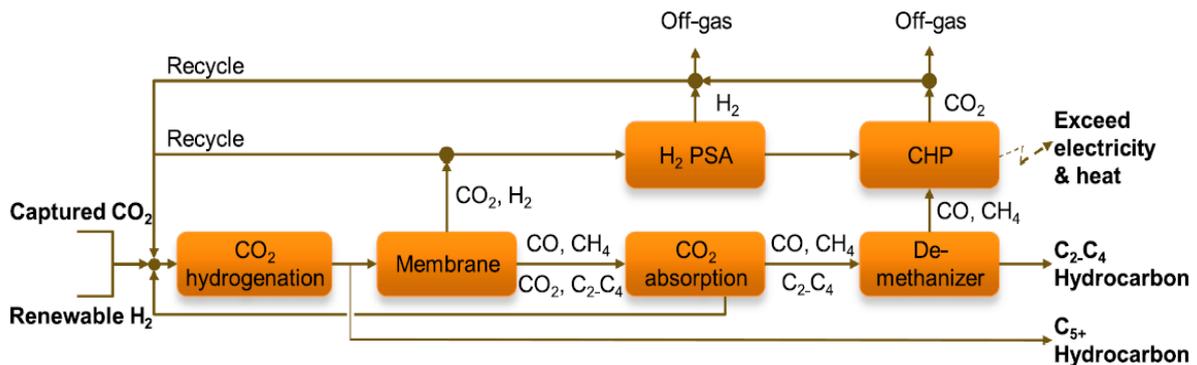
ที่มา: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/global-plastics-market> (accessed date: May 10, 2021) [4]

### ความพร้อมทางด้านเทคโนโลยีในปัจจุบัน (Technology readiness level) และการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรม

1. การแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโอเลฟินส์ด้วยการทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจน ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation)

ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโอเลฟินส์ด้วยการทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตโดยใช้เชื้อเพลิงจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน หรือที่เรียกว่า ไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงสะอาด (Green hydrogen) ถูกศึกษาโดย Do และคณะ [6] โดยแบ่งกระบวนการออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ 1) การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ 2) การแยกและทำให้บริสุทธิ์ที่ประกอบด้วยหน่วยต่าง ๆ ได้แก่ Membrane separation, H<sub>2</sub> pressure swing adsorption (H<sub>2</sub> PSA), CO<sub>2</sub> absorption และ De-methanizer โดยมี Combined heat and power (CHP) เป็นหน่วยผลิตความร้อนและไฟฟ้าเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต (รูปที่ 3.2.2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ศึกษาตัดกั๊บจากก๊าซทิ้งของโรงไฟฟ้าถ่านหิน (21 mol% CO<sub>2</sub>, 3 mol% O<sub>2</sub>, 66 mol % N<sub>2</sub> และ 11 mol% H<sub>2</sub>O) และก๊าซไฮโดรเจนผลิตจากกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน (แสงอาทิตย์และลม) ผลการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการตามสมมุติฐานข้อมูลโรงงานราคาวัตถุดิบและค่าสาธารณูปโภค ดังแสดงในตารางที่ 3.2.1 พบว่าเงินลงทุนรวมทั้งหมด (Total capital investment) ในการสร้างโรงงานคิดเป็นมูลค่า 3,240 ล้านดอลลาร์สหรัฐ โดยมีต้นทุนในการดำเนินงานรวม (Total operating cost, TOC) เป็น 3,564 ล้านดอลลาร์สหรัฐต่อปี และเมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม ซึ่งประกอบด้วยโอเลฟินส์ พบว่ามีค่าเท่ากับ 3.58 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม (กำลังการผลิต 1 ล้านตัน หรือ 125,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง) โดยขึ้นกับราคาของก๊าซไฮโดรเจนเป็นหลัก (71 เซนต์) (รูปที่ 3.2.3) กระบวนการผลิตดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการใช้คาร์บอนและพลังงานสูงถึง 99.2 และ 42.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศในปริมาณ -1.85 กิโลกรัม CO<sub>2</sub>ต่อกิโลกรัม C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> hydrocarbon เมื่อเปรียบเทียบกับราคาขายของเอทิลีนในปี พ.ศ. 2561-2564 ที่ 1.025-1.155 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม และโพรพิลีนที่ 0.974-1.015 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม พบว่าส่วนต่างระหว่างราคาขายกับต้นทุนการผลิตที่เกิดจากราคาที่สูงของก๊าซไฮโดรเจนเป็นข้อจำกัดสำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการผลิต แต่ก็ยังถือว่าอยู่ในช่วงราคาที่มีความเป็นไปได้ถ้าหากมีเทคโนโลยีที่มีศักยภาพเพียงพอที่จะสามารถลดต้นทุนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนลง

สำหรับความพร้อมของประเทศไทย การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าจากกังหันลม หรือที่เรียกว่าระบบ Wind Hydrogen Hybrid มาแล้วตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 [7] แม้ว่าก๊าซไฮโดรเจนทั้งหมดจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) สำหรับผลิตไฟฟ้าจ่ายให้กับศูนย์การเรียนรู้ กฟผ. ลำตะคอง แต่ถ้าในอนาคตมีการผลิตออกจำหน่ายด้วยราคาขายระดับเดียวกับที่ผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล หรือก๊าซธรรมชาติ การผลิตโอเลฟินส์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะเป็นกระบวนการผลิตที่นำลงทุนอย่างมาก เพราะสามารถใช้วัตถุดิบที่มีในประเทศโดยไม่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ นอกจากนี้ล่าสุดในปี พ.ศ. 2564 ได้มีการเปิดตัวโครงการต้นแบบอาคารเก็บพลังงานและผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ หรือ “บ้านผีเสื้อ” ที่สามารถผลิตไฮโดรเจนจากเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจากแสงอาทิตย์ด้วยเช่นกัน [8]



**รูปที่ 3.2.2** แผนภาพกระบวนการผลิตไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับจากก๊าซทิ้งของโรงไฟฟ้าถ่านหินและก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตโดยใช้เชื้อเพลิงจากพลังงานหมุนเวียน  
ที่มา: Do และคณะ (2020) [6]

**ตารางที่ 3.2.1** สมมุติฐานข้อมูลโรงงาน ราคาวัตถุดิบและค่าสาธารณูปโภคที่ใช้ประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม

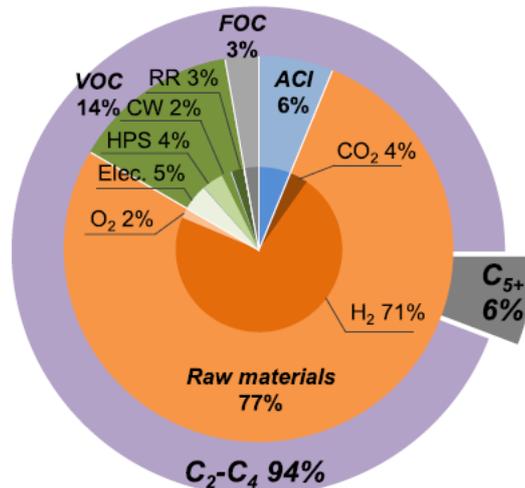
สมมุติฐานข้อมูลโรงงาน	สถานที่ตั้ง	ทวีปอเมริกาเหนือ
	ปีที่ศึกษา (พ.ศ.)	2561
	อายุทางเศรษฐกิจ (Economic life of the project) (ปี)	30
	อัตราดอกเบี้ย (เปอร์เซ็นต์)	6
	วิธีการคิดค่าเสื่อมราคา	แบบเส้นตรง
	ชั่วโมงดำเนินงาน (ชั่วโมงต่อปี)	8000
	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (ค่าจ้างแรงงาน) (เปอร์เซ็นต์)	15
	ค่าใช้จ่ายโรงงาน (ค่าซ่อมบำรุงรักษา) (เปอร์เซ็นต์)	25



**ตารางที่ 3.2.1** สมมุติฐานข้อมูลโรงงาน ราคาวัตถุดิบและค่าสาธารณูปโภคที่ใช้ประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม (ต่อ)

ราคาวัตถุดิบและ ค่าสาธารณูปโภค	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม)	0.035
	ก๊าซไฮโดรเจน (ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม)	3.53
	ก๊าซออกซิเจน (ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม)	0.04
	ตัวเร่งปฏิกิริยา (ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน)	2,092
	เมมเบรน (ดอลลาร์สหรัฐต่อตารางเมตร)	100
	อัตราการเปลี่ยนเมมเบรน (เปอร์เซ็นต์ต่อปี)	25
	โมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA) (ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม)	0.97
	ตัวดูดซับ (ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม)	6.11
	อัตราสึกกร่อนของตัวดูดซับ (เปอร์เซ็นต์ต่อปี)	10
	ค่าไฟฟ้า (ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์)	0.06
	ไอน้ำความดันต่ำ (Low-pressure steam) (ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน)	10.5
	ไอน้ำความดันสูง (High-pressure steam) (ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน)	14.5
	ราคาน้ำหล่อเย็น (ดอลลาร์สหรัฐต่อตารางเมตร)	0.03
	หน่วยทำความเย็น (ดอลลาร์สหรัฐต่อจิกะจูล)	8.53

ที่มา: Do และคณะ (2020) [6]

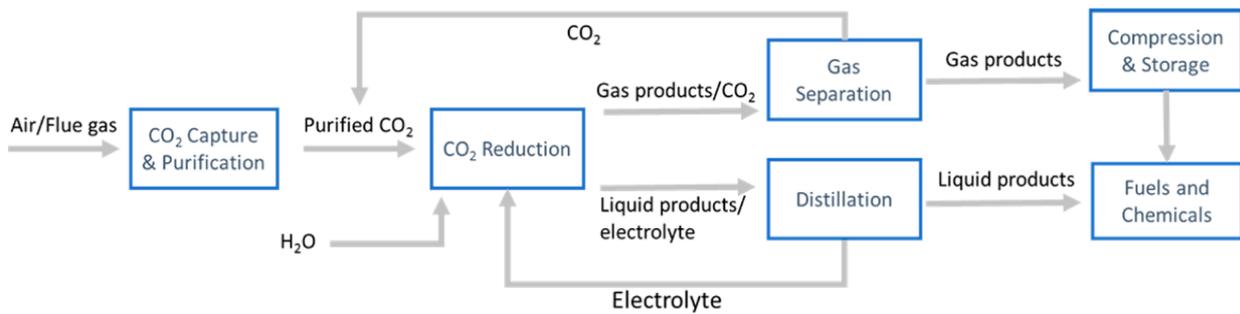


**รูปที่ 3.2.3** สัดส่วนต้นทุนการผลิตไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม จากกระบวนการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน โดย FOC = Fixed Operating Costs, VOC = Variable Operating Costs, ACI = Annualized Capital Cost, RR = Replacement and Refill materials (make-up materials), CW = Cooling Water, HPS = High Pressure Steam, Elec. = Electricity

ที่มา: Do และคณะ (2020) [6]

2. การแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโอเลฟินส์ด้วยปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้า

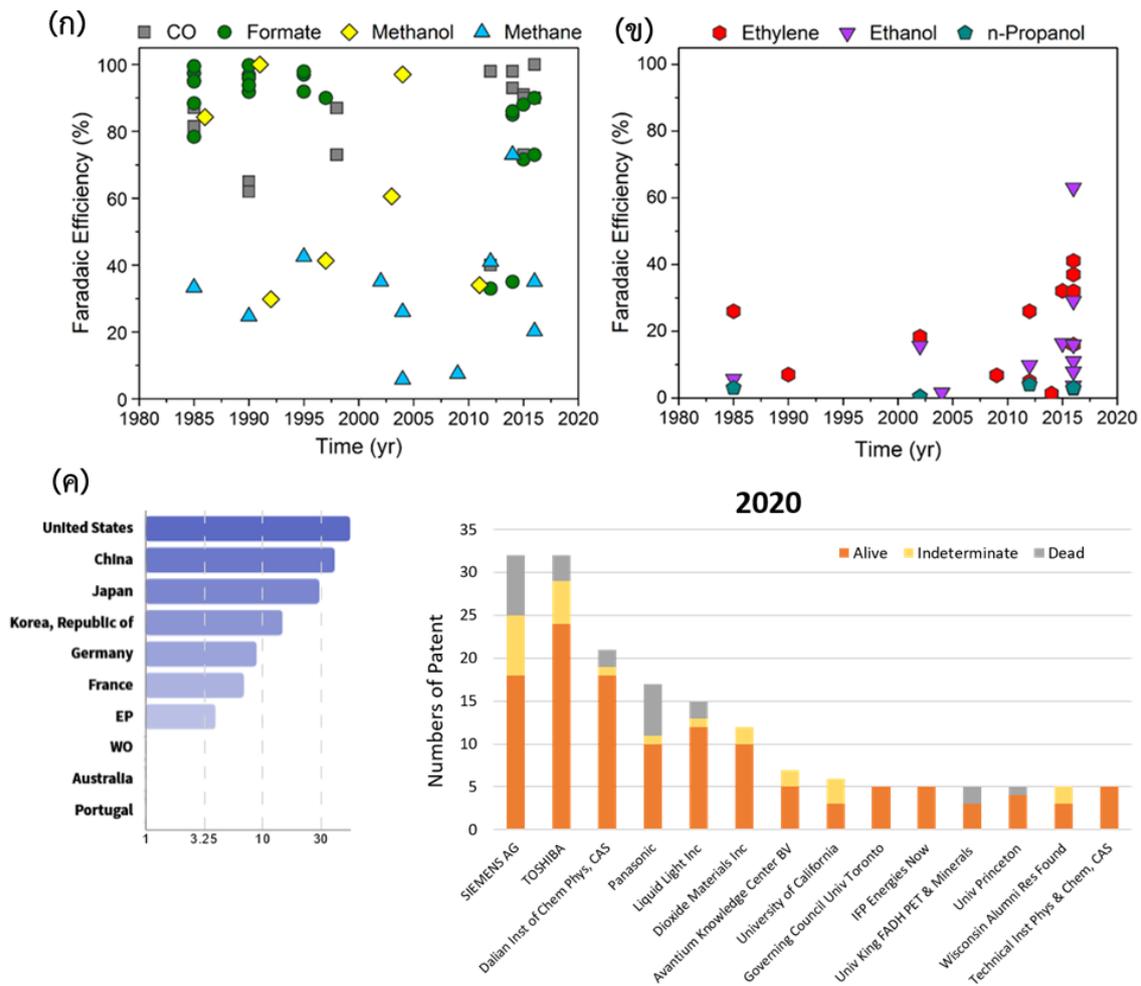
เทคโนโลยีการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอาศัยไฟฟ้าในการทำให้เกิดปฏิกิริยา (Electrochemical CO<sub>2</sub> reduction reaction, CO<sub>2</sub>RR) (รูปที่ 3.2.4) เป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ผลิตสารเคมีต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย ทั้งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 1 อะตอม (C1) เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ กรดฟอร์มิก และเมทานอล รวมถึงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2 อะตอม (C2) เช่น เอทานอล และเอทิลีน (รูปที่ 3.2.5ก และ 3.2.5ข) ซึ่งพลังงานไฟฟ้าจะไปกระตุ้นให้เกิดการถ่ายเทโปรตอนควบคู่กับอิเล็กตรอน (H<sup>+</sup> coupled e<sup>-</sup> transfer) จากโมเลกุลของน้ำไปยังโมเลกุลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนไปเป็นสารอื่น ๆ เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิและความดันต่ำ จึงมีความน่าสนใจในด้านต้นทุนของระบบที่อาจจะต่ำกว่าและมีความยืดหยุ่นในด้านขนาดโรงงานผลิตมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ต้องอาศัยก๊าซไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา (ไฮโดรจีเนชัน) อีกทั้งยังสามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานทดแทนที่ผลิตมากเกินความต้องการซึ่งเป็นทิศทางที่เป็นไปได้มากขึ้นในอนาคต ทำให้เทคโนโลยีนี้มีอัตราการปล่อยคาร์บอนเป็นลบได้ (Carbon negative) แต่ในขณะเดียวกันเทคโนโลยี CO<sub>2</sub>RR นั้นยังขาดความพร้อมเชิงเทคโนโลยี (Technology Readiness Level, TRL) โดยมี TRL ที่ระดับ 2-6 และการพัฒนาเทคโนโลยียังถูกจำกัดในระดับวิชาการและบริษัท Startups จากการสืบค้นสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องพบว่า เทคโนโลยีนี้มีแนวโน้มกำลังเติบโตอย่างมากโดยเฉพาะในระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา โดยมีผู้เล่นหลักอยู่ในทวีปอเมริกาเหนือ ทวีปยุโรป และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แก่ จีน และญี่ปุ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.2.5ค



รูปที่ 3.2.4 แผนผังกระบวนการรีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical CO<sub>2</sub> reduction reaction, CO<sub>2</sub>RR)

ที่มา: Jouny และคณะ (2018) [9]



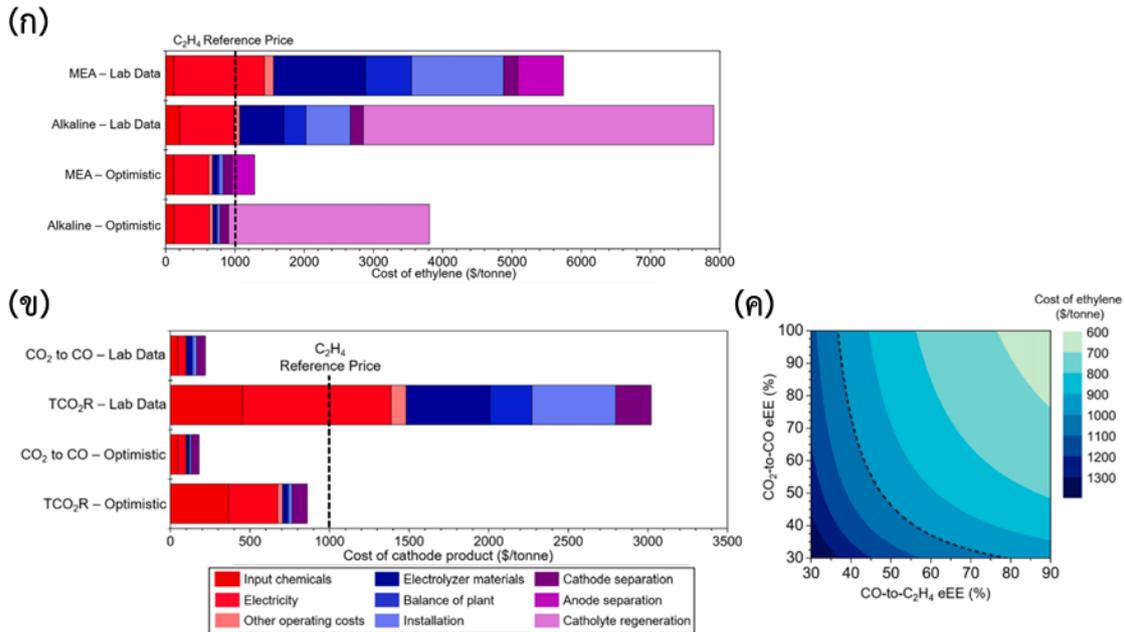


**รูปที่ 3.2.5** ความก้าวหน้าในประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ของกระบวนการ CO<sub>2</sub>RR เพื่อเปลี่ยน CO<sub>2</sub> เป็น (ก) ผลิตภัณฑ์ C1 และ (ข) ผลิตภัณฑ์ C2 ที่มีรายงานในวรรณกรรม และ (ค) ผู้ถือครองสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ CO<sub>2</sub>RR เพื่อผลิตเอทีลีน

ที่มา: Jouny และคณะ (2018) [9]

การผลิตเอทีลีนผ่านกระบวนการ CO<sub>2</sub>RR นั้นต้องผ่านกระบวนการ C-C coupling เพื่อสร้างพันธะระหว่างคาร์บอน 2 อะตอม ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้บนตัวเร่งปฏิกิริยาทองแดงในสถานะอัลคาไลน์ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าของกระบวนการผลิตเอทีลีนนั้นจะพัฒนาขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในระยะ 10 ปีที่ผ่านมาดังแสดงในรูปที่ 3.2.5ข แต่โดยรวมยังมีประสิทธิภาพด้อยกว่าการผลิตสารประกอบ C1 (รูปที่ 3.2.5ก) จากการศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ โดย National Renewable Energy Laboratory (NREL) [10] ในปี พ.ศ. 2562 พบว่า กระบวนการ CO<sub>2</sub>RR ไปเป็นเอทีลีนโดยตรงในเซลล์อิเล็กโทรไลเซอร์แบบอัลคาไลน์นั้นไม่สามารถทำได้อย่างคุ้มทุน ณ ราคาตลาดเอทีลีนปัจจุบันที่ 600-1200 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน ถึงแม้ว่าจะนำประสิทธิภาพเป้าหมายของเซลล์ไฟฟ้าในอุดมคติมาใช้ในการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ก็ตาม ทั้งนี้เพราะประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบถูกจำกัดด้วยร้อยละการแปลงผันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> conversion) ที่ต่ำ เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งต้นบางส่วนจะสูญหายไปในรูปแบบเกลือคาร์บอเนตจากการทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสแก่ที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการผ่านเซลล์ไฟฟ้า 1 ครั้ง (Single-pass conversion) ถูกจำกัดที่ 30-40 เปอร์เซ็นต์ จึงมีราคาต้นทุนสูงและต้องอาศัยการอุดหนุนจากรัฐเพื่อเพิ่มแรงจูงใจในการนำกระบวนการดังกล่าวไปใช้จริงในภาคอุตสาหกรรม [10] เพื่อก้าวข้ามปัญหาขวดดังกล่าว ในปี พ.ศ. 2564 Sisler และคณะ [11]

ได้นำเสนอกระบวนการที่มีความเป็นไปได้ ทางเศรษฐศาสตร์ที่สูงขึ้น โดยการใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแทนเดิมเพื่อแบ่งปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ การใช้อิเล็กโทรไลเซอร์ประเภท solid oxide ที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และออกซิเจนอย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้สารละลายเบสเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นเกลือคาร์บอเนต จากนั้นจึงนำก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ผลิตได้ผ่านเข้าสู่เซลล์อิเล็กโทรไลเซอร์แบบอัลคาไลน์ที่อุณหภูมิต่ำเพื่อผลิตเอทิลีน ดังแสดงในรูปที่ 3.2.6 ระบบปฏิบัติการแบบแทนเดมนี้อาจมีโอกาที่จะคุ้มทุนทางเศรษฐกิจมากขึ้นโดยเฉพาะเมื่อเซลล์ไฟฟ้าอัลคาไลน์มีประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์อย่างน้อย 80 เปอร์เซ็นต์



**รูปที่ 3.2.6** ราคาประเมินต้นทุนการผลิตเอทิลีนจากกระบวนการ CO<sub>2</sub>RR (ก) เมื่อใช้เซลล์ไฟฟ้าประเภท Membrane electrode assemble (MEA) ที่ pH เป็นกลาง และ เมื่อใช้เซลล์ไฟฟ้าในสถานะอัลคาไลน์ (ข) การประเมินต้นทุนของระบบปฏิบัติการแบบแทนเดมนที่ผสมผสานเซลล์ไฟฟ้าแบบ solid oxide และอัลคาไลน์ (พิจารณาจากเซลล์อูมคิตที่มีประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ 90 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน 53 เปอร์เซ็นต์ และ Single-pass conversion 53 เปอร์เซ็นต์) (ค) โดยต้นทุนของเอทิลีนขึ้นกับประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ของทั้งเซลล์ไฟฟ้า Solid oxide และ เซลล์อัลคาไลน์ เส้นประสีดำคือราคาต้นทุนของเอทิลีนที่ 1,000 ดอลลาร์ต่อตัน

ที่มา: Sisler และคณะ (2021) [11]

### ช่องว่างการพัฒนาที่สำคัญ

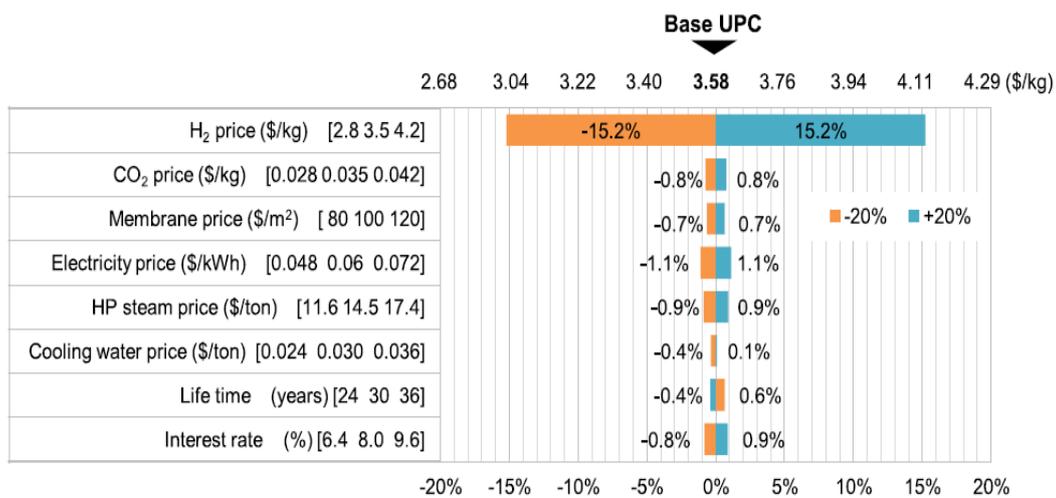
1. การแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโอเลฟินส์ด้วยการทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนผ่านปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน

ปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวกำหนดต้นทุนในการผลิตโอเลฟินส์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน คือราคาของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตจากเชื้อเพลิงสะอาด จากรูปที่ 3.2.7 จะเห็นว่าถ้าราคาของก๊าซไฮโดรเจนลดลงจาก 3.5 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม เป็น 2.8 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม ต้นทุนในการผลิตโอเลฟินส์จะลดลงจาก 3.58 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม เหลือเพียง 3.04 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม คิดเป็น 15.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อพิจารณาราคาก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตจากแหล่งวัตถุดิบอื่น เช่น ถ่านหิน ก๊าซมีเทน หรือชีวมวล พบว่าแม้จะมีราคาที่ถูกกว่าก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตจากการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงจากพลังงานหมุนเวียน แต่กระบวนการผลิตโอเลฟินส์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนเหล่านั้นปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศในปริมาณที่สูงกว่า แม้จะมีกระบวนการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และนำไปใช้ประโยชน์ (Carbon Capture and Utilization: CCU) ร่วมด้วยแล้วก็ตาม (รูปที่ 3.2.8 ก) [6] ดังนั้นแนวทางที่เหมาะสม มีความเป็นไปได้



และน่าสนใจในแง่ของความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการแปรรูป ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโอเลฟินส์ คือการเลือกใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตจากการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงจากพลังงานหมุนเวียนที่มีราคาต่ำที่สุด จากรูปที่ 3.2.8 จะเห็นว่าก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตจากเชื้อเพลิงสะอาดในอินเดียมีราคาถูกที่สุดเมื่อเทียบกับสหรัฐอเมริกา ตะวันออกกลาง แอฟริกาเหนือ ยุโรป และญี่ปุ่น ซึ่งถ้านำมาใช้ก็จะทำให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาของ Centi และคณะ [12] แสดงให้เห็นว่าราคาไฮโดรเจนที่ผลิตด้วยเชื้อเพลิงสะอาดต้องอยู่ในช่วง 2-3 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม ถึงจะทำให้กระบวนการผลิตโอเลฟินส์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแข่งขันได้กับการผลิตด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้ในปัจจุบัน จากการคาดการณ์ขององค์กรวิจัย BloombergNEF ที่ประเมินว่าราคาไฮโดรเจนที่ผลิตด้วยเชื้อเพลิงสะอาด อาจลดลงจาก 2.5-6.8 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม ในปัจจุบัน (พ.ศ. 2563) เหลือเพียง 1.4 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม ในอีก 10 ปีข้างหน้า (พ.ศ. 2573) [13] ซึ่งเห็นว่ากระบวนการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโอเลฟินส์โดยใช้ไฮโดรเจนที่ผลิตด้วยเชื้อเพลิงสะอาดมีแนวโน้มเกิดขึ้นได้จริงในประเทศไทย

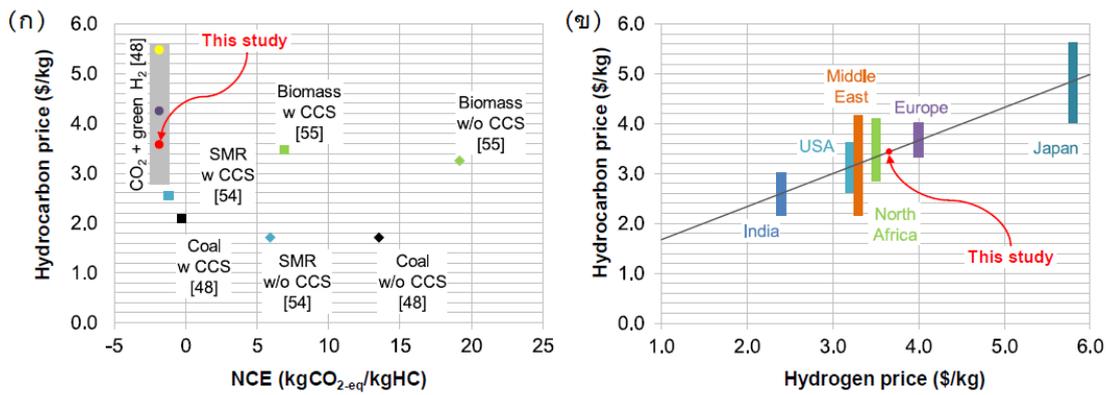
ราคาที่สูงของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตจากพลังงานหมุนเวียน ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากค่าไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการแยกน้ำ เมื่อพิจารณาการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนในกลุ่มพลังงานธรรมชาติ ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ ลม และน้ำ ของคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ) กระทรวงพลังงาน พบว่าต้นทุนอยู่ที่ 2.9-6.06 บาทต่อหน่วย [14] และในการผลิตไฮโดรเจน 1 กิโลกรัม ด้วยประสิทธิภาพการผลิต 100 เปอร์เซ็นต์ ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น 39.4 หน่วย (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [15] หมายความว่าค่าไฟฟ้าต่ำสุดที่ใช้ผลิตไฮโดรเจน 1 กิโลกรัม มีมูลค่าถึง 114.26-238.76 บาท หรือ 3.73-7.8 ดอลลาร์สหรัฐ (คิดอัตราแลกเปลี่ยน 30.6 บาท ต่อ 1 ดอลลาร์สหรัฐอเมริกา) เพื่อให้สามารถแข่งขันกับราคาก๊าซไฮโดรเจนในท้องตลาดได้จำเป็นต้องมีการควบคุมราคาค่าไฟฟ้าที่ใช้ให้มีค่าลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรอบสนับสนุนจากทางภาครัฐในการกำหนดนโยบายเพื่อส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน นอกจากนี้ การจัดเก็บภาษีคาร์บอนก็เป็นอีกหนึ่งกลไกสำคัญที่จะสร้างแรงจูงใจให้หลายภาคส่วนตื่นตัวและหันมาช่วยกันขับเคลื่อนให้กระบวนการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโอเลฟินส์เกิดขึ้นได้จริงในอนาคตอันใกล้



**รูปที่ 3.2.7** แผนภาพต้นทุนการผลิตไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตามการเปลี่ยนแปลงราคาในส่วนต่าง ๆ

ที่มา: Do และคณะ (2020) [6]



**รูปที่ 3.2.8** แผนภาพต้นทุนการผลิตไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคาร์บอน 2-4 อะตอม จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ก) เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากแหล่งวัตถุดิบต่าง ๆ และ (ข) เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตจากการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า โดยใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนในภูมิภาคต่าง ๆ

ที่มา: Do และคณะ (2020) [6]

2. การแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโอเลฟินส์ด้วยปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้า

ช่องว่างในการพัฒนาที่สำคัญสำหรับกระบวนการผลิตเอทิลีนด้วยเทคโนโลยี CO<sub>2</sub>RR คือ (1) พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงพาราแคต จาก 70 เปอร์เซ็นต์ ในปัจจุบันให้ถึงเป้าหมายที่ 90 เปอร์เซ็นต์ และ (2) พัฒนาเซลล์ไฟฟ้าเพื่อเพิ่ม Conversion ของ CO<sub>2</sub> ให้ถึงเป้าหมายที่ >50 เปอร์เซ็นต์ โดยการเพิ่มอุณหภูมิ ความดัน ที่ความเข้มข้นของสารละลายเบสที่ต่ำลง ตลอดจนศึกษาเรื่องความเสถียรและอายุการใช้งานของระบบเพื่อเพิ่มความพร้อมของเทคโนโลยีให้อยู่ในระดับที่สูงขึ้น

**กลยุทธ์การพัฒนาเพื่อการพลิกผัน Pain point to gain point/Opportunity**

1. การแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโอเลฟินส์ด้วยการทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนผ่านปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชั่น

ความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับปฏิกิริยาการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโอเลฟินส์ นอกจากจะช่วยให้สามารถพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพแล้ว ยังช่วยให้สามารถออกแบบกระบวนการผลิต ชนิด และขนาดของปฏิกรณ์ที่ใช้ รวมถึงขั้นตอนและวิธีการแยกได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะนำไปสู่กระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพที่ดีทั้งในแง่ของการใช้พลังงาน ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้น กลยุทธ์สำคัญประการแรกคือ ต้องพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการเลือกผลิตโอเลฟินส์อย่างจำเพาะเจาะจง [16-18] เพื่อที่จะได้ลดขั้นตอนหรือกระบวนการที่ซับซ้อนในการแยกผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลง ขณะเดียวกันความสามารถและความว่องไวในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นประเด็นที่ต้องพิจารณาควบคู่กันไปด้วย เนื่องจากในกรณีที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้น้อย การแยกและทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์เพื่อรีไซเคิลกลับไปใช้ในกระบวนการเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งต้องเลือกใช้ปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่เพียงพอเพื่อให้สามารถรองรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากที่ถูกรีไซเคิลกลับมาได้ นอกจากนี้อาจต้องใช้หลายกระบวนการร่วมกันเพื่อช่วยแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีปริมาณมากออกมาด้วยประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เช่น ใช้เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรนร่วมกับการดูดซับด้วยแอมโมเนีย เป็นต้น การเลือกใช้ปฏิกรณ์ที่มีความโดดเด่นด้านการถ่ายเทความร้อนที่ดีก็เป็นอีกหนึ่งกลยุทธ์ที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต เนื่องจากช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีและลดความเสี่ยงของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อาจขึ้นที่อุณหภูมิสูง

## 2. การแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโอเลฟินส์ด้วยปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้า

สำหรับกลยุทธ์การพัฒนาเทคโนโลยีการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเอทิลีนด้วยกระบวนการ CO<sub>2</sub>RR คือการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเกลือคาร์บอนที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา หรือการจับคู่กระบวนการผลิตเอทิลีนที่ขั้วแคโทดเข้ากับปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อผลิตสารเคมีอินทรีย์ที่มีมูลค่าตลาดสูงกว่าการผลิตออกซิเจนจากน้ำ อันเป็นปฏิกิริยามาตรฐานที่ขั้วแอโนดที่ใช้อ้างอิงในการคำนวณความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ดังที่กล่าวในเบื้องต้น งานวิจัยโดย Na และคณะ [19] เสนอว่าหากจับคู่ CO<sub>2</sub>RR เข้ากับปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเคมีฐานจากชีวมวล เช่น สารอนุพันธ์ของฟูราน จะยกระดับความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพิ่มขึ้นอย่างยิ่ง และสามารถเติมเต็มช่องว่างทางธุรกิจในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์จำเพาะซึ่งคาดการณ์ว่าจะมีการขยายตัวทางการตลาดสูง นอกจากนี้ความเป็นไปได้เชิงเทคโนโลยีแล้ว ปัจจัยหลักที่เป็นตัวกำหนดความคุ้มค่าของเทคโนโลยี CO<sub>2</sub>RR คือ ต้นทุนไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานทดแทน เช่น แสงอาทิตย์ หรือลม การคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นตั้งเป่าราคาไฟฟ้าไว้ที่ 60 สตางค์ต่อหน่วย (2 ¢/kWh) [11] ซึ่งมีมูลค่าต่ำกว่าราคากลางของพลังงานแสงอาทิตย์ที่กำหนดโดยคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) ในปี พ.ศ. 2562 ที่ 1.68 บาทต่อหน่วย ดังนั้นเพื่อความเป็นไปได้ของเทคโนโลยีจำเป็นต้องอาศัยการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนควบคู่ไปพร้อม ๆ กันและลดราคาพลังงานทดแทนให้ถูกลง

### แนวทางดำเนินการและผลที่คาดว่าจะได้รับ

การแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโอเลฟินส์ด้วยการทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนผ่านปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน



## ประเด็นที่มุ่งเน้น: โอกาสของภาคอุตสาหกรรม (Issue in Focus: Industrial sector opportunities)

ในความเป็นจริงหลายอุตสาหกรรมไม่สามารถหลีกเลี่ยงการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศได้ เนื่องจากต้องมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต หรือในบางอุตสาหกรรมก็มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลพลอยได้จากการผลิต ดังนั้นแนวคิดในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตโอเลฟินส์ควบคู่ไปกับกระบวนการผลิตเดิมที่มีอยู่แล้วจึงเป็นทางออกที่น่าสนใจโดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์สูงเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก แม้ว่าการลงทุนกับกระบวนการผลิตโอเลฟินส์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องใช้เงินทุนสูงมหาศาล แต่ในมุมมองระยะยาวนับว่าคุ้มค่ากับสิ่งที่ได้รับกลับมามาก เพราะนอกจากจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการเติบโตทางธุรกิจใหม่ ๆ แล้ว ยังเป็นการสร้างความเข้มแข็งให้กับธุรกิจเดิมให้สามารถเติบโตควบคู่ไปกับการดูแลรักษาสิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืน ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดได้จากการดำเนินธุรกิจ นอกจากจะสามารถนำไปขายเป็นคาร์บอนเครดิตในตลาดคาร์บอน สร้างรายได้ให้กับผู้ประกอบการอีกทางหนึ่งแล้ว ยังนำมาลดหย่อนภาษีได้ด้วย ขณะที่โอเลฟินส์ที่ผลิตได้จากกระบวนการที่พัฒนาขึ้นใหม่ก็สามารถนำไปขายสร้างรายได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งหากมีความร่วมมือกันระหว่างภาคอุตสาหกรรมและนักวิจัยอย่างจริงจังในการกำหนดเป้าหมายและทิศทางของเทคโนโลยีก็จะยิ่งช่วยเพิ่มโอกาสในการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ตลาดจริงได้ในอนาคตอันใกล้



## เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.mreport.co.th/news/trend-and-innovation/009-เทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อม-CO2-ของเสียอุตสาหกรรม> (accessed date: May 10, 2021).
- [2] <https://www.covestro.co.th/th-th/media/news-releases/2021/building-with-co2-technology-becomes-possible> (accessed date: May 10, 2021).
- [3] <http://www.earththailand.org/th/article/1274> (accessed date: May 10, 2021).
- [4] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/global-plastics-market> (accessed date: May 10, 2021).
- [5] <https://www.prachachat.net/csr-hr/news-550566> (accessed date: May 10, 2021).
- [6] T.N. Do and J. Kim, Green C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> hydrocarbon production through direct CO<sub>2</sub> hydrogenation with renewable hydrogen: Process development and techno-economic analysis *Energy Conversion and Management* 214, 2020, 112866.
- [7] [https://www.egat.co.th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1984:20170522-article-01&catid=49&Itemid=251](https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=1984:20170522-article-01&catid=49&Itemid=251) (accessed date: May 10, 2021).
- [8] [https://www.thansettakij.com/content/normal\\_news/465274](https://www.thansettakij.com/content/normal_news/465274) (accessed date: May 10, 2021).
- [9] M. Jouny, W. Luc, and F. Jiao, General techno-economic analysis of CO<sub>2</sub> electrolysis systems, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 57, 2018, 2165-2177.
- [10] T.D. Foust, Comparative economics of carbon capture into alternative dispositions, routes, and end products, *New Technologies & Economics for Carbon Capture/Sequestration Conference: Chapel Hill*, 2019.
- [11] J. Sisler, S. Khan, A.H. Ip, M.W. Schreiber, S.A. Jaffer, E.R. Bobicki, C.T. Dinh, and E.H. Sargent, Ethylene electrosynthesis: A comparative techno-economic analysis of alkaline vs membrane electrode assembly vs CO<sub>2</sub>-CO-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> tandems, *ACS Energy Letters* 6, 2021, 997-1002.
- [12] G. Centi, G. Iaquaniello, and S. Perathoner, Can we afford to waste carbon dioxide? Carbon dioxide as a valuable source of carbon for the production of light olefins, *ChemSusChem* 4, 1265-1273.
- [13] <https://www.greenbiz.com/article/has-green-hydrogens-time-finally-come> (accessed date: May 10, 2021).
- [14] <http://www.erc.or.th/ERCWeb2/Front/StaticPage/StaticPage.aspx?p=263&Tag=&muid=23&prid=85> (accessed date: May 10, 2021).
- [15] คู่มือระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัย, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- [16] T. Numpilai, S. Kahadit, T. Witoon, B.V. Ayodele, C.K. Cheng, N. Siri-Nguan, T. Sornchamni, C. Wattanakit, M. Chareonpanich, J. Limtrakul, CO<sub>2</sub> hydrogenation to light olefins over In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SAPO-34 and Fe-Co/K-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite catalyst, *Topics in Catalysis* 64, 2021, 316-327.
- [17] T. Numpilai, N. Chanlek, Y. Poo-Arporn, C.K. Cheng, N. Siri-Nguan, T. Sornchamni, M. Chareonpanich, P. Kongkachuichay, N. Yigit, G. Rupprechter, J. Limtrakul, T. Witoon, Tuning interactions of surface-adsorbed species over Fe-Co/K-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst by different K contents: Selective CO<sub>2</sub> hydrogenation to light olefins, *ChemCatChem* 12, 2020, 3306-3320.
- [18] T. Numpilai, C. Wattanakit, M. Chareonpanich, J. Limtrakul, T. Witoon, Optimization of synthesis condition for CO<sub>2</sub> hydrogenation to light olefins over In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> admixed with SAPO-34, *Energy Conversion and Management* 180, 2019, 511-523.
- [19] J. Na, B. Seo, J. Kim, C.W. Lee, H. Lee, Y.J. Hwang, B.K. Min, D.K. Lee, H.S. Oh, and U. Lee, General technoeconomic analysis for electrochemical coproduction coupling carbon dioxide reduction with organic oxidation, *Nature Communications* 10, 2019, 5193.



### 3.3 การผลิตกรดฟอร์มิกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

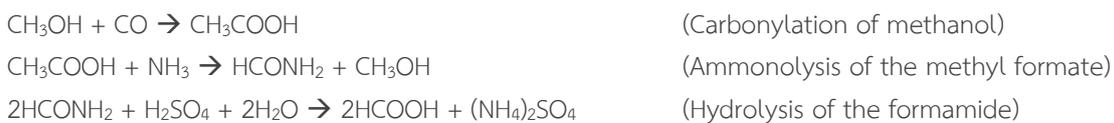
#### ตลาดและการแข่งขัน

กรดฟอร์มิก (Formic Acid, FA) หรือ กรดมด เป็นกรดคาร์บอกซิลิกที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยที่สุด มีสูตรโมเลกุล  $\text{CH}_2\text{O}_2$  หรือ  $\text{HCOOH}$  มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องและมีความสามารถในการระเหยเป็นไอต่ำ (ความดันไอ 40 mmHg ที่อุณหภูมิ 20°C) ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว กรดฟอร์มิกจึงเป็นที่จับตามองในฐานะวัสดุกักเก็บ (Storage medium) ที่มีความเหมาะสมกับเทคโนโลยีการเก็บรักษาไฮโดรเจน (Hydrogen storage technology) ในอนาคต ถึงแม้จะมีความหนาแน่นพลังงานต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลและเอทานอล [3-5]

มีการคาดการณ์ว่าการเติบโตของตลาดกรดฟอร์มิกทั่วโลกอยู่ที่ 4.94% CAGR (Compound Annual Growth Rate) โดยคาดว่าจะมีมูลค่ามากกว่า 878.7 ล้านดอลลาร์สหรัฐ จากปี พ.ศ. 2560-2570 การขยายตลาดกรดฟอร์มิกดังกล่าวได้รับแรงขับเคลื่อนจากความต้องการที่มากขึ้นอย่างรวดเร็วในอุตสาหกรรมเครื่องหนัง สิ่งทอ และยาง ในแถบเอเชียแปซิฟิก และความต้องการที่มากขึ้นในอุตสาหกรรมการผลิตสารเคมี ยา อาหาร และการเกษตรที่มีมากขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก โดยเฉพาะความต้องการของสารถนอมอาหาร (Preservatives) และสารป้องกันเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial agent) ในภาคปศุสัตว์ เนื่องจากการเริ่มมีการบังคับใช้ข้อกำหนดห้ามการใช้ยาปฏิชีวนะ (Antibiotics) ในอุตสาหกรรมการผลิตยาและอาหารสัตว์ ในขณะที่ความต้องการการบริโภคผลิตภัณฑ์จากสัตว์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก

#### วิธีผลิต

โดยส่วนใหญ่กรดฟอร์มิกผลิตโดย Oxalic acid decomposition ( $(\text{COOH})_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2$ ) และ Methanol carbonylation ซึ่งประมาณ 70% ของกรดฟอร์มิกถูกผลิตโดยวิธี Methanol carbonylation โดยปฏิกิริยาที่แสดงนี้



#### ส่วนแบ่งตลาดโลก

พื้นที่เอเชียแปซิฟิกมีส่วนแบ่งทางการตลาดมากที่สุดประมาณ 70% ของมูลค่าทางการตลาดกรดฟอร์มิกทั่วโลก เนื่องจากการเติบโตอย่างรวดเร็วของภาคอุตสาหกรรม และความสามารถในการเข้าถึงวัตถุดิบในการผลิตโดยในบางพื้นที่ยังไม่มีข้อจำกัดจากทางภาครัฐมากนักทำให้ความต้องการของกรดฟอร์มิกเติบโตอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของประชากรและเศรษฐกิจที่เติบโตขึ้นมากในหลายประเทศ เช่น อินเดีย จีน เกาหลีใต้ และไทย ส่งผลให้มีความต้องการผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์มากขึ้น อันเป็นปัจจัยส่งเสริมตลาดของกรดฟอร์มิกมีการเติบโตเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในทวีปยุโรปมีส่วนแบ่งทางการตลาดใหญ่เป็นอันดับสองที่ 25% ของมูลค่าทางการตลาดกรดฟอร์มิกรวมโดยมีข้อกำหนดห้ามการใช้สารปฏิชีวนะในอาหารสัตว์ของสหภาพยุโรป (European Union, EU) เป็นแรงขับเคลื่อนหลัก ทั้งนี้ผู้ผลิตกรดฟอร์มิกรายใหญ่ที่สุดคือ BASF SE (เยอรมนี) และลดหลั่นลงมา ดังแสดงในรูปที่ 3.3.1

ประเทศไทยนำเข้ากรดฟอร์มิกจากต่างประเทศ เช่น เยอรมนี (BASF) จีน และฟินแลนด์ เป็นต้น โดยมีบริษัทนำเข้าและจำหน่ายภายในประเทศ เช่น LC Industrial (<https://www.formicthai.com/>), Wee-rin Chemical Limited Partnership (<http://www.weerinchem.co.th/>), MC Industrial Chemical Company Limited (<https://mcic.co.th/>), Chemical Enterprise (<http://www.chemical.co.th/>) โดยส่วนใหญ่กรดฟอร์มิกถูกนำไปใช้ในภาคการเกษตร เป็นสารกำจัดเชื้อโรคในอาหารสัตว์และอุตสาหกรรมยาง การผลิตกาวลาเท็กซ์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ และใช้ผลิตสารเคมีโดยบริษัท เช่น DOW Chemicals และ SCG โรงงานที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ.ระยอง

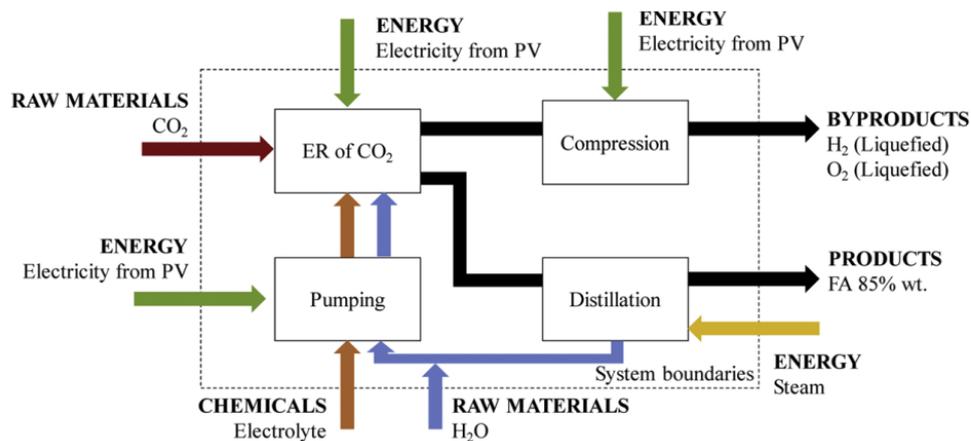


รูปที่ 3.3.1 สรุปภาพรวมของกรดฟอร์มิกในตลาดโลก

ที่มา: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/formic-acid-market-1132> (accessed date: May 12, 2021) [1]

## ความพร้อมทางด้านเทคโนโลยีในปัจจุบัน (Technology readiness level) และการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรม

กระบวนการรีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical CO<sub>2</sub> reduction reaction, CO<sub>2</sub>RR) จัดเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีทางเลือกสำหรับการผลิตสารเคมีจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยอาศัยพลังงานไฟฟ้ากระตุ้นให้เกิดกระบวนการถ่ายเทโปรตอนควบคู่กับอิเล็กตรอน (H<sup>+</sup> coupled e<sup>-</sup> transfer) จากโมเลกุลของน้ำไปสู่มолеกุล CO<sub>2</sub> ที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถเปลี่ยนก๊าซ CO<sub>2</sub> ให้เป็นสารเคมีที่มีประโยชน์เชิงอุตสาหกรรม ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ กรดฟอร์มิก กรดออกซาลิก เมทานอล เอทานอล และเอทิลีน เป็นต้น [3] ถึงแม้ว่าเทคโนโลยี CO<sub>2</sub>RR นั้น ยังขาดความพร้อมเชิงเทคโนโลยี (Technology readiness level, TRL) โดยมี TRL ที่ระดับ 2-6 จากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการถ่ายทอดเทคโนโลยี CO<sub>2</sub>RR สู่ภาคอุตสาหกรรม โดย National Renewable Energy Laboratory (NREL) [2] พบว่า กระบวนการผลิตกรดฟอร์มิกด้วยกระบวนการ CO<sub>2</sub>RR ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในทวีปอเมริกาและยุโรป ทั้งกรดฟอร์มิกยังถูกจัดอยู่ในกลุ่มสารเคมีสามอันดับแรกร่วมกับ คาร์บอนมอนอกไซด์และกรดออกซาลิกที่เทคโนโลยี CO<sub>2</sub>RR มีพร้อมสูงต่อการขยายผลสู่ภาคอุตสาหกรรมโดยพิจารณาจากความซับซ้อนของกระบวนการต่ำ มูลค่าและความต้องการทางตลาดที่เติบโตอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการได้รับการสนับสนุนเงินโยบายจากภาครัฐ



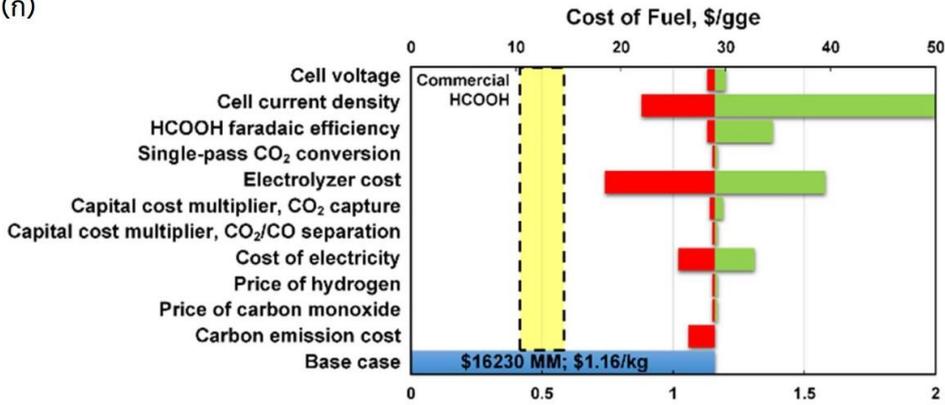
รูปที่ 3.3.2 แผนผังกระบวนการรีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical CO<sub>2</sub> reduction reaction, CO<sub>2</sub>RR) ไปเป็นกรดฟอร์มิกโดยพลังงานทดแทน (Renewable energy)

ที่มา: Rumayor และคณะ (2019) [4]

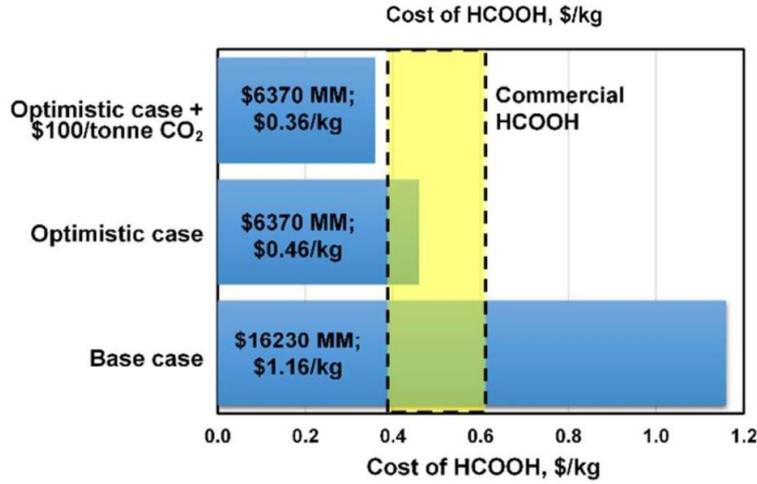
กระบวนการ CO<sub>2</sub>RR ไปเป็นกรดฟอร์มิกที่เป็นสารประกอบ C<sub>1</sub> เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทประจุเพียง 2 อิเล็กตรอน การผลิตกรดฟอร์มิกด้วยเทคโนโลยีนี้จึงไม่ซับซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.3.2 จากการศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ (Technoeconomic analysis) โดย Joshua M. Spurgeon และ Bijandra Kumar [5] ในปี พ.ศ. 2561 พบว่า กระบวนการ CO<sub>2</sub>RR ไปเป็นกรดฟอร์มิกโดยตรงในเซลล์อิเล็กโทรไลเซอร์แบบอัลคาไลน์นั้นจะสามารถดำเนินการได้อย่างคุ้มทุน ณ ราคาตลาดกรดฟอร์มิกปัจจุบันที่ 400-600 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน ก็ต่อเมื่อประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าของกระบวนการผลิตกรดฟอร์มิกเข้าใกล้ประสิทธิภาพเป้าหมาย ของเซลล์ไฟฟ้าในอุดมคติที่ 96% ในปัจจุบันกระบวนการผลิตกรดฟอร์มิกด้วยกระบวนการ CO<sub>2</sub>RR ในระบบดังกล่าว มีความเสถียรสูงและมีประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ที่สูงที่สุดที่ 94% แต่ยังมีประสพปัญหาประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่ำและถูกจำกัดด้วยร้อยละการแปลงผัน (Conversion) ของก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ต่ำ และยังเพิ่มภาระในการคัดแยกกรดฟอร์มิกที่ปะปนอยู่กับอิเล็กโทรไลต์ เพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดเหล่านี้ ในปี พ.ศ. 2562 Chuan Xia และคณะ[6] รายงานผลการใช้อิเล็กโทรไลต์ชนิด Solid-state แทนการใช้อิเล็กโทรไลต์ชนิดของเหลวทำให้สามารถผลิตกรดฟอร์มิกที่ความบริสุทธิ์สูง ในปีต่อมา Lei Fan และคณะ [7] ได้ขยายผลสู่การพัฒนาเซลล์อิเล็กโทรไลเซอร์แบบ Solid-state ที่มีส่วนประกอบของ Gas-diffusion layer: GDL ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงผันก๊าซ CO<sub>2</sub> ให้สูงขึ้นและลดต้นทุนในการคัดแยกกรดฟอร์มิกที่ผลิตได้ อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตกรดฟอร์มิกด้วยเทคโนโลยี CO<sub>2</sub>RR นี้มีโอกาที่จะคุ้มทุนทางเศรษฐกิจมากขึ้นเมื่อพิจารณามิติทางสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยี CO<sub>2</sub>RR มีความยืดหยุ่นสูงในด้านพลังงานและสามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานทดแทนที่ผลิตมากเกินความต้องการซึ่งเป็นทิศทางที่เป็นไปได้มากขึ้นในอนาคต [4] เมื่อพิจารณา CO<sub>2</sub> emission cost ที่ 100 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน เซลล์ไฟฟ้าในอุดมคติสามารถผลิตกรดฟอร์มิกด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าราคาตลาดในปัจจุบัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3.3



(ก)



(ข)



**รูปที่ 3.3.3** การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตกรดฟอร์มิก (ก) การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) ของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการผลิตกรดฟอร์มิกโดยพิจารณาเซลล์ไฟฟ้าพื้นฐาน (Base case) ที่มีประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ 94% Single-pass conversion 50% และค่าไฟฟ้า \$0.06/kWh (ข) การเปรียบเทียบราคาประเมินต้นทุนการผลิตเอทิลีนจากกระบวนการ CO<sub>2</sub>RR ของเซลล์ไฟฟ้าพื้นฐานและเซลล์ไฟฟ้าอุดมคติที่มีประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์ 9% Single-pass conversion 75% และค่าไฟฟ้า \$0.03/kWh โดยพิจารณามิติทางด้านสิ่งแวดล้อม (CO<sub>2</sub> emission cost \$100/tonne)

ที่มา: Spurgeon และคณะ (2018) [5]

## ช่องว่างการพัฒนาที่สำคัญ

กระบวนการผลิตกรดฟอร์มิกด้วยเทคโนโลยี CO<sub>2</sub>RR ในเซลล์ไฟฟ้ามีความเสถียรสูงและมีประสิทธิภาพเชิงฟาราเดย์สูงถึง 94% ใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพในอุดมคติ เมื่อวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของเทคโนโลยี พบว่า การผลิตกรดฟอร์มิกด้วยกระบวนการนี้มีต้นทุนเชิงอุปกรณ์ของเซลล์ไฟฟ้าที่สูงและประสิทธิภาพการแปลงผันของก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ต่ำ [5] เพื่อปิดช่องว่างการพัฒนานี้ การออกแบบและพัฒนาเชิงวิศวกรรมอุปกรณ์จึงมีความสำคัญมากเพื่อเพิ่มการแปลงผันของก๊าซ CO<sub>2</sub> ให้ถึงเป้าหมายที่ >50% นอกจากนี้การพัฒนาเชิงวัสดุเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าและเมมเบรนคัลก็มีความสำคัญเช่นกัน หากสามารถขยายอายุการใช้งานของขั้วแคโทดจาก 2.5 ปี ไปเป็น 4.45 ปี จะทำให้การลงทุนภาคอุตสาหกรรมสามารถคืนทุนได้เร็วขึ้นถึง 3 เท่าตัว [4]

## กลยุทธ์การพัฒนาเพื่อการพลิกผัน Pain point to gain point/Opportunity

จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว แสดงในรูปที่ 3.3.3(ก) พบว่า ค่าความหนาแน่นกระแสภายในเซลล์ไฟฟ้า ต้นทุนของเซลล์ไฟฟ้า และราคาค่าไฟฟ้า เป็น 3 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตกรดฟอร์มิกด้วยเทคโนโลยี CO<sub>2</sub>RR ซึ่งสามารถรวบรวมเป็น 2 กลยุทธ์การพัฒนาเพื่อการพลิกผันใน 2 มิติ ได้แก่ 1) การพัฒนาเซลล์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและมีอายุการใช้งานยืนยาว และ 2) การส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนควบคู่ไปกับการลดราคาพลังงานทดแทนให้ถูกลงเพื่อความยั่งยืนทางด้านพลังงานของประเทศ ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของเทคโนโลยี พบว่าหากสามารถลดต้นทุนเซลล์ไฟฟ้าและต้นทุนทางพลังงานลงอย่างละ 50% จะสามารถลดต้นทุนการผลิตกรดฟอร์มิกเหลือเพียง \$460 ซึ่งอยู่ในระดับเดียวกับราคาตลาดกรดฟอร์มิกปัจจุบันที่ 400-600 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน นอกจากนี้หากพิจารณาภาษีคาร์บอน (Carbon tax) ที่บังคับใช้ในหลายประเทศทั่วโลกและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคต [8] อุตสาหกรรมการผลิตกรดฟอร์มิกด้วยเทคโนโลยี CO<sub>2</sub>RR จะมีความสามารถแข่งขันในตลาดเคมีภัณฑ์ด้วยส่วนต่างของต้นทุนที่ต่ำกว่าราคาตลาดจากการผลิตด้วยกระบวนการเดิม

## ประเด็นที่มุ่งเน้น: โอกาสของภาคอุตสาหกรรม (Issue in Focus: Industrial sector opportunities)

ภาพรวมทางตลาดของกรดฟอร์มิกมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยมีการคาดการณ์ว่าการเติบโตของตลาดกรดฟอร์มิกทั่วโลกอยู่ที่ประมาณ 5% ต่อปี จากปัจจุบันต่อเนื่องไปถึงปี พ.ศ. 2570 นอกจากนี้กระบวนการผลิตกรดฟอร์มิกด้วยเทคโนโลยี CO<sub>2</sub>RR มีประสิทธิภาพสูงและมีความพร้อมโดยรวมอยู่ในระดับปานกลาง (TRL2-6) เหมาะสมต่อการร่วมลงทุนวิจัยและพัฒนาระหว่างภาควิจัยและภาคเอกชนเพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดของเทคโนโลยีในปัจจุบันและผลักดันการขยายผลสู่ระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้การลดราคาพลังงานทดแทนอย่างเหมาะสมสามารถเพิ่มความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ให้เทคโนโลยีนี้ ซึ่งยังต้องอาศัยการสนับสนุนเชิงนโยบายจากรัฐและเปิดโอกาสให้เกิดการเติบโตในกลุ่มอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน



## เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.marketresearchfuture.com/reports/formic-acid-market-1132> (accessed date: May 12, 2021).
- [2] T. D. Foust, Comparative Economics of Carbon Capture into Alternative Dispositions, Routes, and End Products; New Technologies & Economics for Carbon Capture/Sequestration Conference: Chapel Hill, 2019.
- [3] S. Park, D. T. Wijaya, N. Jonggeol and L. Chan Woo, Towards the Large-Scale Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide, *Catalysts* 11, 2021, 253.
- [4] M. Rumayor, A. Dominguez-Ramos, P. Perez and A. Irabien, A techno-economic evaluation approach to the electrochemical reduction of CO<sub>2</sub> for formic acid manufacture, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 34, 2019, 490-499.
- [5] J. M. Spurgeon and B. Kumar, A comparative technoeconomic analysis of pathways for commercial electrochemical CO<sub>2</sub> reduction to liquid products, *Energy & Environmental Science* 11, 2018, 1536-1551.
- [6] X. Chuan, Z. Peng, J. Qiu, P. Ying, L. Wentao, S. Eli, A. Husam N. and W. Haotian, Continuous production of pure liquid fuel solutions via electrocatalytic CO<sub>2</sub> reduction using solid-electrolyte devices, *Nature Energy* 4, 2019, 776–785.
- [7] L. Fan, C. Xia, P. Zhu, Y. Lu and H. Wang, Electrochemical CO<sub>2</sub> reduction to high-concentration pure formic acid solutions in an all-solid-state reactor, *Nature Communications* 11, 2020, 3633.
- [8] <https://www.oecd.org/tax/tax-and-environment.htm> (accessed date: May 15, 2021).

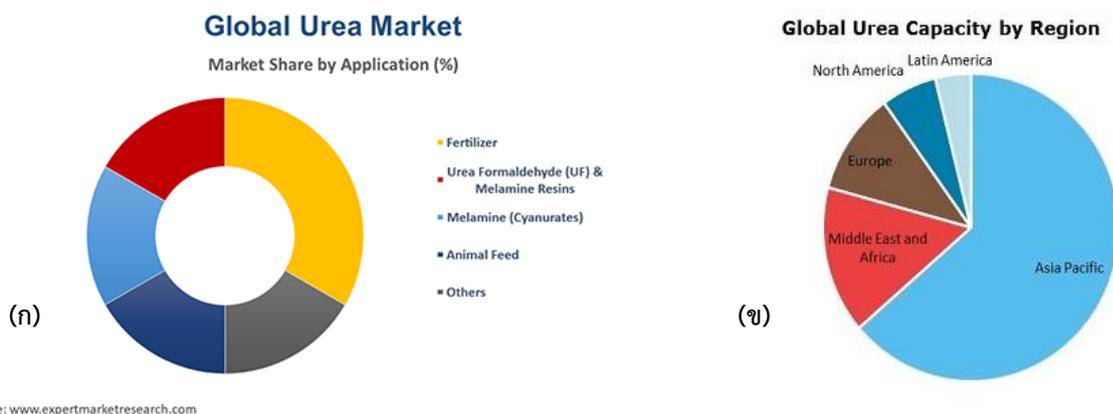


### 3.4 การผลิตปุ๋ยยูเรียจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย

#### ตลาดและการแข่งขัน

ยูเรีย (Urea) เป็นสารประกอบชนิดหนึ่งที่มีสูตรโมเลกุลว่า  $\text{NH}_2\text{CONH}_2$  ส่วนใหญ่ใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืชและเป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ เช่น ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Urea-formaldehyde resin) และยูเรียเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Urea-melamine-formaldehyde resin) เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ไปเป็นส่วนผสมต่าง ๆ ทางด้านอาหาร เวชภัณฑ์ และเครื่องอุปโภค มีการประมาณการว่าความต้องการใช้ยูเรียสูงถึง 211.5 เมกะตัน ( $\times 10^6$  ตัน) ในปี พ.ศ. 2569 [1] และมีความต้องการสูงขึ้นเรื่อย ๆ เฉลี่ยปีละประมาณร้อยละ 3 [2] โดยมีการประมาณว่าในปี พ.ศ. 2564 มูลค่าการตลาดยูเรียที่ผลิตทั่วโลกเท่ากับ 40,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ [3] ปัจจุบันพบว่าร้อยละ 80 ของยูเรียที่ผลิตได้ทั่วโลกนำยูเรียไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับเกษตรกรรม [1] การนำยูเรียมาใช้ประโยชน์ในแต่ละประเภทแสดงดังรูปที่ 3.4.1(ก)

ความต้องการยูเรียของแถบประเทศทางเอเชียแปซิฟิกมีความต้องการสูงสุดที่ร้อยละ 70 ตามด้วยอเมริกาเหนือ และยุโรป เมื่อเทียบกับความต้องการยูเรียทั่วโลก ดังแสดงในรูปที่ 3.4.1(ข) อินเดียและไทยมีการใช้ปุ๋ยกันอย่างแพร่หลายในการทำเกษตรกรรม โดยที่จีนเป็นประเทศผู้ผลิตและผู้ใช้ปุ๋ยยูเรียรายใหญ่ที่สุดในแถบประเทศทางเอเชียแปซิฟิก และอินเดียเป็นประเทศผู้ใช้ปุ๋ยยูเรียมากเป็นลำดับที่สอง จีนผลิตปุ๋ยยูเรียได้มากเนื่องจากมีอุตสาหกรรมเหมืองแร่ถ่านหินมาก จึงมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการผลิตยูเรียในปริมาณสูง ส่วนอินโดนีเซียและปากีสถานมีการส่งออกปุ๋ยยูเรียเช่นกัน แต่ส่งออกเฉพาะในแถบประเทศเพื่อนบ้าน



Source: www.expertmarketresearch.com

รูปที่ 3.4.1 (ก) ร้อยละการใช้ประโยชน์จากยูเรีย (ข) ความต้องการใช้ยูเรียแต่ละทวีป

ที่มา: (ก) <https://www.expertmarketresearch.com/reports/urea-market/> (accessed date: June 04, 2021) [1]

(ข) <https://mcgroup.co.uk/researches/urea/> (accessed date: June 04, 2021) [4]

## ลักษณะของปุ๋ยยูเรีย

ปุ๋ยยูเรียที่ขายกันตามท้องตลาด จะแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพลัม และปุ๋ยยูเรียเม็ดสาकु ซึ่งปุ๋ยยูเรียทั้ง 2 ชนิดนี้มีสูตรเคมีและคุณสมบัติทางเคมีที่เหมือนกัน แตกต่างกันเพียงลักษณะทางกายภาพของเม็ดปุ๋ยเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 3.4.1 [5]

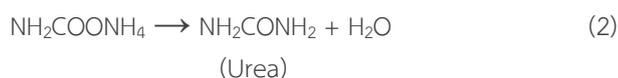
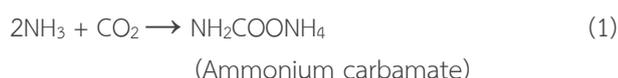
ตารางที่ 3.4.1 ลักษณะจำเพาะของปุ๋ยยูเรียเม็ดโพลัมและปุ๋ยยูเรียเม็ดสาकु

ลักษณะจำเพาะ	ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพลัม	ปุ๋ยยูเรียเม็ดสาकु
ไนโตรเจน	มากกว่า 46%	มากกว่า 46%
ขนาด	2.0-4.0 มิลลิเมตร มากกว่า 90%	1.0-2.5 มิลลิเมตร มากกว่า 90%
ไบยูเรต	ไม่เกิน 1%	ไม่เกิน 1%
ความชื้น	ไม่เกิน 0.5%	ไม่เกิน 0.5%
สี	ขาวสะอาด ไม่มีเม็ดดำเจือปน	ขาวสะอาด ไม่มีเม็ดดำเจือปน
กัมมันตภาพรังสี	ไม่มี	ไม่มี
อื่น ๆ	เทไหลได้ ไม่จับเป็นก้อนแข็ง ไม่มีสารพิษใด ๆ เจือปน	เทไหลได้ ไม่จับเป็นก้อนแข็ง ไม่มีสารพิษใด ๆ เจือปน

ที่มา: [http://119.46.166.126/self\\_all/selfaccess7/m1/497/lesson4/menu3\\_4/p6.php](http://119.46.166.126/self_all/selfaccess7/m1/497/lesson4/menu3_4/p6.php) (accessed date: June 04, 2021) [5]

## การสังเคราะห์ปุ๋ยยูเรียจากคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย

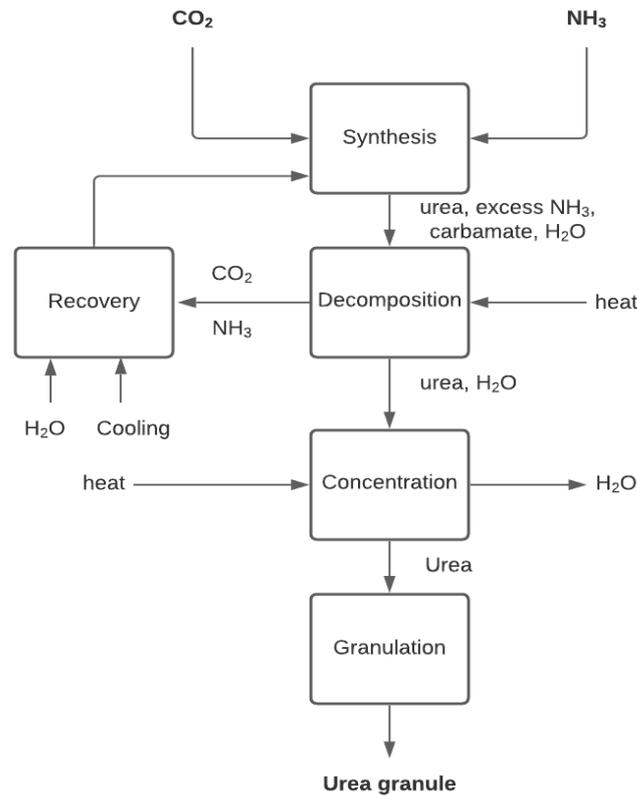
ยูเรียสามารถสังเคราะห์ได้จากคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย ผ่านลำดับขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ดังสมการปฏิกิริยาเคมีที่ (1) และ (2) [6] โดยที่ปฏิกิริยาที่ (1) เกิดได้อย่างรวดเร็วและเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจำนวนมาก ส่วนปฏิกิริยาที่ (2) เกิดช้าและเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเล็กน้อยทำให้โดยรวมของปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดในสถานะของเหลว ดังนั้นการให้ความดันและความร้อนแก่ปฏิกิริยานี้จึงสำคัญ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยานี้จะเกิดได้อย่างเหมาะสมที่ความดันในช่วง 125–250 บาร์ และอุณหภูมิในช่วง 170–220 องศาเซลเซียส [7]



การสังเคราะห์ยูเรีย 1 โมล จะต้องใช้  $\text{CO}_2$  จำนวน 1 โมล ทำปฏิกิริยากับ  $\text{NH}_3$  จำนวน 2 โมล ในกระบวนการสังเคราะห์ยูเรียนี้อาจจะมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นได้ คือได้สารประกอบที่ชื่อว่า ไบยูเรต (Biuret) อยู่ด้วย ดังแสดงในปฏิกิริยาเคมีที่ (3) ซึ่งจะทำได้ผลได้ของยูเรียน้อยลงและยิ่งไปกว่านั้นไบยูเรตเป็นสารที่มีพิษต่อพืช [8] จึงจำเป็นต้องหาวิธีการสังเคราะห์ยูเรียให้ได้ไบยูเรตปะปนอยู่ในปุ๋ยยูเรียให้น้อยที่สุดหรือไม่มีเลย (ควรจะน้อยกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก)



โดยทั่วไป กระบวนการสังเคราะห์ยูเรีย สามารถสรุปได้ตามแผนผังในรูปที่ 3.4.2



รูปที่ 3.4.2 กระบวนการสังเคราะห์ยูเรีย

ขั้นตอนที่ 1 การสังเคราะห์ยูเรีย

ทำการผสมคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนียที่ความดัน 240 บาร์ ในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะให้ได้ปุ๋ยยูเรีย สารประกอบคาร์บาเมต (Carbamate) และน้ำเกิดขึ้น ปฏิกิริยานี้จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนโดยจะได้ค่าแปลงผัน (Conversion) ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ร้อยละ 78 นอกจากนี้ ยังมีส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์กับแอมโมเนียที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ในระบบด้วย

ขั้นตอนที่ 2 การแยกยูเรีย

สารผสมที่ได้หลังจากการทำปฏิกิริยาจะถูกลดความดันแบบ 3 ลำดับขั้นตอน ดังนี้ ลำดับที่ 1 ต้องลดความดันของระบบมาที่ 17 บาร์ และให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส เพื่อที่จะแยกคาร์บอนไดออกไซด์กับแอมโมเนียที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและทำให้คาร์บาเมตที่เหลืออยู่เกิดการสลายตัว (Decomposition) กลับไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนียอีกครั้ง เพื่อแยกกลับไปทำปฏิกิริยาใหม่ (Recovery) ดังแสดงในปฏิกิริยาเคมีที่ (4)



ลำดับที่ 2 ลดความดันให้เหลือ 2 บาร์ ซึ่งจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์กับแอมโมเนียที่เหลืออยู่แยกออกไปได้อีก และลำดับที่ 3 ปรับความดันเป็น -0.35 บาร์ จะทำให้แอมโมเนียที่เหลืออยู่อีกนั้นละลายในน้ำจนหมด การปรับความดันแบบ 3 ลำดับขั้นนี้ เป็นการป้องกันการเกิดสารไบยูเรตและยังป้องกันการปฏิกิริยาผันกลับของยูเรียกลับไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนียได้อีกด้วย

ขั้นตอนที่ 3 การแยกยูเรียออกจากน้ำ

เมื่อแยกจนเหลือยูเรียและน้ำแล้ว ซึ่งความดันจะอยู่ที่ -0.35 บาร์ จะทำให้น้ำที่มีแอมโมเนียละลายอยู่นั้นระเหยออกไป ส่งผลให้ยูเรียมีความเข้มข้นมากขึ้นจาก 68% โดยน้ำหนัก เป็น 80% โดยน้ำหนัก ยูเรียจะเกิดการฟอร์มเป็นผลึก เมื่อปรับความร้อนไปที่ 110 องศาเซลเซียส จะทำให้ผลึกยูเรียละลาย และเมื่อปรับความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 140 องศาเซลเซียส ยูเรียจะเปลี่ยนเป็นยูเรียเหลว (Molten urea) ซึ่งมีความเข้มข้นเป็น 99% โดยน้ำหนัก

#### ขั้นตอนที่ 4 การทำยูเรียให้เป็นเม็ด

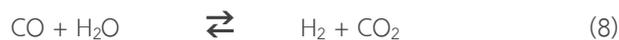
โดยทั่วไปปุ๋ยยูเรียที่ขายกันทางการค้า จะมีลักษณะเม็ดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-4 มิลลิเมตร ซึ่งทำได้โดยการนำยูเรียเหลวมาทำเป็นเม็ดด้วยวิธีการฉีดหรือเหวี่ยงในอากาศ นอกจากนี้ยังมีส่วนที่คอยกำจัดยูเรียที่เป็นฝุ่นแล้วนำมาอัดเป็นเม็ดใหม่และส่วนที่คัดแยกขนาดให้มีขนาดเท่า ๆ กันด้วย โดยที่เม็ดที่ใหญ่เกินไปก็จะนำมาบดแล้วทำให้เป็นเม็ดใหม่อีกครั้ง ก่อนที่จะนำมาขายในท้องตลาดทั่วไป

#### กระบวนการผลิตปุ๋ยยูเรียจากคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนียในระดับอุตสาหกรรม

กระบวนการผลิตยูเรียในปัจจุบันนี้ มักจะเป็นโรงงานผลิตเดียวกันกับโรงงานผลิตแอมโมเนียเพราะในการผลิตแอมโมเนียนั้น จะเกิดคาร์บอนไดออกไซด์อยู่แล้ว สำหรับการผลิตแอมโมเนียนั้น จะใช้  $H_2$  ที่มาจากก๊าซธรรมชาติ และ  $N_2$  จากอากาศ แต่ในก๊าซธรรมชาติ นั้น จะมี  $H_2S$  ปนอยู่ด้วยเสมอ ซึ่งเป็นตัวทำลายตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตแอมโมเนียจึงต้องมีการกำจัดออกก่อนโดยใช้  $ZnO$  ดังแสดงในปฏิกิริยาเคมีที่ (5)



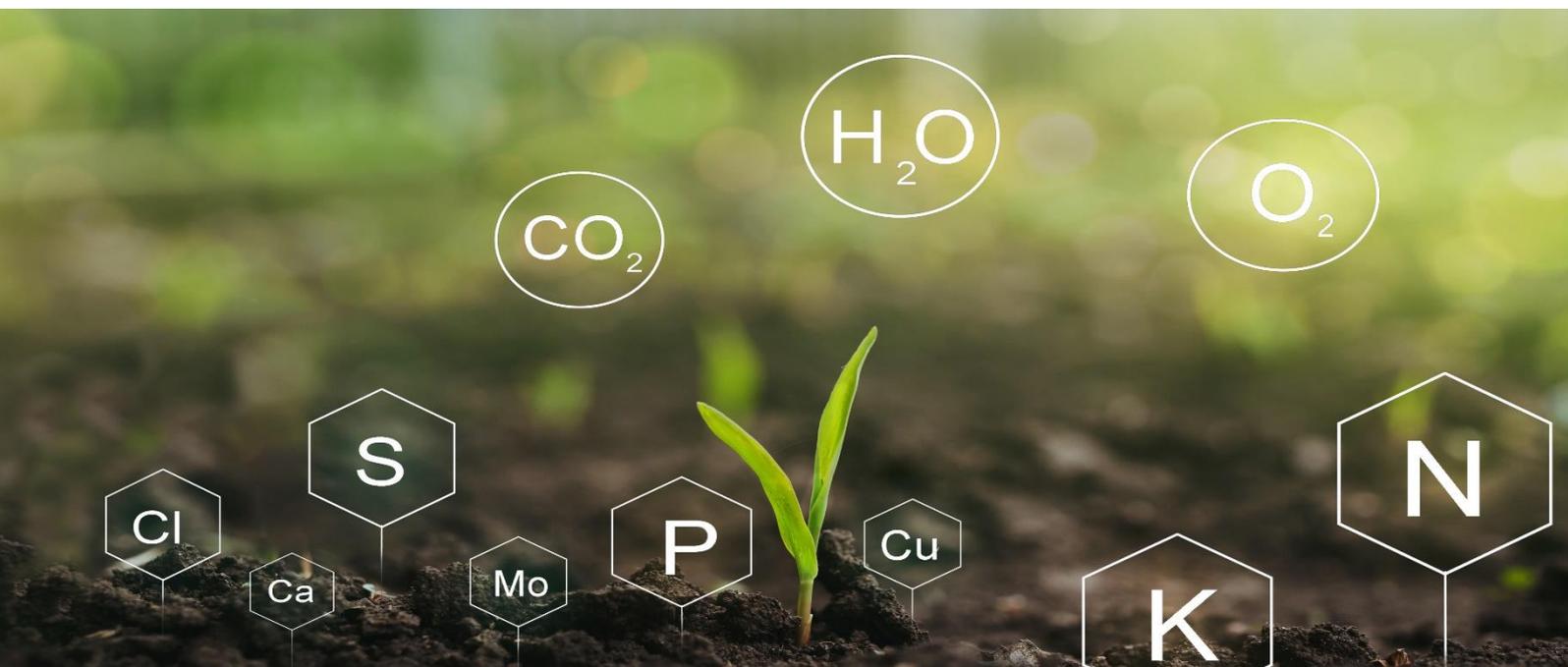
เมื่อกำจัด  $H_2S$  ออกแล้วจะเหลือเฉพาะก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) ซึ่งจะนำไปสังเคราะห์ก๊าซ  $H_2$  ผ่านปฏิกิริยา Steam reforming ของมีเทน ดังแสดงในปฏิกิริยาเคมีที่ (6) และ (7) และ Water-gas shift reaction ดังแสดงในปฏิกิริยาเคมีที่ (8) ตามลำดับ

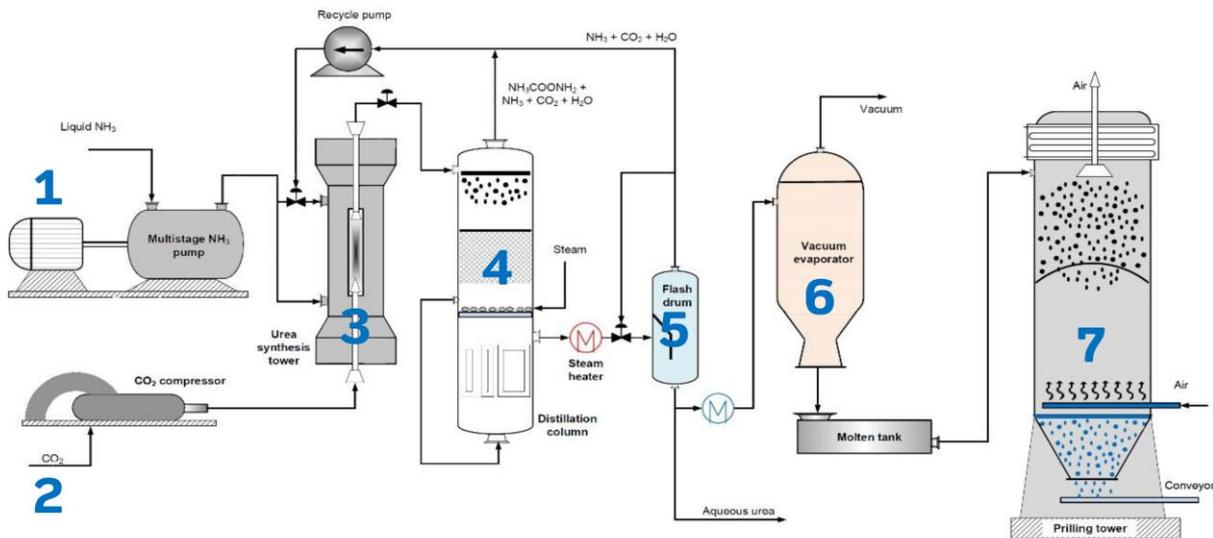


ดังนั้นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จาก  $CH_4$  และ  $H_2O$  คือ  $H_2$  และ  $CO_2$  ซึ่ง  $H_2$  ก็จะนำไปทำปฏิกิริยาต่อกับ  $N_2$  ได้เป็นแอมโมเนียดังแสดงในปฏิกิริยาเคมีที่ (9)



ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกออกมาก่อนแล้วนั้น ก็นำกลับมาทำปฏิกิริยาต่อกับแอมโมเนียสังเคราะห์ได้เป็นยูเรีย สำหรับยูนิตในการสังเคราะห์ยูเรียนั้น โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย 7 หน่วยย่อย ดังแสดงในรูปที่ 3.4.3





รูปที่ 3.4.3 ปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการสังเคราะห์ยูเรีย

ที่มา: Rafiee และคณะ (2018) [9]

หน่วยย่อยสำหรับกระบวนการสังเคราะห์ยูเรีย ทำหน้าที่คร่าว ๆ ดังนี้

- 1) NH<sub>3</sub> ขาเข้า (Ammonia pumping): แอมโมเนียในรูปของของเหลว จะถูกปั๊มเข้าไปในถังปฏิกรณ์ซึ่งทำจากถังสแตนเลส
- 2) คาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (CO<sub>2</sub> compression): ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกอัดเข้าไปในถังปฏิกรณ์ด้วยปั๊มความดันสูง
- 3) ถังปฏิกรณ์สังเคราะห์ยูเรีย (Urea synthesis): คาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนียจะเกิดปฏิกิริยาที่ถังปฏิกรณ์นี้โดยใช้ความดันช่วง 150-250 บาร์ และอุณหภูมิช่วง 180-230 องศาเซลเซียส ผิวของถังปฏิกรณ์จะต้องเคลือบด้วยฟิล์มออกไซด์เพื่อป้องกันการกัดกร่อนถังปฏิกรณ์ตามรูปที่ 3.4.3(2) นี้เป็นแบบต่อเนื่อง (Plug flow reactor) ดังนั้นสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแล้วจะถูกดันออกด้านบนของถังเข้าไปยังหน่วยที่ 4) ต่อไป
- 4) ถังกลั่นแยก (Distillation tower): เมื่อสารต่าง ๆ ออกมาจากถังปฏิกรณ์จะเข้ามายังถังกลั่นแยกนี้โดยจะปรับให้มีความดันต่ำลงและให้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อต้องการแยกคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนียที่เหลือและทำให้คาร์บาเมตสลายตัวเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนียเพื่อนำกลับใช้ใหม่อีกครั้ง
- 5) ถังกำจัดของเหลือ (Flash drum): ถังนี้ จะปรับความดันลงมาที่ประมาณ 1 บาร์ และผ่านความร้อน เพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนียที่ยังหลงเหลืออยู่อีก
- 6) ถังกำจัดน้ำ (Vacuum evaporator): ถังนี้จะปรับให้มีความดันเป็นสุญญากาศเพื่อระเหยน้ำออกทำให้ได้ยูเรียที่เข้มข้นขึ้น
- 7) ถังปั้นเม็ดปุย (Prilling tower): ของเหลวยูเรียที่ได้จะผ่านภาชนะที่หมุนและผ่านอากาศมาจากทางด้านล่าง ทำให้ของเหลวยูเรียถูกแหวกออกเป็นเม็ดขนาดเล็กและตกลงสู่ด้านล่างของถังแล้วนำไปเก็บในภาชนะเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

### แนวทางการพัฒนาการผลิตยูเรียจากคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทย

ในประเทศไทยการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ส่วนหนึ่งได้มาจากหลายกระบวนการผลิตจากโรงไฟฟ้าถ่านหินและการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติหรือชีวมวล ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ก่อให้เกิดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ สูงขึ้นบรรยากาศในปริมาณสูง เพื่อเป็นการลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ และให้โรงงานไฟฟ้าเหล่านี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น การลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการนำมาผลิตเป็นปุ๋ยยูเรียในระดับขั้นอุตสาหกรรมจึงมีความน่าสนใจหากมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างจริงจัง น่าจะเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดการปล่อย คาร์บอนไดออกไซด์ ของประเทศไทยได้ในปริมาณสูง

เนื่องจากการผลิตปุ๋ยยูเรียต้องใช้ความบริสุทธิ์ของคาร์บอนไดออกไซด์สูง แต่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้เพื่อผลิตไฟฟ้าหรือจากการเผาไหม้ถ่านหินมีก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น ออกซิเจน และไนโตรเจนอยู่ด้วย ฉะนั้นการหาเทคโนโลยีการดักจับเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นเรื่องที่ทำหายเช่นกัน หนึ่งในเทคโนโลยีการดักจับ คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพ คือ ใช้สารละลายแอมโมเนียที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยก่อนที่จะใช้สารละลายแอมโมเนียมาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จำเป็นต้องลดอุณหภูมิ



ของก๊าซเผาไหม้ที่ปล่อยทิ้ง (Flue gas) ลงก่อนโดยการผ่านเครื่องทำความเย็น (Cooler) จากนั้นจึงผ่านก๊าซเข้าผสมกับสารละลายแอมโมเนียเหลวในหอดูดซับ (Absorption column) แบบไหลสวนทาง (Counter current) ซึ่งจะทำให้ก๊าซอื่น ๆ ที่ไม่ถูกดักจับหลุดออกไปจากหอ จากนั้นส่งสารละลายแอมโมเนียเหลวที่จับคาร์บอนไดออกไซด์ไว้แล้วไปหอไอร้อน (Steam column) เพื่อปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงเข้าสู่กระบวนการผลิตยูเรียต่อไป ส่วนสารละลายแอมโมเนียก็ส่งกลับไปเตรียมสารละลายแอมโมเนียให้พร้อมใช้งานอีกครั้ง ดังนั้นในกระบวนการนี้จะไม่มีการใช้แอมโมเนียหลุดออกมานอกระบบ และน้ำก็มีการใช้หมุนเวียนในระบบเป็นวัฏจักร ซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงและมีค่าใช้จ่ายต่ำ [10]

ดังนั้นแนวทางการศึกษาวิจัยและพัฒนาการผลิตยูเรียในระดับอุตสาหกรรมในประเทศไทย คือการหาแหล่งโรงงานไฟฟ้าหรือโรงงานต่าง ๆ ที่มีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง จากนั้นหาเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แยกออกจากก๊าซชนิดอื่นให้ได้ความบริสุทธิ์ของคาร์บอนไดออกไซด์สูง (อย่างน้อยร้อยละ 95% [11]) เหนือสิ่งอื่นใด การศึกษาความคุ้มค่าของการลงทุนสร้างโรงงานเพื่อผลิตยูเรียนั้นต้องศึกษาและคำนวณอย่างรอบคอบ ตั้งแต่ค่าก่อสร้างโรงงาน ค่าดำเนินงาน ค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างการผลิตที่ใช้ในปริมาณสูง แต่เนื่องจากการใช้ปุ๋ยยูเรียในประเทศไทยมีปริมาณสูงขึ้นทุก ๆ ปี และมีการนำเข้าปุ๋ยยูเรียที่สูงขึ้น ดังนั้นภาครัฐและเอกชนควรดำเนินการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตยูเรียจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างจริงจัง ทั้งนี้เพื่อส่งเสริมการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ เพื่อลดผลกระทบจากภาวะเรือนกระจกที่ไม่อาจจะประเมินราคาได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.expertmarketresearch.com/reports/urea-market/> (accessed date: June 04, 2021).
- [2] <https://www.imarcgroup.com/urea-market/> (accessed date: June 04, 2021).
- [3] <https://www.adroitmarketresearch.com/industry-reports/urea-market/> (accessed date: June 04, 2021).
- [4] <https://mcgroup.co.uk/researches/urea>, Urea: 2021 World Market Outlook and Forecast up to 2030/ (accessed date: June 04, 2021).
- [5] [http://119.46.166.126/self\\_all/selfaccess7/m1/497/lesson4/menu3\\_4/p6.php](http://119.46.166.126/self_all/selfaccess7/m1/497/lesson4/menu3_4/p6.php) (accessed date: June 04, 2021).
- [6] C.H. Huang and C.S. Tan, A Review: CO<sub>2</sub> Utilization, Aerosol and Air Quality Research 14, 2014, 480-499.
- [7] J. Meessen, Urea synthesis, Chemie Ingenieur Technik 86, 2014, 2180-2189.
- [8] R.L. Mikkelsen, Biuret in urea fertilizer, Fertilizer research 26, 1990, 311-318.
- [9] Rafiee, K. Rajab Khalilpour, D. Milani and M. Panahi, Trends in CO<sub>2</sub> conversion and utilization: A review from process systems perspective, Journal of Environmental Chemical Engineering 6, 2018, 5771-5794.
- [10] S. Rahman, S. Ajith, Z. Aldhaheeri, S. Saeed, L. Owda, O. Chaalal and R. Z., A Novel Global Warming Solution: Use of Flue Gas to Produce Urea, MATEC Web of Conferences 187, 2018.
- [11] R. Shirmohammadi, A. Aslani, R. Ghasempour and L.M. Romeo, CO<sub>2</sub> Utilization via Integration of an Industrial Post-Combustion Capture Process with a Urea Plant: Process Modelling and Sensitivity Analysis, Processes 8, 2020, 1144.



### 3.5 การผลิตโพลียูรีเทนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตพลาสติกแต่ละชนิดโดยทั่วไปมีการใช้พลังงานและสารตั้งต้นที่เป็นเคมีภัณฑ์จากแหล่งปิโตรเลียมในปริมาณมาก อีกทั้งยังมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ออกสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณมากซึ่งก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อนส่งผลให้มีสภาพภูมิอากาศที่แปรปรวน โดยในปี พ.ศ. 2559 ตลาดของวัสดุประเภทพลาสติกในระดับโลกมีขนาดการผลิตโดยรวมประมาณ 335 ล้านตัน อย่างไรก็ตาม ตลาดของพลาสติกยังคงมีการเติบโตเพิ่มมากขึ้นต่อไปในอนาคตเนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นและเพื่อรองรับกิจกรรมต่าง ๆ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาพัฒนาวัสดุพลาสติก รวมไปถึงการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นการรักษาทรัพยากรธรรมชาติได้อย่างยั่งยืน [1]

โพลียูรีเทน (Polyurethane: PU) จัดเป็นผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์ที่สำคัญที่มีการคาดการณ์ขนาดของตลาดอยู่ที่ประมาณ 20 ล้านตันต่อปี โพลียูรีเทนผลิตจากปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ที่ต่างกันสองชนิดคือ โพลีออล (Polyols) และไดไอโซไซยานेट (Diisocyanate) หรือโพลีเมอริกไอโซไซยานेट (Polymeric isocyanate) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม โพลียูรีเทนเป็นผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์หรือพลาสติกที่มีรูปแบบการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่หลากหลาย [2] สามารถแบ่งตามประเภทการใช้งานหลัก ๆ ได้แก่ โพลียูรีเทนโฟม (Polyurethane foam) หรือฟิยูโฟม (PU foam) และโพลียูรีเทนชนิดที่ไม่ใช่โฟม (Polyurethane non-foam) หรือฟิยูชนิดไม่ใช่โฟม (PU non-foam) [3,4] ซึ่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตโพลียูรีเทนในปัจจุบันนั้น จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ โทลูอีนไดไอโซไซยานेट (Toluene diisocyanate: TDI) และไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยานेट (Diphenylmethane diisocyanate: MDI) และโพลีออล (Polyol)

จากรายงานการศึกษาผลกระทบจากภาวะโลกร้อนจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศของอุตสาหกรรมต่าง ๆ พบว่า อุตสาหกรรมการผลิตโพลียูรีเทนมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกคิดเป็น 3.22 กิโลกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อโพลียูรีเทน 1 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อมองไปถึงความต้องการโพลียูรีเทนที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละปีจะพบว่าอุตสาหกรรมการผลิตโพลียูรีเทนนั้นมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นจำนวนที่มากขึ้น นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ต่างมุ่งเน้นในเรื่องของการลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังมีการนำเทคโนโลยีการดักจับและใช้ประโยชน์คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Capture and Utilization: CCU) เข้ามาใช้ในแต่ละอุตสาหกรรมกันมากขึ้น

การนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมโพลีเมอร์สามารถบรรลุตามหลักการของเคมีสีเขียว (Twelve principle of green chemistry) ได้อยู่หลายข้อ ซึ่งเริ่มต้นขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2512 จากการทำปฏิกิริยาของคาร์บอนไดออกไซด์กับอีพ็อกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพลีคาร์บอเนต แม้ว่าในขณะนั้นจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำก็ตาม แต่ในปัจจุบันโพลีคาร์บอเนตโพลีออล (Polycarbonate polyol) กลับได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นต่อการใช้ผลิตโพลียูรีเทน อีกทั้งเมื่อไม่นานมานี้มีการรายงานถึงความสำเร็จในการสังเคราะห์โพลีเอเทอร์คาร์บอเนต โพลีออล (Polyether carbonate polyol) ผ่านการทำปฏิกิริยาการสังเคราะห์โพลีเมอร์ร่วม (Copolymerization) ระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอีพ็อกไซด์ (Epoxyde) ที่สามารถนำมาใช้ทดแทนโพลีเอเทอร์โพลีออล ได้จากผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของโพลียูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่นจากวัตถุดิบสองแหล่งคือ คาร์บอนไดออกไซด์ และจากแหล่งปิโตรเลียม พบว่าโฟมแบบยืดหยุ่นทั้งสองชนิดแสดงคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.5.1 [5]

**ตารางที่ 3.5.1** สมบัติทางกายภาพของวัสดุโพลียูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่นที่เตรียมได้จากโพลีเอเทอร์คาร์บอนเนตโพลีออล (CO<sub>2</sub> 10.5% โดยน้ำหนัก) และเตรียมโดยใช้โพลีเอเทอร์ โพลีออลแบบดั้งเดิมจากแหล่งปิโตรเลียม โดยใช้ขั้นตอนและกระบวนการเดียวกัน

Property	Polyurethane material				
		CO <sub>2</sub> -based		Conventional	
Core density [kg/m <sup>3</sup> ]		23.1	37.3	23.4	38.6
Tensile strength [kPa]		102	92	111	74
Elongation at break [%]		165	178	215	151

ที่มา: Langanke และคณะ (2014) [5]

อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมโพลียูรีเทนในปัจจุบันกำลังมองหาวัสดุหมุนเวียนเพื่อทดแทนการใช้วัตถุดิบหลักจากแหล่งปิโตรเลียม อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนเกี่ยวกับต้นทุนปิโตรเลียมในอนาคตและความต้องการที่จะก้าวไปสู่การใช้วัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรสิ่งแวดล้อมให้มากขึ้น นอกจากนี้การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นแหล่งทดแทนที่มีข้อได้เปรียบด้านราคาที่ถูกลงเมื่อเทียบกับโพลีออลจากปิโตรเลียม ซึ่งโพลียูรีเทนโฟมที่ได้จากแหล่งทดแทนจะมีความเสถียรต่อความร้อน (Thermal stability) ที่สูงขึ้นและมีความคงสภาพของมิติ (Dimensional stability) มากกว่าโพลียูรีเทนโฟมที่ใช้โพลีโพรพิลีนออกไซด์แบบดั้งเดิม ซึ่งการสังเคราะห์โพลีออลจากแหล่งทดแทนนี้ คาดว่าจะช่วยลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon footprint) และส่งเสริมการจัดการแหล่งทรัพยากรธรรมชาติได้อีกด้วย [6]

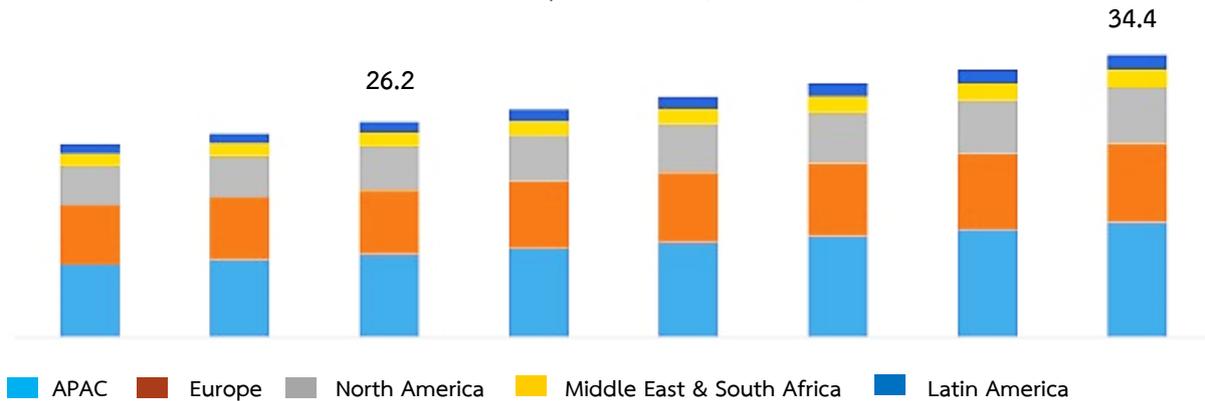
**ตลาดและการแข่งขัน**

โพลียูรีเทนโฟม (Polyurethane foam) เป็นโพลีเมอร์และพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โฟมแบบแข็ง (Rigid foam) และโฟมแบบยืดหยุ่น (Flexible foam) โดยที่โฟมแบบแข็งใช้สำหรับเป็นฉนวนกันความร้อนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำความเย็นและใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ส่วนโฟมแบบยืดหยุ่นส่วนใหญ่ใช้เป็นวัสดุกันกระแทกในบรรจุภัณฑ์ เฟอร์นิเจอร์ และเครื่องนอน [7] ขนาดของตลาดโพลียูรีเทนโฟมทั่วโลกมีการเติบโตที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 จนถึงปัจจุบัน และมีการคาดการณ์ว่าจะเติบโตมากขึ้นในอนาคต พบว่าขนาดของตลาดโพลียูรีเทนโฟมของภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 40 ของตลาดโพลียูรีเทนทั่วโลก ซึ่งมีมูลค่า 63.7 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี พ.ศ. 2563 [8] ทั้งนี้การครองตลาดโพลียูรีเทนโฟมของโลกอยู่ในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก เนื่องมาจากการเติบโตของเมืองและอุตสาหกรรม จากข้อมูลการตลาดของกลุ่มผู้ใช้งานโพลียูรีเทนโฟมขั้นสุดท้าย (End user) พบว่า ภาคการก่อสร้างเป็นกลุ่มผู้ใช้งานที่ใหญ่ที่สุด นอกจากนี้อุตสาหกรรมยานยนต์ก็จัดเป็นกลุ่มลูกค้าสำคัญอีกกลุ่มหนึ่งของโพลียูรีเทนโฟมซึ่งมาจากการเพิ่มยอดขายยานยนต์ทั่วเอเชียแปซิฟิก [9]



โพลีโอลเป็นส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการผลิตโพลียูรีเทนซึ่งส่วนใหญ่จะใช้งานอุตสาหกรรมต่าง ๆ รวมถึงโพลียูรีเทนโฟมแบบแข็งและแบบยืดหยุ่น สารเคลือบ กาว สารพ่น และอีลาสโตเมอร์ โดยกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของโพลีโอล ได้แก่ โพลีเอสเตอร์โพลีโอลและโพลีอีเทอร์โพลีโอล ขนาดของตลาดโพลีโอลอยู่ที่ประมาณ 26.2 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี พ.ศ. 2562 และคาดว่าจะสูงถึง 34.4 พันล้านเหรียญสหรัฐภายในปี พ.ศ. 2567 ที่ CAGR ร้อยละ 5.6 ดังแสดงในรูปที่ 3.5.1 ซึ่งภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกเป็นตลาดที่ใหญ่ที่สุดสำหรับโพลีโอล โดยประเทศจีนเป็นหนึ่งในผู้บริโภครายใหญ่ในภูมิภาคนี้ อันเนื่องมาจากผลของจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อีกทั้งกฎระเบียบของรัฐบาลในการเพิ่มกิจกรรมการก่อสร้าง การเติบโตในอุตสาหกรรมยานยนต์และความต้องการที่เพิ่มขึ้นสำหรับสิ่งทอและเฟอร์นิเจอร์ ซึ่งเป็นแรงผลักดันที่ดีต่อการเติบโตของตลาดโพลีโอลในภูมิภาคนี้ นอกจากนี้ อเมริกาเหนือและยุโรปคาดว่าจะมีการเติบโตของตลาดโพลีโอลในระดับปานกลาง ในขณะที่ละตินอเมริกาและตะวันออกกลางและแอฟริกาคาดว่าจะเติบโตอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นของประเทศเศรษฐกิจเกิดใหม่ในภูมิภาค [10,11]

POLYOLS MARKET SIZE, BY REGION (USD BILLION)



รูปที่ 3.5.1 ตลาดของโพลีโอลในระดับโลกแบ่งตามภูมิภาค

ที่มา: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/polyols-market-725.html>

(accessed date: June 10, 2021) [11]

โดยทั่วไปอุปสงค์และอุปทานทางการค้าภายในตลาดไอโซไซยานเนตทั่วโลกมีความสมดุลสำหรับวัตถุดิบบางชนิด ยกเว้น ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยานเนต (MDI) ซึ่งต้องการกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นภายในปี พ.ศ. 2563 ตลาดไอโซไซยานเนตทั่วโลกมีการรวมตัวกันในระดับปานกลาง โดยมียักษ์ใหญ่ในอุตสาหกรรมเคมีเพียงไม่กี่รายที่มีส่วนแบ่งการตลาดนี้ เนื่องจากเทคโนโลยีที่เป็นกรรมสิทธิ์เป็นอุปสรรคในการเข้ามาของคู่แข่งรายย่อยรายอื่น ๆ ในการขยายกำลังการผลิต [12]

### ความพร้อมทางด้านเทคโนโลยี (Technology Readiness level) และการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจในการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรม

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตโพลีโอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จัดอยู่ในระดับความพร้อมทางด้านเทคโนโลยี (TRL) ในขั้นที่ 6 ซึ่งเป็นขั้นของการทดลองในโรงงานจำลองหรือโรงงานต้นแบบ (Pilot plant) ได้ถูกทดสอบในสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องและเป็นตัวแทนในการก้าวไปสู่เทคโนโลยีที่มีความพร้อมและผ่านการทดลองด้านต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว จึงทำให้ทราบได้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทดแทนสัดส่วนของการผลิตโพลีโอลจากกระบวนการดั้งเดิมที่ใช้วัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเลียมซึ่งผลิตภัณฑ์โพลีโอลจากคาร์บอนไดออกไซด์คือ โพลีอีเทอร์คาร์บอนเนต โพลีโอล ที่สามารถมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบได้ถึงประมาณร้อยละ 43 โดยน้ำหนัก ซึ่งวิธีการผลิตโพลียูรีเทนมีข้อได้เปรียบเนื่องจากต้นทุนทางด้านวัตถุดิบและพลังงานที่ลดลง ในขณะที่ความเสี่ยงของการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปยังสภาพแวดล้อมจากผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายมีเพียงปริมาณเล็กน้อย [1]

บริษัท โคเวสโตร (Covestro Ag) ประเทศเยอรมนี เป็นบริษัทที่มีกำลังการผลิตโพลียูรีเทนในระดับสูงและเป็นอันดับ 2 ของผู้ผลิตโพลียูรีเทนของโลก บริษัทฯ มีโครงการสำหรับศึกษาวิจัยและพัฒนาโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัตถุดิบโดยสร้างโรงงานต้นแบบที่มีกำลังการผลิต 5,000 ถึง 6,000 ตันในปี พ.ศ. 2559 ซึ่งโครงการนี้มีชื่อว่า "Dream Production" ในการผลิตโพลีคาร์บอเนตโพลีเอสเตอร์และโพลีเอสเตอร์คาร์บอเนตโพลีเอสเตอร์โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้จากโรงงานไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้แก่ ถ่านหินในประเทศเยอรมนี โดยมีอัตราการผลิตโพลีเอสเตอร์อยู่ที่ประมาณ 2.6 กิโลตันต่อปี ซึ่งทางโรงงานต้นแบบของบริษัทฯ ทำการผลิตโพลีเอสเตอร์โดยผ่านการทำปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และอัลคิลีนออกไซด์ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา Double metal cyanide (DMC) [1,13]

ในขณะเดียวกัน บริษัท ซาอุดี อราโมโก้ (Saudi Aramco) ได้ทำการผลิตโพลีคาร์บอเนตโพลีเอสเตอร์โดยใช้เทคโนโลยีที่มีชื่อว่า Converge Technology<sup>®</sup> โดยสามารถเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าที่สูงขึ้นได้ ทั้งนี้ Converge<sup>®</sup> เป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความยั่งยืนมากกว่าการผลิตโพลีเอสเตอร์จากแหล่งปิโตรเลียม ตัวอย่างเช่น โพลีคาร์บอเนตโพลีเอสเตอร์ที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีนี้ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 40 โดยมวล ซึ่งจะช่วยให้บริษัทฯ ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เหลือน้อยที่สุดโดยที่ Converge polyols มีคาร์บอนฟุตพริ้นท์ประมาณหนึ่งในสามของกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม ซึ่งทางบริษัทฯ กำลังวางแผนสำหรับสร้างโรงงานผลิตด้วยเทคโนโลยีนี้เต็มรูปแบบในประเทศซาอุดีอาระเบียภายใต้กรอบวิสัยทัศน์ของซาอุดีอาระเบียปี พ.ศ. 2573 [13,14]

นอกจากนี้ยังมีเทคโนโลยี Eonic Technologies ซึ่งเป็นบริษัทที่ตั้งอยู่ใน Macclesfield Eonic ในสหราชอาณาจักรได้รายงานว่าการสังเคราะห์โพลีเอสเตอร์คาร์บอเนตโพลีเอสเตอร์ที่สามารถมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบได้มากถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งความสำเร็จนี้เกิดจากพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ที่สามารถทดสอบแล้วว่าสามารถทนต่อสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จัดว่ามีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตเป็นอย่างยิ่ง [1]

## ช่องว่างการพัฒนาที่สำคัญ

เทคโนโลยีการดักจับและใช้ประโยชน์คาร์บอนไดออกไซด์โดยการผลิตโพลียูรีเทนนี้ยังมีสิ่งที่จะต้องปรับปรุงและพัฒนาต่อเพื่อให้เทคโนโลยีการผลิตโพลีเอสเตอร์จากคาร์บอนไดออกไซด์สามารถดำเนินการผลิตได้จริงในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยที่มีประเด็นสำคัญดังนี้คือ

### 1. ตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาพัฒนาวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ที่สามารถใช้ในการสังเคราะห์โพลีเอสเตอร์คาร์บอเนตโพลีเอสเตอร์ได้ในระดับอุตสาหกรรมดังตัวอย่างในกรณีของโครงการ Dream Production ซึ่งยังมีข้อจำกัดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องใช้กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงเท่านั้น ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับการพัฒนาปรับปรุงขึ้นใหม่โดย Eonic Technology ซึ่งได้ผ่านการทดสอบแล้วว่าสามารถทนต่อสิ่งสกปรกที่เจือปนกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับโดยตัวทำละลายประเภทเอมีนได้ก็จำเป็นต้องทำปฏิกิริยาในสถานะของเหลวและต้องมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อนในการแยกออกจากผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงความยุ่งยากและการใช้พลังงานที่มากขึ้นในการนำสารละลายเอมีนกลับไปใช้ใหม่

2. การพัฒนากระบวนการผลิตโพลีเอสเตอร์แบบต่อเนื่อง (Continuous process) แทนที่กระบวนการแบบกะ (Batch process) ซึ่งจะช่วยให้สามารถถ่ายโอนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านระบบท่อจากแหล่งของคาร์บอนไดออกไซด์ อาทิเช่น โรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยไอเสียคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น เพื่อนำเข้าสู่โรงงานผลิตโพลีเอสเตอร์จากคาร์บอนไดออกไซด์ได้ทันทีโดยไม่ต้องผ่านการขนส่งโดยรถยนต์

3. การพัฒนาเทคโนโลยีในการสังเคราะห์แบบใหม่ที่สามารถนำคาร์บอนไดออกไซด์เข้าร่วมตัวกับทั้งโพลีเอสเตอร์และโพลียูรีเทนได้โดยตรงทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและลดการใช้สารเคมีอื่น ๆ ลงได้

ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาถือเป็นจุดศูนย์กลางของเทคโนโลยีดักจับและใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับทำปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมของคาร์บอนไดออกไซด์ได้มีการพัฒนาควบคู่กันมากับตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับสังเคราะห์พอลิเมอร์อื่น ๆ ตลอดระยะเวลา 40 กว่าปีนับตั้งแต่มีการบุกเบิกการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ร่วมของคาร์บอนไดออกไซด์และอีพ็อกไซด์โดยผ่านการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งระบบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) ได้รับการพัฒนาอย่างพิถีพิถันมาโดยตลอด ด้วยจุดมุ่งหมายในการเพิ่มความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา (Activity) มีความสามารถในการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (Selectivity) ได้ดี การควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ (Molecular weight control) การปรับแต่งองค์ประกอบของโพลีเมอร์ (Polymer composition regulation) และเข้าทำปฏิกิริยาในทิศทางที่เฉพาะเจาะจงทางด้านใดด้านหนึ่งมากกว่าอีกด้านหนึ่ง (Enantioselectivity) เป็นเหตุให้เกิดผลิตภัณฑ์แบบเฉพาะเจาะจงมากขึ้น

อันเนื่องมาจากการวิจัยของ Inoue ในปี พ.ศ. 2512 ที่ถือเป็นการบุกเบิกการใช้คาร์บอนไดออกไซด์กับอีพ็อกไซด์มาทำเป็นโพลีเมอร์ร่วมผ่านการใช้  $ZnEt_2$  และน้ำเพื่อเร่งปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และโพรพิลีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ โพลีโพรพิลีน คาร์บอเนต (Polypropylene carbonate: PPC) ที่มีมวลโมเลกุลที่ค่อนข้างต่ำและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ยาวนานหลายวัน ซึ่งหลังจากนั้นต่อมาได้มีการใช้โลหะเชิงซ้อน (Metal complex) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในปี พ.ศ. 2534 Shen และคณะได้พัฒนาระบบตัวเร่งปฏิกิริยา Rare earth metal ternary catalyst ได้แก่  $Y(P_{204})-Al(i-Bu)_3$ -glycerol ในการเตรียมโพลีคาร์บอเนตซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีมวลโมเลกุล ( $M_n$ ) เท่ากับ 476 kg/mol อย่างไรก็ตาม ร้อยละของการเชื่อมต่อหมู่คาร์บอเนต (CU%) เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 30 ถึง 40 เท่านั้น [15] ซึ่งในระยะต่อมาได้มีการศึกษาและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเชิงซ้อน (Metal complex) โดยแบ่งออกเป็นระบบต่าง ๆ อาทิเช่น Zn-Co-DMC ZnGa SalenCo(III) complex และ Dinuclear Zn เป็นต้น ซึ่งสามารถทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าการเลือกเกิดเป็น PPC และ Polycyclohexene carbonate ที่สูงถึงร้อยละ 90 ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60-120 องศาเซลเซียส โดยมี Cyclic carbonates เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Co-DMC มีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วม จึงมีความต้องการเป็นอย่างมากที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งต่อมาจะถูกใช้เป็นสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานูเรตสำหรับผลิตโพลียูรีเทน นอกจากนี้ระบบ Zn-Co-DMC ยังมีการใช้สารตัวเริ่มปฏิกิริยา คือ Initiation-transfer agent เพื่อเพิ่มความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาให้สูงขึ้นซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีหน่วยคาร์บอเนต (CU) ในปริมาณที่มากขึ้นในสภาวะที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และความดัน 40 บาร์จะมีการใช้ตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา ได้แก่ 1,3,5-Benzenetricarboxylic acid Oligomeric alcohol และ Dicarboxylic acid ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีหน่วยคาร์บอเนตเป็นร้อยละ 54 62.5 และ 75 ตามลำดับ [16]

นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์ที่จะนำมาใช้ทำปฏิกิริยาถูกดักจับมาจากแหล่งอุตสาหกรรมที่มักจะมีการเจือปนของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) และน้ำ ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้มีผลต่อการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำให้ความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาลดลง ซึ่งมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาในหลาย ๆ ระบบต่อความทนทานในการเร่งปฏิกิริยาในสภาวะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสิ่งเจือปนต่าง ๆ ซึ่งเป็นการสนับสนุนความเป็นไปได้ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมที่ต้องมีการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้น [15]



ดังที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการชี้ให้เห็นถึงช่องว่างในการพัฒนาการดักจับและใช้ประโยชน์ของคาร์บอนไดออกไซด์โดยการสังเคราะห์เป็นโพลียูรีเทน ทั้งนี้ในกระบวนการสังเคราะห์โพลีเอเทอร์คาร์บอนเอทิลโพลีเอทิล ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญในการสังเคราะห์โพลียูรีเทนนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งการจะก้าวข้ามไปสู่ระดับความพร้อมของเทคโนโลยีที่สูงขึ้นเพื่อให้สามารถนำเทคโนโลยีนี้ไปผลิตในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้ ยังต้องมีการวิจัยและพัฒนาในด้านของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ความพร้อมและเหมาะสมกับการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ แม้ว่าจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Zinc carboxylates และ Double metal cyanides (DMC) จะมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสำหรับการสังเคราะห์โพลีเอทิลจากคาร์บอนไดออกไซด์ก็ตาม แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบนี้มักจำเป็นต้องใช้สถานะในการทำปฏิกิริยาที่ค่อนข้างรุนแรงโดยการใช้ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง [15] ดังนั้นการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาให้สามารถใช้สถานะในการทำปฏิกิริยาที่ความดันที่ต่ำลง อีกทั้งยังสามารถใช้งานในสถานะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสิ่งเจือปนต่าง ๆ อยู่ด้วยจึงเป็นช่องว่างที่เหมาะสมในการพัฒนาต่อยอดต่อไปในอนาคต

อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการดักจับและใช้ประโยชน์คาร์บอนไดออกไซด์ที่นำมาใช้ในการผลิตโพลียูรีเทนนั้นต่างก็มีอุปสรรค โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่ายังมีปัญหาในเรื่องการใช้พลังงานสูงอยู่ ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการดูดซับด้วยสารละลายเอมีน (Amine absorption process) ซึ่งมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แต่ยังติดปัญหาในเรื่องพลังงานที่ใช้ในการนำสารละลายเอมีนกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งคาดว่าจะต้องใช้พลังงานสูงถึงร้อยละ 70 ของพลังงานทั้งหมดของกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะลดการใช้พลังงานดังกล่าวด้วยการเลือกชนิดเอมีนที่เหมาะสม หรือการใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ ช่วยในการนำสารละลายเอมีนกลับมาใช้ใหม่ หรือการนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกจับอยู่ในสารละลายเอมีนแปลงเป็นสารผลิตภัณฑ์โดยตรงโดยไม่ผ่านการแยกเอมีนออกก่อนซึ่งวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ที่ใช้ ซึ่งจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันกับผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ทำให้มีความยากในการแยกออกจากกัน ซึ่งอุปสรรคดังกล่าวนี้เป็นความท้าทายที่สามารถเป็นช่องว่างสำหรับการพัฒนาต่อไปได้

### กลยุทธ์การพัฒนาเพื่อการพลิกผัน (Pain point to gain point/Opportunity)

โพลีเอเทอร์โพลีเอทิล และโพลีเอสเตอร์โพลีเอทิลนิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียมโพลียูรีเทนกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีมากและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ แต่อย่างไรก็ตามโพลีเอทิลทั้งสองชนิดนี้มีความต้านทานต่อการไฮโดรไลซิสที่ต่ำ จึงเป็นจุดด้อยของโพลียูรีเทนที่ผลิตจากโพลีเอทิลทั้งสองชนิดนี้ ทั้งนี้โพลีคาร์บอนเอทิลโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกันกับทั้งโพลีเอสเตอร์และโพลีเอเทอร์ แต่กลับพบว่าโพลีคาร์บอนเอทิลมีแนวโน้มที่จะไฮโดรไลซิสได้ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับโพลีเอสเตอร์ ซึ่งโพลีคาร์บอนเอทิลได้รับการตรวจสอบแล้วว่าสามารถใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือกสำหรับการเตรียมโพลียูรีเทน และสามารถทดแทนการใช้โพลีเอสเตอร์โพลีเอทิล และโพลีเอเทอร์โพลีเอทิลแบบทั่วไปได้

โพลียูรีเทนที่ผลิตจากโพลีคาร์บอนเอทิลโพลีเอทิลมีความเสถียรต่อการไฮโดรไลซิสได้ดีมาก มีความต้านทานต่อสารเคมี มีความคงทน แข็งแรง ทนต่อความร้อนได้ดี มีสมบัติที่ดีที่อุณหภูมิต่ำและมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่จะมีต้นทุนในการผลิตที่สูงกว่าการใช้โพลีเอเทอร์โพลีเอทิล และโพลีเอสเตอร์โพลีเอทิล ซึ่งด้วยเหตุผลนี้ทำให้โพลียูรีเทนที่ผลิตจากโพลีคาร์บอนเอทิลโพลีเอทิลจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่มีสมรรถนะสูง อาทิเช่น ในอุตสาหกรรมยานยนต์ และรองเท้า เป็นต้น จากสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าและต้านทานไฮโดรไลซิสได้ดีกว่าโพลียูรีเทน จากโพลีเอทิลแบบดั้งเดิม จึงเป็นโอกาสที่ดีที่จะหันมาให้ความสนใจกับใช้โพลีคาร์บอนเอทิลเพื่อนำมาผลิตโพลียูรีเทนที่มีความคงทนแข็งแรงเหมาะสมสำหรับนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นและสามารถรีไซเคิลหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง [15,17]

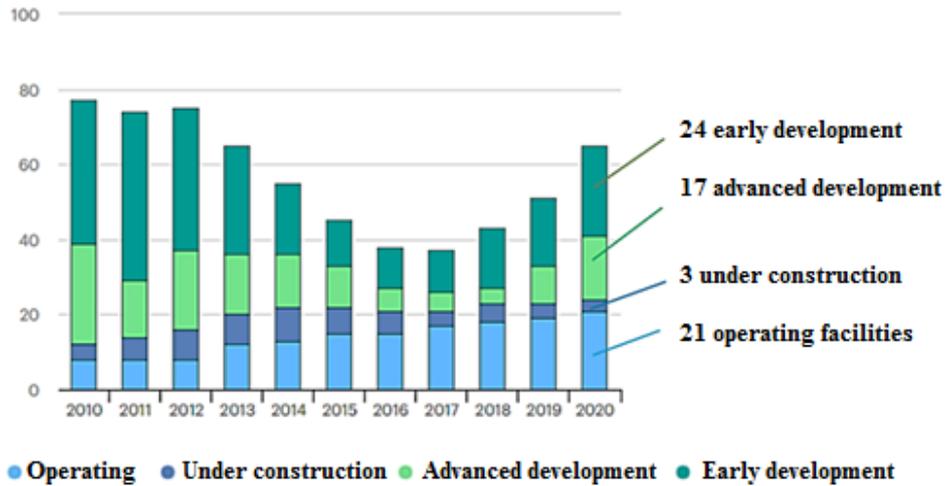


อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์โพลีคาร์บอนเนตในอุตสาหกรรมในปัจจุบันยังต้องใช้วัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเลียมเป็นอย่างมากและต้องใช้กระบวนการที่มีการควบแน่น (Condensation) ของฟอสจีนที่เป็นพิษสูง อีกทั้งยังต้องตามด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ของอะโรมาติกหรืออะลิฟาติกไดออล ซึ่งทำให้มีต้นทุนการผลิตที่สูงและอาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังที่กล่าวมาแล้วว่าคาร์บอนไดออกไซด์สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์โพลีคาร์บอนเนตได้ ซึ่งการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในอุตสาหกรรมเคมีมีจุดเด่นที่น่าสนใจคือ ประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อมและทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ไม่มีมูลค่า หากปล่อยออกสู่บรรยากาศจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งคาร์บอนไดออกไซด์ยังสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์โพลีเมอร์ได้ ดังนั้นจึงเป็นโอกาสที่จะมีการปรับกระบวนการผลิตให้หันมาใช้เทคโนโลยีการดักจับและใช้ประโยชน์คาร์บอนไดออกไซด์เพื่อประโยชน์ที่นอกเหนือจากต้นทุนการผลิตที่ลดลงในระยะยาวแล้ว ยังเป็นกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเป็นการช่วยรักษาทรัพยากรธรรมชาติได้อย่างยั่งยืน [17] ซึ่งในปัจจุบันมีบริษัทผู้ผลิตโพลียูรีเทนในระดับโลกได้หันมาสนใจในประเด็นของการผลิตโพลียูรีเทนผ่านเทคโนโลยีการดักจับและใช้ประโยชน์คาร์บอนไดออกไซด์ โดยได้ทำการวิจัยและพัฒนาทางด้านกลไกในการเกิดปฏิกิริยา ด้านการเร่งปฏิกิริยาและออกแบบและปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น บริษัท โคเวสโตร ประเทศเยอรมนีได้ดำเนินโครงการที่มีชื่อว่า Dream Production เพื่อศึกษาการผลิตโพลียูรีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์โพลีเอเทอร์คาร์บอนเนต โพลีออล ผ่านการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Double metal cyanide (DMC) ซึ่งเป็นการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับจากไอเสียของโรงไฟฟ้าถ่านหินภายในประเทศมาทำปฏิกิริยากับโพรพิลีน ออกไซด์ และมีการใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งทำให้ได้โพลีเอเทอร์คาร์บอนเนต โพลีออลที่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างเป็นร้อยละ 7.1 ซึ่งจากการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์แล้วพบว่า การผลิตโพลีเอเทอร์คาร์บอนเนตโพลีออลจากคาร์บอนไดออกไซด์มีความต้องการใช้ทรัพยากรจากแหล่งฟอสซิลที่น้อยกว่ากระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมที่ใช้โพลีออลจากแหล่งปิโตรเลียมได้ประมาณร้อยละ 13 ถึง 16

นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีผลิตภัณฑ์โพลียูรีเทนโพรพอกโพลีคาร์บอนเนตโพลีออลที่เตรียมได้จากคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในรูปของโพลีโพรพิลีน คาร์บอนเนต โพลีออล ผลิตโดยบริษัทซาอุดี อรามโก (Saudi Aramco) โดยผลิตภัณฑ์โพลียูรีเทนโพรพอกโพลีออลชนิดนี้มีสมบัติในการต้านการเกิดไฮโดรไลซิสได้ดีมากอันเนื่องมาจากการเชื่อมโยงของอีเทอร์ในโครงสร้าง อีกทั้งยังมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จึงเป็นข้อดีของการนำไปประยุกต์ใช้เป็นโพลียูรีเทนสำหรับเคลือบผิว นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงอันเนื่องมาจากการมีหน่วยซ้ำของคาร์บอนเนตและสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้เนื่องจากมีโพรพิลีนอยู่ในโครงสร้าง [15]

การดักจับ การใช้ประโยชน์ และการกักเก็บคาร์บอน (Carbon capture, utilization and storage: CCUS) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางจากทั่วโลกในปัจจุบัน โดยเฉพาะหลังจากปี พ.ศ. 2558 ดังแสดงในรูปที่ 3.5.2 จะเห็นได้ว่าการเติบโตของหน่วย CCUS ที่ลดลงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 แต่กลับเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหลังจากมีการประชุม COP21 ในปี พ.ศ. 2558 ซึ่งเกิดจากการผลักดันของนานาประเทศทั้งภาครัฐและเอกชน เทคโนโลยี CCUS จึงเติบโตและขยายวงกว้างมากขึ้นโดยได้รับการสนับสนุนจากเป้าหมายด้านสภาพภูมิอากาศและแรงจูงใจด้านนโยบายใหม่ ๆ เมื่อต้นทุน CCUS ลดลงจะทำให้อุตสาหกรรมใหม่และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์คาร์บอนไดออกไซด์มีความเป็นไปได้และมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์มากขึ้น ดังนั้นความก้าวหน้าในการวิจัยและพัฒนาและกำหนดนโยบายจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการมุ่งไปสู่เป้าหมายที่ตั้งไว้ [18]

### Facilities



รูปที่ 3.5.2 หน่วย CCUS ขนาดใหญ่ (World large-scale CCUS facilities)  
ที่มา: ภัทรพร คิม. (2564) [18]

### แนวทางการดำเนินการและผลที่คาดว่าจะได้รับ

สำหรับแนวทางในการดำเนินการของกระบวนการผลิตโพลีเอทิลีนจากคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องมุ่งศึกษาในประเด็นของเทคโนโลยีการดักจับและใช้ประโยชน์ของคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Capture and Utilization: CCU) ซึ่งสำหรับการศึกษากระบวนการสังเคราะห์โพลีเอทิลีนจากการใช้วัตถุดิบโพลีเอทิลีนจากคาร์บอนไดออกไซด์จะใช้กระบวนการต้นแบบของโครงการ Dream Production ของบริษัทโคเวสโตร

ตามกระบวนการผลิตโพลีเอทิลีนแบบดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่อุตสาหกรรมโพลีเอทิลีนต่าง ๆ ในปัจจุบันจะใช้โพลีเอทิลีนจากแหล่งปิโตรเลียม โดยโพลีเอทิลีนที่นำมาใช้เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างอีพ็อกไซด์และตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา แต่สำหรับการสังเคราะห์โพลีเอทิลีนบนแนวทางของ CCU แบบใหม่จะเป็นการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นก๊าซไอเสียจากโรงไฟฟ้าเข้ามาแทนการใช้วัตถุดิบบางส่วนจากแหล่งปิโตรเคมี ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นของเหลือทิ้งที่ไม่มีมูลค่า ดังนั้นในกระบวนการผลิตโพลีเอทิลีนตามแนวทาง CCU สามารถช่วยลดความต้องการพลังงานและค่าใช้จ่ายสำหรับวัตถุดิบลงได้เช่นเดียวกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกสู่สิ่งแวดล้อม

ซึ่งจากการศึกษากระบวนการผลิตโพลีเอทิลีนตามแนวทาง CCU ของโครงการต้นแบบ ทำให้เราทราบถึงขั้นตอนในการผลิตรวมไปถึงแหล่งที่มาของวัตถุดิบคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นข้อมูลที่ได้จากการศึกษาต้นแบบสามารถนำไปศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม วิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ทางการตลาดเพื่อประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ รวมไปถึงการวิเคราะห์ถึงปัญหาและอุปสรรคของเทคโนโลยีและระดับความพร้อมของเทคโนโลยีเพื่อหาช่องว่างของการพัฒนาเทคโนโลยีให้สูงขึ้นไปจนถึงขั้นสูงสุดโดยการผลิตในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้



## ประเด็นที่มุ่งเน้น: โอกาสของภาคอุตสาหกรรม (Issue in Focus: Industrial sector opportunity)

ในปัจจุบันความต้องการและตลาดของโพลีเอทิลีนในระดับโลกมีเพิ่มมากขึ้นและได้มีการคาดการณ์ว่าจะยังมีความต้องการที่เพิ่มขึ้นอีกในอนาคต อีกทั้งความต้องการวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมก็มีเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน รวมไปถึงการที่อุตสาหกรรมชั้นนำหลายแห่งได้ตั้งเป้าที่จะลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ได้ร้อยละ 30 ภายในปี พ.ศ. 2573 และมุ่งสู่อุตสาหกรรมที่มีคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ (Net-zero carbon) ภายในปี พ.ศ. 2593 โดยมีแนวทางต่างกันเพื่อไปให้บรรลุถึงเป้าหมายได้ [18] ซึ่งการผลิตโพลีเอทิลีนจากคาร์บอนไดออกไซด์นั้นถือว่าเป็นโอกาสของอุตสาหกรรมโพลีเอทิลีนในการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่จำนวนมากและเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากโรงงานไฟฟ้ามาใช้เป็นวัตถุดิบที่สามารถทำให้ลดต้นทุนในเรื่องของวัตถุดิบลงได้ อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่ลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งจากการประเมินผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนและการสิ้นเปลืองทรัพยากรฟอสซิลสำหรับหน่วยงานของโพลีเอทิลีน 1.0 กิโลกรัมและไฟฟ้ากริด 0.36 กิโลวัตต์ชั่วโมง พบว่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนสำหรับระบบเกณฑ์มาตรฐานที่มีโพลีเอทิลีนแบบดั้งเดิมและสำหรับระบบการดักจับและใช้คาร์บอนไดออกไซด์โดยผลิตเป็นโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตโพลีเอทิลีนที่มีคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในโครงสร้างคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ในทั้งสองระบบจะมีส่วนร่วมในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดคือ ในส่วนของการผลิตอีพ็อกไซด์ โดยที่โพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตคิดเป็นร้อยละ 81 และโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตโพลีเอทิลีนคิดเป็นร้อยละ 80 จากการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตโพลีเอทิลีน พบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งระบบสามารถลดลงได้ร้อยละ 15 (-0.54 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยการทำงาน) โดยที่ประมาณร้อยละ 28 ของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดเกิดจากผลของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (-0.15 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยการทำงาน) อันเป็นผลมาจากการลดการปล่อยที่แหล่งคาร์บอนไดออกไซด์และการปล่อยเพิ่มเติมสำหรับการชดเชยไฟฟ้า ทั้งนี้การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญประมาณร้อยละ 72 เกิดจากการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตโพลีเอทิลีน (-0.39 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยการทำงาน) [19]

จากการประเมินผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนของโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตในข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การผลิตโพลีเอทิลีนโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์สามารถสร้างโอกาสให้กับอุตสาหกรรมทั้งในด้านสิ่งแวดล้อมในการลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศและมีข้อได้เปรียบในการเป็นอุตสาหกรรมที่ปลอดคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในอนาคต อีกทั้งยังเป็นการนำเอาคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นก๊าซทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งไม่มีมูลค่ามาใช้เพื่อทดแทนการใช้วัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเลียมทำให้สามารถลดต้นทุนทางด้านวัตถุดิบลงได้



## เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Hankin, G., G. Gosálbez, G.H. Kelsall, N.M. Dowell, N. Shah, S.Z. Weider and K. Brophy, Assessing the economic and environmental value of carbon capture and utilization in the UK. Briefing Paper No. 3, Institute for Molecular Science and Engineering, Imperial College London.
- [2] จูติมา ตะสุวรรณ, การพัฒนาพอลิออลเรซินสำหรับการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น, วิทยานิพนธ์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2554.
- [3] PTTGC, The better living, PTTGC Investor’s Newsletter, ไตรมาส2/2558.
- [4] <https://www.ruedee.com/th/fabric/spandex/> (accessed date: June 10, 2021).
- [5] J. Langanke, A. Wolf, J. Hofmann, K. Böhm, M.A. Subhani, T.E. Müller, W. Leitner and C. Gürtler, Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) as sustainable feedstock for polyurethane production, *Green Chemistry* 16, 2014, 1865–1870.
- [6] M. DeBolt, A. Kiziltas, D. Mielewski, S. Waddington and M.J. Nagridge, Flexible polyurethane foams formulated with polyols derived from waste carbon dioxide, *Journal of Applied Polymer Science* 133, 2016, 44086.
- [7] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/polyurethane-foam-market> (accessed date: June 10, 2021).
- [8] <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/polyurethane-foam-market> (accessed date: June 10, 2021).
- [9] <https://www.ameriresearch.com/product/polyurethane-market-size-analysis/> (accessed date: June 10, 2021).
- [10] <https://www.zionmarketresearch.com/market-analysis/polyols-market> (accessed date: June 10, 2021).
- [11] <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/polyols-market-725.html> (accessed date: June 10, 2021).
- [12] <https://www.ameriresearch.com/product/polyurethane-market-size-analysis/> (accessed date: June 10, 2021).
- [13] <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/polycarbonate-diols-market-52484866.html> (accessed date: June 10, 2021).
- [14] <https://www.aramco.com/en/news-media/news/2016/acquires-novomers-polyol-business-downstream-expansion> (accessed date: June 10, 2021).
- [15] A.J. Kamphuis, F. Picchioni and P.P. Pescarmona, CO<sub>2</sub>-fixation into cyclic and polymeric carbonates: principles and applications, *Green Chemistry* 21, 2019, 406-448.
- [16] A.D.N. Kamkeng, M. Wang, J. Hu, W. Du and F. Qian, Transformation Technologies for CO<sub>2</sub> Utilisation: Current Status, Challenges and Future Prospects, *Chemical Engineering Journal* 409, 2021, 128138.
- [17] E. Orgilés-Calpena, F. Arán-Aís, A.M. Torró-Palau and C. Orgilés-Barceló, Novel polyurethane reactive hot melt adhesives based on polycarbonate polyols derived from CO<sub>2</sub> for the footwear industry, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 70, 2016, 218–224.
- [18] ภัทรพร คิม. การนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์: สถานการณ์ อุปสรรค และความท้าทาย. จดหมายข่าว ฉบับที่ 3, Bio-Circular-Green economy Technology and Engineering Center (BCGeTEC), 2564.
- [19] N. Von der Assen and A. Bardow, A. Life cycle assessment of polyols for polyurethane production using CO<sub>2</sub> as feedstock: insights from an industrial case study, *Green Chemistry* 16, 2014, 3272–3280.

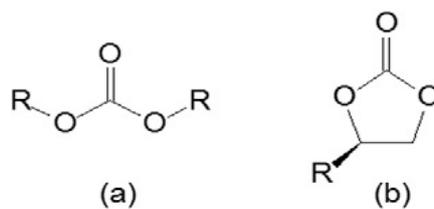


### 3.6 การผลิตคาร์บอนเนตจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

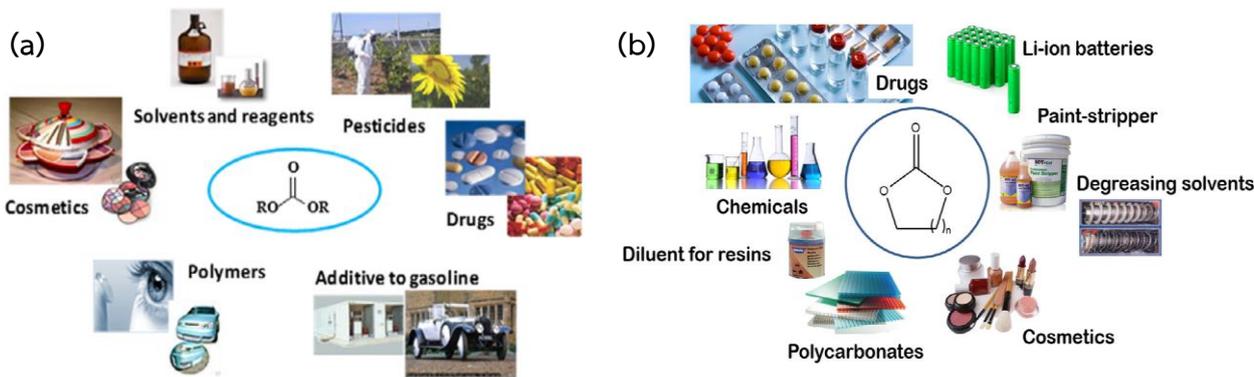
#### ตลาดและการแข่งขัน

ปัจจุบันการเกิดปัญหาภาวะโลกร้อนรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้หลายภาคส่วนตระหนักถึงความสำคัญทางด้านปัญหาสิ่งแวดล้อมและมลพิษมากขึ้น รวมถึงการใช้สารเคมีในภาคอุตสาหกรรมที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ ซึ่งภาคอุตสาหกรรมเป็นภาคส่วนขนาดใหญ่และมีการใช้สารเคมีในปริมาณมาก ดังนั้นการลดและการใช้สารเคมีอื่นที่ไม่มีอันตรายหรือมีอันตรายน้อยกว่า เพื่อทดแทนการใช้สารเคมีที่สร้างมลพิษและเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมจึงมีสำคัญอย่างยิ่งในการร่วมอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม มีหลายงานวิจัยทำการศึกษเกี่ยวกับสารเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และให้ความสนใจกับสารกลุ่มคาร์บอนเนต (Carbonate) ซึ่งจัดเป็นตัวทำละลายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green solvent) และสามารถใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมัน (Fuel oxygenate additive) ได้นอกจากนี้การนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก มาผลิตสารกลุ่มคาร์บอนเนตจัดเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญที่จะสามารถช่วยบรรเทาปัญหาภาวะโลกร้อนได้อย่างยั่งยืน

คาร์บอนเนตเป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดเอสเทอร์ของกรดคาร์บอนิก ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl, C=O) อยู่ระหว่างหมู่อัลคอกซี (alkoxy, -O-R) 2 หมู่ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็นคาร์บอนเนตที่มีโครงสร้างเชิงเส้น และโครงสร้างเป็นวง (cyclic) ดังแสดงในรูปที่ 3.6.1 เนื่องจากคาร์บอนเนตมีจุดเดือดและจุดวาบไฟสูง มีความเป็นพิษต่ำ ไม่มีกลิ่น สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ง่าย และคาร์บอนเนตชนิดวงมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน [1] จึงนิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมี โดยใช้เป็นตัวทำละลายและเป็นสารตั้งต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในอุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ ดังสรุปในรูปที่ 3.6.2



รูปที่ 3.6.1 โครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนเนตอินทรีย์แบบเชิงเส้น (a) และแบบวง (b)  
ที่มา: Aresta และคณะ 2016 [2]



รูปที่ 3.6.2 การประยุกต์ใช้งานของ (a) ไดอัลคิลคาร์บอเนต (b) ไซคลิกคาร์บอเนต

ที่มา: Delledonne และคณะ (2001), Shaikh และคณะ (1996), Buyschm (1992) [3–5]

คาร์บอเนตโครงสร้างเชิงเส้นที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ได้แก่ ไดเมทิลคาร์บอเนต (Dimethyl carbonate, DMC) ไดเอทิลคาร์บอเนต (Diethyl carbonate, DEC) และไดบิวทิลคาร์บอเนต (Dibutyl carbonate, DBC) มักนิยมใช้เป็นส่วนผสมในแก๊สโซลีนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในโครงสร้างมีอะตอมออกซิเจนอยู่มาก และคาดว่าน่าจะมีความต้องการใช้งานในลักษณะนี้เพิ่มมากขึ้นในอนาคต ปัจจุบันไดเมทิลคาร์บอเนตส่วนใหญ่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมผลิตโพลีคาร์บอเนต

จากข้อมูลตลาดโลกของไดเมทิลคาร์บอเนต พบว่ามีการเติบโตของตลาดทั่วโลกอยู่ที่ 4.49 % CAGR (Compound Annual Growth Rate) และมีการคาดการณ์ที่จะเพิ่มมูลค่าได้มากถึง 594.3 ล้านดอลลาร์สหรัฐในปี พ.ศ. 2567 การขยายตัวของตลาดดังกล่าวสืบเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิไดเมทิลคาร์บอเนต (Polycarbonate) ซึ่งผลิตโดยใช้ไดเมทิลคาร์บอเนตเป็นมอนอเมอร์ (Monomer) และปัจจัยสำคัญอีกหนึ่งประการ คือ อุตสาหกรรมสีและการเคลือบ ซึ่งมีความต้องการสีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ส่งผลให้ตัวทำละลายที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างไดเมทิลคาร์บอเนตมีความต้องการสูงขึ้นในตลาดโลกด้วยเช่นกัน ดังแสดงดังรูปที่ 3.6.3

การลงทุนด้านการผลิตไดเมทิลคาร์บอเนตได้แพร่กระจายไปทุกภูมิภาคทั่วโลก เช่น อเมริกาเหนือ ลาตินอเมริกา ยุโรป เอเชียแปซิฟิก ตะวันออกกลาง และแอฟริกา เมื่อพิจารณาวิเคราะห์ส่วนแบ่งตลาดโลก ภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกมีการเติบโตของตลาดไดเมทิลคาร์บอเนตสูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ที่ 54.23 % CAGR ทั้งนี้เนื่องจากภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกเป็นฐานการผลิตหลักของตลาดโลก โดยมีประเทศจีนเป็นผู้ผลิตหลักของโลก [7] นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาส่วนแบ่งทางการตลาดแบบแบ่งตามประเภท ในปี พ.ศ. 2561 พบว่าส่วนแบ่งการตลาดของไดเมทิลคาร์บอเนตคุณภาพสำหรับการค้า (Market grade) มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 48.09 % และในปีเดียวกันตลาดโลกมีส่วนแบ่งการตลาดในกลุ่มพอลิไดเมทิลคาร์บอเนตสูงถึง 45.03 % รวมถึงกลุ่มพลาสติกที่มีส่วนแบ่งการตลาดสูงที่สุดถึง 54.23 % ของอุตสาหกรรมขั้นสุดท้าย

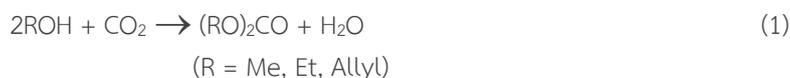


รูปที่ 3.6.3 สรุปภาพรวมของไดเมทิลคาร์บอเนตในตลาดโลก

ที่มา: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/dimethyl-carbonate-market-5486> (accessed date: July 2, 2021) [6]

### ความพร้อมทางด้านเทคโนโลยีในปัจจุบันและการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรม

ปฏิกิริยาหลักในการสังเคราะห์คาร์บอเนตจาก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าไปในโครงสร้างของแอลกอฮอล์โดยตรง (Direct carboxylation of alcohols) ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ (1) ค่าพลังงานของการเกิดและพลังงานอิสระกิบส์แสดงในตารางที่ 3.6.1

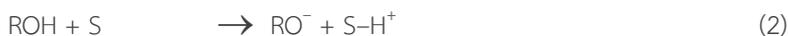


ตารางที่ 3.6.1  $\Delta H^\circ$  และ  $\Delta G^\circ$  ในการสังเคราะห์คาร์บอเนตอินทรีย์จากแอลกอฮอล์และคาร์บอนไดออกไซด์

R group	$\Delta H_{298K}^\circ$ (kcal/mol)	$\Delta G_{298K}^\circ$ (kcal/mol)
CH <sub>3</sub>	-4.0	6.0
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	-3.8	6.2
CH <sub>2</sub> =CH-CH <sub>2</sub>	-3.9	6.1
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub>	12.1	22.1

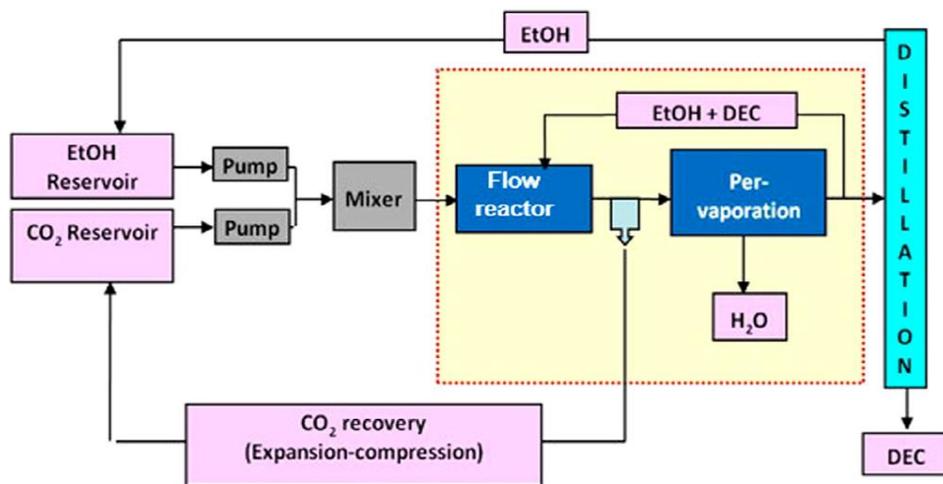
ที่มา: Aresta และคณะ (2003) [8]

จากตารางที่ 3.6.1 จะเห็นได้ว่า การเกิดของคาร์บอนเตจจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับแอลกอฮอล์เป็นไปได้ยากในเชิงอุณหพลศาสตร์ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาซึ่งส่วนมากจะอยู่ในช่วง 130– 180 องศาเซลเซียส สำหรับปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะมีกลไกการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ [13]



(S = basic site; S' = acid site)

เนื่องจากปฏิกิริยามีน้ำเกิดขึ้นคู่กับคาร์บอนเตจ การกำจัดน้ำออกระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้สมดุลระหว่างสารผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้นเลื่อนมาทางขวามากขึ้น ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์คาร์บอนเตจมากขึ้น สามารถกำจัดน้ำได้ด้วยการเติมสารอินทรีย์ที่สามารถจับโมเลกุลน้ำได้ ตัวอย่างเช่น อะซีทัล (Acetals) [9] คีทัล (Ketals) [10] ไซยาไนด์ (Cyanides) และอิมิด (Imides) [11] หรือใช้สารอินทรีย์เช่น ซีโอดีทซึ่งถูกใช้ทั่วไปในการจับน้ำที่ปนอยู่กับเอทานอลที่ได้จากการกลั่นซึ่งจะมีน้ำปนมาประมาณ 5% แต่การใช้ซีโอดีทในกรณีนี้ต้องใช้ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 240 เคลวิน [12] เพื่อไม่ให้เกิดการแตกตัวของคาร์บอนเตจบนตำแหน่งที่เป็นกรดของซีโอดีท (เกิดที่อุณหภูมิประมาณ 400 เคลวิน) อีกเทคนิคที่ใช้ได้ผลโดยไม่ต้องกังวลเรื่องการเกิดปฏิกิริยาควนคู่ คือ การใช้เทคนิคเมมเบรนเพอร์เวปอเรชัน (Membrane pervaporation) ดังแสดงในรูปที่ 3.6.4 ซึ่งเป็นตัวอย่างของการผลิตไดเอทิลคาร์บอนเตจ (DEC) หลังการทำปฏิกิริยาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนที่เหลือถูกแยกออกแล้วนำกลับไปใช้ใหม่ ส่วนกระแสผลิตภัณฑ์ที่ผสมกันระหว่าง DEC น้ำและเอทานอล (ส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา) จะผ่านเข้าหน่วยเพอร์เวปอเรชัน เฉพาะโมเลกุลน้ำจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนที่อีกด้านหนึ่งถูกทำให้เป็นสุญญากาศเพื่อเพิ่มแรงขับให้โมเลกุลน้ำเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้มากขึ้น ขั้นตอนสุดท้าย DEC จะถูกแยกออกจากเอทานอลด้วยการกลั่น

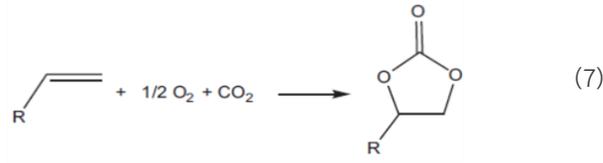


รูปที่ 3.6.4 แผนภาพการผลิตไดเอทิลคาร์บอนเตจจาก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเอทานอลใช้เทคนิคเมมเบรนเพอร์เวปอเรชันในการแยกน้ำออกจากกระแสผลิตภัณฑ์ขาออก

ที่มา: Dibenedetto และคณะ (2012) [13]



ไซคลิกคาร์บอนเนตสามารถสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดทีฟคาร์บอกซิเลชัน (Oxidative carboxylation) ของโอเลฟินส์ ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ (7) โดยประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อย คือ (1) อีพอกซิเดชันของโอเลฟินส์ และ (2) คาร์บอนชันของอีพอกไซด์ ทั้ง 2 ขั้นตอนเกิดต่อเนื่องภายในเครื่องปฏิกรณ์เดียวกัน



### ช่องว่างการพัฒนาที่สำคัญ

การสังเคราะห์คาร์บอนเนตที่มีโครงสร้างเชิงเส้นจากคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านกระบวนการเติมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในโครงสร้างของแอลกอฮอล์โดยตรง มีปัญหาที่สำคัญคือ เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง แม้ว่าการแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามในปฏิกิริยาที่เป็นสภาวะของเหลว พบว่ายังมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ยาก ทั้งนี้การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวต้องใช้ความดันสูง และมีการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเร็ว ปัจจุบันจึงมีความพยายามในการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ แต่พบว่าอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์กลุ่มคาร์บอนเนตยังอยู่ในปริมาณที่ต่ำ นอกจากปัญหาดังกล่าวแล้ว การสังเคราะห์ไซคลิกคาร์บอนเนตจากคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดทีฟคาร์บอกซิเลชันของโอเลฟินส์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ ก๊าซออกซิเจนอาจเข้าทำปฏิกิริยากับโอเลฟินส์ที่ตำแหน่งพันธะคู่ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง และส่งผลให้ค่าการเลือกเกิดของคาร์บอนเนตต่ำลงได้

### ประเด็นที่มุ่งเน้น: โอกาสของภาคอุตสาหกรรม

ตามกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติ ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) ซึ่งได้มุ่งเน้นให้มีความพยายามในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อลดผลกระทบของปัญหาภาวะโลกร้อนที่ทวีความรุนแรงขึ้นในแต่ละปี หลายหน่วยงานจึงมุ่งเน้นมาที่การวิจัยการใช้ประโยชน์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อผลิตเป็นสารมูลค่าเพิ่มที่สำคัญในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี สอดคล้องกับแนวคิดระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน รวมทั้งความต้องการในตลาดโลกของคาร์บอนเนตที่มีการขยายตัวสูงขึ้นทุกปี และคาดว่าจะสูงถึง 594.3 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี พ.ศ. 2567 สืบเนื่องมาจากการที่คาร์บอนเนตเป็นสารเคมีทางเลือกที่มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และในประเทศไทยยังมีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารในกลุ่มนี้อยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นการผลักดันให้กลุ่มอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องพิจารณาเลือกใช้สารในกลุ่มคาร์บอนเนตที่ผลิตจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเป็นหนึ่งแนวทางสำคัญที่จะช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แหล่งกำเนิด และยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้อีกด้วย



## เอกสารอ้างอิง

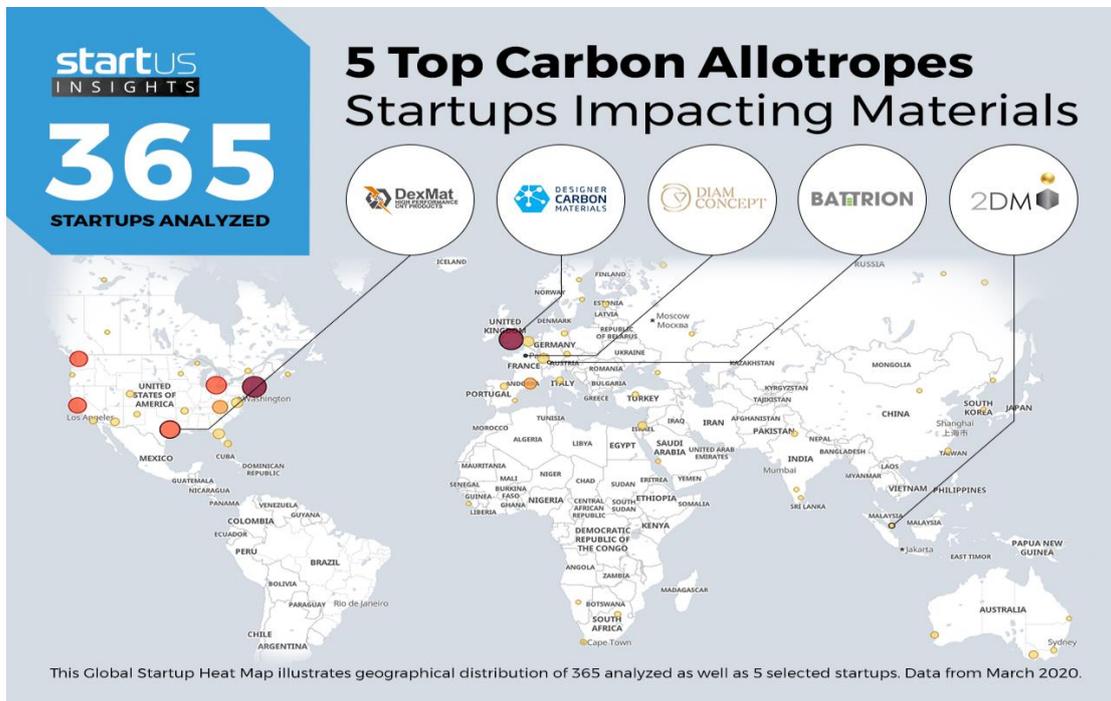
- [1] E. J. Lopes, A. P. Ribeiro, and L. M. Martins, New trends in the conversion of CO<sub>2</sub> to cyclic carbonates, *Catalysts* 10(5), 2020, 479.
- [2] M. Aresta, A. Dibenedetto, and E. Quaranta, State of the art and perspectives in catalytic processes for CO<sub>2</sub> conversion into chemicals and fuels: The distinctive contribution of chemical catalysis and biotechnology, *Journal of Catalysis* 343, 2016, 2–45.
- [3] D. Delledonne, F. Rivetti, and U. Romano, Developments in the production and application of dimethyl carbonate, *Applied Catalysis: A-general* 221, 2001, 241–251.
- [4] A-A.G. Shaikh and S. Sivaram, Organic carbonates, *Chemical Reviews* 96, 1996, 951–976.
- [5] H.J. Buyschm, *Ullmann’s Encyclopedia of industrial chemistry*, vol. A5, VCH Publishers, Weinheim, 1992, p. 197.
- [6] <https://www.marketresearchfuture.com/reports/dimethyl-carbonate-market-5486> (accessed date: July 2, 2021).
- [7] <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/dimethyl-carbonate-market-24544228.html> (accessed date: July 2, 2021)
- [8] M. Aresta, A. Dibenedetto, and C. Pastore, Synthesis and characterization of Nb (OR)<sub>4</sub>[OC(O)OR] (R = Me, Et, Allyl) and their reaction with the parent alcohol to afford organic carbonates, *Inorganic Chemistry* 42, 2003, 3256–3261.
- [9] T. Sakakura, Y. Saito, J-C. Choi, T. Masuda, T. Sako, and T. Oriyama, Metal-catalyzed dimethyl carbonate synthesis from carbon dioxide and acetals, *Journal of Organic Chemistry* 64, 1999, 4506–4508.
- [10] M. Aresta, A. Dibenedetto, C. Di Leo, I. Tommasi, and E. Amodio, The first synthesis of a cyclic carbonate from a ketal in SC- CO<sub>2</sub>, *Journal of Supercritical Fluids* 25, 2003, 177-182.
- [11] M. Honda, S. Kuno, S. Sonehara, K. Fujimoto, K. Suzuki, Y. Nakagawa, and K. Tomishige, Tandem carboxylation-hydration reaction system from methanol, CO<sub>2</sub> and benzonitrile to dimethyl carbonate and benzamide catalyzed by CeO<sub>2</sub>, *ChemCatChem* 3, 2011, 365–370.
- [12] K. Tomishige and K. Kunimori, Catalytic and direct synthesis of dimethyl carbonate starting from carbon dioxide using CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> solid solution heterogeneous catalyst: effect of H<sub>2</sub>O removal from the reaction system, *Applied Catalysis A: general* 237, 2002, 103–109.
- [13] A. Dibenedetto, M. Aresta, A. Angelini, J. Ethiraj, and B.M. Aresta. Synthesis, characterization, and use of nbv/ceiv-mixed oxides in the direct carboxylation of ethanol by using pervaporation membranes for water removal, *Chemistry–A European Journal* 18, 2012, 10324–10334.



## 3.7 เทคโนโลยีการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นวัสดุฐานคาร์บอน

### ตลาดและการแข่งขัน

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ในปัจจุบันได้มีนโยบายต่าง ๆ มากมายเพื่อที่จะลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก เช่น การลดปริมาณในการใช้พลังงาน และการหันมาใช้พลังงานหมุนเวียน เป็นต้น ทั้งนี้ยังมีการศึกษาเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Capture and Storage: CCS) ซึ่งเป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและเก็บไว้ในชั้นใต้ดินลึกลงไปหลายกิโลเมตร อย่างไรก็ตามยังมีอีกเทคโนโลยีที่นำช่วยในการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งก็คือ เทคโนโลยีการดักจับ การใช้ประโยชน์ และการกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture, Utilization and Storage: CCUS) [1] การเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นผงคาร์บอนซึ่งเป็นของแข็งนั้นกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากวัสดุฐานคาร์บอนเป็นวัสดุพิเศษที่ใช้ในหลายอุตสาหกรรมทำให้ในปัจจุบันธุรกิจการผลิตวัสดุฐานคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ยังคงเป็นที่น่าจับตามอง ดังแสดงในรูปที่ 3.7.1 ที่แสดงให้เห็นถึงธุรกิจการผลิตวัสดุฐานคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ทั่วโลก และมีอยู่ 5 บริษัทที่สร้างนวัตกรรมและส่งผลกระทบต่อเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุฐานคาร์บอน ได้แก่ DexMat (ท่อนาโนคาร์บอน: Carbon nanotubes) Designer Carbon Materials (ฟูลเลอร์รีน: Fullerenes) Diam Concept (เพชร: Diamonds) Batttrion (กราไฟต์: Graphite) และ 2DM (กราฟีน: Graphene)



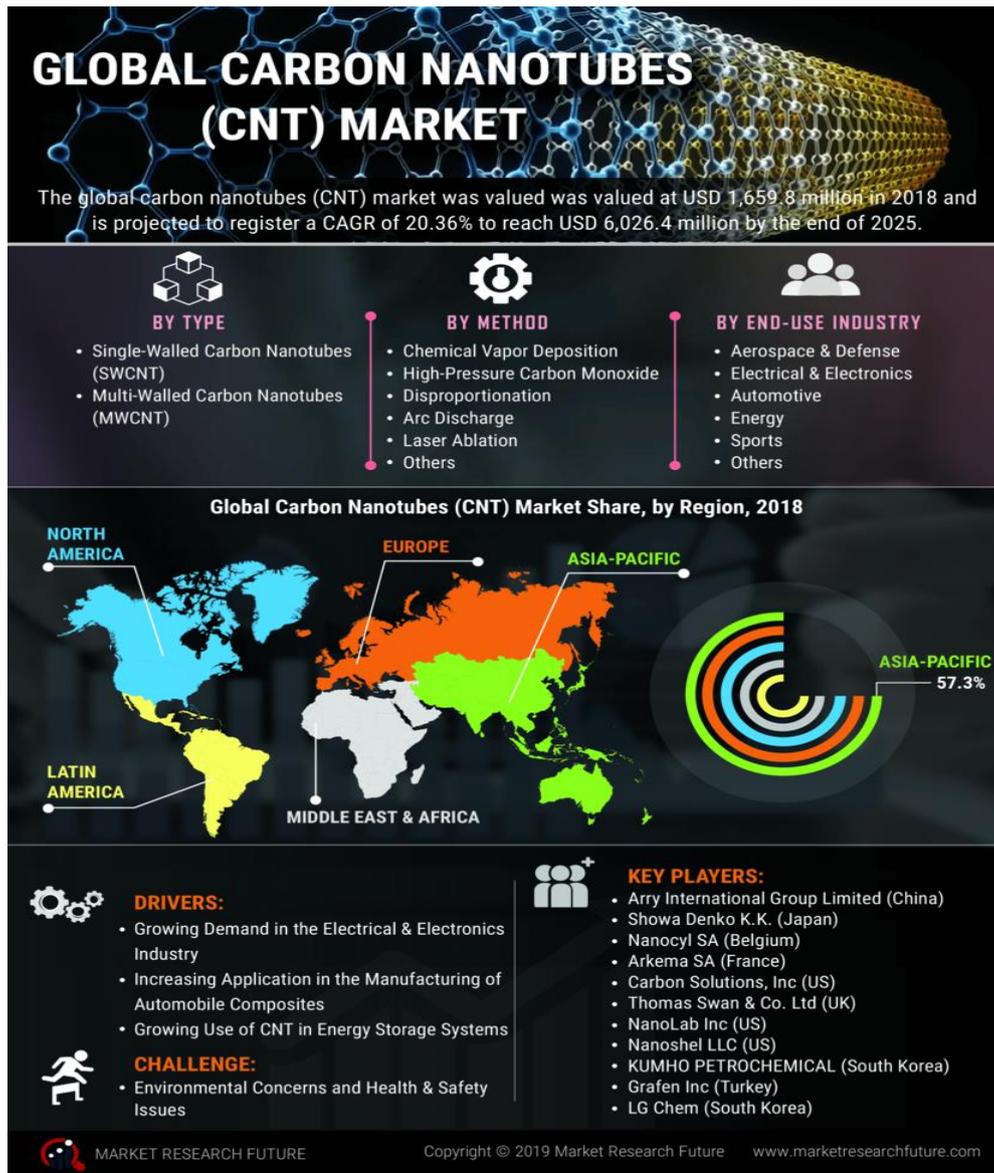
รูปที่ 3.7.1 ภาพรวมของธุรกิจการผลิตวัสดุฐานคาร์บอนทั่วโลก และบริษัท Start-up ชั้นนำในการผลิตวัสดุฐานคาร์บอน  
ที่มา: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/5-top-carbon-allotropes-startups-impacting-the-materials-industry/> (accessed date: June 4, 2021) [2]

อีกหนึ่งความเป็นไปได้ของการวางแผนกลยุทธ์เชิงรุกในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อนำไปผลิตวัสดุมูลค่าเพิ่ม คือการนำมาใช้ในการผลิตท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) เป็นอีกรูปหนึ่งของสารประกอบคาร์บอน โดยท่อนาโนคาร์บอนค้นพบครั้งแรกโดย ศาสตราจารย์ ซูมิโอะ อีจิมะ ในปี พ.ศ. 2534 ด้วยคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีที่น่าสนใจหลายประการของท่อนาโนคาร์บอนทำให้วัสดุชนิดนี้ได้รับความสนใจในวงกว้าง ตัวอย่างเช่น ท่อนาโนคาร์บอนสามารถทนในสภาวะกรดและเบสได้ดีและทนอุณหภูมิได้มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี รวมถึงมีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นสูงในขณะที่มีน้ำหนักเบา จากคุณสมบัติต่าง ๆ ที่กล่าวมานั้น ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมิติ เช่น ใช้เป็นวัสดุรองรับ วัสดุเพิ่มความแข็งแรง ตัวเก็บพลังงาน ตัวตรวจวัด วงจรไฟฟ้า และตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

จากข้อมูลการตลาดระดับโลกของท่อนาโนคาร์บอนมีมูลค่ามากกว่า 2.6 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี พ.ศ. 2562 และมีการคาดการณ์ที่จะเพิ่มมูลค่าได้มากถึง 5.8 ล้านดอลลาร์สหรัฐในปี พ.ศ. 2570 โดยคาดว่าจะมีการเติบโตของตลาดท่อนาโนคาร์บอนทั่วโลกอยู่ที่ 10.7% CAGR (Compound Annual Growth Rate) ในช่วงปี พ.ศ. 2563 ถึง 2570 การขยายตัวของตลาดดังกล่าวสืบเนื่องมาจากการเพิ่มความต้องการวัสดุประเภทพอลิเมอร์ผสมน้ำหนักเบา (Lightweight structural polymer composites) วัสดุป้องกันไฟฟ้าสถิตในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ระบบกักเก็บพลังงาน และอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ เป็นต้น

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ส่วนแบ่งตลาดโลก ภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกมีการเติบโตของตลาดท่อนาโนคาร์บอนสูงที่สุดและมีค่าอยู่ที่ 11.6% CAGR เนื่องจากมีการลงทุนด้านการผลิตอย่างมหาศาลในหลายประเทศ เช่น จีน ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย และอินเดีย และเมื่อพิจารณาตลาดโดยแบ่งตามประเภทของท่อนาโนคาร์บอน จะเห็นว่าท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes หรือ MWCNT) มีส่วนแบ่งการตลาดที่มากที่สุดถึง 65.1% ในปี พ.ศ. 2562 และคาดว่าจะมีการเติบโตอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะท่อคาร์บอนนาโนชนิดผนังเดี่ยว (Single-walled carbon nanotubes หรือ SWCNT) มีการคาดการณ์จะมีการเติบโตของตลาดได้สูงถึง 15% CAGR ซึ่งการเติบโตของตลาดท่อคาร์บอนนี้เกี่ยวข้องกับความต้องการหลากหลายด้านโดยเฉพาะการนำมาใช้เป็นวัสดุเพิ่มความแข็งแรงและน้ำหนักเบาและการนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบกักเก็บพลังงาน ดังแสดงดังรูปที่ 3.7.2





**รูปที่ 3.7.2** ภาพรวมของตลาดโลกของท่อนาโนคาร์บอน โดยจำแนกเป็นประเภทต่าง ๆ

ที่มา: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/carbon-nanotube-market-4397> (accessed date: June 03, 2021) [3]

**กระบวนการผลิต**

โดยทั่วไปท่อนาโนคาร์บอนนั้น สามารถสังเคราะห์ได้โดยผ่านกระบวนการหลากหลายวิธี ตัวอย่างเช่น วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc-Discharge) วิธีระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization) และวิธีตกตะกอนไอระเหยของสารเคมี (Chemical vapor deposition (CVD)) โดยสองวิธีแรกนี้ ถือว่าเป็นเทคนิคที่ต้องผ่านอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง (High temperature routes) และนอกจากนี้ยังต้องอาศัยวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้ในการผลิตท่อนาโนคาร์บอนที่มีราคาค่อนข้างแพง เช่น ต้องใช้แท่งขั้วไฟฟ้ากราไฟท์ที่มีความบริสุทธิ์สูง รวมถึงการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก แต่ในขณะที่สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณต่ำ ดังนั้นจึงยากต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ในขณะที่วิธีตกตะกอนไอระเหยของสารเคมีเป็นเทคนิคที่ถือว่าการใช้อุณหภูมิในช่วงปานกลาง (Medium temperature routes) โดยวิธีการสังเคราะห์นี้เป็นวิธีที่สามารถควบคุมสภาวะต่าง ๆ ในการสังเคราะห์ได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าวิธีอื่น ๆ ทำให้มีการนำเทคนิคนี้มาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตท่อนาโนคาร์บอนในปัจจุบัน

โดยทั่วไปสามารถนำสารประกอบคาร์บอนหลากหลายประเภทมาใช้เป็นสารตั้งต้นของการผลิตท่อนานโนคาร์บอน เช่น ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ก๊าซอะเซทิลีน (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเอทานอล (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) เป็นต้น หรือแม้แต่แหล่งกำเนิดคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นของแข็ง เช่น พลาสติกที่เหลือจากการใช้งาน หรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เป็นต้น โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดสารประกอบคาร์บอนดังกล่าวจะถูกส่งผ่านเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 700 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส สำหรับการใช่วิธีตกตะกอนไอระเหยของสารเคมี ซึ่งมีการควบคุมการแตกตัวของแหล่งกำเนิดคาร์บอนบนพื้นผิวของของแข็งเพื่อฟอร์มตัวเป็นท่อนานโนคาร์บอน โดยมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นอนุภาคโลหะ เช่น เหล็ก โคบอล นิกเกิล และทองแดง เป็นต้น บนตัวรองรับของแข็ง หรือแผ่นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Anodic Al oxides (AAO)) เพื่อเป็นแม่แบบสำหรับสังเคราะห์ท่อนานโนคาร์บอน ที่มีขนาด ความยาว และมีความเป็นระเบียบสูง เพื่อให้สารประกอบคาร์บอนแตกตัวเป็นเรดิคัลอิสระ (Free radical) ของคาร์บอน จากนั้นจะรวมตัวกันบนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะและก่อตัวขึ้นเป็นท่อนานโนคาร์บอนขึ้นเพื่อควบคุมให้สามารถสังเคราะห์ท่อนานโนคาร์บอนให้ได้ปริมาณมาก รวมทั้งมีขนาดและความยาวที่เหมาะสมจึงอาศัยปัจจัยที่มีความสำคัญในการสังเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ระยะเวลา ความเข้มข้นของแหล่งกำเนิดคาร์บอน รวมไปถึงขนาดและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมด้วย

เมื่อพิจารณาถึงการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน สำหรับการผลิตท่อนานโนคาร์บอนเป็นกลยุทธ์หนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถพิจารณาแหล่งคาร์บอนดังกล่าวเป็นแหล่งคาร์บอนที่ไม่ต้องมีการลงทุนเกี่ยวกับสารตั้งต้น (No-cost resource) เหมือนกับการใช้แหล่งกำเนิดคาร์บอนรูปแบบอื่น ๆ ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตท่อนานโนคาร์บอน และยังสามารถที่จะลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศหรือจากภาคอุตสาหกรรมได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังเป็นการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิโดยรวมที่อันเกิดมาจากกระบวนการผลิตท่อนานโนคาร์บอนในปัจจุบันที่ใช้แหล่งกำเนิดคาร์บอนชนิดอื่น เช่น อะเซทิลีน เป็นต้น

ดังกล่าวข้างต้น การพัฒนากระบวนการผลิตท่อนานโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ ซึ่งไม่เพียงแต่เป็นการลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้นแต่ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุที่ได้เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลากหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมการแพทย์ เป็นต้น

## ความพร้อมทางด้านเทคโนโลยีในปัจจุบัน (Technology readiness level) และการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรม

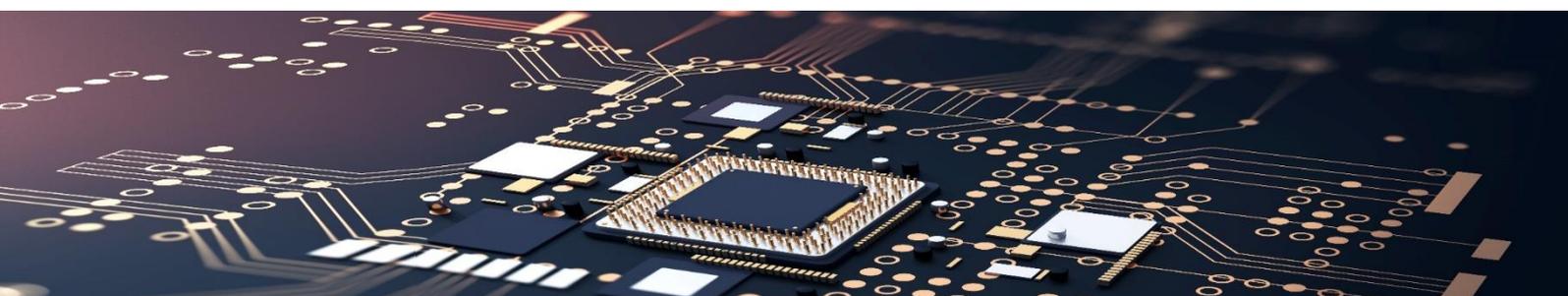
วิธีการที่ง่ายสุดในเชิงทฤษฎีสำหรับการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์บอนนั้น คือการทำให้คาร์บอนไดออกไซด์แตกตัวออกเป็นคาร์บอนและออกซิเจน ดังสมการที่ 1



อย่างไรก็ตามการที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นนั้นยังไม่สามารถทำให้เกิดได้ในสภาพแวดล้อมปกติที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากต้องใช้พลังงานที่สูงมาก มีเพียงแต่การทำให้คาร์บอนไดออกไซด์แตกตัวออกเป็นออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เท่านั้น โดยอาศัยพลังงานจากไมโครเวฟ [4] ดังสมการที่ 2



ดังนั้นการที่จะให้คาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนนั้น จำเป็นจะต้องใช้เทคโนโลยีจำเพาะ เช่น วิธีการทางเคมีไฟฟ้า โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็น Novel catalysts

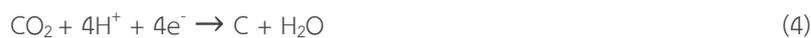


วิธีการทางเคมีไฟฟ้า (Electrocatalyst) จะมีองค์ประกอบหลัก ๆ คือ ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) ซึ่งประกอบด้วยขั้วแอโนดและขั้วแคโทด และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) โดยในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นวัสดุฐานคาร์บอนนั้นจะต้องใช้ขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วเฉื่อย หรือก็คือเป็นขั้วไฟฟ้าที่ไม่มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาในระบบ ซึ่งมักจะทำมาจากโลหะมีค่า เช่น แพลตตินัม (Pt) เป็นต้นจากงานวิจัยของ Li และคณะ [5] ได้ใช้วิธีการเคมีไฟฟ้าในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัสดุฐานคาร์บอนโดยใช้เกลือหลอมเหลว LiCl–Li<sub>2</sub>O เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ใช้แพลตตินัมและไทเทเนียม เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด ตามลำดับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบคือ เมื่อ LiCl–Li<sub>2</sub>O หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 903 เคลวิน จะคายออกซิเจนออกมาและทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลายเป็น CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> หลังจากนั้นจะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา ตามสมการที่ 3 และได้คาร์บอนและออกซิเจนเป็นผลผลิต



จากงานวิจัยนี้จะพบว่า ในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัสดุฐานคาร์บอนนั้น จำเป็นจะต้องใช้พลังงานที่สูงมาก ซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนที่ทำให้เกลือละลาย อีกทั้งยังต้องใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นให้เกิดวัสดุฐานคาร์บอนออกมา

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ใช้การเพิ่มความดันเพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาแทนการใช้ความร้อน ซึ่งคาร์บอนที่ได้ออกมาจะเคลือบอยู่ที่แท่งเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) [6] ผู้วิจัยได้ทำการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งประกอบด้วยเมทานอลและสารละลายอิเล็กโทรไลต์อินทรีย์ (TBAPF<sub>6</sub>) จนถึงความดัน 10 MPa ซึ่งทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในสารละลายดังกล่าวและใช้แพลตตินัมและเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด ตามลำดับ หลังจากจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ เมทานอลจะคายทั้งอิเล็กตรอนและโปรตรอน ประจุดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ และได้เป็นวัสดุฐานคาร์บอนเกาะอยู่ที่ผิวขั้วแคโทด ดังสมการที่ 4



งานวิจัยนี้ยังได้ทำการทดลองที่ความดันต่าง ๆ และพบว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้นปริมาณของคาร์บอนที่เกาะอยู่ผิวขั้วแคโทดจะลดลงจนถึงที่ความดัน 20 MPa จะไม่มีคาร์บอนเกาะอยู่ที่ผิวขั้วแคโทดเลย ดังนั้นที่ความดัน 10 MPa จึงเป็นความดันที่ดีที่สุดในการทำให้เกิดคาร์บอน อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังต้องใช้พลังงานสูง

Esrafilzadeh และคณะ [7] ได้รายงานการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้าที่เป็นโลหะเหลว (Liquid metal) ของโลหะผสม Galinstan ที่มีอนุภาคซีเรียม (Cerium) แล้วใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดและใช้แพลตตินัมเป็นขั้วแอโนดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ TBAPF<sub>6</sub>–Dimethylformamide (DMF) โดยวิธีการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มจากการที่ซีเรียมในขั้วไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนในอากาศกลายเป็นซีเรียม (III) ออกไซด์ (Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) หลังจากนั้น Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จะทำปฏิกิริยากับน้ำและอิเล็กตรอน จนได้ Ce<sup>(0)</sup> ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ผลผลิตเป็นวัสดุฐานคาร์บอนและซีเรียมออกไซด์ (CeO<sub>2</sub>) ดังแสดงสมการที่ 5



ยิ่งไปกว่านั้นวัสดุฐานคาร์บอนที่เป็นผลผลิตนั้น ได้มีการนำไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการสร้างตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) ซึ่งได้ผลลัพท์ใกล้เคียงกับคาร์บอนที่มีขายทั่วไป



จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัสดุฐานคาร์บอนนั้น จำเป็นจะต้องใช้พลังงานที่สูงหรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังใช้อุปกรณ์ในการทำปฏิกิริยา เช่น ขั้วไฟฟ้าแพลตตินัม ซึ่งมีราคาสูงทำให้ในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นคาร์บอนนั้น ยังคงมีต้นทุนที่สูงมากเทียบกับผลผลิตที่ได้รับ อีกทั้งวัสดุฐานคาร์บอนที่ได้ยังคงเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) อย่างไรก็ตามยังคงมีงานวิจัยที่จะพัฒนาเพื่อลดต้นทุนในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัสดุฐานคาร์บอนอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้วัสดุฐานคาร์บอนรูปแบบอื่น เช่น ท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดคาร์บอนอื่น ๆ เช่น อะเซทิลีน มีเทน เอทิลีน เอทานอล และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ แหล่งกำเนิดคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถือว่าเป็นแหล่งที่ถูกที่สุดและมีปริมาณคาร์บอนเมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยทั่วไป ยังถือว่าเป็น “เทคโนโลยีอุบัติใหม่ (Emerging Technology)” และจัดเป็นกระบวนการที่มีความพร้อมทางเทคโนโลยีอยู่ในระดับ TRL 6-7 ประกอบกับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโมเลกุลที่มีเสถียรภาพซึ่งยากต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยผ่านปฏิกิริยารีดักชันซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญของการเกิดสารมัธยันต์เพื่อให้เกิดการฟอร์มตัวของท่อนาโนคาร์บอนต่อไป ซึ่งในปัจจุบันมีงานวิจัยและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนี้

1. กระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านวิธีตกตะกอนไอระเหยของสารเคมีด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น

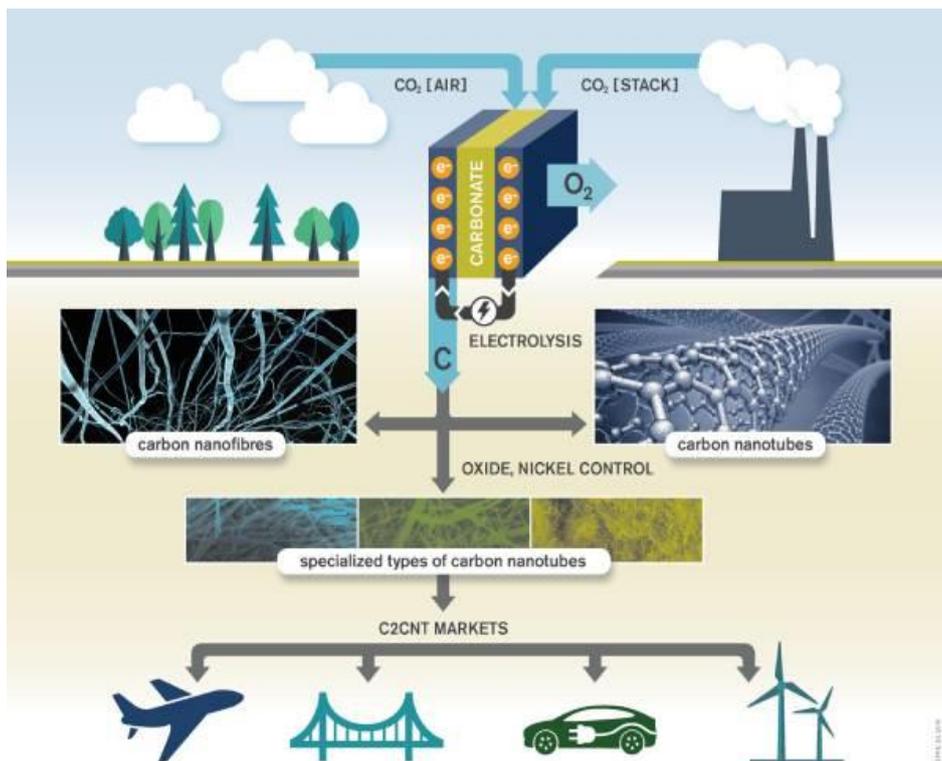
- การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเฟอร์ไรท์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ผลึกเฟอร์ไรท์ที่ขาดแคลนออกซิเจน (Oxygen deficient ferrites (ODF)) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยารีดักชันของเฟอร์ไรท์กับก๊าซไฮโดรเจน ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวต่อการสลายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อผลิตอะตอมของคาร์บอนที่พร้อมจะฟอร์มตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอนต่อไป [8-9]

- การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทโลหะทรานซิชันและโลหะทรานซิชันบนตัวรองรับ โดยทั่วไปโลหะทรานซิชันหลายประเภท เช่น เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ รวมทั้งโลหะดังกล่าวบนตัวรองรับเช่น อะลูมินา แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมออกไซด์ เป็นต้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนได้เช่นกัน [10-11]

2. กระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) ตัวอย่างเช่นกระบวนการ C2CNT (Carbon dioxide into carbon nanotubes) ดังแสดงในรูปที่ 3.7.3 ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสโดยใช้คาร์บอเนตหลอม (Molten carbonates) และใช้ขั้วโลหะผสมของนิกเกิล (Nickel superalloy (Inconel 718)) เป็นขั้วแอโนด และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนได้สำเร็จไม่ว่าจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศ หรือจากการปล่อยของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และเทคนิคดังกล่าวสามารถปรับขยายขนาด (Scale Up) ของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน รวมถึงอยู่ในระหว่างขั้นตอนการพัฒนาการยกระดับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนในระดับเชิงพาณิชย์ [12-13]







**รูปที่ 3.7.3** แผนภาพเทคโนโลยี C2CNT (Carbon dioxide into carbon nanotubes) สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis)

ที่มา: <https://www.capitalpower.com/sustainability/innovation/carbon-conversion> (accessed date: June 03, 2021) [14]

ซึ่งเมื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการขยายขนาดการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับอุตสาหกรรม แม้ว่ากระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกจัดเป็นเทคโนโลยีอุบัติใหม่ (Emerging Technology) แต่ก็มีบางเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องที่น่าสนใจในปัจจุบัน ซึ่งได้มีการศึกษากระบวนการผลิตดังกล่าวโดยใช้แหล่งผลิตไฟฟ้าที่มีต้นทุนต่ำ สามารถที่จะลดการปล่อยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิได้มากถึง 77-98% นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) พบว่าการกำหนดราคาท่อนาโนคาร์บอนที่ผลิตได้มีค่าต้นทุนการผลิตที่สำคัญขึ้นอยู่กับต้นทุนของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้โดยมีการประเมินความเป็นไปได้ของเทคโนโลยีดังกล่าว พบว่ามีความน่าจะเป็นในการสร้างกระแสรายได้เป็นที่น่าพอใจและสามารถลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไม่น้อยกว่า 2 ล้านตันต่อปี ส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์และสามารถก่อให้เกิดรายได้มากถึง 1.08-5.40 พันล้านเหรียญสหรัฐ [15]

### ช่องว่างการพัฒนาที่สำคัญ

แม้ว่าจะมีเทคโนโลยีปัจจุบันที่ใช้ในการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น่าสนใจ แต่ยังมีข้อจำกัดในการพัฒนากระบวนการดังกล่าวในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากปัญหาดังต่อไปนี้

1. ข้อจำกัดด้านความซับซ้อนของกระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนในระดับใหญ่ เช่น ในระดับอุตสาหกรรม
2. ในกระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น อาศัยพลังงานที่ค่อนข้างสูงซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งโดยทั่วไปพลังงานที่ใช้ในการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจะมากกว่าการผลิตวัสดุอื่น ๆ เช่น ใช้พลังงานมากกว่ากระบวนการผลิตอะลูมิเนียมประมาณ 30 ถึง 100 เท่า นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงแหล่งพลังงานที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนนั้นต้องไม่มาจากแหล่งพลังงานที่เกิดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศเพิ่มเติม

3. นอกจากข้อจำกัดด้านความซับซ้อนของกระบวนการผลิตท่อนานคาร์บอน ยังพบว่าโดยทั่วไปในกระบวนการผลิตนั้น อาศัยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารแม่แบบสำหรับการกำหนดโครงสร้างการเรียงตัวของท่อนานคาร์บอน เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นอนุภาคโลหะ เช่น เหล็ก โคบอล นิกเกิล และทองแดง เป็นต้น บนตัวรองรับของแข็ง หรือแผ่นอะลูมิเนียมออกไซด์เพื่อกำหนดโครงสร้างของท่อนานคาร์บอน รวมถึงข้อไฟฟ้าในกรณีที่เป็นการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสโดยวัสดุดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูงและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ยากส่งผลให้ราคาของท่อนานคาร์บอนที่ผลิตได้สูงไปด้วย

4. ข้อจำกัดด้านปริมาณและคุณภาพของท่อนานคาร์บอนที่ผลิตได้ เนื่องจากโดยทั่วไปเมื่อใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะอาศัยพลังงานมากเพื่อช่วยในการแตกตัวของโมเลกุลเทียบกับแหล่งกำเนิดคาร์บอนชนิดอื่น ๆ และยังส่งผลให้ร้อยละผลผลิตและคุณภาพของท่อนานคาร์บอนต่ำกว่าท่อนานคาร์บอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดคาร์บอนอื่น ๆ

จากข้อจำกัดดังกล่าวทำให้การประยุกต์ใช้งานของกระบวนการผลิตท่อนานคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคอุตสาหกรรมยังไม่สามารถประสบความสำเร็จในปัจจุบันและทำให้ท่อนานคาร์บอนที่ผลิตได้มีราคาสูง ซึ่งโดยทั่วไปจะมีราคาในช่วง \$85-\$450K ต่อดัน [16] และจะมีราคาสูงกว่าวัสดุชนิดอื่นค่อนข้างมาก แม้ว่าจะเป็นวัสดุที่มีข้อดีหลายประการโดยเฉพาะอย่างยิ่งถือว่าเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทางแรงดึง (Tensile strength) สูงที่สุดซึ่งมีค่าประมาณ 93,900 เมกะปาสคาล [17-18] เป็นต้น

### กลยุทธ์การพัฒนาเพื่อการพลิกผัน Pain point to gain point/Opportunity

เพื่อเป็นการพัฒนากระบวนการผลิตท่อนานคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีประสิทธิภาพนั้น สามารถพิจารณาได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือส่วนแรกเป็นการพัฒนาตัวกระบวนการรวมถึงตัวเร่งปฏิกิริยาหรือข้อไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมการผลิตท่อนานคาร์บอน ไม่ว่าจะใช้ในกระบวนการวิธีตกตะกอนไอระเหยของสารเคมี หรือผ่านกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตท่อนานคาร์บอนที่มีคุณภาพสูงที่อุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ และอีกส่วนสำคัญที่ต้องทำการพัฒนาเพื่อให้สามารถบรรลุเป้าหมายของการนำเทคโนโลยีการผลิตท่อนานคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมคือ การพัฒนาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต้นทุนต่ำรวมถึงการใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าทดแทนเพื่อไม่ให้มีการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศเพิ่มเติม และเพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นศูนย์อย่างแท้จริง

### แนวทางดำเนินการและผลที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตท่อนานคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อนำไปสู่การขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรมนั้น จำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือจากหลายภาคส่วนด้วยกันทั้งในส่วนของอุตสาหกรรมที่ประสบปัญหาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก ภาครัฐบาลที่จริงจังกับการควบคุมการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ การทำงานร่วมกันของนักวิจัยทั้งทางฝั่งภาคเอกชนและสถาบันการศึกษาเพื่อร่วมกันพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาหรือข้อไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตดังกล่าว ผู้ผลิตเทคโนโลยีเพื่อผลักดันการนำผลการศึกษาร่วมกันวิจัยไปสู่ภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งผู้ผลิตและนักวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลังงานสะอาด หรือพลังงานทดแทน เนื่องจากความอ่อนไหวหนึ่งที่สำคัญของกระบวนการนี้สืบเนื่องมาจากต้นทุนการผลิตไฟฟ้าและคุณภาพของการผลิตไฟฟ้าที่ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างแท้จริง รวมถึงสร้างมูลค่าให้กับสินค้า ซึ่งส่งผลให้ลดต้นทุนการผลิตวัสดุในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และการบิน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมทางการแพทย์ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลช่วยผลักดันเศรษฐกิจของประเทศต่อไป



## ประเด็นที่มุ่งเน้น: โอกาสของภาคอุตสาหกรรม (Issue in Focus: Industrial sector opportunities)

เนื่องจากในปัจจุบันถือว่ากระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น “เทคโนโลยีอุบัติใหม่” ดังนั้นการที่สามารถพัฒนาเทคโนโลยีใหม่เพื่อเป็นเจ้าของเทคโนโลยีดังกล่าวมีความเป็นไปได้สูงและมีเทคโนโลยีแข่งขันในปัจจุบันจำนวนน้อยทำให้ประเทศไทยสามารถมีโอกาสด้านการแสดงศักยภาพในการพัฒนาเทคโนโลยีของตนเองได้ นอกจากนี้ในปัจจุบันประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก ซึ่งมีค่าประมาณ 3.68 ตันต่อหัวประชากร และกิจกรรมหลักที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากนี้มาจากภาคการผลิตไฟฟ้า อุตสาหกรรม และการขนส่ง (ข้อมูล: สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ปี 2563-2564) ซึ่งจะเห็นว่าจากปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยในปริมาณมหาศาลนี้ จึงทำให้เรามองหาโอกาสทางเลือกใหม่ในการเปลี่ยนเป็นวัสดุนาโนเพิ่มมูลค่าได้

ยิ่งไปกว่านั้นในส่วนของ การนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาวัสดุดังกล่าวเพื่อประยุกต์ใช้ในชิ้นส่วนรถยนต์ ในส่วนของประเทศไทยซึ่งถือว่ามีการผลิตรถยนต์จำนวนมาก ดังนั้นจึงเป็นโอกาสอันดีที่จะสามารถประยุกต์ใช้วัสดุดังกล่าวที่ผลิตขึ้นจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ รวมถึงการนำมาใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นวัสดุทางการแพทย์ และการเร่งปฏิกิริยาเคมีและเคมีไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น ลดการปล่อยของก๊าซอันตรายหรือการปนเปื้อนของสารพิษในแหล่งน้ำต่าง ๆ ซึ่งเป็นหัวข้อหนึ่งที่สามารถนำวัสดุท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้งานได้เช่นกัน

แม้ว่าที่ผ่านมาการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อาศัยพลังงานค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามเราสามารถจัดการแก้ปัญหาเรื่องนี้ได้ เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนสามารถใช้เป็นวัสดุที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้อีกด้วย และยิ่งไปกว่านั้นประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่ได้รับการสนับสนุนในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนอีกด้วย ดังนั้นเมื่อนำแหล่งพลังงานทดแทนมาประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการผลิตท่อนาโนคาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะเห็นว่าสามารถพิจารณากระบวนการดังกล่าวในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นวัสดุนาโนที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นศูนย์



## เอกสารอ้างอิง

- [1] T. C. A. Academy, "CCUS เทคโนโลยีที่กำลังเติบโตเพื่อการปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์," TGO Climate Action Academy. <https://caacademy.tgo.or.th/ccus-%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%A2%E0%B8%B5%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%81%E0%B8%B3%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%9A/> (accessed date: April 29 2021).
- [2] <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/5-top-carbon-allotropes-startups-impacting-the-materials-industry/> (accessed date: June 04, 2021).
- [3] <https://www.marketresearchfuture.com/reports/carbon-nanotube-market-4397> (accessed date: June 03, 2021).
- [4] T. Sakurap and A. Yokoyama, Decompositions of Carbon Dioxide, Carbon Monoxide and Gaseous Water by Microwave Discharge, *Journal of nuclear science and technology* 37, 2000, 814-820.
- [5] L. Li, Z. Shi, B. Gao, X. Hu, and Z. Wang, Electrochemical conversion of CO<sub>2</sub> to carbon and oxygen in LiCl–Li<sub>2</sub>O melts, *Electrochimica acta* 190, 2016, 655-658.
- [6] M. Wu, R. Tang, Y. Chen, S. Wang, W. Wang, X. Chen, N. Mitsuzaki and Z. Chen, Electrochemical reduction of CO<sub>2</sub> to carbon films on stainless steel around room temperature, *Electrochemistry communications* 110, 2020, 106606.
- [7] D. Esrafilzadeh, A. Zavabeti, R. Jalili, P. Atkin, J. Choi, B. Carey, R. Brkljača, A. P. O’Mullane, Mael D. Dickey, D. L. Officer, D. R. MacFarlane, T. Daeneke and K. Kalantar-Zadeh, Room temperature CO<sub>2</sub> reduction to solid carbon species on liquid metals featuring atomically thin ceria interfaces, *Nature communications* 10, 2019, 865-865.
- [8] M.H. Khedr, M. Bahgat, M.I. Nasr and E.K. Sedeek, CO<sub>2</sub> decomposition over freshly reduced nanocrystalline Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 302, 2017, 517-524.
- [9] M.H. Khedr and A.A. Farghali, Microstructure, kinetics and mechanisms of CO<sub>2</sub> catalytic decomposition over freshly reduced nano-crystallite CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> at 400–600°C, *Applied Catalysis B: Environmental* 61, 2005, 219-226.
- [10] X. Xu and S. Huang, “Carbon dioxide as a carbon source for synthesis of carbon nanotubes by chemical vapor deposition,” *Materials Letters* 61, 2007, 4235-4237.
- [11] G. S. Simate, S. E. Iyuke, S. Ndlovu, C. S. Yah and L. F. Walubita, The production of carbon nanotubes from carbon dioxide: challenges and opportunities, *Journal of Natural Gas Chemistry* 19, 2010, 453-460.
- [12] <https://www.c2cnt.com> (accessed date: June 03, 2021).
- [13] X. Wang, X. Liu, G. Licht, B. Wang and S. Licht, Exploration of alkali cation variation on the synthesis of carbon nanotubes by electrolysis of CO<sub>2</sub> in molten carbonates, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 34, 2019, 303-312.
- [14] <https://www.capitalpower.com/sustainability/innovation/carbon-conversion> (accessed date: June 03, 2021).
- [15] <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018PhDT.....105S> (accessed date: June 03, 2021).
- [16] <https://www.cheaptubes.com/> (accessed date: June 03, 2021).
- [17] M. F. Yu, O. Lourie, M. J. Dyer, K. Moloni, T. F. Kelly and R. S. Ruoff, Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load, *Science* 287, 2000, 637-640.
- [18] C.-C. Chang, I-K. Hsu, M. Aykol, W-H. Hung, C.-C. Chen and S. B. Cronin, A New Lower Limit for the Ultimate Breaking Strain of Carbon Nanotubes, *ACS Nano* 4, 2010, 5095–5100.



### 3.8 การผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน

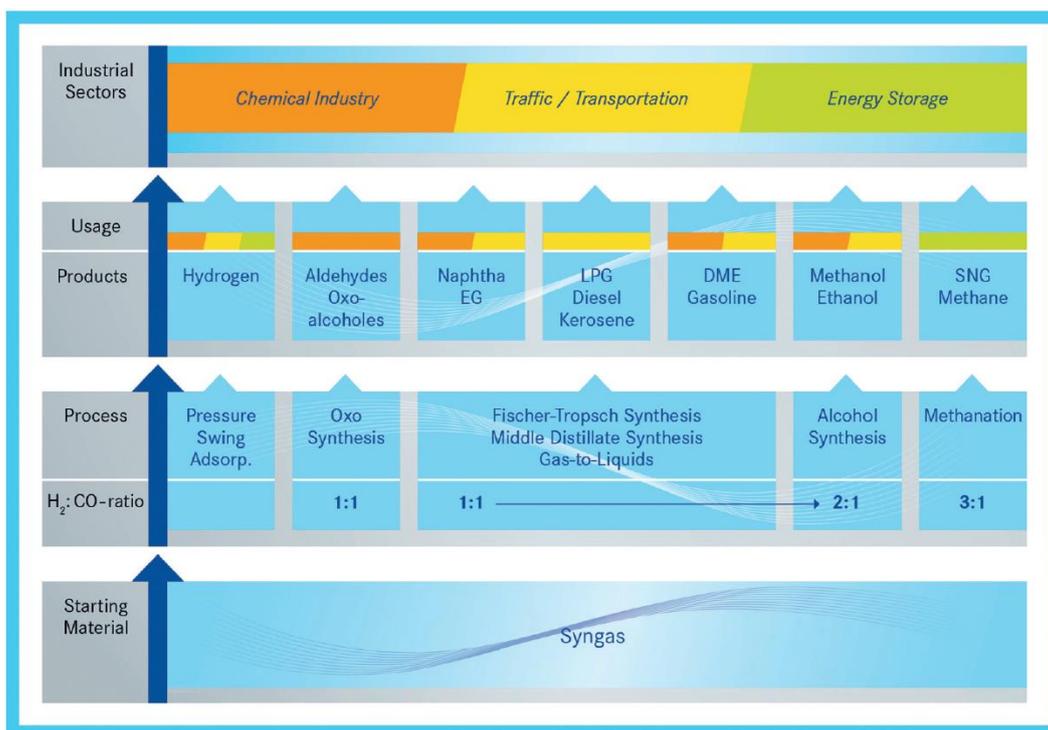
#### ตลาดและการแข่งขัน

ก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis gas or Syngas) คือก๊าซผสมของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น ตัวทำละลาย (เมทานอลและเอทานอล) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (เช่น กรดอะซิติก และสารประกอบโอเลฟินส์ เป็นต้น ซึ่งต่อยอดเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรม ปิโตรเคมี) เชื้อเพลิง (เช่น ไดเมทิลอีเทอร์ ก๊าซโซลีน และดีเซล เป็นต้น) และยังสามารถผลิตแอมโมเนียซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยด้วย โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน (รูปที่ 3.8.1) [1,2] นอกจากนี้ ก๊าซสังเคราะห์ยังถูกนำไปใช้งานเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงและใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

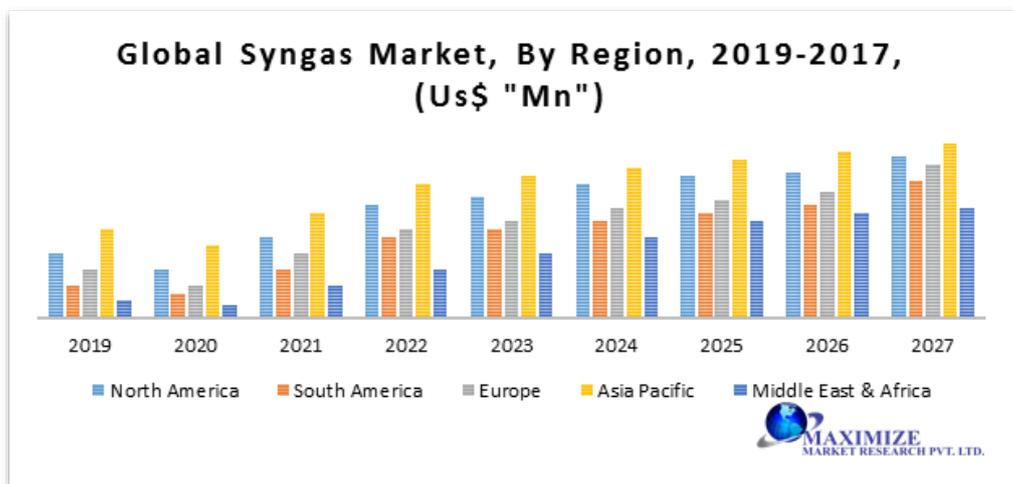
ความหลากหลายของการนำก๊าซสังเคราะห์มาเป็นวัตถุดิบตั้งต้น รวมทั้งการเติบโตของอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีทั่วโลก เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ก๊าซสังเคราะห์มีความต้องการในตลาดโลกมากขึ้น สำหรับตลาดของก๊าซสังเคราะห์ทั่วโลกสามารถแบ่งออกได้ 5 ภูมิภาค คือเอเชียแปซิฟิก อเมริกาเหนือยุโรป ละตินอเมริกา ตะวันออกกลาง และแอฟริกา (รูปที่ 3.8.2) ในปี พ.ศ. 2560 ตลาดเอเชียแปซิฟิกมีความต้องการก๊าซสังเคราะห์สูง เนื่องจากมีการผลิตไฟฟ้าในภูมิภาคที่สูงขึ้น รวมถึงความต้องการปุ๋ยที่สูงมากในประเทศเกษตรกรรม เช่น ใต้หวัน อินเดีย มาเลเซีย และเวียดนาม เป็นต้น สำหรับตลาดในยุโรปและอเมริกาเหนือ คาดว่าจะมีการเติบโตอย่างมีนัยสำคัญในช่วงเวลาคาดการณ์ เนื่องจากมีความต้องการก๊าซสังเคราะห์ที่สูงในการเป็นวัตถุดิบตัวกลางสำหรับการผลิตสารเคมีซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมขั้นสุดท้ายที่สำคัญ เช่น ยานยนต์ การก่อสร้าง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และการบินและอวกาศ เป็นต้น [3,4]

ในด้านการแข่งขันนั้น การผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับเทคโนโลยีใหม่ที่เริ่มเข้ามามีบทบาทในการผลิตก๊าซสังเคราะห์นั้นเริ่มสังเกตได้จากจำนวนการยื่นขอจดสิทธิบัตรที่เพิ่มมากขึ้นทุกปี (รูปที่ 3.8.3ก) เนื่องจากแนวโน้มในอนาคตที่พลังงานทางเลือกเข้ามามีบทบาทมากขึ้น ส่งผลให้เกิดภาวะกำลังการผลิตไฟฟ้าเกินความต้องการในบางช่วงเวลา หรือบางฤดูกาล โดยสิทธิบัตรเหล่านี้ได้รับการคุ้มครอง 3 อันดับแรกในประเทศจีน สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น (รูปที่ 3.8.3ข) บริษัทที่มีการจดสิทธิบัตรในงานทางด้านนี้ 3 อันดับแรก คือ Siemens, Toshiba และ BASF นอกจากนี้ยังพบบริษัท start-ups ที่มีลงทุนทางด้านนี้ เช่น Carbon Recycling International จากประเทศ Iceland



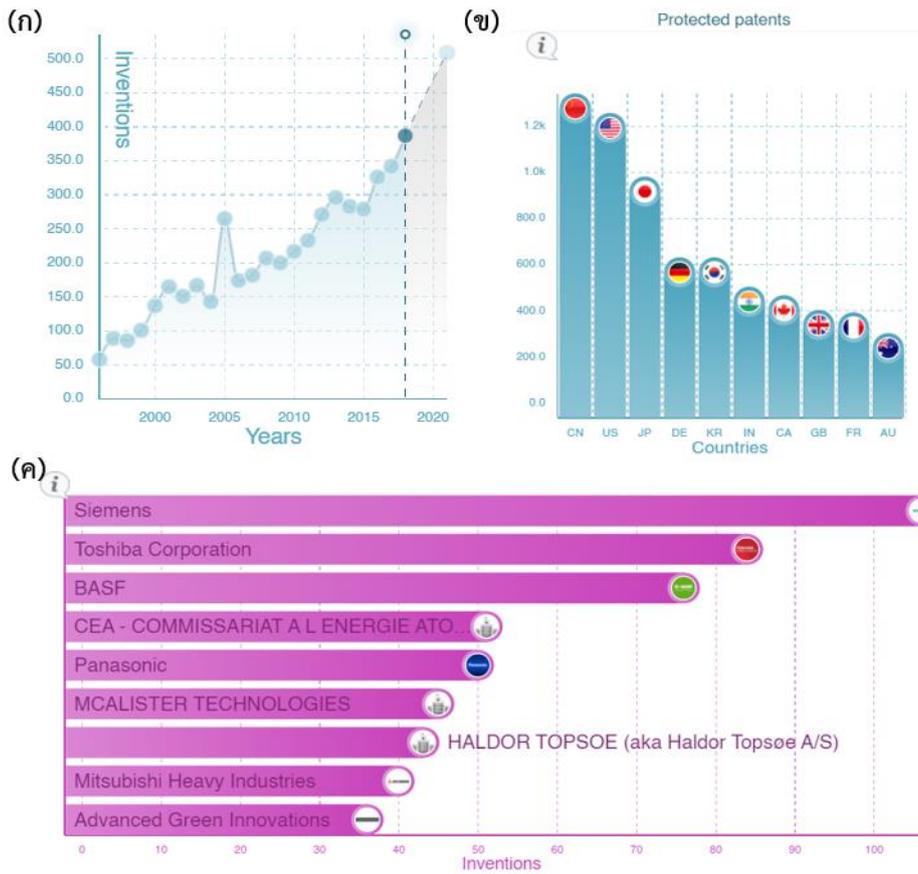


รูปที่ 3.8.1 กระบวนการสำหรับการใช้ประโยชน์ของก๊าซสังเคราะห์  
ที่มา: Foit และคณะ (2017) [1]



รูปที่ 3.8.2 แนวโน้มความต้องการก๊าซสังเคราะห์ทั่วโลก

ที่มา: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-syngas-market/68868/> (accessed date: June 10, 2021) [3]



**รูปที่ 3.8.3** ผลการสืบค้นฐานข้อมูล Orbit Insight ด้วยคำสืบค้น syngas (or synthesis gas, carbon monoxide) and electrolysis (หรือ ) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) (ก) จำนวนการยื่นขอจดสิทธิบัตรในช่วงปี พ.ศ. 2539 ถึง 2561 (ข) จำนวนสิทธิบัตรที่ได้รับการคุ้มครองในประเทศต่าง ๆ (ค) จำนวนสิทธิบัตรที่ถือครองโดยบริษัท 9 อันดับแรก  
ที่มา: <https://insight.orbit.com> (accessed date: May 16, 2021) [5]

**ความพร้อมทางด้านเทคโนโลยีในปัจจุบัน (Technology readiness level) และการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรม**

สำหรับการผลิตก๊าซสังเคราะห์ในระดับอุตสาหกรรมนั้น โดยทั่วไปจะถูกผลิตจากก๊าซธรรมชาติ และชีวมวล ทำปฏิกิริยากับไอน้ำหรือออกซิเจน ภายใต้สภาวะที่มีการไม่ได้ใช้และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น กระบวนการการออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation และ Catalytic partial oxidation, สมการที่ 1) และกระบวนการรีฟอร์มมิงของมีเทนด้วยไอน้ำ (Steam reforming of methane, สมการที่ 2) โดยทำที่สภาวะอุณหภูมิ 750–950 องศาเซลเซียส (Jens Hagen, Industrial catalysis)



ปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิ่ง (Dry reforming) เป็นอีกหนึ่งปฏิกิริยาที่น่าสนใจสำหรับการผลิตก๊าซสังเคราะห์ เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่มีการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจก และมักจะถูกปล่อยทิ้งในกระบวนการอุตสาหกรรมนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Recycle) โดยทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซมีเทนหรือก๊าซธรรมชาติ (สมการที่ 3) นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการรีฟอร์มมิ่งของมีเทนด้วยไอน้ำ พบว่า ปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิ่งมีการใช้พลังงานที่น้อยกว่าอย่างมาก เพราะไม่ต้องใช้พลังงานในการผลิตไอน้ำในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ ปฏิกิริยานี้ยังผลิตก๊าซสังเคราะห์ที่มีสัดส่วนของไฮโดรเจนที่ต่ำกว่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วย [2,6]



สำหรับการผลิตก๊าซสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิ่งในระดับอุตสาหกรรมนั้น มีหลายบริษัททั่วโลกประสบความสำเร็จในการพัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยีเพื่อนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาร่วมทำปฏิกิริยากับมีเทนเพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซสังเคราะห์ ตัวอย่างเช่น ในปี พ.ศ. 2549 ประเทศญี่ปุ่นได้มีการจัดตั้งกลุ่มพัฒนาวิจัย Nippon GTL Technology Research Association โดยมีความร่วมมือของ 6 บริษัทคือ บริษัท INPEX Corporation, บริษัท JX Nippon Oil & Energy Corporation บริษัท Japan Petroleum Exploration, บริษัท Cosmo Oil บริษัท Nippon Steel Engineering และ Chiyoda Corporation และทำวิจัยร่วมกับบริษัท Japan Oil, Gas and Metals National Corporation ซึ่งวัตถุประสงค์คือ การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนก๊าซธรรมชาติที่มีองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นผลิตภัณฑ์เนฟทา น้ำมันก๊าด (Kerosene) และดีเซล โดยตรงผ่าน 3 กระบวนการคือ กระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์ กระบวนการพิซเซอร์โทปส์ และกระบวนการ Hydrocracking หรือรวมเรียกว่า กระบวนการ GTL (Gas-to-Liquids process) และในปี พ.ศ. 2554 ความร่วมมือนี้ได้ประสบความสำเร็จ โดยสามารถผลิตผลิตภัณฑ์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีคุณภาพสูง และพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถใช้งานได้นานมากกว่า 11,000 ชั่วโมง [7] ขณะที่ปี พ.ศ. 2553 บริษัท Linde ประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการทำวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีและตัวเร่งปฏิกิริยาของการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการช่วยผลิตก๊าซสังเคราะห์ โดยได้มีการทำวิจัยร่วมกับพันธมิตรที่ BASF และ บริษัทในเครือ THE ตลอดจนนักวิจัยจาก Karlsruhe Institute of Technology – KIT, Technical University of Munich, University of Leipzig และ DECHEMA German Society for Chemical Engineering and Biotechnology และในปี พ.ศ. 2560 บริษัท Linde ก็ได้มีการดำเนินการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากเทคโนโลยีของปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิ่งในระดับอุตสาหกรรมอย่างเต็มรูปแบบ [8] จะเห็นได้ว่า การพัฒนาเทคโนโลยีและตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนนั้นต้องใช้ระยะเวลาและเงินทุนวิจัยจำนวนมาก เพื่อให้ประสบความสำเร็จมีองค์ความรู้และฐานเทคโนโลยีของตนเอง

อีกเทคโนโลยีที่สำคัญที่ได้รับความสนใจมากขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาคือ การใช้ไฟฟ้าในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซสังเคราะห์ [9] โดยมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ สามารถตั้งเป็นโรงงานขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในพื้นที่ที่มีแหล่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยมีเทคโนโลยีที่สำคัญสองเทคโนโลยีคือ กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสที่อุณหภูมิต่ำ และกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสที่อุณหภูมิสูง โดยทั้งสองระบบนี้สามารถปรับระบบให้ผลิตก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพียงชนิดเดียว หรือเป็นก๊าซสังเคราะห์ได้

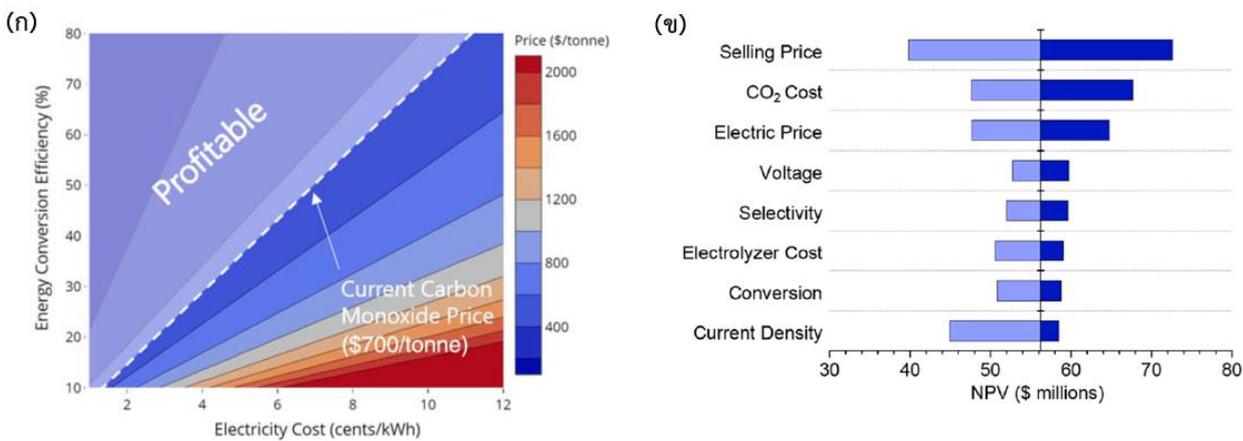
ในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสที่อุณหภูมิต่ำจะใช้น้ำหรือโพลีเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด (สมการที่ 4-5) ในขณะที่ออกซิเจนจะขึ้นที่ขั้วแอโนด (สมการที่ 6) กระบวนการดังกล่าวมีจุดเด่นหลายประการคือ ทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นกระแสสูง และมีค่าการเลือกจำเพาะสูง แต่มีข้อด้อยที่สำคัญคือ ความคุ้มค่าเชิงพลังงานต่ำ และความเสถียรของระบบอยู่ในระดับเพียง 1000 ชั่วโมง





จากผลการศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เมื่อปี พ.ศ. 2561 นั้น (รูปที่ 3.8.4ก) เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการลงทุน ระบบการเร่งปฏิกิริยาจะต้องมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมากกว่าร้อยละ 40 บนสมมติฐานราคากลางของพลังงานแสงอาทิตย์ที่กำหนดโดยคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) ในปี พ.ศ. 2562 ที่ 1.68 บาทต่อหน่วย ราคาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 940 บาทต่อตัน มีค่า Faradaic efficiency ที่ร้อยละ 90 มีค่าความหนาแน่นกระแสอยู่ที่ 500 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ต้นทุนของเซลล์ไฟฟ้าอยู่ที่ 9,400 บาทต่อกิโลวัตต์ และอายุการใช้งาน 30 ปี นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) (รูปที่ 3.8.4ข) พบว่า มูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ ค่าไฟ และต้นทุนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสามปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความคุ้มค่าในการลงทุน

จากการเปรียบเทียบมูลค่าของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพียงชนิดเดียวกับก๊าซสังเคราะห์ พบว่าการผลิตก๊าซสังเคราะห์จะมีความคุ้มค่ากว่ามาก เนื่องจากมีมูลค่าในตลาดอยู่ที่ 19,000-22,000 บาทต่อตัน ในขณะที่ก๊าซสังเคราะห์มีมูลค่าเพียง 1,900 บาทต่อตัน ทำให้ไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แม้คำนึงถึงกรณีที่ดีที่สุด



**รูปที่ 3.8.4** (ก) การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สภาวะค่าไฟฟ้า ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน และราคาตลาดต่าง ๆ กัน (ข) การวิเคราะห์ความอ่อนของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการผลิตก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ที่มา: Luna และคณะ (2019) [10] และ Jouny และคณะ (2018) [11]

ในด้านการศึกษาความเป็นไปได้ในระดับอุตสาหกรรม ในปี พ.ศ. 2563 บริษัทซีเมนส์ได้ตั้งโรงงานต้นแบบผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 25 กิโลวัตต์ เพื่อส่งต่อไปให้แบคทีเรียเพื่อผลิตบิวทานอล และเฮกซานอล โดยโรงงานต้นแบบดังกล่าวถือว่ามีประสิทธิภาพความเป็นไปได้ทางเทคโนโลยีในระดับ 6-7 [12,13]

สำหรับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสที่อุณหภูมิสูงนั้น จะใช้ออกไซด์ในสถานะของแข็งเป็นอิเล็กโทรไลต์ และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600–1,000 องศาเซลเซียส [14] โดยการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน (สมการที่ 7–8) ในขณะที่ออกซิเจนจะขึ้นที่ขั้วแอโนด (สมการที่ 9) ได้มีการทดสอบความเสถียรอยู่ในระดับ 10,000 ชั่วโมง



จากการศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์คำนวณเมื่อปี พ.ศ. 2553 [15] โดยใช้กรณีฐานเป็นสมมติฐานที่ราคาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 6,000 บาทต่อตัน ค่าไฟฟ้าที่ 2 บาทต่อหน่วย ต้นทุนเซลล์ไฟฟ้า 57,000 บาทต่อตารางเมตร อายุการใช้งาน 20,000 ชั่วโมง พบว่าต้นทุนการผลิตก๊าซสังเคราะห์อยู่ที่ 29,000 บาทต่อตัน ซึ่งยังคงสูงกว่าราคาตลาด นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) พบว่า ต้นทุนค่าไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตมากที่สุด

สำหรับการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม บริษัท Haldor Topsoe ได้มีการจำหน่ายโมดูลสำหรับผลิตก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งมีกำลังการผลิตอยู่ในระดับ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จึงนับว่าเป็นกระบวนการที่มีความพร้อมทางเทคโนโลยีอยู่ในระดับ TRL 8 [16]

## ช่องว่างการพัฒนาที่สำคัญ

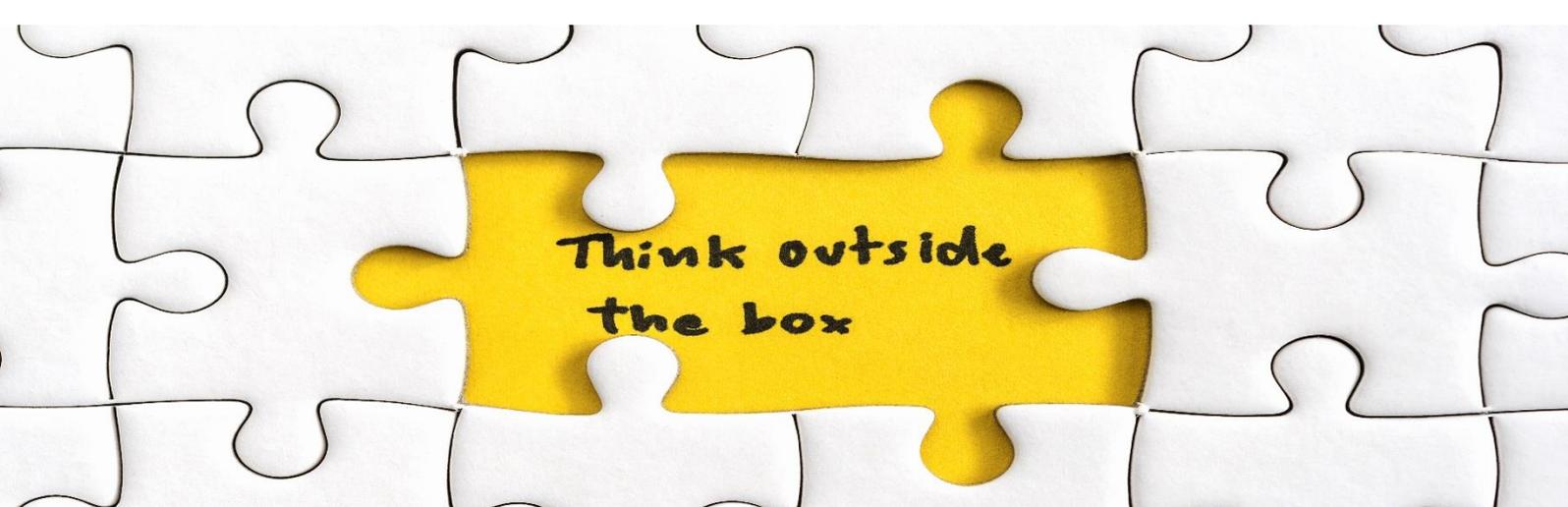
การผลิตก๊าซสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิ่ง ปัญหาที่สำคัญคือการเกิดโค้กบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซสังเคราะห์ และอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สั้นลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อราคาต้นทุนของการผลิตด้วย ดังนั้น การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีความจำเป็นอย่างมาก หลายงานวิจัยยังคงทำการศึกษาและออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ลดการเกิดโค้ก เพิ่มความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยา และขณะเดียวกันยังคงมีความไวในการทำปฏิกิริยาด้วย

สำหรับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสที่อุณหภูมิต่ำนั้น จำเป็นต้องพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึงระบบเซลล์ไฟฟ้าที่สามารถทำปฏิกิริยาที่ค่าความหนาแน่นเชิงกระแสที่สูงขึ้น และมีค่าความคุ้มค่าทางพลังงานที่สูงขึ้น และสามารถทำงานได้ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานในระดับหลายหมื่นชั่วโมง ในขณะที่กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสที่อุณหภูมิสูงนั้น การพัฒนาระบบให้อายุการใช้งานไปถึงระดับหลายหมื่นชั่วโมง จะทำให้ระบบมีความน่าสนใจมากขึ้น นอกจากนี้ประสิทธิภาพของกระบวนการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซสังเคราะห์ด้วยไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแต่ละอุตสาหกรรมมีสิ่งเจือปนที่แตกต่างกัน และปริมาณที่ไม่เท่ากัน การศึกษาผลกระทบของสิ่งเจือปนต่อประสิทธิภาพจึงเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความคุ้มค่าในการลงทุน

## กลยุทธ์การพัฒนาเพื่อการพลิกผัน Pain point to gain point/Opportunity

การผลิตก๊าซสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาดรายรีฟอร์มมิ่งนั้น การมุ่งเน้นการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่จำเป็น ขณะเดียวกันการนำก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการอุตสาหกรรมทางการเกษตรและปศุสัตว์ หรือเกิดจากกระบวนการน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบตั้งต้นทดแทนก๊าซธรรมชาติ รวมทั้งการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมักถูกปล่อยทิ้งตามกระบวนการกลับมาใช้ประโยชน์ได้ก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจ โดยมุ่งเน้นความคุ้มค่าเชิง Techno-economic ควบคู่ไปกับการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมอย่างครบวงจร เพื่อมุ่งสู่ระบบและเศรษฐกิจสีเขียว

สำหรับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสนั้น แม้ว่าโดยรวมจะมีข้อจำกัดบางประการ แต่มีหลายปัจจัยที่สามารถทำให้กระบวนการดังกล่าวมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น อาทิ 1. สามารถทำได้ในแหล่งที่มีข้อจำกัดเรื่องสถานที่ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ 2. จะมีความคุ้มค่าทุนสูงสำหรับอุตสาหกรรมที่มีพลังงานไฟฟ้าส่วนเกิน หรือสามารถผลิตไฟฟ้าได้ด้วยต้นทุนที่ถูก จะสามารถทำให้กระบวนการดังกล่าวถึงจุดคุ้มทุนได้มากขึ้น เนื่องจากกระบวนการทั้งสองนั้นมีค่าไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่สำคัญ



Think outside  
the box

## แนวทางดำเนินการและผลที่คาดว่าจะได้รับ

- วิจัยและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนผ่านปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งที่มีคุณสมบัติในการลดการเกิดโค้ก เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและอายุการใช้งานได้นานขึ้น เหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตก๊าซสังเคราะห์ในระดับอุตสาหกรรม
- การเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซสังเคราะห์ด้วยไฟฟ้าที่มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์นั้น จำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือจากหลายภาคส่วน ทั้งในส่วนของอุตสาหกรรมที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผู้ผลิตเทคโนโลยี และผู้ผลิตไฟฟ้า เนื่องจากต้นทุนที่สำคัญคือไฟฟ้าและแหล่งที่มาของไฟฟ้าที่จำเป็นต้องเป็นแหล่งไฟฟ้าสะอาด
- มีการเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมกลางน้ำและปลายน้ำเพื่อนำก๊าซสังเคราะห์ที่ผลิตด้วยกระบวนการสะอาดไปใช้ในแทนที่ก๊าซสังเคราะห์ที่ผลิตด้วยกระบวนการอื่นอยู่ หากเกิดความร่วมมือดังกล่าว จะทำให้เกิดอุตสาหกรรมต้นน้ำใหม่ที่มีสารตั้งต้นที่สามารถผลิตสารเคมีหลายชนิดได้ในประเทศเกิดความมั่นคงในด้านวัตถุดิบการผลิต
- ผลการสืบค้นฐานข้อมูล Orbit Insight ยังพบว่างานวิจัยในปัจจุบัน เกิดขึ้นจากความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัย สถาบันวิจัย และอุตสาหกรรม โดยเป็นความร่วมมือที่เกิดขึ้นภายในประเทศ

## ประเด็นที่มุ่งเน้น: โอกาสของภาคอุตสาหกรรม (Issue in Focus: Industrial sector opportunities)

การผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนผ่านปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งในระดับอุตสาหกรรมนั้น นอกจากลักษณะและคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีความสำคัญแล้ว การออกแบบกระบวนการผลิตให้มีความเชื่อมโยงกัน ตั้งแต่ต้นน้ำจนถึงปลายน้ำก็มีความจำเป็นด้วย คือ การป้อนวัตถุดิบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนเข้ากระบวนการรีฟอร์มมิ่งเพื่อผลิตก๊าซสังเคราะห์ จากนั้นก็ป้อนเข้าก๊าซสังเคราะห์เข้ากระบวนการฟิชเชอร์โทรปส์เพื่อผลิตเป็นสารเคมีมูลค่าสูงต่อไป เนื่องจากระบบที่ครบวงจรจะทำให้กระบวนการผลิตสามารถถึงจุดคุ้มทุนได้

สำหรับเทคโนโลยีการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยไฟฟ้านั้นจะเกิดประโยชน์กับอุตสาหกรรมที่มีแหล่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตไบโอเอทานอล หากเป็นอุตสาหกรรมอื่นที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก แต่มีสารมลทินที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพต่อระบบปฏิกรณ์จำเป็นต้องมีกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ก่อนซึ่งทำให้ต้นทุนสูงขึ้น นอกจากนี้อุตสาหกรรมที่ผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานสะอาด เช่น พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ และมีต้นทุนค่าไฟฟ้าต่ำจะทำให้กระบวนการดังกล่าวมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เพิ่มสูงขึ้น



# SUSTAINABILITY

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S.R. Foit, I.C. Vinke, L.G.J. Haart, and R.A. Eichel, Power-to-Syngas: An Enabling Technology for the Transition of the Energy System?, *Angewandte Chemie International Edition* 2017, 56, 5402–5411.
- [2] K. Wittich, M. Krämer, N. Bottke, and S.A. Schunk, Catalytic Dry Reforming of Methane: Insights from Model Systems, *ChemCatChem* 2020, 12, 2130–2147.
- [3] Global Syngas Market- Industry Analysis and Forecast (2019-2027) – by Feedstock, Technology, Gasifier Type, Application, and Region. Available from: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-syngas-market/68868/>. August 2020. (accessed date: May 24, 2021).
- [4] SYNGAS MARKET - GROWTH, TRENDS, COVID-19 IMPACT, AND FORECASTS (2021 - 2026). Available from: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/syngas-market>. 2020. (accessed date: May 24, 2021).
- [5] Patent search using the keywords "syngas (or synthesis gas, carbon monoxide) and electrolysis (or electrolyzer, electrocatalysis) and carbon dioxide" analyzed by Orbit Insight. Available from: <https://insight.orbit.com>. (accessed date: May 16, 2021).
- [6] R. Singh, A. Dhir, S.K. Mohapatra, and S.K. Mahla, Dry reforming of methane using various catalysts in the process: review, *Biomass Conversion and Biorefinery* 2020, 10, 567–587.
- [7] Green Car Congress: Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility. Available from: <https://www.greencarcongress.com/2012/03/japan-tl-20120329.html>. 29 March 2012. (accessed date: May 24, 2021).
- [8] Linde Engineering Americas: Recycling CO<sub>2</sub> – the efficient way. Available from: [https://www.leamericas.com/en/about\\_linde\\_engineering/success-stories/index.html](https://www.leamericas.com/en/about_linde_engineering/success-stories/index.html). (accessed date: May 24, 2021).
- [9] C. Hepburn, E. Adlen, J. Beddington, E.A. Carter, S. Fuss, N. Mac Dowell, J.C. Minx, P. Smith, and C.K. Williams, The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal, *Nature* 2019, 575, 87–97.
- [10] P. De Luna, C. Hahn, D. Higgins, S.A. Jaffer, T.F. Jaramillo, and E.H. Sargent, What would it take for renewably powered electrosynthesis to displace petrochemical processes?, *Science* 2019, 364, eaav3506.
- [11] M. Jouny, W. Luc, and F. Jiao, General techno-economic analysis of CO<sub>2</sub> electrolysis systems, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2018, 57, 2165–2177.
- [12] A climate killer is turned into feedstock: Using CO<sub>2</sub> and hydrogen for sustainable chemicals. Available from: <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2020/rheticus-worlds-first-automated-co2-electrolyzer.html>. September, 2020. (accessed date: May 16, 2021).
- [13] EVONIK leading Beyond Chemistry, Available from: <https://corporate.evonik.com/en/media/press-releases/corporate/for-a-climate-friendly-industry-using-carbon-dioxide-and-hydrogen-as-raw-materials-for-sustainable-c-143559.html>. September, 2020. (accessed date: May 16, 2021).
- [14] A. Schreiber, A. Peschel, B. Hentschel, and P. Zapp, Life cycle assessment of power-to-syngas: Comparing high temperature Co-electrolysis and steam methane reforming, *Frontiers in Energy Research* 2020, 8, 1–17.
- [15] Q. Fu, C. Mabilat, M. Zahid, A. Brisse, and L. Gautier, Syngas production via high-temperature steam/CO<sub>2</sub> co-electrolysis: An economic assessment, *Energy & Environmental Science* 2010, 3, 1382–1397.
- [16] R. Küngas, Review—electrochemical CO<sub>2</sub> reduction for CO production: Comparison of low- and high-temperature electrolysis technologies, *Journal of the Electrochemical Society* 2020, 167, 044508.



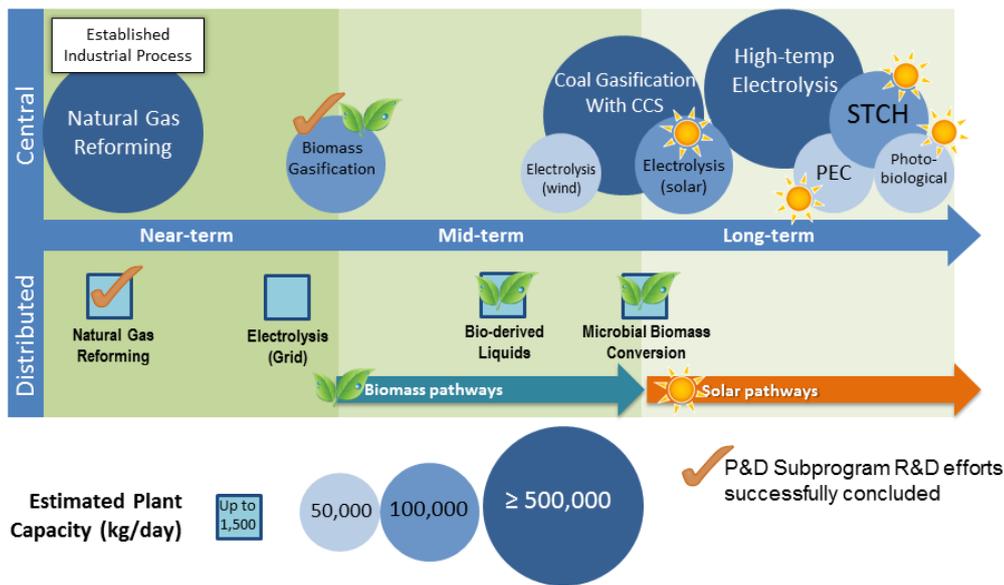
### 3.9 การผลิตไฮโดรเจนสีเขียวจากการอิเล็กโทรไลซิสของไอน้ำผ่านเซลล์อิเล็กโทรไลซิส

แหล่งที่มาและต้นทุนการผลิตไฮโดรเจนมีส่วนสำคัญในการกำหนดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้น (CO<sub>2</sub> conversion to value-added products) ปัจจุบันไฮโดรเจนที่ใช้ในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมและปิโตรเคมี นอกจากนี้ไฮโดรเจนที่ใช้กันอยู่ทั่วโลกส่วนใหญ่ยังมาจากกระบวนการปฏิรูปก๊าซธรรมชาติด้วยไอน้ำ (Steam reforming of natural gas) ซึ่งจัดเป็นกระบวนการที่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ในปัจจุบันนิยมกำหนดสีให้กับไฮโดรเจน ดังนี้

- “ไฮโดรเจนสีเทา (Grey hydrogen)” หมายถึง ไฮโดรเจนที่ผลิตด้วยกระบวนการที่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น กระบวนการปฏิรูปก๊าซธรรมชาติด้วยไอน้ำที่ไม่มีการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon capture and storage: CCS)
- “ไฮโดรเจนสีน้ำเงิน (Blue hydrogen)” หมายถึง ไฮโดรเจนที่ผลิตจากกระบวนการผลิตที่มีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากกระบวนการ เช่น กระบวนการปฏิรูปก๊าซธรรมชาติด้วยไอน้ำที่ดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการหรือการผลิตไฮโดรเจนจากชีวมวลผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Biomass gasification) ร่วมกับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการ หรืออาจใช้สารตั้งต้นอื่น ๆ นอกเหนือไปจากก๊าซธรรมชาติและปิโตรเลียม ตัวอย่างเช่น การใช้เอทานอลในการผลิตไฮโดรเจนผ่านการปฏิรูปด้วยไอน้ำ (Steam reforming of ethanol) เอทานอลจึงเป็นหนึ่งในสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจนที่น่าสนใจ ทั้งนี้ประเทศไทยมีกำลังการผลิตเอทานอลค่อนข้างสูงซึ่งสวนทางกับความต้องการที่อาจจะลงในอนาคตเมื่อมีปริมาณการใช้รถยนต์ไฟฟ้า (Electric vehicle: EV) มากขึ้น
- “ไฮโดรเจนสีเขียว (Green hydrogen)” หมายถึง ผลิตจากเทคโนโลยีอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) ของน้ำหรือไอน้ำ ซึ่งจัดเป็นกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่ปราศจากการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตมาจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable sources)

การใช้ไฮโดรเจนในการแปลงคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ควรจะต้องคำนึงถึงปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดของระบบด้วย ดังนั้นไฮโดรเจนควรผลิตมาจากกระบวนการที่ปราศจากการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์หรือกระบวนการที่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ สำหรับแผนระยะกลางสำหรับการผลิตไฮโดรเจนเพื่อใช้ในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์อาจจะมุ่งไปสู่ไฮโดรเจนสีน้ำเงินผ่านการผลิตในทิศทางชีวมวล (Biomass pathway) ได้ก่อน อย่างไรก็ตามสำหรับแผนระยะยาวนั้น การผลิตไฮโดรเจนสีเขียวด้วยเทคโนโลยีอิเล็กโทรไลซิสที่ปราศจากการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นเทคโนโลยีที่นำไปสู่การการนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ได้อย่างยั่งยืนในอนาคต แสดงดังรูปที่ 3.9.1 [1]

ไฮโดรเจนที่มาจากกระบวนการที่ปราศจากการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีราคาสูง ต้นทุนการผลิตไฮโดรเจนที่ผลิตจากกระบวนการปฏิรูปด้วยไอน้ำของก๊าซธรรมชาติอยู่ที่ประมาณ 0.9-3.2 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม ในขณะที่ราคาไฮโดรเจนที่มาจากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสอยู่ที่ 3.0-7.5 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้มาจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน [2-4] โดยต้นทุนของไฮโดรเจนสีเขียวเกี่ยวข้องกับสองส่วนหลัก ประกอบด้วยขีดความสามารถของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสในการผลิตไฮโดรเจนต่อพลังงานที่ป้อน และราคากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการ แม้ว่าในช่วงหลายปีที่ผ่านมาต้นทุนด้านพลังงานทางเลือกจะมีค่าลดลงอย่างมาก แต่หากมีการสนับสนุนเชิงนโยบายจากภาครัฐซึ่งจะมีบทบาทให้ราคาไฮโดรเจนสีเขียวถูกลง อาจต้องดำเนินการผลักดันและสนับสนุนในการลดค่ากระแสไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส ตัวอย่างโปรเจกขนาดใหญ่ ได้แก่ NEOM ซึ่งมีมูลค่าถึง 7 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ ณ ประเทศซาอุดีอาระเบีย ดำเนินการโดยบริษัท Air Products เป็นโครงการผลิต Green hydrogen ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิสโดยใช้พลังงานลมและแสงอาทิตย์ที่ใหญ่ที่สุดในโลก (ด้วยกำลังการผลิต 650 ต้นต่อวัน) สำหรับใช้ในภาคขนส่งทั่วโลก ซึ่งคาดว่าจะช่วยลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงถึง 3 ล้านตันต่อปี (เทียบเท่าการใช้รถยนต์ 700,000 คันต่อปี) [5]



รูปที่ 3.9.1 การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการต่าง ๆ

ที่มา: U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Hydrogen Production (public domain) [1]

### เซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide electrolysis cell)

เซลล์อิเล็กโทรไลซิสเป็นเทคโนโลยีที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้โดยปราศจากการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ หากเลือกใช้แหล่งพลังงานทางเลือกในการผลิตได้อย่างเหมาะสม จะสามารถผลิตไฮโดรเจนบริสุทธิ์โดยไม่ต้องมีขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification process) ซ้ำอีก การทำอิเล็กโทรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้เซลล์ที่มีอิเล็กโทรไลต์ประเภทอัลคาไลน์ (Alkaline) หรือเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton-exchange membrane: PEM) ได้ถูกใช้ในเชิงพาณิชย์ กระบวนการดังกล่าวทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ซึ่งมีผลดีในด้านอายุการใช้งานของอุปกรณ์ การควบคุมการปฏิบัติการ แต่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิต เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิปฏิบัติการต่ำ ความต้องการไฟฟ้าในกระบวนการจะมีค่าสูงตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวโดยย่อปริมาณความต้องการไฟฟ้าทั้งหมด ( $\Delta H$ ) สำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสในกระบวนการสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (1) โดย  $\Delta G$  แสดงค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการ ส่วน  $T\Delta S$  แสดงค่าความต้องการพลังงานความร้อนของกระบวนการ

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (1)$$

แม้ว่าความต้องการพลังงานทั้งหมดจะไม่แตกต่างกันมากนักตามอุณหภูมิปฏิบัติการ แต่ความต้องการพลังงานไฟฟ้าในระบบจะลดลงเมื่ออุณหภูมิในปฏิบัติการเพิ่มขึ้น ดังนั้นพลังงานส่วนใหญ่ที่จำเป็นสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสจึงสามารถใช้พลังงานความร้อนแทนได้ ซึ่งเปิดโอกาสให้สามารถบูรณาการระบบกับการใช้แหล่งความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเพื่อใช้ในการผลิตไฮโดรเจน เช่น พลังงานความร้อนจากโรงไฟฟ้าหรือกระบวนการอุตสาหกรรมอื่น ๆ นอกจากนี้อุณหภูมิปฏิบัติการที่สูงยังช่วยเพิ่มความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเซลล์อิเล็กโทรไลซิส ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะตระกูลสูงที่มีราคาแพง และอุณหภูมิที่สูงขึ้นยังช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้ความสามารถของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสสูงขึ้น นอกจากนี้เซลล์อิเล็กโทรไลซิสจะสามารถทำปฏิกิริยา Steam electrolysis แล้ว ยังสามารถทำปฏิกิริยา CO<sub>2</sub> electrolysis ได้อีกด้วย และหากป้อนไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกันจะเรียกกระบวนการนี้ว่า Co-electrolysis โดยปฏิกิริยานี้ให้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซสังเคราะห์ (Syngas) ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งสามารถนำมาทำปฏิกิริยาต่อไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวและสารเคมีสำคัญได้หลายประเภท

เซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide electrolysis cell: SOEC) มีความคล้ายกันกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cell: SOFC) โดยส่วนประกอบหลักของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบออกไซด์ของแข็ง อิเล็กโทรไลต์ที่มีความหนาแน่นถูกขนานด้วยอิเล็กโทรดที่มีรูพรุนทั้งสองด้าน เรียกว่า ขั้วแคโทดและขั้วแอโนด กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของเซลล์เชื้อเพลิง โดยจะเห็นได้ว่าไอน้ำถูกป้อนเข้าที่ขั้วแคโทด โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์บังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแอโนดไปยังแคโทดโดยไม่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ ส่วนออกซิเจนไอออนที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของไอน้ำจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ แคโทดไปยังแอโนดทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ที่ขั้วแคโทดและเกิดออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ที่ขั้วแอโนด แสดงดังรูปที่ 3.9.2 หากป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับไอน้ำที่ขั้วแคโทด จะสามารถผลิตก๊าซสังเคราะห์ซึ่งมีส่วนประกอบของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ได้อีกด้วย ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า Co-electrolysis

ขั้วแคโทด:



ขั้วแอโนด:



ปฏิกิริยาโดยรวม:



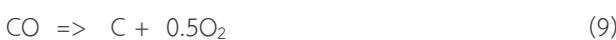
กระบวนการ Co-electrolysis เป็นกระบวนการซึ่งเกิดจากการป้อนไอน้ำและ CO<sub>2</sub> ร่วมกัน จะเกิดปฏิกิริยาโดยรวม ดังนี้



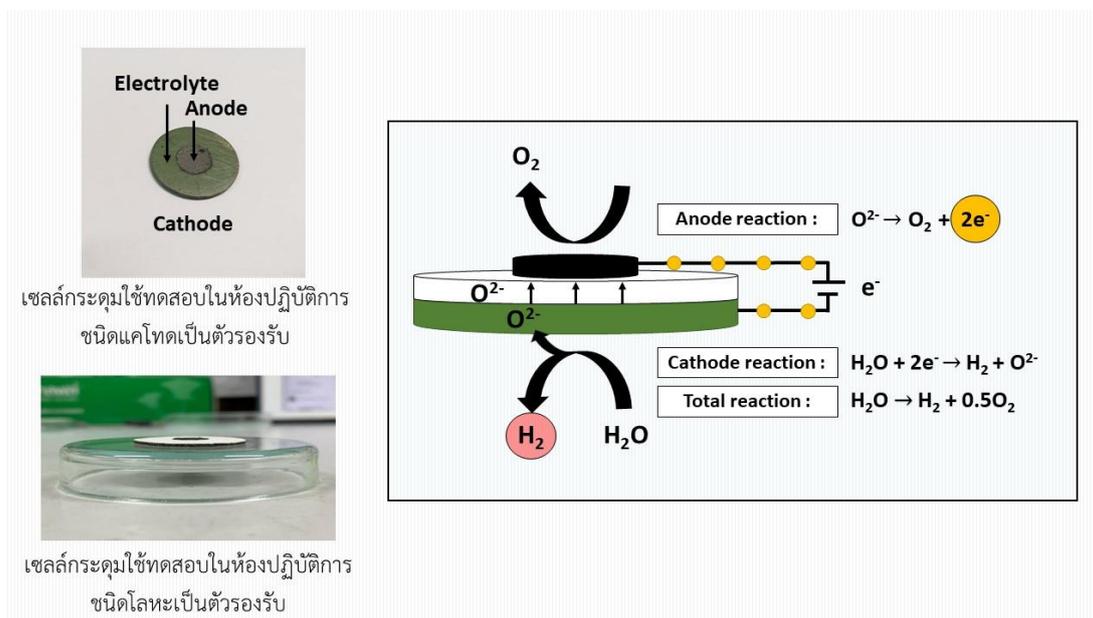
ในกระบวนการ Co-electrolysis ไม่เพียงแต่จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอน้ำและ CO<sub>2</sub> ที่เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีกด้วย ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยารีเวิร์สวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (Reverse water-gas shift: RWGS) แสดงดังสมการที่ (8)



ทั้งนี้ในระบบ CO<sub>2</sub> electrolysis หรือ ระบบ Co-electrolysis หากความเข้มข้นของ CO สูงเกินไป อาจเกิดการสะสมของคาร์บอนได้ (Carbon deposition) ได้ดังสมการที่ (9)



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ไม่พึงประสงค์ เนื่องจากการสะสมคาร์บอนบนพื้นผิวเซลล์ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ลดลงได้ ดังนั้นจึงควรเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเพื่อควบคุมไม่ให้เกิดปฏิกิริยาเช่นนี้ในระบบ ทั้งนี้การเกิดคาร์บอนสะสมจะลดลงเมื่อมีไอน้ำและไฮโดรเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบ Co-electrolysis อาจเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า CO<sub>2</sub> electrolysis



รูปที่ 3.9.2 เซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide electrolysis cell: SOEC)

### ความท้าทายที่พบจากการใช้งานเซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบออกไซด์ของแข็งและแนวทางในการแก้ปัญหา และการพัฒนาต่อยอด

จากการศึกษาและวิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาในเรื่องเซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบออกไซด์ของแข็งเพื่อการผลิตไฮโดรเจนสีเขียว โดยมุ่งเน้นที่เซลล์ที่มีอิเล็กโทรไลต์ ชนิดตัวนำออกซิเจนไอออน ทำให้สามารถรวบรวมปัญหาและความท้าทายจากการใช้งาน สรุปได้เป็น 5 ด้านหลัก พร้อมทั้งได้เสนอแนวคิดในการแก้ปัญหานั้น ๆ แสดงดังตารางที่ 3.9.1





**ตารางที่ 3.9.1** ปัญหาและความท้าทายที่พบจากการใช้งานเซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบออกไซด์ของแข็งและแนวทางในการแก้ปัญหาและการพัฒนาต่อยอด

ปัญหาและความท้าทาย	แหล่งที่พบปัญหา	แนวทางในการแก้ปัญหาและการพัฒนาต่อยอด
<p>1. เซลล์อิเล็กโทรไลซิสมีความสามารถทางเคมีไฟฟ้าต่ำและขาดความสมดุลระหว่างความสามารถในระบบอิเล็กโทรไลเซอร์และระบบเซลล์เชื้อเพลิง (Low performance and unbalance between electrolysis and fuel cell mode)</p>	<p><u>ขั้วแคโทด:</u> ความสามารถของขั้วแคโทดที่ใช้วัสดุพื้นฐานชนิด Nickel-yttria stabilized zirconia (Ni-YSZ) มีค่าต่ำในระบบอิเล็กโทรไลเซอร์เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเซลล์เชื้อเพลิง ทั้งนี้โดยทั่วไปความสามารถของเซลล์ควรจะสมดุลกันระหว่างสองระบบ ปัญหาความไม่สมดุลนี้จะทำให้เซลล์ขาดประสิทธิภาพต่อการใช้งานลักษณะที่ต้องใช้งานทั้งสองระบบ (Regenerative cell)</p> <p><u>ขั้วแอโนด:</u> วัสดุพื้นฐานที่มีคุณสมบัติผสมในตัวเองระหว่างการนำออกซิเจนไอออนและการนำอิเล็กตรอน (Mixed ionic and electronic conductivity, MIEC) เช่น วัสดุจำพวก Lanthanum strontium cobalt ferrite (LSCF) มักจะมีความสามารถต่ำในการทำงานในระบบอิเล็กโทรไลเซอร์เมื่อเทียบกับระบบเซลล์เชื้อเพลิง ขณะที่ LSM-YSZ ซึ่งเป็นวัสดุผสมแยกเฟสระหว่างวัสดุนำออกซิเจนไอออนและวัสดุนำอิเล็กตรอน กลับมีความสามารถสมดุลกันระหว่างทั้งสองระบบ แต่กลับจะมีความสามารถโดยรวมต่ำกว่าอิเล็กโทรดชนิด MIEC</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ เพิ่มความสามารถการทำงานของวัสดุที่ใช้ในอิเล็กโทรดฝั่งผลิตไฮโดรเจน เช่น การเติมวัสดุจำพวกซีเรีย (Ceria) เป็นส่วนประกอบ ในขั้วแคโทดจะช่วยเพิ่มความสามารถของเซลล์ในระบบอิเล็กโทรไลเซอร์ได้</li> <li>➤ เพิ่มความสามารถการทำงานของวัสดุที่ใช้ในขั้วอิเล็กโทรดฝั่งผลิตออกซิเจน</li> </ul>



### ตารางที่ 3.9.1 รวบรวมปัญหาและความท้าทายที่พบจากการใช้งานเซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบออกไซด์ของแข็งและแนวทางในการแก้ปัญหาและการพัฒนาต่อยอด (ต่อ)

ปัญหาและความท้าทาย	แหล่งที่พบปัญหา	แนวทางในการแก้ปัญหาและการพัฒนาต่อยอด
2. เซลล์อิเล็กโทรไลซิสมีอายุการใช้งานสั้น (Poor durability)	<p>เกิดการเกาะรวมตัวกัน (Agglomeration) การออกซิไดซ์ และเกิดการแตกร้าวระดับไมโคร (Micro-crack) ขึ้นภายในอิเล็กโทรดที่มีนิกเกิลเป็นส่วนประกอบ</p> <p>เกิดการแยกชั้น (Delamination) ระหว่างชั้นของอิเล็กโทรไลต์และชั้นแอโนดฝั่งที่ผลิตออกซิเจน ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เสถียรของโครงสร้างของแอโนดภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนปริมาณมาก ส่งผลเหนี่ยวนำให้เกิดความดันเฉพาะจุดขึ้นและส่งผลให้เกิดการแยกชั้น</p> <p>การเสื่อมสภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและระบบเสริม (Degradation in Balance of Plant, BOP) เนื่องจากความร้อนจาก สภาวะปฏิบัติการที่อุณหภูมิสูง (&gt; 800 องศาเซลเซียส)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ พัฒนาขั้วแอโนดให้มีความเสถียรในสถานะที่มีออกซิเจนปริมาณมาก เช่น เติมส่วนประกอบของขั้วเพื่อช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนออกซิเจนได้ดีขึ้น การสังเคราะห์แบบโลหะคู่ (Bimetallic) หรือการใช้อัลลอยด์แทนโลหะ Ni</li> <li>➤ เพิ่มการถ่ายเทของออกซิเจนที่เกิดขึ้น เช่น การออกแบบระดับความพรุนของแอโนดให้แตกต่างกันตามความห่างจากชั้นอิเล็กโทรไลต์ หรือการออกแบบให้ปฏิกรณ์มีระบบที่ช่วยให้เกิด Oxygen gradient สูง ทำให้ออกซิเจนที่เกิดขึ้นที่แอโนดมีการถ่ายเทที่เร็วขึ้น หรือ มีฟลักซ์สูง (High O<sub>2</sub> flux)</li> <li>➤ ลดอุณหภูมิปฏิบัติการลงเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาค่าการเสื่อมสภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและระบบเสริม อย่างไรก็ตามค่าการนำไฟฟ้าจะต่ำลงเมื่อลดอุณหภูมิลง นั่นหมายถึงความสามารถทางเคมีไฟฟ้าที่จะลดลงและความต้องการปริมาณไฟฟ้าที่จะเพิ่มขึ้นไปด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์จึงเป็นสิ่งจำเป็น</li> <li>➤ พัฒนาอิเล็กโทรไลต์ ชนิดตัวนำโปรตอนที่มีค่าการนำไฟฟ้าทางทฤษฎีสูง เพื่อให้สามารถลดอุณหภูมิได้</li> <li>➤ ลดความหนาของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสเพื่อลดความต้านทานภายในเซลล์ และเพิ่มความแข็งแรงของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสที่บางด้วยโลหะ (Metal-supported SOEC)</li> </ul>
3. การใช้พลังงานความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนภายนอก (Utilization of external waste heat)	ระบบที่เหมาะสมกับการนำแหล่งความร้อนเหลือทิ้งจากแหล่งภายนอกมาใช้ประโยชน์ในเซลล์อิเล็กโทรไลซิส	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ ศึกษาการใช้ความร้อนจากแหล่งพลังงานภายนอก โดยเฉพาะความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม (Waste heat) ในประเทศไทย รวมทั้งการใช้ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบเองเพื่อก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด</li> </ul>

### ตารางที่ 3.9.1 รวบรวมปัญหาและความท้าทายที่พบจากการใช้งานเซลล์อิเล็กโทรไลซิสแบบออกไซด์ของแข็งและแนวทางในการแก้ปัญหาและการพัฒนาต่อยอด (ต่อ)

ปัญหาและความท้าทาย	แหล่งที่พบปัญหา	แนวทางในการแก้ปัญหาและการพัฒนาต่อยอด
4. การหาจุดที่เหมาะสมสำหรับสภาวะปฏิบัติการ (Operating conditions optimization)	เมื่อมีการขยายขนาดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Single cell) ไปเป็นเซลล์ขนาดใหญ่ (Stack-type cell) สภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสมอาจมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงควรเลือกสภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสมที่สามารถควบคุมได้ ทำให้เซลล์อิเล็กโทรไลซิสมีความสามารถสูงและลดการเสื่อมสภาพได้	➤ ศึกษาสภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสม การสร้างแบบจำลองของเซลล์ขนาดใหญ่ที่ออกแบบขึ้นเพื่อทำนายสภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสม ในขณะที่การขยายขนาดจริงและการทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่ง
5. การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการใช้งานที่หลากหลาย (Versatility of SOEC)	หากเซลล์อิเล็กโทรไลซิสสามารถรองรับสารตั้งต้นที่หลากหลายจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ	➤ ศึกษาการใช้เซลล์อิเล็กโทรไลซิสในการผลิต CO จาก CO <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> electrolysis) หรือในการผลิตก๊าซสังเคราะห์ (Syngas) จากไอน้ำร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ (Co-electrolysis)

ปัญหาและความท้าทายทั้ง 5 ด้าน พร้อมแนวทางในการแก้ปัญหาและการพัฒนาต่อยอดได้ถูกรวบรวมและนำเสนอ ดังนี้

#### 1. เซลล์อิเล็กโทรไลซิสมีความสามารถทางเคมีไฟฟ้าต่ำและขาดความสมดุลระหว่างความสามารถในระบบอิเล็กโทรไลเซอร์ และระบบเซลล์เชื้อเพลิง (Performance balance between electrolysis and fuel cell mode)

ปัญหานี้มีความสำคัญอย่างมากต่อต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฮโดรเจน เพราะเมื่อเซลล์อิเล็กโทรไลซิสมีความสามารถต่ำจะทำให้ความต้องการใช้กระแสไฟฟ้าในการผลิตไฮโดรเจนต่อหน่วยสูง นอกจากนี้ความไม่สมดุลกันระหว่างความสามารถของเซลล์ในระบบอิเล็กโทรไลเซอร์และระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพ ถ้าหากเซลล์นั้นจะถูกพัฒนาไปเป็นอุปกรณ์ที่ต้องทำงานทั้งสองระบบ เช่น Regenerative cell ซึ่งสามารถใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยระบบเซลล์เชื้อเพลิง หรือใช้ไฟฟ้าในช่วงที่ความต้องการไฟฟ้าต่ำ (Off-peak demand) มาใช้ผลิตไฮโดรเจนด้วยระบบอิเล็กโทรไลเซอร์ ซึ่งในกรณีนี้เรียกว่า Regenerative cell ซึ่งจำเป็นอย่างมากที่ความสามารถของเซลล์ควรจะสมดุลกันในทั้งสองระบบ ปัญหาความไม่สมดุลนี้จะทำให้ระบบขาดประสิทธิภาพและขาดศักยภาพในการพัฒนาต่อ

เนื่องจากอิเล็กโทรดที่ผลิตไฮโดรเจนหรือขั้วแคโทดในเซลล์อิเล็กโทรไลซิส นั้น แคโทดจะต้องสัมผัสกับไอน้ำปริมาณมากอยู่ตลอดเวลา ส่งผลให้ส่วนที่เป็นโลหะ เช่น นิกเกิล เกิดการออกซิไดซ์ทำให้ความสามารถของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสต่ำลง จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า อิเล็กโทรดที่มีซีเรีย (Ceria, CeO<sub>2-x</sub>) เป็นส่วนประกอบจะช่วยเพิ่มความสามารถของเซลล์ในระบบอิเล็กโทรไลซิสส่งผลให้สมดุลระหว่างความสามารถทั้งสองระบบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากซีเรียมีคุณสมบัติในการสะสมและแลกเปลี่ยนออกซิเจนได้ดี (Oxygen storage capacity: OSC) ทำให้ช่วยลดการเกิดออกซิเดชันของโลหะลงได้ [6-9] อย่างไรก็ตามในส่วนของการใช้งานยังคงพบปัญหาในการขึ้นรูป โดยอิเล็กโทรดที่มีส่วนประกอบของซีเรียจะขึ้นรูปค่อนข้างยาก เซลล์มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำและมีความเปราะทำให้ขาดความแข็งแรงเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรดชนิดพื้นฐานอย่าง YSZ การพัฒนาการขึ้นรูปให้เซลล์ที่มีส่วนประกอบของซีเรียให้มีความแข็งแรงทนทานมากขึ้นยังเป็นความท้าทายของงานวิจัย การเติมสารช่วยขึ้นรูป (Sintering additive) ก็เป็นอีกหนึ่งแนวทาง [10,11] นอกจากนี้การใช้ตัวช่วยเสริมความแข็งแรง เช่น ดัดแปลงเซลล์ชนิดมีโลหะเป็นตัวรองรับ (Metal-supported SOEC) ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะพัฒนาต่อไปได้ [12-15] อย่างไรก็ตามการนำวัสดุซีเรียมาใช้เพิ่มความสมดุลระหว่างระบบเซลล์อิเล็กโทรไลซิสและเซลล์เชื้อเพลิงยังต้องคำนึงถึงการเสื่อมสภาพของวัสดุเนื่องจากการเกิดรีดักชัน [16,17] และนอกจากนี้จากวัสดุมีความสามารถในการนำทั้งอิเล็กตรอนและออกซิเจนไอออนซึ่งจะทำให้เกิด Short circuit ได้ ดังนั้นจึงอาจพิจารณาศึกษาใช้ Blocking layer ในอิเล็กโทรดดังกล่าว [9,18]

สำหรับขั้วที่ผลิตออกซิเจนหรือขั้วแอโนด วัสดุพื้นฐานที่มีคุณสมบัติผสมในตัวเองระหว่างการนำออกซิเจนไอออนและการนำอิเล็กตรอน (Mixed ionic and electronic conductivity: MIEC) เช่น วัสดุจำพวก Lanthanum strontium cobalt ferrite (LSCF) มักจะมีความสามารถต่ำในการทำงานในระบบอิเล็กโทรไลเซอร์เมื่อเทียบกับระบบเซลล์เชื้อเพลิง ขณะที่ LSM-YSZ ซึ่งเป็นวัสดุผสมแยกเฟสระหว่างวัสดุนำออกซิเจนไอออนและวัสดุนำอิเล็กตรอน กลับมีความสามารถสมดุลกันระหว่างทั้งสองระบบ แต่มักจะมีความสามารถโดยรวมต่ำกว่าอิเล็กโทรดชนิด MIEC โดยได้มีรายงานถึงการลดลงของ Oxygen vacancy ในอิเล็กโทรดผสมชนิด MIEC ภายใต้สภาวะแอโนดของ SOEC [19] ซึ่งสอดคล้องกับงานแบบจำลองที่ได้ถูกรายงานไว้ [20]

## 2. เซลล์อิเล็กโทรไลต์มีอายุการใช้งานสั้น (Poor durability)

อายุการใช้งานของเซลล์เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการผลิตในส่วนของ Capital investment cost โดยพบว่า ปัญหาอายุการใช้งานนั้นมีแหล่งที่มาจากทั้งในส่วนของคุณสมบัติของขั้วแคโทดและแอโนด

สำหรับขั้วแคโทด พบว่านิกเกิลที่เป็นส่วนประกอบหลักของอิเล็กโทรดพื้นฐานชนิด Ni-YSZ อนุภาคมักเกิดการเกาะรวมตัวกัน (Agglomeration) หลังจากใช้งานมาเป็นเวลานาน ส่งผลให้เกิด Micro-crack ขึ้นภายในอิเล็กโทรดซึ่งส่งผลต่อทั้งความสามารถของอิเล็กโทรดและอายุการใช้งาน [9,21-23] ในส่วนของขั้วแอโนด พบว่ามักเกิดการแยกชั้น (Delamination) ระหว่างชั้นของอิเล็กโทรไลต์ และชั้นแอโนด ที่มาของปัญหาถูกรายงานว่าน่าจะเป็นผลมาจากความไม่เสถียรของโครงสร้างของแอโนดซึ่งมี Defects ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนปริมาณมากส่งผลเหนี่ยวนำให้เกิดความดันเฉพาะจุดขึ้นและส่งผลให้เกิดการแยกชั้นและแตกร้าวในโครงสร้าง [24,25]

ดังนั้นการศึกษาหาชนิดวัสดุขั้วแอโนดที่มีความสามารถสูงและเสถียรในสภาวะที่มีออกซิเจนปริมาณมากจึงยังคงเป็นความท้าทาย [26] นอกจากนี้การออกแบบให้ปฏิกรณ์มีระบบที่ช่วยให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนได้ดีอาจจะช่วยลดปัญหาดังกล่าว เนื่องจากจะทำให้ออกซิเจนที่เกิดขึ้นที่แอโนดมีออกซิเจนฟลักซ์ที่สูง (High  $O_2$  flux) นอกจากนี้การออกแบบระดับความพรุนของแอโนด (Functional porous layer) ให้แตกต่างกันตามความห่างจากชั้นอิเล็กโทรไลต์ ก็อาจช่วยบรรเทาปัญหาดังกล่าวได้

โดยทั่วไปเซลล์อิเล็กโทรไลต์ผสมมักจะมีสภาวะปฏิบัติการที่อุณหภูมิสูง (> 800 องศาเซลเซียส) ดังนั้นการเสื่อมสภาพของเซลล์อิเล็กโทรไลต์และระบบเสริม (Balance of plant) มักจะเกิดขึ้น การลดอุณหภูมิปฏิบัติการลงเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตามสำหรับ YSZ ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปเป็นอิเล็กโทรไลต์ชนิดตัวนำออกซิเจนไอออน โดยทั่วไปจะมีค่าการนำไอออนต่ำลงอย่างมากเมื่อลดอุณหภูมิลงและส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนของเซลล์อิเล็กโทรไลต์

ดังนั้นการพัฒนาวัสดุอิเล็กโทรไลต์ ชนิดอื่นที่มีความสามารถสูงที่อุณหภูมิจำลองต่ำลงจึงเป็นหัวข้อที่ยังคงมีความท้าทาย อิเล็กโทรไลต์ชนิดตัวนำโปรตอนเป็นแนวทางหนึ่งซึ่งมีความน่าสนใจ เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับออกซิเจนไอออน ( $O^{2-}$ ) แล้ว โปรตอน ( $H^+$ ) มี Ionic radius ที่เล็กกว่ามากและมีการเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า ในทางทฤษฎีอิเล็กโทรไลต์ที่นำโปรตอนจึงมีความสามารถสูงกว่าอิเล็กโทรไลต์ที่นำออกซิเจนไอออน [27,28]

นอกจากนี้การขึ้นรูปเซลล์อิเล็กโทรไลต์ให้มีความบางจะช่วยลดค่าความต้านทานภายในเซลล์ลงส่งผลให้ความสามารถในการวิเคราะห์ไฮโดรเจนสูงขึ้น แต่เซลล์ที่บางจะมีปัญหาในเรื่องของความแข็งแรง ดังนั้นการใช้โลหะเป็นตัวรองรับ (Metal-foam supported SOEC) จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องศึกษาการขึ้นรูปเซลล์ซึ่งเป็นเซรามิกสนับสนุนโลหะที่เป็นตัวรองรับให้มีชั้นตอนที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนที่เหมาะสม



### 3. การใช้พลังงานความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนภายนอก (Utilization of external waste heat)

การใช้พลังงานความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนภายนอก โดยเฉพาะการใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอื่นเป็นแนวทางหนึ่งที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการผลิตโดยรวม ตัวอย่างเช่น พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอื่น ๆ (500-750 องศาเซลเซียส) หรือพลังงานความร้อนจากระบบ Solar concentrators (750-1000 องศาเซลเซียส) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมในประเทศไทยส่วนใหญ่ไม่ได้มีอุณหภูมิที่สูงมากนัก ดังนั้น เพื่อให้เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย การพัฒนาเซลล์อิเล็กโทรไลซิสให้สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำลงจะเป็นแนวทางที่สามารถดึงความร้อนจากแหล่งภายนอกมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อต้นทุนการผลิตไฮโดรเจนนี้ แต่ทั้งนี้ยังต้องคำนึงถึงค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำลงเมื่อลดอุณหภูมิลง นั้นหมายถึงความสามารถทางเคมีไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลซิสที่จะลดลงและความต้องการปริมาณไฟฟ้าที่จะเพิ่มขึ้นไปด้วย ดังนั้นนอกจากการพัฒนาเซลล์อิเล็กโทรไลซิสแล้วการวิเคราะห์ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ถึงความเกี่ยวข้องระหว่างอุณหภูมิปฏิบัติการและต้นทุนการผลิตไฮโดรเจนจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

การพัฒนาเซลล์อิเล็กโทรไลซิสให้สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำลงนอกจากจะทำให้สามารถดึงความร้อนจากแหล่งภายนอกมาใช้แล้ว ยังช่วยลดการเสื่อมสภาพของเซลล์และระบบเสริมที่เกิดจากอุณหภูมิที่สูงได้ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2

### 4. การหาจุดที่เหมาะสมสำหรับสภาวะปฏิบัติการ (Operating conditions optimization)

เมื่อมีการขยายขนาดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการไปเป็นเซลล์ขนาดใหญ่ (Stack-type cell) สภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสมอาจแตกต่างจากสภาวะที่เหมาะสมสำหรับ ตัวอย่างเช่น ในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนภายในเซลล์ อัตราส่วนสารตั้งต้นที่เหมาะสมแก่ขั้วแคโทด อัตราส่วนของ Flushing gas ที่ขั้วแอโนด เป็นต้น ทั้งนี้เซลล์อิเล็กโทรไลซิสที่มีการออกแบบรูปร่าง (Configuration) ที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อการปฏิบัติการที่ต่างกันไปด้วย ที่สำคัญการกำหนดสภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสมอาจมีส่วนช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของเซลล์ทำให้เซลล์อิเล็กโทรไลซิสมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น

### 5. การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการใช้งานที่หลากหลาย (Versatility of SOEC)

หากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ สามารถรองรับสารตั้งต้นที่หลากหลายจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ กล่าวคือ นอกจากจะใช้ผลิตไฮโดรเจนจากไอน้ำแล้ว ยังสามารถใช้เซลล์ในการผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์จากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> electrolysis) หรือใช้ในการผลิตก๊าซสังเคราะห์ (Syngas) จากไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกันได้อีกด้วย (Co-electrolysis) จากการเปรียบเทียบระบบ CO<sub>2</sub> electrolysis กับ Co-electrolysis พบว่าความสามารถของเซลล์ในการผลิตก๊าซสังเคราะห์ผ่านกระบวนการ Co-electrolysis มีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการ CO<sub>2</sub> electrolysis มีค่าความต้องการกระแสไฟฟ้าสูงกว่าและยังก่อให้เกิดการสะสมของคาร์บอน (Carbon deposition) บนแคโทดส่งผลให้อิเล็กโทรดเสื่อมสภาพลง ในขณะที่ในกระบวนการ Co-electrolysis มีไอน้ำพร้อม ๆ กับ CO<sub>2</sub> ดังนั้นจึงช่วยลดปัญหาการสะสมของคาร์บอนลงได้ [6,8,9,29,30]



## เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/production-of-hydrogen.php> (accessed date: June 15, 2021).
- [2] <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (accessed date: June 15, 2021).
- [3] [https://www.iea.org/reports/direct-air-capture?fbclid=IwAR0xJMR76jowkird6X0LuGfNeSI\\_dm0yvyw SUgHTAO-nz0ai0m8oZtC5oY](https://www.iea.org/reports/direct-air-capture?fbclid=IwAR0xJMR76jowkird6X0LuGfNeSI_dm0yvyw SUgHTAO-nz0ai0m8oZtC5oY) (accessed date: June 15, 2021).
- [4] B. Parkinson, P. Balcombe, J.F. Speirs, A.D. Hawkes and K. Hellgardt, Levelized cost of CO<sub>2</sub> mitigation from hydrogen production routes, *Energy & Environmental Science* 12, 2018, 19-40.
- [5] <https://www.airproducts.com/news-center/2020/07/0707-air-products-agreement-for-green-ammonia-production-facility-for-export-to-hydrogen-market> (accessed date: June 15, 2021).
- [6] P. Kim-Lohsoontorn and J. Bae, Electrochemical performance of solid oxide electrolysis cell electrodes under high-temperature coelectrolysis of steam and carbon dioxide, *Journal of Power Sources* 196, 2011, 7161-7168.
- [7] P. Temluxame, P. Puengjinda, S. Peng-ont, W. Ngampuengpis, N. Sirimungkalakul, T. Jiwanuruk, T. Sornchamni and P. Kim-Lohsoontorn, Comparison of ceria and zirconia-based electrolytes for solid oxide electrolysis cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 2020, 24568-24580.
- [8] P. Kim-Lohsoontorn, Y-M. Kim, N. Laosiripojana and J. Bae, Gadolinium doped ceria-impregnated nickel-yttria stabilised zirconia cathode for solid oxide electrolysis cell, *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 2011, 9420-9427.
- [9] P. Kim-Lohsoontorn, N. Laosiripojana and J. Bae, Performance of solid oxide electrolysis cell having bi-layered electrolyte during steam electrolysis and carbon dioxide electrolysis, *Current Applied Physics* 11, 2011, S223-S228.
- [10] S. Likhittaphon, T. Pukkrueapun, P. Seeharaj, U. Wetwathana Hartley, N. Laosiripojana and P. Kim-Lohsoontorn, Effect of sintering additives on barium cerate based solid oxide electrolysis cell for syngas production from carbon dioxide and steam, *Fuel Processing Technology* 173, 2018, 119-125.
- [11] R. Visvanichkul, S. Peng-Ont, W. Ngampuengpis, N. Sirimungkalakul, P. Puengjinda, T. Jiwanuruk, T. Sornchamni and P. Kim-Lohsoontorn, Effect of CuO as sintering additive in scandium cerium and gadolinium-doped zirconia-based solid oxide electrolysis cell for steam electrolysis, *Processes* 7(12), 2019, 686-695.
- [12] R. Visvanichkul, P. Puengjinda, T. Jiwanuruk, S. Peng-Ont, N. Sirimungkalakul, W. Ngampuengpis, T. Sornchamni and P. Kim-Lohsoontorn, Fabrication using sequence wet-chemical coating and electrochemical performance of Ni-Fe-foam-supported solid oxide electrolysis cell for hydrogen production from steam, *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 2021, 4903-4916.
- [13] M.C. Tucker, Progress in metal-supported solid oxide electrolysis cells: A review, *International Journal of Hydrogen Energy* 45, 2020, 24203-24218.
- [14] F. Shen, R. Wang and M.C. Tucker, Long term durability test and post mortem for metal-supported solid oxide electrolysis cells, *Journal of Power Sources* 474, 2020, 228618.
- [15] R. Wang, C. Byrne and M.C. Tucker, Assessment of co-sintering as a fabrication approach for metal-supported proton-conducting solid oxide cells, *Solid State Ionics* 332, 2019, 25-33.
- [16] M.A. Laguna-Bercero and V.M. Orera, Micro-spectroscopic study of the degradation of scandia and ceria stabilized zirconia electrolytes in solid oxide electrolysis cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 2011, 13051-13058.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [17] P. Temluxame, N. Laosiripojana, S. Assabumrungrat, P. Puengjinda and P. Kim-Lohsoontorn, Phase transformation and electrical properties of bismuth oxide doped scandium cerium and gadolinium stabilized zirconia (0.5Gd0.5Ce10ScSZ) for solid oxide electrolysis cell, *International Journal of Hydrogen Energy* 45, 2020, 29953-29965.
- [18] H. Sumi, E. Suda and M. Mori, Blocking layer for prevention of current leakage for reversible solid oxide fuel cells and electrolysis cells with ceria-based electrolyte, *International Journal of Hydrogen Energy* 42, 2017, 4449-4455.
- [19] O.A. Marina, L.R. Pederson, M.C. Williams, K.D. Coffey GW, Meinhardt and C.D. Nguyen, Electrode performance in reversible solid oxide fuel cells, *Journal of Electrochemical Society* 154, 2007, B452-459.
- [20] A.M. Svensson, S. Sunde and K. Nisancioglu, Mathematical modeling of oxygen exchange and transport in air-perovskite-yttria-stabilized zirconia interface regions, II, Direct exchange of oxygen vacancies, *Journal of Electrochemical Society* 145, 1998, 1390-1399.
- [21] M. Keane, H. Fan, M. Han and P. Singh, Role of initial microstructure on nickel-YSZ cathode degradation in solid oxide electrolysis cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 39, 2014, 18718-18726.
- [22] B.C. Church, T.H. Sanders, R.F. Speyer and J.K. Cochran, Thermal expansion matching and oxidation resistance of Fe-Ni-Cr interconnect alloys, *Materials Science and Engineering: A* 452-453, 2007, 334-340.
- [23] S.B. Simonsen, T.T. Muhl, K.T.S. Thydén, C. Chatzichristodoulou, J. Nielsen and B.R. Sudireddy, Effect of Fe on high performing nanostructured Ni/Gd-doped ceria electrocatalysts, *Solid State Ionics* 340, 2019, 6.
- [24] P. Kim-Lohsoontorn, D.J.L. Brett, N. Laosiripojana, Y-M. Kim and J-M. Bae, Performance of solid oxide electrolysis cells based on composite  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_{3-\delta}$  - yttria stabilized zirconia and  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$  oxygen electrodes, *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 2010, 3958-3966.
- [25] N.P. Brandon and D.J.L. Brett, Engineering porous materials for fuel cell applications, *Philosophical Transactions of Royal Society A* 364, 2006, 147-159.
- [26] P. Prasopchokkul, P. Seeharaj and P. Kim-Lohsoontorn,  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}(\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_{3-\delta}$  perovskite anode in solid oxide electrolysis cell for hydrogen production from high-temperature steam electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 2021, 7023-7036.
- [27] P. Kim-Lohsoontorn, C. Paichitra, S. Vorathamthongdee and P. Seeharaj, Low-temperature preparation of  $\text{BaCeO}_3$  through ultrasonic-assisted precipitation for application in solid oxide electrolysis cell, *Chemical Engineering Journal* 278, 2015, 13-18.
- [28] J. Sarabut, S. Charojrochkul, T. Sornchamni, N. Laosiripojana, S. Assabumrungrat, U. Wetwatana-Hartley and P. Kim-Lohsoontorn, Effect of strontium and zirconium doped barium cerate on the performance of proton ceramic electrolyser cell for syngas production from carbon dioxide and steam, *International Journal of Hydrogen Energy* 44, 2019, 20634-20640.
- [29] D-Y. Lee, M.T. Mehran, J. Kim, S. Kim, S-B. Lee, R-H. Song, E-Y. Ko, J-E. Hong, J-Y. Huh and T-H. Lim, Scaling up syngas production with controllable  $\text{H}_2/\text{CO}$  ratio in a highly efficient, compact, and durable solid oxide co electrolysis cell unit-bundle, *Applied Energy* 257, 2020, 114036-114047.
- [30] O.G. Sánchez, Y.Y. Birdja, M. Bulut, J. Vaes, T. Breugelmanns and D. Pant, Recent advances in industrial  $\text{CO}_2$  electroreduction, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 16, 2019, 47-56.



### 3.10 การพัฒนาการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากจุลสาหร่าย

จุลสาหร่าย (Microalgae) เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่พบได้ทั่วไปทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม สามารถสร้างอาหารได้เองจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) โดยใช้คาร์บอนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และใช้พลังงานจากแสงในช่วงคลื่น 400–700 นาโนเมตร เพื่อตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยาในวัฏจักรคัลวิน และได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์โบไฮเดรตในรูปมวลชีวภาพของจุลสาหร่าย ออกซิเจน และน้ำ จากข้อได้เปรียบของกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์และคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศซึ่งไม่มีค่าใช้จ่าย รวมถึงความหลากหลายทางชีวภาพของจุลสาหร่าย จึงเกิดแนวความคิดการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย กระบวนการนี้มีจุดแข็ง อาทิ สามารถตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่ได้สูงกว่าวิธีการทางชีวภาพแบบอื่น เช่น การปลูกป่าหรือการเพาะเลี้ยงสาหร่ายทะเล ประมาณ 30–50 เท่า การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายไม่ต้องคำนึงถึงประเด็นความสมบูรณ์ของดิน จึงดำเนินการได้ในพื้นที่หลากหลายและไม่แข่งขันกับพื้นที่ปลูกพืชอาหาร จุลสาหร่ายน้ำเค็มสามารถนำมาเพาะเลี้ยงได้ในพื้นที่น้ำกร่อยหรือบริเวณชายฝั่ง ทำให้ลดปัญหาการแย่งน้ำจืดกับชุมชนและการค่าใช้จ่ายในการขนส่งน้ำไปสู่สถานที่เพาะเลี้ยง นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายสามารถใช้น้ำทิ้งจากชุมชนหรือฟาร์มเลี้ยงสัตว์ร่วมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรม และสามารถดำเนินงานให้คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วยการจำหน่ายมวลชีวภาพของจุลสาหร่าย หรือนำไปสกัดเพื่อผลิตสารชีวเคมีที่มีมูลค่าสูง

#### ตลาดและการแข่งขัน

การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเชิงพาณิชย์มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อผลิตมวลชีวภาพสำหรับใช้เป็นอาหารหรือนำไปสกัดเพื่อผลิตสารชีวเคมีเท่านั้น และยังไม่พบการเพาะเลี้ยงในระดับอุตสาหกรรมที่มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเชิงพาณิชย์ในประเทศไทยเกิดขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2519 โดยบริษัท Siam Algae ซึ่งอยู่ในเครือบริษัท DIC Corporation ประเทศญี่ปุ่น โดยมีกำลังการผลิตที่ 150 ตัน/ปี ในปัจจุบันบริษัท Siam Algae ได้ย้ายฐานการผลิตไปที่ประเทศจีน [1] ขณะที่ผู้ผลิตจุลสาหร่ายรายใหญ่ในปัจจุบันคือ บริษัทบุญสมฟาร์ม ซึ่งเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายสไปรูลินา (สาหร่ายเกลียวทอง) เพื่อผลิตอาหารเสริมเป็นหลัก โดยมีกำลังการผลิตที่ 40 ตัน/ปี [2] ในส่วนของตลาดจุลสาหร่ายทั่วโลก คาดว่าจะขยายตัวในอัตราเฉลี่ย 6.9% ต่อปี ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2560–2567 โดยมีมูลค่าในปี พ.ศ. 2567 ประมาณ 1.92 ล้านล้านบาท [3] อย่างไรก็ตามการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเชิงพาณิชย์จำกัดอยู่เพียงจุลสาหร่าย 4 สกุล คือ คลอเรลลา (*Chlorella*) สไปรูลินา (*Spirulina*) ดุนาลิเอลลา (*Dunaliella*) และฮีมาโตคอกคัส (*Haematococcus*) คลอเรลลาเป็นจุลสาหร่ายสีเขียวที่พบได้ทั่วไปในประเทศไทยและรู้จักในกลุ่มเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์น้ำในชื่อ "น้ำเขียว" สามารถนำไปเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอนสัตว์เพื่อใช้อุบลสัตว์น้ำวัยอ่อนที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ คลอเรลลานิยมใช้ผลิตอาหารเสริมในรูปผงหรืออัดเม็ดเพราะมีโปรตีน เบตาแคโรทีน และสารกระตุ้นการเจริญเติบโตในปริมาณมาก ผู้ผลิตและตลาดส่วนใหญ่ของคลอเรลลาอยู่ในภูมิภาคเอเชีย เช่น จีน ไต้หวัน และญี่ปุ่น ตลาดของจุลสาหร่ายสกุลนี้คาดว่าจะขยายตัวที่อัตราเฉลี่ย 5.9% ต่อปี ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2563–2570 และมีมูลค่าตลาดในปี พ.ศ. 2570 ประมาณ 6,100 ล้านบาท [4] สไปรูลินาเป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน



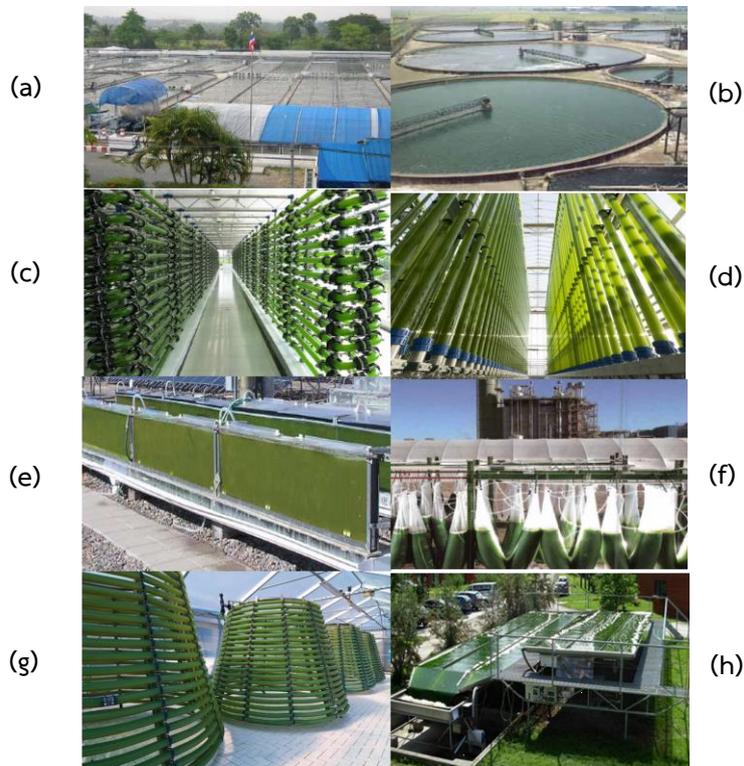
หรือไฮยาโนแบคทีเรีย การเพาะเลี้ยงสไปรูลิनाทำได้ง่ายในสภาวะกลางแจ้งเพราะเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่เอชสูงประมาณ 10–11 ซึ่งไม่เหมาะกับจุลสาหร่ายหรือจุลินทรีย์กลุ่มอื่น มวลชีวภาพของสไปรูลิનાนิยมนำมาผลิตอาหารเสริมเนื่องจากมีโปรตีน กรดไขมัน สารกลุ่มแคโรทีนอยด์ และเส้นใย ในปริมาณมาก และยังใช้สกัดเพื่อผลิตสารไฟโคไซยานิน (Phycocyanin) ซึ่งเป็นรงควัตถุสีฟ้าที่มีการใช้งานในสีผสมอาหาร สีในเครื่องสำอาง หรือใช้เป็นเครื่องหมายติดฉลากฟลูออเรสเซนต์เพื่อใช้ในทางการแพทย์ การเพาะเลี้ยงสไปรูลินาเชิงพาณิชย์พบได้ทั่วโลก โดยเฉพาะทางภาคตะวันตกเฉียงใต้ของสหรัฐอเมริกา จีน ญี่ปุ่น อินเดีย และเม็กซิโก [1] และตลาดมีอัตราการขยายตัวเฉลี่ยต่อปีประมาณ 9.4% ซึ่งคิดเป็นมูลค่าในปี พ.ศ. 2568 ประมาณ 19,518 ล้านบาท [5] ดุนาลิเอลลาเป็นจุลสาหร่ายสีเขียวอีกสกุลที่เพาะเลี้ยงได้ง่ายในสภาวะกลางแจ้ง เพราะทนต่อความเค็มของน้ำได้ถึงประมาณ 10 เท่าของน้ำทะเล ทำให้จุลสาหร่ายและแบคทีเรียกลุ่มอื่นปนเปื้อนได้ยาก จุลสาหร่ายดุนาลิเอลลาได้รับความสนใจเพราะสะสมสารเบตาแคโรทีนได้สูงถึง 5%–15% ของน้ำหนักแห้งเมื่อเซลล์อยู่ภายใต้สภาวะความเค็มสูง ความเข้มแสงสูง หรือระดับธาตุอาหารต่ำ ในปัจจุบันมีการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายดุนาลิเอลลาเชิงพาณิชย์ในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย อิสราเอล จีน และสเปน เป็นต้น มูลค่าของตลาดเบตาแคโรทีนในปี พ.ศ. 2562 อยู่ที่ประมาณ 16,800 ล้านบาท โดย 35% มาจากการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายดุนาลิเอลลา [6] จุลสาหร่ายฮีมาโตคอกคัสเป็นสาหร่ายสีเขียวที่สะสมสารแอสตาแซนทิน (Astaxanthin) ได้ในปริมาณมากเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะแก่การเจริญเติบโต เช่น ความเข้มแสงสูง ขาดไนโตรเจน หรือความเค็มสูง สารแอสตาแซนทินมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระจึงมีการใช้งานในหลายด้าน เช่น การแพทย์ เกษษกรรม อาหารเสริม อาหารสัตว์ และเคมีภัณฑ์ สารแอสตาแซนทินที่ผลิตจากกระบวนการทางชีวภาพเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอาหาร เกษษกรรมและการแพทย์ มากกว่าสารแอสตาแซนทินที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมี ตลาดแอสตาแซนทินมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องในอัตราเฉลี่ยมากกว่า 15% ต่อปี ซึ่งเป็นผลจากความตระหนักด้านสุขภาพของประชากร และคาดว่าในปี พ.ศ. 2568 ตลาดแอสตาแซนทินทั่วโลกจะมีมูลค่าประมาณ 81,000 ล้านบาท โดยครึ่งหนึ่งมาจากการผลิตด้วยกระบวนการทางชีวภาพโดยเฉพาะการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายฮีมาโตคอกคัส [7] การขยายตัวของตลาดจุลสาหร่ายจำเป็นต้องใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก จึงเป็นโอกาสในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์

### ความพร้อมทางด้านเทคโนโลยีในปัจจุบันและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรม

รูปที่ 3.10.1 แสดงตัวอย่างของระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย การเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันนิยมดำเนินงานภายใต้สภาวะกลางแจ้งในบ่อน้ำวน (Raceway) ซึ่งเป็นบ่อคอนกรีตหรือบ่อที่คลุมด้วยวัสดุกันน้ำซึม มีความลึก 10–40 เซนติเมตร มีใบพัดตีน้ำเพื่อผลักดันน้ำให้ไหลไปตามแนวบ่อและนำจุลสาหร่ายขึ้นมารับแสงแดดใกล้ผิวน้ำ และอาจมีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเพิ่มผลผลิตมวลชีวภาพในฟาร์มเพาะเลี้ยงขนาดใหญ่ บ่อน้ำวนมีการใช้งานเพื่อผลิตจุลสาหร่ายเชิงพาณิชย์มานานมากกว่า 50 ปี และยังคงเป็นกำลังหลักในปัจจุบัน ข้อจำกัดสำคัญของบ่อน้ำวนคือ ผลผลิตต่ำเมื่อเทียบกับขนาดพื้นที่เพาะเลี้ยง พบปัญหาการปนเปื้อนจากจุลสาหร่ายและจุลินทรีย์ชนิดอื่นซึ่งเป็นผลจากการดำเนินงานในระบบเปิด และจำเป็นต้องเติมน้ำเพื่อชดเชยส่วนที่ระเหยออกจากการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายกลางแจ้งพบการใช้งานบ่อวงกลมซึ่งทำจากคอนกรีต มีความลึกประมาณ 25–30 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดประมาณ 40–45 เมตร และมีใบพัดตีน้ำเพื่อให้จุลสาหร่ายเคลื่อนที่ตามแนวเส้นรอบวง จากข้อจำกัดของบ่อน้ำวนและบ่อวงกลมจึงเกิดแนวคิดการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในระบบปิดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (Bioreactor) โดยรูปแบบที่ได้รับความนิยมคือแบบท่อยาว (Tubular) ทรงกระบอกแนวตั้ง (Column) และแผ่นแบน (Flat plate or panel) ระบบเพาะเลี้ยงจะถูกออกแบบให้มีระยะแสงผ่านประมาณ 5–10 เซนติเมตร เพื่อลดปัญหาแสงไม่เพียงพอและจากการบดบังแสงกันเองของเซลล์จุลสาหร่าย ปัญหาหลักของการเพาะเลี้ยง



จุลสาหร่ายในระบบปิดซึ่งทำให้ไม่สามารถขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรม คือต้นทุนการก่อสร้างและดำเนินการที่สูงกว่าบ่อน้ำวนเกิน 10 เท่า รวมถึงปัญหาในเชิงวิศวกรรม เช่น การถ่ายโอนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างฟองอากาศและของเหลว การกำจัดออกซิเจนส่วนเกิน การควบคุมอุณหภูมิในช่วงเวลากลางวัน การเกาะติดของจุลสาหร่ายบนผนังของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง เป็นต้น นอกจากนี้มีรายงานการออกแบบระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในระบบปิดอีกหลายรูปแบบ เช่น ใช้ถุงพลาสติกแขวนเรียงกัน (Bag Bioreactor) แบบท่อยาวที่ขดเป็นรูปกรวย หรือแบบ Thin-layer cascade ระบบเหล่านี้มักถูกจำกัดอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการหรือในระดับโรงงานนำร่อง (Pilot plant) แต่ไม่พบการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม การการเก็บเกี่ยวมวลชีวภาพของจุลสาหร่ายเป็นอีกปัญหาที่สำคัญของการเพาะเลี้ยงเชิงพาณิชย์ เพราะความเข้มข้นของมวลชีวภาพในบ่อน้ำวนหรือระบบเพาะเลี้ยงแบบปิดมีค่าต่ำระหว่าง 0.3–0.5 กรัม/ลิตร เมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยง ดังนั้นการแยกน้ำจากของแข็งเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของมวลชีวภาพขึ้นประมาณ 100–1,000 เท่า จึงต้องอาศัยพลังงานในปริมาณมากซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต [8] นอกจากนี้เทคโนโลยีที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในระบบปิดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพจะต้องพิจารณาเป็นรายกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องการเดินระบบเพราะยังไม่เคยมีการทดลองด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพในพื้นที่ขนาดใหญ่ และจะต้องนำข้อมูลด้านชนิดของจุลสาหร่าย ผลผลิตที่ต้องการ สภาพแวดล้อมในบริเวณฟาร์มเพาะเลี้ยง ปริมาณแสงแดดและฝน ทรัพยากรในการเพาะเลี้ยงที่มีอยู่แล้ว เงินทุน และกฎหมายที่เกี่ยวข้องมาพิจารณาประกอบการตัดสินใจ



**รูปที่ 3.10.1** ระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย (a) บ่อน้ำวน (b) บ่อวงกลมกลางแจ้ง (c) แบบท่อยาว (d) แบบทรงกระบอกแนวตั้ง (e) แบบแผ่นแบน (f) ถุงพลาสติก (g) แบบท่อยาวที่ขดเป็นรูปกรวย และ (h) แบบ Thin-layer cascade

**ที่มา:** สรวีศ เฝ้าทองศุข (2543) [1], <https://www.schott.com/innovation/en/algae-harvesting-kicks-off/> (accessed date June 09, 2021) [9], Grivalsky และคณะ (2019) [10], Hu และคณะ (2008) [11] และ Benemann (2017) [12]

Technology Readiness Level (TRL) ของการพัฒนากระบวนการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซไอเสีย (Flue gas) ถูกจัดอยู่ในระดับ 5-7 ซึ่งเป็นการทดสอบระบบเพาะเลี้ยงในระดับห้องปฏิบัติการจนถึงการทดสอบภาคสนามภายใต้สภาวะจริงในระดับโรงงานนำร่อง [13] การดำเนินงานในระดับโรงงานนำร่องซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่างบริษัท Seambiotic (Israel) และ Israel Electric Company ในปี พ.ศ. 2550 ได้นำก๊าซไอเสียจากโรงไฟฟ้ามาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายกลางแจ้ง ผลการทดสอบเบื้องต้นได้รับผลผลิตมวลชีวภาพประมาณ 20 กรัม/ตารางเมตร·วัน และลดต้นทุนการผลิตจากการใช้ก๊าซได้ถึง 30% อย่างไรก็ตาม Seambiotic ได้ยุติการดำเนินงานที่มุ่งเป้าในด้านเชื้อเพลิงชีวภาพและปรับยุทธศาสตร์ไปเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตสารโภชนเภสัช (Nutraceuticals) อีกหนึ่งตัวอย่างคือความร่วมมือระหว่าง Arizona Public Service (APS) และ Greenfuel Technologies ในปี พ.ศ. 2550 ซึ่งศึกษาในระดับโรงงานนำร่องในการนำก๊าซไอเสียจากโรงไฟฟ้าขนาด 1,060 MW มาเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตพลังงาน หลังจากดำเนินงานไปได้ 2 ปี และใช้เงินลงทุนไปมากกว่า 2,200 ล้านบาท โครงการไม่สามารถดำเนินการต่อไปได้จากทั้งเหตุผลด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ และยังพบว่าบริษัทสตาร์ทอัพเกี่ยวกับพลังงานชีวภาพจากจุลสาหร่ายจำนวนมากทั้งในสหรัฐอเมริกาและยุโรปไม่สามารถดำเนินการต่อได้ หรือจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนแผนธุรกิจจากด้านพลังงานชีวภาพเป็นการผสมผสานระหว่างพลังงานชีวภาพและผลิตภัณฑ์อื่นจากจุลสาหร่าย เช่น อาหารเสริม ผลิตภัณฑ์เสริมความงาม สารโภชนเภสัช และสารชีวเคมี หลังจากปี พ.ศ. 2552 ยังพบโครงการระดับโรงงานนำร่องดำเนินงานอยู่ในหลายประเทศในแถบยุโรปและออสเตรเลีย เพื่อนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าหรือโรงงานอุตสาหกรรมมาเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ แต่ไม่พบการขยายขนาดขึ้นสู่ระดับอุตสาหกรรม ในส่วนของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2552 ได้มีการจัดตั้ง Consortium ด้านการผลิตน้ำมันจากจุลสาหร่ายซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่างหลายมหาวิทยาลัยและสถาบันนวัตกรรม ปตท. โครงการได้สร้างโรงงานนำร่องที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เพื่อผลิตจุลสาหร่ายและนำมาสกัดน้ำมัน อย่างไรก็ตามหลังความเสียหายอย่างหนักจากอุทกภัยปี พ.ศ. 2554 โรงงานนำร่องได้ยุติการดำเนินงาน และมีรายงานข่าวว่าบริษัท ปตท. เคมีคอล จำกัด ได้แถลงข่าวการติดตั้งระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายสไปรูลินาแบบท่อยาวขนาด 3,000 ลิตร ด้วยเงินลงทุน 10 ล้านบาท [14] เพื่อบำบัดก๊าซไอเสียจากโรงงานปิโตรเคมีที่จังหวัดระยอง

หากนำตัวเลขปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของภาคการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2563 ที่ 90.02 ล้านตัน และใช้อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อผลิตน้ำมันในโรงงานนำร่องของบริษัท Ente Nazionale Idrocarburi (ENI) ประเทศอิตาลี ที่ 1,000 ตัน/เฮกเตอร์·ปี (ตารางที่ 3.10.1) จะต้องใช้พื้นที่สำหรับเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายประมาณ 900 ตารางกิโลเมตร ซึ่งเทียบเท่าพื้นที่ของจังหวัดสมุทรสาครและภูเก็ตรวมกัน ตัวเลขดังกล่าวสอดคล้องกับบทความทางวิชาการ [15] และการบรรยายของผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศ [12] ที่ระบุว่าต้องการพื้นที่เพาะเลี้ยงประมาณ 110 ตารางกิโลเมตร (3.5 เท่า ของพื้นที่สนามบินสุวรรณภูมิ) เพื่อตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าขนาด 1,000 MW นอกจากนี้ราคาต้นทุนของการผลิตสาหร่ายสไปรูลินาในประเทศไทยตกอยู่ที่ประมาณ 200-400 บาท/กิโลกรัม ซึ่งเป็นการเพาะเลี้ยงในระบบเปิดและใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศ หากทำการผลิตจุลสาหร่ายสกุลอื่นที่เพาะเลี้ยงยากกว่าสไปรูลินาในระบบปิดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพและมีกระบวนการทำบริสุทธิ์ ผลิตภัณฑ์ที่ซับซ้อนขึ้น ราคาต้นทุนของการผลิตจุลสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นมากกว่า 1,500 บาทต่อกิโลกรัม อย่างแน่นอน ซึ่งมากกว่าต้นทุนในการผลิตจุลสาหร่ายคุณภาพในโรงกลางแจ้งเพื่อผลิตเบตาแคโรทีนถึงประมาณ 3 - 4 เท่า

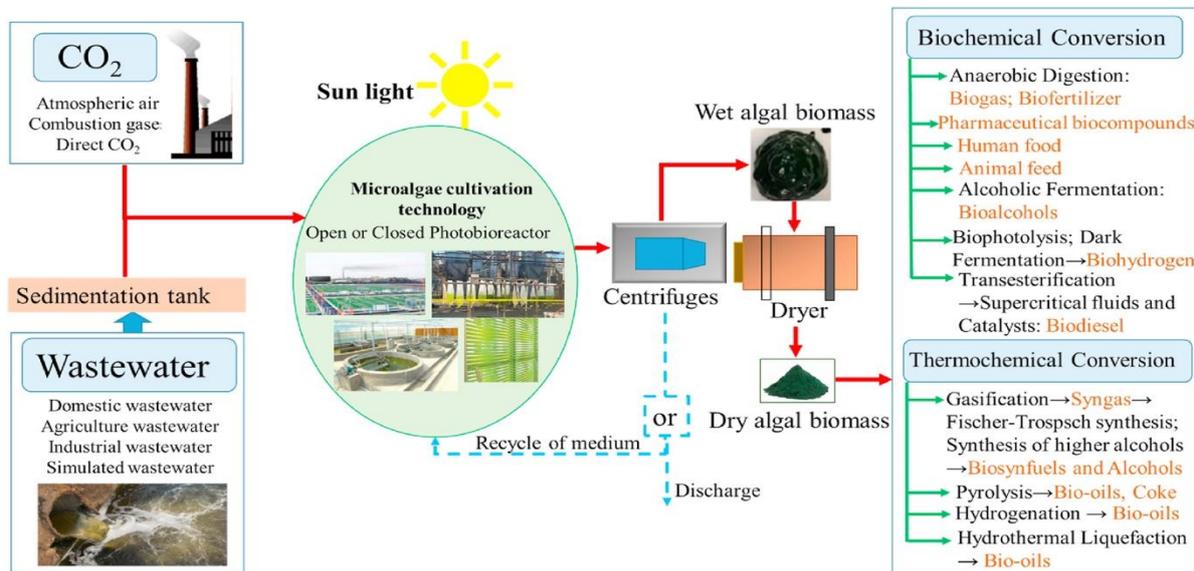


**ตารางที่ 3.10.1** ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตรึงได้จากการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายของบริษัทในต่างประเทศ

บริษัท	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตรึงได้	ผลผลิตสูงสุด (ชีวมวล)
Ente Nazionale Idrocarburi (ENI), Italy	1,000 ตัน/เฮกเตอร์·ปี	500 ตัน/เฮกเตอร์·ปี
Sinopec, China <sup>1</sup>	200,000 ตัน/ปี	50 กรัม/ตารางเมตร·วัน
Pond Technologies, Canada <sup>1</sup>	6,500 ตัน/ปี	3,500 ตัน/ปี
Phytolutions, Germany <sup>1</sup>	12 ตัน/ปี	6 ตัน/ปี
Algae Tec and Bayswater Power Station, Australia <sup>1</sup>	270,00 ตัน/ปี	-
ENN Group, China <sup>1</sup>	110 ตัน/ปี	-
MBD Energy, South Africa <sup>1</sup>	300,000 – 1,000,000 ตัน/ปี	-

<sup>1</sup>ไม่ได้ระบุพื้นที่ในการเพาะเลี้ยง

ที่มา: Zhang และ Liu (2016) [16]



**รูปที่ 3.10.2** แนวคิดการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ที่มา: Kong และคณะ (2021) [17]

จากรูปที่ 3.10.2 จะเห็นว่ามีความพยายามลดค่าใช้จ่ายของการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยนำน้ำเสียและก๊าซของเสียมาใช้เป็นวัตถุดิบของกระบวนการสังเคราะห์แสง และมีการนำกลับน้ำซึ่งแยกออกจากมวลชีวภาพในขั้นตอนการเก็บเกี่ยว เพื่อนำไปเติมในระบบเพาะเลี้ยงทดแทนน้ำที่ระเหยออกไป มวลชีวภาพของจุลสาหร่ายสามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยผสมเป็นอาหารสัตว์หรือใช้เป็นปุ๋ยบำรุงดิน ซึ่งอาจมีส่วนต่างกำไรไม่มาก หรืออาจนำไปเผาหรือหมักเพื่อผลิตพลังงานชีวภาพรูป หรือนำไปสกัดและทำบริสุทธิ์เพื่อผลิตสารเคมีราคาสูง เช่น แคลโรทีนอยด์ สารเร่งการเจริญเติบโต สารรงควัตถุที่ใช้ในเครื่องสำอาง สารต้านอนุมูลอิสระ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ส่วนต่างกำไรมากขึ้น จะเห็นว่าการลดต้นทุนของระบบเพาะเลี้ยงไปพร้อมกับการเพิ่มผลผลิตเป็นหัวใจของการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่ายให้เกิดขึ้นอย่างเป็นรูปธรรม

## ช่องว่างการพัฒนาที่สำคัญและกลยุทธ์การพัฒนาเพื่อการพลิกผัน

### ตารางที่ 3.10.2 ประเด็นการพัฒนาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่าย

ประเด็นการพัฒนา	รายละเอียดของประเด็นการพัฒนา
ชนิดจุลสาหร่าย	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ควรคัดเลือกจุลสาหร่ายที่เจริญเติบโตได้เร็วภายใต้สภาวะกลางแจ้งและอุณหภูมิสูง สามารถเจริญเติบโตได้ดีเมื่อมี SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> และโลหะหนักปนเปื้อน มวลชีวภาพของจุลสาหร่ายเก็บเกี่ยวได้ง่าย นำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย และไม่ก่อปัญหาสิ่งแวดล้อมหรือมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำและพืชน้ำ</li> <li>- ควรพิจารณาจุลสาหร่ายคลอเรลลา สไปรูลินา ดูนาลีเอลลา เพราะมีการศึกษาอย่างแพร่หลาย นอกเหนือจากสกุลในข้างต้นอาจพิจารณาจุลสาหร่ายแนนโนคลอโรพซิส (<i>Nannochloropsis</i>) และซีนเดสมัส (<i>Scenedesmus</i>) และคลอโรคอคคัม (<i>Chlorococcum</i>) เพราะทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงได้ดี</li> <li>- ศึกษาและคัดแยกจุลสาหร่ายที่เจริญเติบโตในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง เช่น น้ำพุร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิสูงและกำมะถัน</li> <li>- ศึกษาการปรับปรุงจุลสาหร่ายและการใช้พันธุวิศวกรรมดัดแปลงยีนเพื่อเร่งจุลสาหร่ายให้เจริญเติบโตและตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น</li> </ul>
แหล่งสายพันธุ์จุลสาหร่าย	<ul style="list-style-type: none"> <li>- จากความหลากหลายทางชีวภาพของจุลสาหร่ายในประเทศ ควรปรับปรุงคลังสายพันธุ์ในประเทศให้เทียบเท่าแหล่งสายพันธุ์ที่มีชื่อเสียงในต่างประเทศ เช่น UTEX, NIES, ATCC และ CCAP เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการใช้งานและไม่ต้องผ่านพิธีทางศุลกากรซึ่งใช้เวลานาน</li> </ul>
การปรับปรุงระบบเพาะเลี้ยงที่มีอยู่เดิม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปรับปรุงระบบเพาะเลี้ยงแบบบ่อน้ำวนหรือบ่วงกลมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยเพิ่มอัตราการถ่ายเทก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงในของเหลวและลดการสูญเสียกลับออกสู่บรรยากาศก่อนจุลสาหร่ายจะได้นำไปใช้ประโยชน์</li> <li>- ศึกษาการใช้งานระบบควบคุมอัตโนมัติเนื่องจากมีความแม่นยำในการดำเนินงานและลดค่าแรง</li> </ul>
ออกแบบระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในระบบปิด	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พัฒนาระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายในระบบปิดเพื่อใช้ผลิตหัวเชื้อให้แก่การเพาะเลี้ยงในระดับอุตสาหกรรมหรือเพื่อผลิตมวลชีวภาพสำหรับใช้สกัดสารชีวเคมีมูลค่าสูงเท่านั้น โดยควรพิจารณาในประเด็นที่สำคัญดังนี้ (1) ออกแบบระบบเพาะเลี้ยงให้จุลสาหร่ายได้รับแสงอย่างเพียงพอ (2) เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่ของเหลวและปรับปรุงรูปแบบการให้ก๊าซเพื่อลดการสูญเสียออกทางผิวน้ำ (3) ออกแบบหัวจ่ายอากาศที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูง (4) ออกแบบระบบเพาะเลี้ยงที่ของเหลวภายในผสมและหมุนเวียนได้ดีเพื่อลดความเสี่ยงของเซลล์ตกตะกอนบริเวณจุดอับ (5) เลือกใช้วัสดุที่แสงผ่านได้ดี ทนทานต่อการใช้งาน และมีราคาเหมาะสมและ (6) การใช้งานระบบควบคุม เซ็นเซอร์ ตรวจวัดพารามิเตอร์ที่สำคัญ และประยุกต์ Machine Learning เพื่อวิเคราะห์และแก้ไขการทำงานของระบบเพาะเลี้ยงแบบอัตโนมัติ</li> </ul>

**ตารางที่ 3.10.2** ประเด็นการพัฒนาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่าย (ต่อ)

ประเด็นการพัฒนา	รายละเอียดของประเด็นการพัฒนา
การเก็บเกี่ยวเซลล์	- ศึกษาแนวทางการเก็บเกี่ยวมวลชีวภาพของจุลสาหร่ายที่ใช้พลังงานน้อย ไม่ซับซ้อน และไม่สร้างความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ในเซลล์จุลสาหร่าย
การขนส่งวัตถุดิบ	- ผู้ผลิตจุลสาหร่ายส่วนใหญ่ตั้งอยู่ใกล้แหล่งน้ำซึ่งอาจไม่ได้ในพื้นที่เดียวกับผู้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ต้องสร้างท่อลำเลียงก๊าซและระบบควบคุมซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม ดังนั้นจึงควรพัฒนาระบบขนส่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้งานง่าย ปลอดภัยและประหยัด
การปนเปื้อนของ SO <sub>x</sub> และ NO <sub>x</sub> ในก๊าซไอเสีย	- การปนเปื้อนของ SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> และโลหะหนักในก๊าซไอเสียสามารถลดหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย การปนเปื้อนอาจสร้างปัญหาด้านการยอมรับผลิตภัณฑ์จากจุลสาหร่าย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอาหารและสุขภาพ การเพิ่มหน่วยแยกสารปนเปื้อนออกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงอาจมีความจำเป็นแม้เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายของระบบ
แหล่งที่มาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย	- อุตสาหกรรมบางประเภทผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ได้ในปริมาณมากซึ่งสามารถนำมาใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนแยกสารปนเปื้อน ตัวอย่างเช่น การผลิตเอทานอลจากกระบวนการหมัก และการผลิตก๊าซมีเทนจากถังหมักไร้อากาศ (Anaerobic digester) การวิจัยและพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อาจเน้นโรงงานกลุ่มนี้
การใช้วัตถุดิบอื่นๆ จากผู้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	- ผู้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเป็นแหล่งสารธาตุโภชนาการและวัตถุดิบอื่น ๆ ให้แก่ผู้ผลิตจุลสาหร่าย ความร้อนส่วนเกินจากการผลิตหรือก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงสามารถนำมาใช้ระเหยน้ำออกจากมวลชีวภาพของจุลสาหร่ายในขั้นตอนการเก็บเกี่ยว น้ำคอนเดนเสท (Condensate) สามารถนำมาเติมทดแทนน้ำที่ระเหยออกจากระบบเพาะเลี้ยง หรือแม้แต่น้ำทิ้งซึ่งมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสามารถใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารของจุลสาหร่ายในการเจริญเติบโต ผู้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อาจพิจารณาใช้พื้นที่ในโรงงานและแรงงานร่วมกับผู้ผลิตจุลสาหร่าย การบริหารจัดการทรัพยากรร่วมกันเป็นกลยุทธ์สำคัญในการลดต้นทุนการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายและเป็นหัวใจของแนวคิดฐานเศรษฐกิจ BCG

**แนวทางการดำเนินงานและผลที่คาดว่าจะได้รับ**

ภาครัฐควรจัดสรรทุนวิจัยอย่างเพียงพอและมีตัวชี้วัดที่เหมาะสม โดยมุ่งเป้าในเรื่องการคัดเลือกและปรับปรุงสายพันธุ์จุลสาหร่าย การพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงและวิธีการเก็บเกี่ยว การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจและสังคม และจัดสรรงบประมาณเพื่อปรับปรุงคลังสายพันธุ์จุลสาหร่ายเพื่อใช้งานในประเทศ นอกจากนี้ภาครัฐควรแต่งตั้งหน่วยงานเพื่อเป็นเจ้าภาพและมีอำนาจในการบริหารจัดการหัวข้อวิจัยและงบประมาณเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่าย หน่วยงานเจ้าภาพจะต้องประสานงานกับภาคเอกชน เช่น สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย เป็นต้น เพื่อจัดทำแผนพัฒนาการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่าย และคัดเลือกโรงงานผู้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าเกณฑ์มาจับคู่กับฟาร์มจุลสาหร่ายและนักวิจัยจากสถาบันการศึกษาเพื่อดำเนินโครงการตามแผน ควรสนับสนุนการจ้างผู้เชี่ยวชาญทั้งในและต่างประเทศที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับการออกแบบและใช้งานระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายมาเป็นที่ปรึกษาในโครงการ ซึ่งจะช่วยให้ก้าวข้ามปัญหาเดิมได้เร็วขึ้น และต้องส่งเสริมการระดมเงินจากนักลงทุนทั้งในและต่างประเทศเพื่อใช้ตามแผนที่พัฒนาขึ้น ร่วมกับการใช้งบประมาณจากภาครัฐ

หน่วยงานเจ้าภาพร่วมกับภาคีภาคเอกชนควรจัดเวทีให้ผู้บริหารหรือพนักงานระดับจัดการของผู้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผู้ผลิตจุลสาหร่าย และนักวิชาการ ได้พบปะเพื่อหารือในประเด็นการแลกเปลี่ยนทรัพยากรและเทคโนโลยี ผู้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อาจพิจารณาเข้าเป็นเจ้าของฟาร์มเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายและจัดหาวัตถุดิบในการผลิตจุลสาหร่ายโดยเน้นทรัพยากรและของเสียที่มีอยู่แล้ว ในโรงงานหรือบริเวณใกล้โรงงาน ผู้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อาจดำเนินการผลิตจุลสาหร่ายเองหรือจ้างผู้ผลิตที่มีอยู่เดิม และจำหน่ายผลิตภัณฑ์จากจุลสาหร่ายและทำการตลาดเพิ่มเติมเพื่อเปลี่ยนภาพลักษณ์จากผู้ปล่อยมลพิษเป็นผู้ผลิตสีเขียวที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

**ประเด็นที่มุ่งเน้น: โอกาสของภาคอุตสาหกรรม**

**ตารางที่ 3.10.3** โรงงานหรือกิจกรรมที่ควรมุ่งเป้าเพื่อพัฒนาการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่าย

ประเภทโรงงาน	ความเหมาะสมของโรงงาน	ประเด็นที่โรงงานควรพิจารณาในการดำเนินงาน
โรงงานผลิตเอทานอลจากกระบวนการหมัก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การผลิตเอทานอลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในถังหมักที่มีความบริสุทธิ์สูงเป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถนำมาใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายได้โดยไม่ต้องแยกสารปนเปื้อนและก๊าซมีอุณหภูมิไม่สูงสามารถใช้งานได้ทันที</li> <li>- น้ำเสียจากโรงงานมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสำหรับใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย</li> <li>- ไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนระบบบำบัดน้ำเสีย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ก๊าซไอเสียควรมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบไม่เกิน 10%–15% สำหรับใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย ดังนั้นอาจพิจารณาถึงแนวทางการลดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยง และควรศึกษาถึงวิธีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ว่าควรเติมโดยเป่าก๊าซลงในของเหลวโดยตรงหรือเป็นรูปแบบอื่น เช่น การจับคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของไบคาร์บอเนต [18]</li> <li>- ควรเลือกชนิดของจุลสาหร่ายที่มีการศึกษามาแล้วอย่างกว้างขวาง เช่น คลอเรลลา สไปรูลินา ตูนาเลียเอลลา แนนโนคัลลอปซิส และซินเดสมัส</li> <li>- หากโรงงานมีพื้นที่เพียงพอแนะนำให้ใช้ระบบบ่อน้ำวนกลางแจ้งหรือเป็นการผสมผสานระหว่างถังปฏิกรณ์ชีวภาพและบ่อกลางแจ้ง หากมีพื้นที่จำกัดควรดำเนินงานในถังปฏิกรณ์ชีวภาพและควรพิจารณาเรื่องแนวทางการให้แสงสว่างแก่เซลล์</li> <li>- ศึกษาถึงชนิดของผลิตภัณฑ์จากจุลสาหร่ายที่ควรผลิตและทำการตลาดเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และสร้างภาพลักษณ์ที่ดี</li> <li>- วัตถุดิบที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายควรมาจากแหล่งใกล้โรงงานเพื่อลดค่าขนส่ง และควรนำทรัพยากรในโรงงาน เช่น ความร้อนส่วนเกิน น้ำคอนเดนเสต และแรงงาน มาใช้งานเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด</li> </ul>

**ตารางที่ 3.10.3** โรงงานหรือกิจกรรมที่ควรมุ่งเป้าเพื่อพัฒนาการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่าย(ต่อ)

ประเภทโรงงาน	ความเหมาะสมของโรงงาน	ประเด็นที่โรงงานควรพิจารณาในการดำเนินงาน
โรงงานบำบัดน้ำเสียชุมชน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ถังหมักไร้อากาศซึ่งใช้บำบัดตะกอนอินทรีย์ระหว่างการบำบัดน้ำเสียให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 30%–40% ของปริมาตรก๊าซชีวภาพ (ประมาณ 60% คือมีเทน)</li> <li>- น้ำเสียดิบมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพียงพอสำหรับใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย และน้ำทิ้งจากถังหมักไร้อากาศสามารถนำมาเจือจางเพื่อเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายได้เช่นกัน</li> <li>- มีเทนสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานในฟาร์มเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย</li> <li>- ไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนระบบบำบัดน้ำเสีย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ควรปรับระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในช่วง 10%–15% สำหรับใช้เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย ดังนั้นอาจพิจารณาถึงแนวทางการลดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย นอกจากนี้ควรศึกษาถึงวิธีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของไบคาร์บอเนต [18]</li> <li>- ควรเลือกชนิดของจุลสาหร่ายที่มีการศึกษามาแล้วอย่างกว้างขวาง เช่น คลอเรลลา สไปรูลินา ดูนาลีเอลลา แนนโนคลอโรพซิส และซินเดสมัส</li> <li>- แนะนำให้ใช้งานระบบบ่อน้ำวนหรือบ่อวงกลมกลางแจ้งเพื่อลดค่าใช้จ่าย</li> <li>- อาจพิจารณาถึงการใช้ประโยชน์จากจุลสาหร่ายเพื่อลดค่าใช้จ่ายของการบำบัดน้ำเสีย เช่น การใช้มวลชีวภาพเพื่อผลิตมีเทน หรือใช้บำบัดน้ำก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (Polishing)</li> </ul>





## เอกสารอ้างอิง

- [1] สรวิต เฒ่าทองสุข, *สาหร่าย: ศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเพื่อการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายในประเทศไทย*, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2543.
- [2] <http://ftiebusiness.com/shop4/profile.php?uid=39074> (accessed date June 09, 2021).
- [3] <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-microalgae-market> (accessed date June 09, 2021).
- [4] <https://meticulousblog.org/top-10-companies-in-the-chlorella-market/> (accessed date June 09, 2021).
- [5] <https://meticulousblog.org/top-10-companies-in-spirulina-market/> (accessed date June 09, 2021).
- [6] <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/beta-carotene> (accessed date June 09, 2021).
- [7] <https://www.bloomberg.com/press-releases/2017-07-31/astaxanthin-market-size-worth-2-57-billion-by-2025-cagr-18-9-grand-view-research-inc> (accessed date June 09, 2021).
- [8] B. Wang, Y. Li, N. Wu, and C.Q. Lan, CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae, *Applied Microbiology Biotechnology* 79, 2008, 707-718.
- [9] <https://www.schott.com/innovation/en/algae-harvesting-kicks-off/> (accessed date June 09, 2021).
- [10] T. Grivalsky, K. Ranglova, J.A. da Camara Manoel, G.E. Lakatos, and R. Lhotsky, Development of thin-layer cascades for microalgae cultivation: milestones (review), *Folia Microbiologica* 64, 2019, 603-614.
- [11] Q. Hu, M. Sommerfeld, E. Jarvis, M. Ghirardi, M. Posewitz, M. Seibert, and A. Darzins, Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances, *The Plant Journal* 54, 2008, 621-639.
- [12] J. Benemann, CO<sub>2</sub> microalgae utilization - historical and global overview, US DOE BETO Algae Cultivation for Carbon Capture and Utilization Workshop, Orlando, FL, 05/23/17.
- [13] C. Hepburn, E. Adlen, J. Beddington, E.A. Carter, S. Fuss, N.A. Dowell, J.C. Minx, P. Smith, and C.K. William, The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal, *Nature* 575, 2019, 87-97.
- [14] เชื้อเพลิงพลังงานสาหร่ายแก้วิกฤตพลังงาน-จับคาร์บอน, หนังสือพิมพ์กรุงเทพธุรกิจ, 8 ธันวาคม 2552
- [15] J.R. Seth and P.P. Wangikar, Challenges and opportunities for microalgae-mediated CO<sub>2</sub> capture and biorefinery, *Biotechnology and Bioengineering* 112(7), 2015, 1281-1296.
- [16] S. Zhang and Z. Liu, Advances in the biological fixation of carbon dioxide by microalgae, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 96, 2021, 1475-1495.
- [17] W. Kong, B. Shen, J. Lyu, J. Kong, J. Ma, Z. Wang and S. Feng, Review on carbon dioxide fixation coupled with nutrients removal from wastewater by microalgae, *Journal of Cleaner Production* 292, 2021, 125975.
- [18] H.W. Yen, S.H. Ho, C.Y. Chen, and J.S. Chang, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> removal from flue gas via microalgae cultivation: a critical review, *Biotechnology Journal* 10, 2015, 829-839.

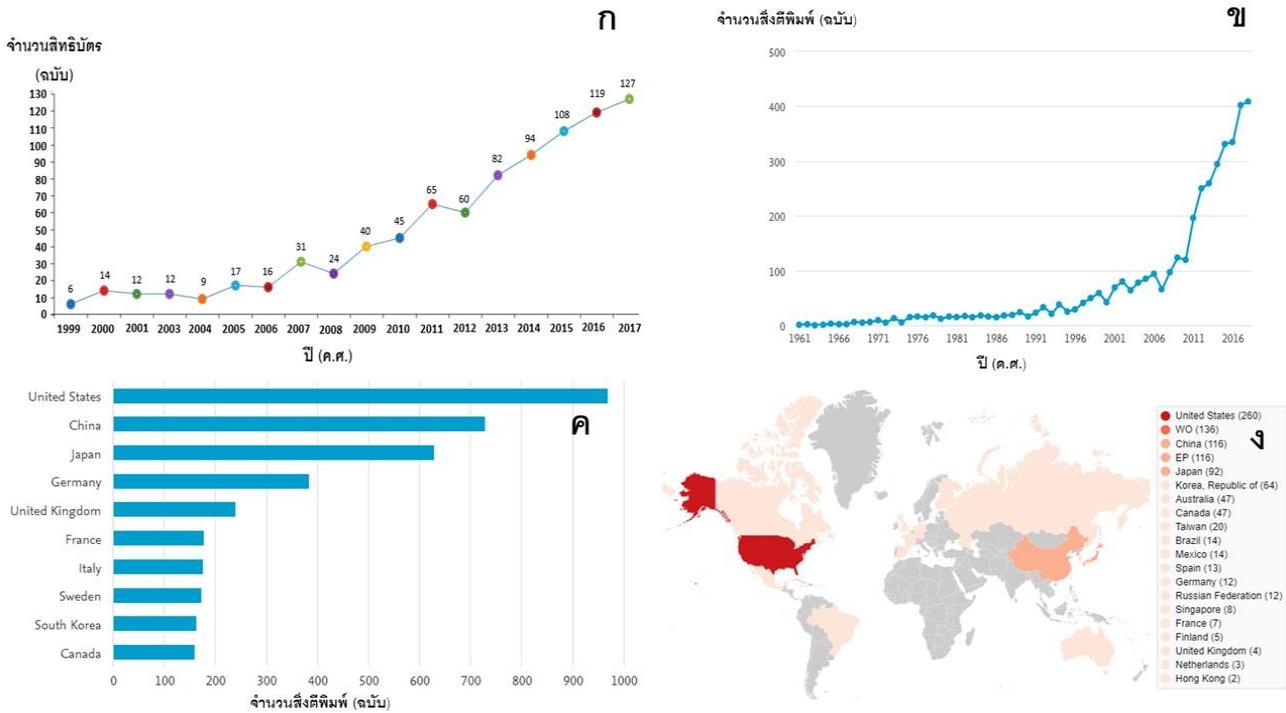


### 3.11 เทคโนโลยีแห่งอนาคตสำหรับการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารเคมีและวัสดุที่มีประโยชน์

นอกจากเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีการพัฒนากันมานานและค่อนข้างมีความพร้อมสูงที่จะนำไปใช้จริง (ระดับความพร้อมทางเทคโนโลยีตั้งแต่ TRL 5 ขึ้นไป) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทก่อนหน้า ยังมีอีกเทคโนโลยีที่เพิ่งถูกพัฒนาเมื่อไม่นานมานี้ ซึ่งแม้จะมี TRL ต่ำกว่า แต่ได้รับความสนใจจากประชาคมวิจัยในระดับโลกเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีศักยภาพสูงที่จะเป็นเทคโนโลยีแบบพึ่งพาตัวเองได้ (Sustainable technology) เพราะใช้พลังงานต่ำกว่าเทคโนโลยีแบบดั้งเดิมและสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ ได้แก่

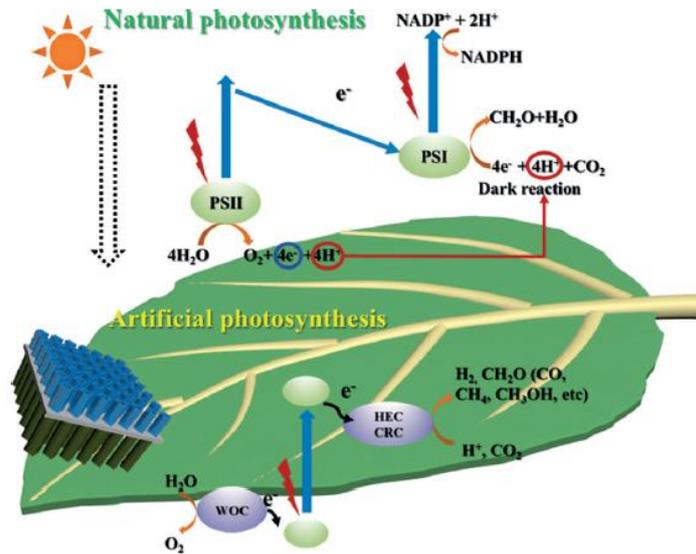
**การสังเคราะห์แสงเทียมเลียนแบบพืช (Artificial Photosynthesis: AP)** เทคโนโลยี AP เป็นเทคโนโลยีแห่งอนาคตที่ถูกพิจารณาว่ามีศักยภาพสูงที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหาสำคัญของโลก ทั้งปัญหาภาวะโลกร้อนที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปัญหาการขาดแคลนพลังงานและสารเคมีจากแหล่งฟอสซิลได้พร้อม ๆ กัน AP เป็นการเลียนแบบกระบวนการการสังเคราะห์แสงตามธรรมชาติ (Natural Photosynthesis: NP) ที่เกิดขึ้นในพืช สาหร่ายและแบคทีเรียบางชนิดที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่อย่างไม่จำกัดไปใช้ในการเปลี่ยนโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นโมเลกุลพลังงานและสารเคมีที่มีประโยชน์ เช่น น้ำตาลและคาร์โบไฮเดรต โดยมีออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ หากมนุษย์สามารถเลียนแบบกระบวนการนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพก็จะสามารถลดก๊าซเรือนกระจกและสร้างโมเลกุลพลังงานไว้ใช้ประโยชน์ได้พร้อมกันอย่างยั่งยืน ดังนั้นในช่วงสิบปีที่ผ่านมาทั่วโลกจึงลงทุนและส่งเสริมงานวิจัยด้านนี้อย่างมาก โดยสังเกตได้จากจำนวนการจดสิทธิบัตร (รูป 3.11.1ก) และการตีพิมพ์ผลงาน (รูป 3.11.1ข) ที่เกี่ยวข้องกับ AP และหลายประเทศยกให้เป็นเทคโนโลยีเปลี่ยนเกม (Game-changing technology) ของโลก ประเทศชั้นนำด้านงานวิจัยทั่วโลกจึงมีการตั้งศูนย์แห่งชาติเพื่อทำงานวิจัยด้านนี้โดยเฉพาะ เช่น ศูนย์ Joint Centre for Artificial Photosynthesis (JCAP) ของสหรัฐอเมริกา Japan Technological Research Association of Artificial Photosynthetic Chemical Process (ARPCChem) และ All Nippon Artificial Photosynthesis Project for Living Earth (AnApple) ประเทศญี่ปุ่น The Korean Centre for Artificial Photosynthesis (KCAP) ประเทศเกาหลีใต้ The Swedish Consortium for Artificial Photosynthesis (CAP) ประเทศสวีเดน Max Planck Institute for Chemical Energy ประเทศเยอรมนี The SolarCAP Consortium for Artificial Photosynthesis (SolarCAP) ของสหราชอาณาจักร SOLAR-CHEM ประเทศอิตาลี และประเทศจีนมี Institute of Artificial Photosynthesis เป็นต้น จึงทำให้ประเทศเหล่านี้ครอบครองทรัพย์สินทางปัญญาและมีความพร้อมในเทคโนโลยีด้านนี้อย่างมาก ในระดับมากกว่าร้อยละ 50 ดังแสดงในรูป 3.11.1ค) ในขณะที่ประเทศไทยยังไม่มีกรณีศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีแห่งอนาคตนี้ อย่างชัดเจน โดยสังเกตได้จากแผนที่แสดงถึงความเข้มข้นของงานวิจัยในด้านนี้ของแต่ละประเทศทั่วโลก (รูป 3.11.1ง)





**รูปที่ 3.11.1** สถิติข้อมูลทรัพย์สินทางปัญญาเมื่อใช้คำค้น “Artificial Photosynthesis” ก) จำนวนสิทธิบัตร (ข้อมูลจาก Clarivate Analytics, Derwent Innovation ช่วงเวลาการค้นหาคำค้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542-2560) ข) จำนวนสิ่งตีพิมพ์ (ข้อมูลจาก Scopus ช่วงเวลาการค้นหาคำค้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2503-2560) ประเทศที่มีผลงานตีพิมพ์สูงสุด (ข้อมูลจาก Scopus ช่วงเวลาการค้นหาคำค้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2503-2560) ง) แผนที่ความเข้มข้นของงานวิจัยด้าน AP ตามพื้นที่ต่าง ๆ ของโลก (ข้อมูลจาก Scopus ช่วงเวลาการค้นหาคำค้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2562)

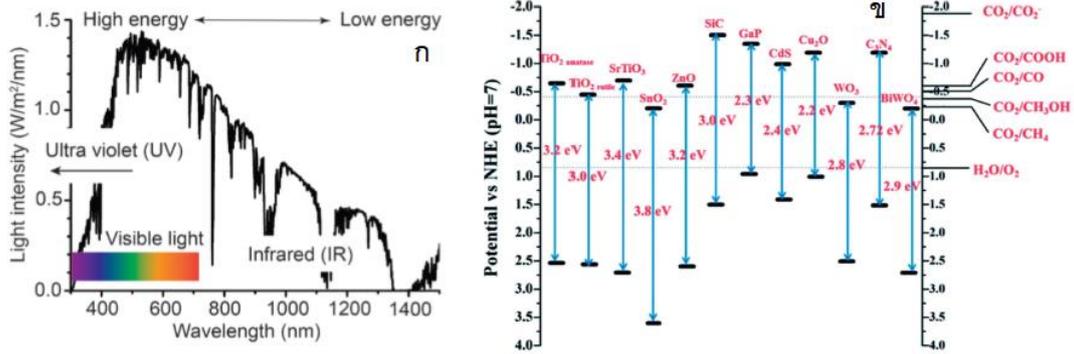
แม้ว่าการสังเคราะห์แสงตามธรรมชาติจะมีข้อดีหลายอย่าง เช่น เกิดขึ้นได้เองและพึ่งพาตัวเองได้ (Self-sustainable) และต้นทุน แต่ก็ถือว่ามีประสิทธิภาพไม่สูงนัก ในแง่ของการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับทั้งหมด (พืชและสาหร่ายส่วนมากมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ไปเป็นโมเลกุลพลังงานได้เพียง 0.5-1% ของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับทั้งหมดเท่านั้น) และโมเลกุลที่ผลิตได้ไม่ใช่โมเลกุลที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูง เช่น คาร์โบไฮเดรตมีความหนาแน่นของพลังงานเท่ากับ 16.7 MJ/kg ในขณะที่แก๊สโซลีนมีความหนาแน่นของพลังงาน 46.4 MJ/kg และ ไฮโดรเจน 120-142 MJ/kg เป็นต้น อีกทั้งยังต้องใช้พื้นที่ในการจัดเก็บมาก ฉะนั้นจึงใช้ประโยชน์ได้ไม่มากนัก นอกจากนี้มีวิธีการเปลี่ยนแสงอาทิตย์เป็นโมเลกุลพลังงานโดยวิธีอื่นอีก (ไม่นับ Photovoltaic cells ซึ่งเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งไม่ใช่โมเลกุลเคมี) ได้แก่ วิธีการสังเคราะห์แสงเทียม (Artificial Photosynthesis: AP) ซึ่งมีรายงานว่าอาจมีประสิทธิภาพถึง 18-20% และในทางทฤษฎีอาจถึง 40% [1-3] ทั้ง AP และ NP ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญที่คล้ายกัน 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) ขั้นตอนการเก็บเกี่ยวแสง (Light harvesting) 2) ขั้นตอนการแยกประจุ (Charge separation) 3) ขั้นตอนการแยกน้ำ (Water splitting) และ 4) การสังเคราะห์โมเลกุลเคมี/เชื้อเพลิง (Chemical/fuel production) [4] โดยตัวที่ทำหน้าที่ในแต่ละขั้นตอนของ NP และ AP จะแตกต่างกันออกไป เช่น ในขั้นตอนการเก็บเกี่ยวแสงใน NP จะใช้คลอโรฟิลล์หรือแคโรทีน ส่วนใน AP จะใช้วัสดุกึ่งตัวนำในขั้นตอนการแยกประจุ ใน NP นั้นคลอโรฟิลล์จะถ่ายเทอิเล็กตรอน (e<sup>-</sup>) ไปให้ตัวรับแสงอีกตัวหนึ่ง (Photosystem I, SPI) ทำให้เกิดการแยกประจุลบและบวกซึ่งเกิดจากโฮล (Hole, h<sup>+</sup>) ส่วนใน AP จะมีการใช้ตัวรับอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งซึ่งอาจเป็นสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่ง หรือโมเลกุลเคมีอื่น ๆ เป็นต้น รูปที่ 3.11.2 เป็นแผนภาพเปรียบเทียบกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นใน NP และ AP โดยสังเขป [5]



รูปที่ 3.11.2 แผนภาพเปรียบเทียบกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นใน NP และ AP  
ที่มา: Zhou และคณะ (2016) [5]

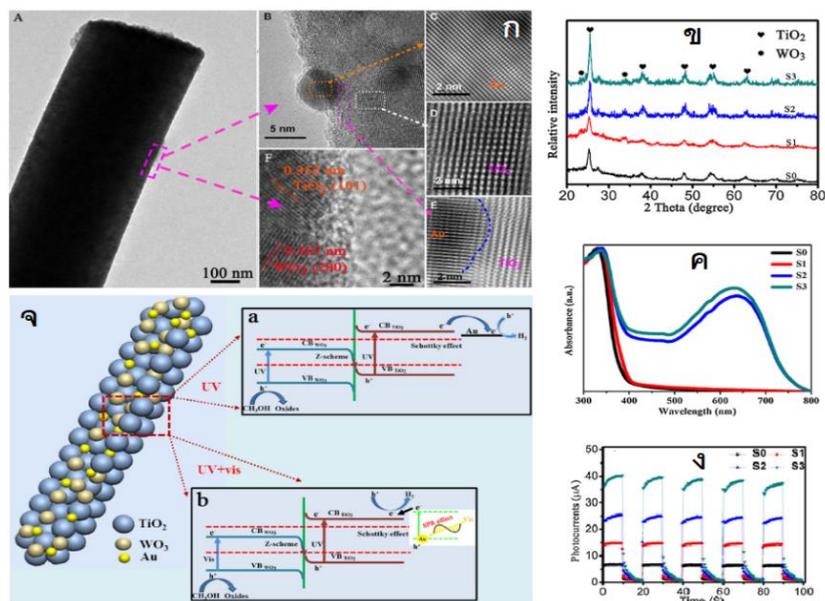
AP เป็นงานวิจัยขั้นแนวหน้า (Frontier research) การพัฒนาองค์ความรู้และเพิ่มประสิทธิภาพของ AP ต้องอาศัยความก้าวหน้าล่าสุดทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพ นาโนเทคโนโลยี หรือบูรณาการองค์ความรู้ทั้งสองอย่างร่วมกัน

การสังเคราะห์แสงเทียมเลียนแบบพืชโดยอาศัยนาโนเทคโนโลยี เป็นการพัฒนา AP โดยอาศัยความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยี เพื่อออกแบบโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductors) ทั้งประเภทอินทรีย์และอนินทรีย์ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง (Photocatalysts) สำหรับปฏิกิริยา AP การพัฒนา AP ในแขนงนี้มีข้อดีเหนือกว่าการพัฒนา AP โดยอาศัยเทคโนโลยีชีวภาพหลายประการ เช่น มีประสิทธิภาพสูงกว่ามาก (มีรายงานประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฮโดรเจนสูงถึง 24% [6]) มีการใช้โฟตอนไปในปฏิกิริยาที่ต้องการโดยตรงไม่สูญเสียไปในรูปแบบอื่นอย่างที่เกิดขึ้นในเทคโนโลยีชีวภาพ ดังกล่าวข้างต้น มีความทนทานต่อสภาวะการเกิดปฏิกิริยามากกว่าและสามารถผลิตโมเลกุลพลังงานที่ซับซ้อนกว่าได้ เป็นต้น หลักการพัฒนา AP โดยอาศัยนาโนเทคโนโลยีนั้นก็เหมือนกับการพัฒนา AP แขนงอื่น ๆ คือ พยายามปรับปรุงประสิทธิภาพของขั้นตอนหลักของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ได้แก่ การดูดกลืนแสง การแยกประจุ การแยกน้ำ และการสังเคราะห์โมเลกุลเชื้อเพลิง สำหรับขั้นตอนการดูดกลืนแสงจะต้องคำนึงถึงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์เป็นหลัก (รูป 3.11.3ก) โดยจะต้องเลือกสารกึ่งตัวนำที่ความเหมาะสม (Match) กับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ โดยทั่วไปแล้วควรใช้สารกึ่งตัวนำที่สามารถดูดซับสเปกตรัมแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดเพื่อที่จะสามารถเก็บเกี่ยวโฟตอนจำนวนมากที่สุด ซึ่งสมบัติการดูดซับแสงนี้จะแปรผกผันกับความกว้างของแถบพลังงาน (Band gap) ของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือ ถ้าสารกึ่งตัวนำมีความกว้างของแถบพลังงานน้อยจะสามารถดูดกลืนสเปกตรัมแสงอาทิตย์ได้กว้างกว่าสารกึ่งตัวนำมีความกว้างของแถบมาก เช่น CdS มีความกว้างของแถบพลังงานเท่ากับ 2.4 eV จะสามารถดูดกลืนแสงได้กว้างกว่า SrTiO<sub>3</sub> ซึ่งมีความกว้างของแถบพลังงานเท่ากับ 3.4 eV (ดูรูป 3.11.3ข ประกอบ) ปัจจุบันยังมีข้อจำกัดและความท้าทายสูงในการเลือกสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสม กล่าวคือ ถ้าสารกึ่งตัวนำมีความกว้างของแถบพลังงานน้อย (สามารถดูดซับแสงได้ในช่วงกว้าง) เช่น CdS (2.4 eV) Cu<sub>2</sub>O (2.2 eV) มักจะไม่เสถียรและเกิดการสลายตัวหรือเปลี่ยนวิฤภาคอย่างรวดเร็ว ในขณะที่สารกึ่งตัวนำที่มีความเสถียรสูง เช่น TiO<sub>2</sub>, SrTiO<sub>3</sub>, SnO<sub>2</sub> สามารถดูดกลืนแสงได้เฉพาะในช่วง UV ซึ่งคิดเป็นเพียง < 5% ของสเปกตรัมแสงอาทิตย์เท่านั้น นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงศักย์เคมีของแถบพลังงาน (Band position) ด้วย เช่น WO<sub>3</sub> ซึ่งมีศักย์เคมีของแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band: CB) อยู่ที่ประมาณ -0.4 V vs NHE ซึ่งทำให้ไม่สามารถรีดิวซ์หรือเปลี่ยน CO<sub>2</sub> ไปเป็น COOH ได้ ในขณะที่ C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ซึ่งมีศักย์เคมี CB อยู่ที่ประมาณ -1.2 V vs NHE สามารถรีดิวซ์ CO<sub>2</sub> ไปเป็น COOH ได้ (ดูรูป 3.11.3ข ประกอบ ด้านขวามือแสดงศักย์ไฟฟ้าเคมีของปฏิกิริยาตัวอย่าง)



**รูปที่ 3.11.3** ก) สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ข) ความกว้างและตำแหน่งของแถบนำและแถบวาเลนซ์ของตัวอย่างสารกึ่งตัวนำต่าง ๆ ที่มีสมบัติเป็นตัวกระตุ้นเชิงแสง  
ที่มา: Roy และคณะ (2019) [7]

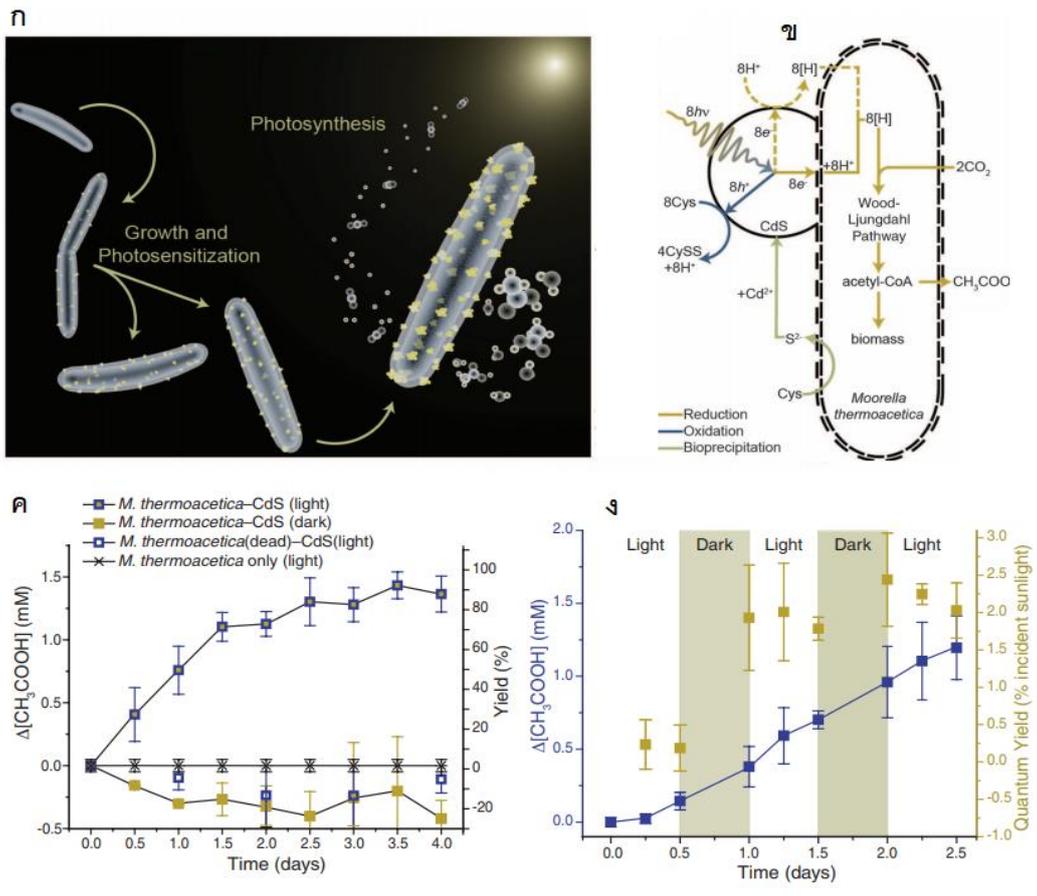
ในปัจจุบันยังไม่มีสารกึ่งตัวนำชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียวที่สามารถทำปฏิกิริยา AP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความทนทานมากพอ หรือมีราคาถูกคุ้มค่ากับการลงทุน นักวิทยาศาสตร์จึงพยายามสร้างสารประกอบนาโนคอมโพสิตของสารกึ่งตัวนำมากกว่าหนึ่งชนิด เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับแสงดีและเหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น Gao และคณะ [8] รายงานว่าสารประกอบคอมโพสิตของ TiO<sub>2</sub> และ WO<sub>3</sub> ซึ่งมีอนุภาคของทองคำ Au แทรกอยู่ระหว่างชั้น (ดังแสดงในรูป 3.11.4ก และ 3.11.4ข) จะทำให้สารประกอบมีการดูดซับแสงในช่วงกว้างขึ้น (รูป 3.11.4ค) ส่งผลให้สารประกอบมีกระแสไฟฟ้าอันเกิดจากแสงเพิ่มมากขึ้น และมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำเนิดก๊าซไฮโดรเจนโดยการแยกน้ำได้ดีขึ้น (รูป 3.11.4ง) ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบคอมโพสิตมีการดูดซับโฟตอนได้ในปริมาณมากกว่าเดิมและการถ่ายเทประจุระหว่าง TiO<sub>2</sub> และ WO<sub>3</sub> เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านอนุภาคทองคำ Au ซึ่งทำหน้าที่เหมือนสะพานขนส่งประจุ (Charge transfer bridge) ระหว่างวัสดุทั้งสอง



**รูปที่ 3.11.4** การทำงานของระบบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สารกึ่งตัวนำมากกว่าหนึ่งชนิด (TiO<sub>2</sub>+WO<sub>3</sub>)  
ที่มา: Gao และคณะ (2017) [8]

การสังเคราะห์แสงเทียมเลียนแบบพืชโดยอาศัยการบูรณาการนาโนเทคโนโลยีและเทคโนโลยีชีวภาพ แนวคิดเรื่องการบูรณาการเทคโนโลยีชีวภาพและนาโนเทคโนโลยีเข้าด้วยกัน เพื่อทำปฏิกิริยา AP เพิ่งเกิดขึ้นและถูกทำให้เป็นจริงเมื่อไม่กี่ปีมานี้ (เริ่มมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558) โดยการนำของศาสตราจารย์ Peidong Yang แห่งมหาวิทยาลัย California Berkeley ได้ลองใช้แบคทีเรีย *Moorella thermoacetica* ซึ่งไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้มาทำการเติมตัวดูดซับแสง (Photosensitizer) ในกรณีนี้ใช้อนุภาคนาโนของ CdS ไปติดกับผนังของแบคทีเรียดังกล่าว (ดูรูป 3.11.5ก ประกอบ) [9] ปรากฏว่าแบคทีเรียดังกล่าวสามารถดูดซับแสงและสังเคราะห์แสงเองได้ กลไกการทำงานอธิบายได้ดังรูป 3.11.5ข โดย CdS ทำหน้าที่เป็นตัวรับโฟตอนและถ่ายเทอิเล็กตรอนไปให้ตัวแบคทีเรีย *Thermoacetica* และการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นภายในตัวแบคทีเรียเอง โดยพบว่าระบบนี้สามารถเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ได้ในปริมาณมากพอสมควรภายในระยะเวลาไม่กี่วัน ทั้งในช่วงที่รับแสงและไม่ได้รับแสง (ดูรูป 3.11.5ค-ง ประกอบ) นับเป็นความก้าวหน้าที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าแบคทีเรียดังกล่าวสามารถแบ่งตัวเพื่อเพิ่มปริมาณและซ่อมแซมตัวเอง อีกทั้งยังสามารถตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีอีกด้วย นอกจากนี้กลุ่มวิจัยนี้ยังได้รายงานระบบตัวเร่งปฏิกิริยาลูกผสม (Hybrid) ของเทคโนโลยีชีวภาพและนาโนเทคโนโลยีอีกหลายระบบที่น่าสนใจ อาทิเช่น ระบบที่ประกอบด้วย  $\text{TiO}_2/\text{CdS}$  nanoparticles-*Moorella thermoacetica*/  $\text{Mn(II)}$  Phthalocyanine [10,11] ซึ่งสามารถผลิตกรดฟอร์มิกจากคาร์บอนไดออกไซด์ได้เหมือนกัน

อย่างไรก็ตามแม้เทคโนโลยี AP จะแสดงผลที่น่าประทับใจในห้องปฏิบัติการ แต่ในขณะนี้ยังมีอัตราการเกิดปฏิกิริยายังไม่สูงและขนาดไม่พอที่จะประยุกต์ในระดับมหภาคคาดว่าเทคโนโลยีแห่งอนาคตนี้จำเป็นต้องใช้เวลาในการศึกษาค้นคว้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพอีก



**รูปที่ 3.11.5** ก) ขั้นตอนการแบ่งตัว-เติบโตและการแทรก CdS nanoparticles ลงไปใน *Moorella thermoacetica* เพื่อนำไปใช้ในปฏิกิริยา AP ข) กลไกการทำงานของระบบ CdS nanoparticles-*Moorella thermoacetica* ค-ง) ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา AP ของตัวเร่งปฏิกิริยา CdS nanoparticles-*Moorella thermoacetica*

ที่มา: Sakimoto และคณะ (2016) [9]

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Licht, B. Wang, S. Mukerji, T. Soga, M. Umeno, H. Tributsch, Over 18% solar energy conversion to generation of hydrogen fuel; theory and experiment for efficient solar water splitting, *International Journal of Hydrogen Energy* 26, 2001, 653-659.
- [2] F.F. Abdi, L. Han, A.H. Smets, M. Zeman, B. Dam, R. Van De Krol, Efficient solar water splitting by enhanced charge separation in a bismuth vanadate-silicon tandem photoelectrode, *Nature Communications* 4, 2013, 2195.
- [3] C. Liu, B.C. Colón, M. Ziesack, P.A. Silver, D.G. Nocera, Water splitting–biosynthetic system with CO<sub>2</sub> reduction efficiencies exceeding photosynthesis, *Science* 352, 2016, 1210-1213.
- [4] R.J. Cogdell, T.H. Brotsudarmo, A.T. Gardiner, P.M. Sanchez, L. Cronin, Artificial photosynthesis–solar fuels: current status and future prospects, *Biofuels* 1, 2010, 861-876.
- [5] H. Zhou, R. Yan, D. Zhang, T. Fan, Challenges and perspectives in designing artificial photosynthetic systems, *Chemistry–A European Journal* 22, 2016, 9870-9885.
- [6] A. Nakamura, Y. Ota, K. Koike, Y. Hidaka, K. Nishioka, M. Sugiyama, K. Fujii, A 24.4% solar to hydrogen energy conversion efficiency by combining concentrator photovoltaic modules and electrochemical cells, *Applied Physics Express* 8, 2015, 107101.
- [7] N. Roy, N. Suzuki, C. Terashima, A. Fujishima, Recent Improvements in the Production of Solar Fuels: From CO<sub>2</sub> Reduction to Water Splitting and Artificial Photosynthesis, *Bulletin of the Chemical Society of Japan* 92, 2019, 178-192.
- [8] H. Gao, P. Zhang, J. Zhao, Y. Zhang, J. Hu, G. Shao, Plasmon enhancement on photocatalytic hydrogen production over the Z-scheme photosynthetic heterojunction system, *Applied Catalysis B: Environmental* 210, 2017, 297-305.
- [9] K.K. Sakimoto, A.B. Wong, P. Yang, Self-photosensitization of nonphotosynthetic bacteria for Solar-to-chemical production, *Science* 351, 2016, 74-77.
- [10] K.K. Sakimoto, S.J. Zhang, P. Yang, Cysteine–cystine photoregeneration for oxygenic photosynthesis of acetic acid from CO<sub>2</sub> by a tandem inorganic–biological hybrid system, *Nano Letters* 16, 2016, 5883-5887.
- [11] K.K. Sakimoto, N. Kornienko, P. Yang, Cyborgian material design for solar fuel production: The emerging photosynthetic biohybrid systems, *Accounts of Chemical Research* 50, 2017, 476-481.

# 4 นโยบายและมาตรการสำหรับส่งเสริมและผลักดันเทคโนโลยี การใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน



จากความตระหนักถึงปัญหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศอย่างต่อเนื่องในช่วง 10 กว่าปีที่ผ่านมา ภาครัฐได้ดำเนินการเชิงนโยบายและจัดเตรียมมาตรการเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างยั่งยืนมาอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น ในปี พ.ศ. 2550 ได้มีพระราชกฤษฎีกาจัดตั้งองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) โดยกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อดำเนินการที่เกี่ยวกับการลดการปลดปล่อย การกักเก็บ หรือการดูดซับก๊าซเรือนกระจก เพื่อสนับสนุนการขับเคลื่อนการลดก๊าซเรือนกระจกเพื่อให้ประเทศไทยมุ่งสู่เศรษฐกิจสังคมคาร์บอนต่ำ [1] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จัดทำแผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2558-2593 (Climate Change Master Plan 2015–2050: CCMP) [2] ซึ่งสอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580) ว่าด้วยการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (รูปที่ 4.1) [3] และเพื่อปรับกระบวนการทัศน์และทิศทางการพัฒนาประเทศอย่างบูรณาการ สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ สำนักนายกรัฐมนตรี ได้จัดทำแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (2560–2564) [4] เตรียมพร้อมสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Low-carbon society) ซึ่งสอดคล้องเป็นอย่างดีกับแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (2554-2573) [5] ที่กระทรวงพลังงานได้กำหนดเพื่อลดความเข้มข้นการใช้พลังงาน (Energy intensity) ลงร้อยละ 25 ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ เป็นต้น



รูปที่ 4.1 การสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561–2580

อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ บรรลุวัตถุประสงค์การพัฒนาอย่างยั่งยืนและมุ่งสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำภายในปี พ.ศ. 2573 ตามที่ประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจก (คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) ไว้ที่ร้อยละ 20–25 [6–8] กล่าวคือ ลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าลงจาก 555 ล้านตัน เหลือ 416–444 ล้านตัน คณะทำงานฯ มีข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย มาตรการสำหรับภาครัฐ แนวทางดำเนินการและผลที่คาดว่าจะได้รับในการส่งเสริมและผลักดันเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน ดังนี้



## 4.1 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

เพื่อส่งเสริม สนับสนุนและผลักดันการพัฒนาอย่างยั่งยืนและมุ่งสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำ และการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน ทุกภาคส่วนจำเป็นต้องสนับสนุนการดำเนินการด้านสภาพภูมิอากาศ ดังต่อไปนี้

- (1) นำระบบการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data Analysis) มาใช้บริหารจัดการคลังข้อมูลขนาดใหญ่ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีรูปแบบที่หลากหลาย และติดตามการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละขั้นตอนของห่วงโซ่มูลค่า และรองรับองค์ความรู้และเทคโนโลยี เพื่อมุ่งสู่สังคมคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน
- (2) พัฒนาการศึกษ การสร้างความตระหนักรู้ และยกระดับขีดความสามารถรายบุคคลและหน่วยงานในเรื่องการลดผลกระทบจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเตือนภัยล่วงหน้า เพื่อสร้างความพร้อมในการดำเนินมาตรการตามนโยบายและแผนด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ
- (3) ผลักดันให้เกิดการบูรณาการแนวทางและมาตรการการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืนและเป็นรูปธรรมในนโยบายยุทธศาสตร์ และการวางแผนระดับชาติ
- (4) ส่งเสริม สนับสนุน และผลักดันการพัฒนาอย่างยั่งยืนเพื่อให้เกิดการลดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในทุกภาคส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ภาคอุตสาหกรรมการผลิตและการขนส่งภายในประเทศ และสร้างกลไกให้เกิดการเติบโตขององค์กรคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน อาทิเช่น เครือข่าย Carbon Markets และเครือข่ายคาร์บอนนิวทรัลประเทศไทย (Thailand Carbon Neutral Network: TCNN) เป็นต้น



## 4.2 มาตรการสำหรับภาครัฐในการส่งเสริมและผลักดันเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์คาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน

สำหรับนโยบายและมาตรการสำหรับภาครัฐในการส่งเสริมและผลักดันให้เกิดการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสนับสนุนให้เกิดเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเป็นรูปธรรมเพื่อมุ่งสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำ โดยมีแผนการส่งเสริมและผลักดันการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน ดังนี้

### (1) เป้าหมายระยะสั้น

- 1.1 สร้างเครือข่ายการวิจัยและพัฒนาด้านการลดและการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน
- 1.2 พัฒนาระบบ Big Data เพื่อติดตามข้อมูลการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละขั้นตอนของห่วงโซ่มูลค่าอย่างครบวงจรตามวัฏจักรชีวิตในภาพรวมและรายสาขา ครอบคลุมสาขาอุตสาหกรรมพลังงาน คมนาคมขนส่ง และสาขาอื่น ๆ ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศในปริมาณสูง และรองรับองค์ความรู้และเทคโนโลยีเพื่อมุ่งสู่สังคมคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน
- 1.3 จัดทำเป้าหมายและ Roadmap การลดและการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศในระยะกลางและระยะยาว โดยเริ่มจากกลุ่มอุตสาหกรรมที่มีความพร้อม และกลุ่มอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศในปริมาณสูง
- 1.4 สร้างกลไกแบบผสมผสานทั้งเชิงเศรษฐศาสตร์และกฎหมาย เพื่อสร้างแรงจูงใจควบคู่กับการผลักดันให้เกิดการลดและการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน
- 1.5 จัดเตรียมแผนยุทธศาสตร์ระดับประเทศเพื่อการศึกษาวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยี รองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การลดและการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเน้นการพัฒนาบุคลากรรองรับการดำเนินงาน สนับสนุนกลไกการลงทุนและการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดและปล่อยคาร์บอนต่ำ
- 1.6 จัดตั้งกลไกภายในประเทศเพื่อรองรับการสนับสนุนด้านการเงิน เทคโนโลยีและการเสริมสร้างศักยภาพจากต่างประเทศ

### (2) เป้าหมายระยะกลาง

- 2.1 ผลักดันให้เกิดการปรับตัวเพื่อรองรับมาตรการการปรับคาร์บอนก่อนเข้าพรมแดน (Carbon Border Adjustment Mechanism: CBAM) ตอบรับแผนของ European Union (EU) [9] โดยมีกลุ่มเป้าหมายหลัก คือ กลุ่มอุตสาหกรรมส่งออกที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูง
- 2.2 สนับสนุนการลงทุนในเทคโนโลยีสีเขียวเพิ่มขึ้น รวมถึงนโยบายการเก็บภาษีคาร์บอน และการจัดทำรอยเท้าคาร์บอน (Carbon Footprint) ในองค์กร
- 2.3 ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศลดลงร้อยละ 20–25 ในภาคอุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมการผลิต คมนาคมขนส่ง และกลุ่มอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศในปริมาณสูง
- 2.4 ส่งเสริม สนับสนุนและผลักดันให้เกิดการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดเพื่อมุ่งสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำเพิ่มมากขึ้นร้อยละ 10 โดยเน้นที่กลุ่มอุตสาหกรรมที่มีความพร้อม และกลุ่มอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศในปริมาณสูง เพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้นทาง

### (3) เป้าหมายระยะยาวและเป้าหมายต่อเนื่อง

- 3.1 ลดค่าความเข้มของการใช้พลังงาน (Energy intensity) ลงอย่างน้อยร้อยละ 20–25 เมื่อเทียบกับกรณีปกติ (Business-as-usual: BAU) (ปีเป้าหมาย พ.ศ. 2573)
- 3.2 ลดสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) ต่อมูลค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมของอุตสาหกรรมพลังงาน และสาขาอื่น ๆ ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศในปริมาณสูง ลงอย่างน้อยร้อยละ 20–25 (ปีเป้าหมาย พ.ศ. 2573)
- 3.3 ลดสัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า จากการคมนาคมขนส่งทางบก อย่างน้อยร้อยละ 20–25 (ปีเป้าหมาย พ.ศ. 2573)

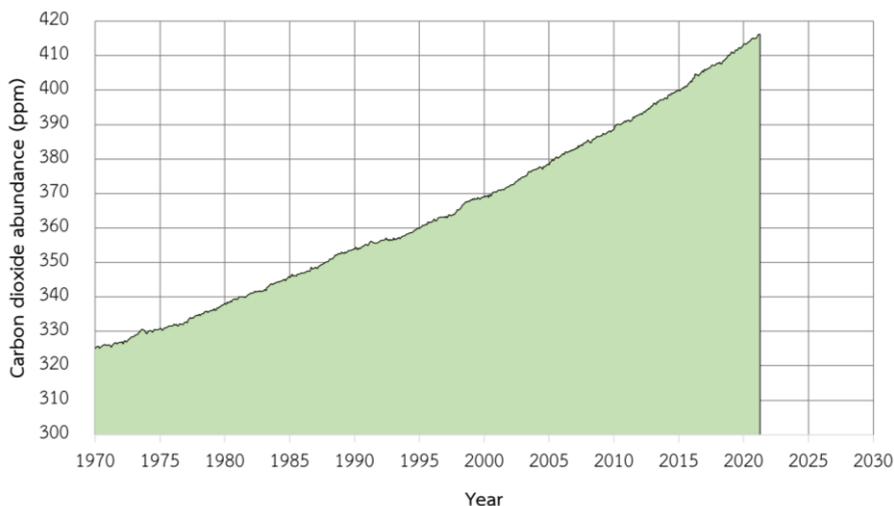
### 4.3 แนวทางดำเนินการและผลที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อให้โดยภาพรวมของประเทศสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้บรรลุตามวัตถุประสงค์การพัฒนาอย่างยั่งยืน และมุ่งสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำภายในปี พ.ศ. 2573 [6-7] กล่าวคือ สามารถลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าลงจาก 555 ล้านตัน เหลือ 416–444 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 20–25 แนวทางดำเนินการเพื่อส่งเสริมและผลักดันให้เกิดการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสนับสนุนเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อมุ่งสู่สังคมคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Society) อย่างจริงจัง และผลที่คาดว่าจะได้รับมีดังนี้

#### (1) สถานการณ์ก๊าซเรือนกระจกบนฐานของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากการที่ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง 50 กว่าปีที่ผ่านมา (เพิ่มจาก 324 ppm ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2512 เป็น 416 ppm ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2564) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 [10] นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศทั่วโลก ทำให้ชั้นบรรยากาศโลกกักเก็บความร้อนไว้มากขึ้นจนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกจากปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) โดยพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นประมาณ 0.6–1 องศาเซลเซียส ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2393 จนถึงปี พ.ศ. 2553 [11] จากการดังกล่าวคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (International Panel on Climate Change, IPCC) ได้คาดการณ์ว่าภายในปี พ.ศ. 2643 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศจะเพิ่มขึ้นถึง 570 ppm [12] ภายใต้ต้นนโยบายและแนวปฏิบัติในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทั่วโลกใช้อยู่ในปัจจุบัน โลกจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 2.8-3.2 องศาเซลเซียส [13] อย่างไรก็ตาม หากทุกประเทศร่วมมือกันอย่างจริงจังในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้สามารถลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ บรรลุวัตถุประสงค์การพัฒนาอย่างยั่งยืนและมุ่งสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำภายในปี พ.ศ. 2573 ได้ จะสามารถลดอุณหภูมิที่จะเพิ่มขึ้นได้ลงเหลือ 2.5-2.8 องศาเซลเซียส เพื่อให้สามารถลดความเสี่ยงและผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับประเทศไทย พบว่าช่วงปี พ.ศ. 2555–2562 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มสูงขึ้นกว่าช่วงปีก่อนหน้าอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเดือนเมษายน พ.ศ. 2559 ประเทศไทยมีอุณหภูมิสูงที่สุดเป็นประวัติการณ์ คือ 44.6 องศาเซลเซียส โดยวัดได้ที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน และพบว่าในช่วง 2554–2562 อุณหภูมิสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.09 องศาเซลเซียสต่อปี โดยมีแนวโน้มที่เห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2494 ถึงปี พ.ศ. 2562 [14]



รูปที่ 4.2 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศโลก

ที่มา: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide> [10]

(2) การมีส่วนร่วมในการจัดการปัญหาก๊าซเรือนกระจกบนฐานของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์: CO<sub>2</sub> Pain point to gain point ว่าด้วย “ความตกลงปารีส (COP21)”

ดังที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 1 เรื่องความตกลงปารีส (Paris Agreement) ซึ่งเป็นความตกลงตามกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติ ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (UNFCCC) เพื่อกำหนดกติการะหว่างประเทศที่มีความมุ่งมั่นมากยิ่งขึ้น ในลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเริ่มตั้งแต่ พ.ศ. 2563 ซึ่งได้กำหนดการมีส่วนร่วมของภาคีสมาชิกในการแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศระดับโลกในบริบทของการพัฒนาที่ยั่งยืน ควบคู่ไปกับความพยายามในการขจัดความยากจน และการดำเนินงานเพื่อควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกให้ต่ำกว่า 2 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับยุคก่อนอุตสาหกรรม เพื่อให้สามารถลดความเสี่ยงและผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ และยังรวมถึงการเพิ่มขีดความสามารถในการปรับตัวต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และสร้างกองทุนหมุนเวียนเพื่อสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีที่ตอบโจทย์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณต่ำอีกด้วย

จากการดังกล่าว เพื่อให้สามารถช่วยแก้ปัญหาก๊าซเรือนกระจกบนฐานของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีนัยสำคัญ การนำเทคโนโลยีขั้นสูงซึ่งนอกจากจะช่วยดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว ยังสามารถนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์ เพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งผลิต ควบคู่กับการนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบรอบสอง (Secondary raw material) จึงเป็นประเด็นสำคัญที่จำเป็นและเร่งด่วน เพื่อลดการใช้วัตถุดิบและในขณะเดียวกันยังสามารถสร้างเสถียรภาพให้กับวัตถุดิบโดยการใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน และสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจในเชิงห่วงโซ่คุณค่าใหม่ (New value chains) ตอบโจทย์การหมุนเวียนใช้ทรัพยากรธรรมชาติในห่วงโซ่คุณค่า (Value Chain) ตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ได้เป็นอย่างดี กลไกและมาตรการสำหรับภาครัฐในการส่งเสริมและผลักดันเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืนสามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3

กลไกและมาตรการเพื่อส่งเสริมและผลักดันเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ CO<sub>2</sub> อย่างยั่งยืน

- แผนอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2558-2579
- แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579
- แผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2558-2593
- นโยบายและแผนการส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2560-2569
- แผนขับเคลื่อนการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน พ.ศ. 2560-2579



รูปที่ 4.3 กลไกและมาตรการสำหรับภาครัฐในการส่งเสริมและผลักดันเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืน



(3) การใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืนเพื่อการพึ่งพาตนเองและหลุดพ้นจากกับดักรายได้ปานกลาง—*Border Adjustment Carbon & and International Trade*

เพื่อสนับสนุนและส่งเสริมให้เกิดการปรับตัวเพื่อรองรับมาตรการการปรับคาร์บอนก่อนเข้าพรมแดน (CBAM) ตอบรับแผนของ European Union (EU) การนำเทคโนโลยีการผลิตสารเคมีมูลค่าเพิ่มโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัตถุดิบทดแทน สร้างห่วงโซ่คุณค่าใหม่ตอบโจทย์การหมุนเวียนใช้ทรัพยากรธรรมชาติตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียนมาประยุกต์ใช้ นอกจากนี้จะช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แหล่งกำเนิดแล้ว ยังสามารถแก้ปัญหาการลดลงของทรัพยากร (Resource depletion) ได้อีกด้วย เทคโนโลยีการผลิตสารมูลค่าเพิ่มจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีศักยภาพดังกล่าว ได้แก่

- การผลิตเมทานอลจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- การผลิตโอเลฟินส์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- การผลิตกรดฟอร์มิกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- การผลิตปุ๋ยยูเรียจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย
- การผลิตโพลีเอทิลีนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- การผลิตคาร์บอนเนตจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- เทคโนโลยีการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นวัสดุฐานคาร์บอน
- การผลิตก๊าซสังเคราะห์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน และ
- การพัฒนาการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรม

ร่วมกับการผลิตไฮโดรเจนสีเขียวจากการอิเล็กโทรไลซิสของน้ำผ่านเซลล์อิเล็กโทรไลซิส และเทคโนโลยีแห่งอนาคตสำหรับการแปรรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารเคมีและวัสดุที่มีประโยชน์ เป็นต้น



## เอกสารอ้างอิง

- [1] “องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)”, <http://www.tgo.or.th/2020/> (วันที่เข้าถึง: 28 พฤษภาคม 2021).
- [2] แผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2558–2593 โดยสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ปี พ.ศ. 2558, จำนวน 123 หน้า.
- [3] แผนยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561–2580) ว่าด้วยการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยสำนักงานเลขาธิการของคณะกรรมการยุทธศาสตร์ชาติ สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, ปี พ.ศ. 2561, จำนวน 22 หน้า.
- [4] แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (2560–2564) โดยสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ สำนักนายกรัฐมนตรี, ปี พ.ศ. 2559, จำนวน 244 หน้า.
- [5] แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (2554–2573) โดยกระทรวงพลังงาน, ปี พ.ศ. 2554, จำนวน 94 หน้า.
- [6] แผนยุทธศาสตร์องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) พ.ศ. 2561-2565 โดยสำนักยุทธศาสตร์ องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), ปี พ.ศ. 2561, จำนวน 40 หน้า.
- [7] แผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ปี พ.ศ. 2564–2573 โดยสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ปี พ.ศ. 2562, จำนวน 96 หน้า.
- [8] “29 องค์การตั้งเป้าลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาพรวมของประเทศ ร้อยละ 20–25 ภายในปี 2573”, ที่มา: <https://www.fti.or.th/> ข่าว ส.อ.ท. ประจำวันที่ 01/04/2021, สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย, 2021 (วันที่เข้าถึง: 28 พฤษภาคม 2021).
- [9] “Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)”, CPMU News, Custom policy monitoring unit, ปีที่ 5 ฉบับที่ 11 ประจำเดือนพฤศจิกายน 2563, สำนักงานที่ปรึกษาการศุลกากร ณ กรุงบรัสเซลส์, จำนวน 26 หน้า.
- [10] “Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide”, <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide> (accessed date: May 28, 2021).
- [11] C. Stewart and M. Hessami, Energy Conversion and Management 46, 2005, 403–420.
- [12] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151.
- [13] “CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions”, <https://ourworldindata.org/CO2-and-other-greenhouse-gas-emissions> (accessed date: May 28, 2021).
- [14] Thailand’s Third Biennial Update Report (BUR) จัดทำโดย สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2563, จำนวน 136 หน้า.

# 5 บทสรุป



ปัญหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศอย่างต่อเนื่องในช่วง 10 กว่าปีที่ผ่านมา สร้างความตระหนักให้กับภาครัฐและภาคเอกชนในวงกว้าง ภาครัฐได้ดำเนินการเชิงนโยบายและจัดเตรียมมาตรการเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างยั่งยืนมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อส่งเสริมและผลักดันให้เกิดการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สนับสนุนการขับเคลื่อนการลดก๊าซเรือนกระจกบนฐานของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้ประเทศไทยมุ่งสู่เศรษฐกิจสังคมคาร์บอนต่ำ ภายในปี พ.ศ. 2573 ตามที่ประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจก (คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) ไว้ที่ร้อยละ 20–25 และสนับสนุนเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อมุ่งสู่สังคมคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Society) อย่างจริงจัง

การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งผลิต โดยการประยุกต์เทคโนโลยีขั้นสูงช่วยดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และนำกลับมาใช้ประโยชน์ จึงเป็นหนึ่งในกลไกหลักที่นอกจากจะช่วยแก้ปัญหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังช่วยสร้างเสถียรภาพเชิงวัตถุดิบทดแทนและสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจในเชิงห่วงโซ่คุณค่าใหม่ตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน หากสามารถผลักดันให้กลไกดังกล่าวบังเกิดผลสำเร็จ จะนำไปสู่การใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างยั่งยืนเพื่อการพึ่งพาตนเองและหลุดพ้นจากกับดักรายได้ปานกลาง สนับสนุนและส่งเสริมให้เกิดการปรับตัวเพื่อรองรับมาตรการการปรับคาร์บอนก่อนเข้าพรมแดน (Border Adjustment Carbon and International Trade) ได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ตาม เพื่อมุ่งสู่สังคมคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ นอกจากความร่วมมือของหน่วยงานทุกภาคส่วน อาทิ องค์กรบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงพลังงาน และสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ สำนักงานรัฐมนตรี ในเชิงแผนและนโยบาย ความร่วมมืออย่างจริงจังจากองค์กรธุรกิจขนาดใหญ่ที่เป็นผู้ผลิต หรือมีรายได้จากอุตสาหกรรมหนัก หรือใช้พลังงานฟอสซิล และองค์กรพันธมิตรอื่น ๆ อาทิ เครือข่าย Carbon Markets และเครือข่ายคาร์บอนนิวทรัลประเทศไทย (Thailand Carbon Neutral Network: TCNN) เพื่อผลักดันสู่สังคมคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ เพื่อชดเชยและลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกแล้ว การสร้างจิตสำนึกและความตระหนักให้กับประชาคมทุกระดับ เพื่อก่อให้เกิดพลวัตของการขับเคลื่อนเพื่อมุ่งสู่สังคมคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์อย่างยั่งยืน จึงเป็นเรื่องที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการควบคู่กันไปอย่างจริงจัง

## ปัญหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการปล่อย CO<sub>2</sub>

ออกสู่บรรยากาศ “ไม่ใช่เรื่องไกลตัวอีกต่อไป”

หากประชาคมทุกภาคส่วนยังคงเพิกเฉย ไม่รวมแรงร่วมใจช่วยกัน  
ดำเนินการป้องกันแก้ไขอย่างจริงจัง ก็จะมีผลเสียมหาศาลต่อมนุษยชาติ  
โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อรุ่นลูกหลานของเราอย่างหลีกเลี่ยงมิได้

# คณะผู้จัดทำ

## ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. ชำรงรัตน์ มุ่งเจริญ

นายเกียรติชาย ไมตรีวงษ์

อาจารย์พิเศษ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคณะทำงานบัณฑิตยสภาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ผู้อำนวยการองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)

## คณะผู้จัดทำสมุดปกขาว

ดร. ขจรศักดิ์ เพ็ญนวกิจ

ดร. ปองกานต์ จักรธรรานนท์

ดร. อีระ บุตรบุรี

ดร. บุญรัตน์ รุ่งทิวรัตน์

ดร. ศิรภัสสร เกียรติพิงพร

ดร. ผุศนา หิรัญสิทธิ์

ดร. กนกกร พิมพ์เจริญ

ดร. สราวุฒิ อิ่มเพ็ง

ดร. ศรัณญา จันทราภิรมย์

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ศาสตราจารย์ ดร. เมตตา เจริญพานิช  
(บรรณาธิการ)

รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล คงคาอุยฉาย

รองศาสตราจารย์ ดร. ธงไทย วิฑูรย์

รองศาสตราจารย์ ดร. ชลิตา เนียมนัย

รองศาสตราจารย์ ดร. อนุสรณ์ สืบสาย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วลีพร ดอนไพร  
(ผู้ตรวจพิสูจน์อักษร)

ดร. ธนาภา นุ่มพีไล

นางสาววันทนีย์ คงทัด

(ผู้ช่วยบรรณาธิการ)

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์

รองศาสตราจารย์ ดร. กษิติศ หนูทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพร คิม

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณิน เนื่องโนราช

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฬารัตน์ วัฒนกิจ

สำนักวิทยบริการพลังงาน สถาบันวิทยสิริเมธี



## หน่วยงานร่วมจัดทำ



มูลนิธิบัณฑิตยสภาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (บวท.)



สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.)



หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.)



ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)



ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



Bio-Circular-Green economy Technology & Engineering Center (BCGeTEC)

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



สำนักวิชาวิทยาการพลังงาน สถาบันวิทยสิริเมธี

GREENHOUSE  
EFFECT

VALUE-ADDED  
CHEMICALS   
CARBON NEUTRAL

CIRCULAR  
ECONOMY



GLOBAL WARMING

# CO<sub>2</sub> UTILIZATION

WASTE   
MINIMIZATION



CLEANER   
PRODUCTION



ZERO EMISSION

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS