

เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำ

ในปัจจุบัน การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างมากทั่วโลก เนื่องจากก๊าซเรือนกระจก เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide: CO₂) ก๊าซมีเทน (Methane: CH₄) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nitrous Oxide: N₂O) มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความเป็นอยู่ของมนุษย์ เศรษฐกิจ และสังคม การลดการปล่อยก๊าซเหล่านี้จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องรีบดำเนินการเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่รุนแรงในอนาคต เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Technology: LCT) จึงเป็นแนวทางแก้ปัญหาที่มีศักยภาพโดยช่วยตอบโจทย์การผลิตและการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้พร้อมกัน

เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำเป็นนวัตกรรมทางเทคนิคที่ถูกออกแบบมาเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตและการใช้พลังงาน เทคโนโลยีเหล่านี้มีคุณลักษณะเฉพาะ คือ มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณต่ำหรือไม่ปล่อยเลย โดยมีเป้าหมายเพื่อช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชะลอการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์¹ เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำมีข้อดีมากมายแต่ในขณะเดียวกันก็ยังมีข้อจำกัดด้วยเช่นกัน รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำ^{2,3}

ข้อดี	ข้อจำกัด
- การใช้เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำในการผลิตและการใช้พลังงานช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อน ทำให้ชะลอการเกิดผลกระทบ และลดความรุนแรงจากภัยพิบัติที่มีสาเหตุจากระดับความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ - การชะลอการใช้ทรัพยากรใหม่ เช่น เทคโนโลยีการเปลี่ยนขยะให้เป็นพลังงาน อย่างการใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ หรือเผาเป็นเชื้อเพลิง ที่ช่วยลดการขุดแหล่งเชื้อเพลิงใหม่ขึ้นมาใช้ - ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่ำ สำหรับเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำบางชนิดที่ใช้ทรัพยากรที่ไม่มีต้นทุน เช่น พลังงานจากลมและแสงอาทิตย์ เป็นต้น - การสร้างโอกาสการจ้างงานในท้องถิ่น ซึ่งนับเป็นการสร้างผลประโยชน์ทางสังคมให้กับชุมชนอีกทางหนึ่ง - สร้างเสถียรภาพทางพลังงานให้กับประเทศ ลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ จากการใช้เทคโนโลยีผลิตพลังงานหมุนเวียนและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ - การมีงานวิจัยและพัฒนาที่เติบโตขึ้นอย่างมากทั่วโลกในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ทำให้เงินทุนในเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำลดลงมาก ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตลดลง	- ตลาดเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำมีพัฒนาการที่แตกต่างกันตามพื้นที่และกลุ่มอุตสาหกรรม ในกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนาซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาก กลับมีความจริงจังในการพัฒนาเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำที่น้อยกว่า ประเทศที่พัฒนาแล้ว ที่มีปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่า - การพึ่งพิงนโยบายและการสนับสนุนจากภาครัฐเพื่อผลักดันให้เกิดการนำมาใช้ประโยชน์จริง เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำบางชนิดอาจมีต้นทุนต่ำกว่าเทคโนโลยีสร้างมลพิษ เช่น หลอด LED vs. หลอดไฟแบบมีไส้ แต่เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำอื่น ๆ อีกมากยังคงต้องพึ่งพิงนโยบายจากภาครัฐในการให้ทุนให้โทษเพื่อผลักดันให้สามารถเกิดขึ้นได้ - นโยบายสนับสนุนส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำที่เกี่ยวข้องกับการผลิตและการเปลี่ยนรูปพลังงาน มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่สามารถดักจับและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับคาร์บอนได้อย่างแท้จริงและมีความเป็นไปได้สูง - ภาวะการแข่งขันในตลาดปกติที่ไม่เอื้อให้เกิดแรงจูงใจ สำหรับเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำ ซึ่งอาจเกิดจากการขาดการสื่อสารให้เกิดความเข้าใจระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำมีหลากหลายประเภทและมีเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกหลายวิธี หนึ่งในวิธีจำแนกที่ช่วยให้เข้าใจเทคโนโลยีเหล่านี้ได้ดี คือ การแบ่งกลุ่มเป็น Type A เทคโนโลยีการผลิตพลังงาน และ Type B เทคโนโลยีการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ซึ่งแต่ละกลุ่มจะสามารถแบ่งย่อยได้อีก 3 ประเภท ได้แก่ เทคโนโลยีที่ปราศจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เทคโนโลยีที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ และ เทคโนโลยีการจัดและใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์³ รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การแบ่งประเภทของเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำ³

ประเภทหลัก ประเภทย่อย	Type A เทคโนโลยีการผลิตพลังงาน	Type B เทคโนโลยีการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน
1. เทคโนโลยีที่ปราศจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	A1 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานที่ปราศจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ และพลังงานนิวเคลียร์	B1 เทคโนโลยีเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ที่ปราศจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น รถยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ และรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิง
2. เทคโนโลยีที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ	A2 เทคโนโลยีการผลิตพลังงาน ที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ เช่น พลังงานชีวมวลและเชื้อเพลิงชีวภาพ เซลล์เชื้อเพลิง การผลิตพลังงานจากของเสีย การผลิตพลังงานก๊าซจากขยะฝังกลบ การผลิตพลังงานร่วมกับ ความร้อนและโรงไฟฟ้าความร้อนร่วม	B2 เทคโนโลยีเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ เช่น เครื่องยนต์ไฮบริด แสงสว่างและเครื่องใช้ไฟฟ้าพลังงานต่ำ
3. เทคโนโลยีการจัดและใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	A3 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานที่กำจัดและใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น พลังงานจากสาหร่ายและพลังงานคาร์บอนดิลบ	B3 เทคโนโลยีเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่กำจัดและใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำมากักเก็บหรือใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ

จะเห็นว่า เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำมีหลากหลายประเภท และในปัจจุบันมีบริษัททั้งในและต่างประเทศที่ร่วมมือกันในการนำเทคโนโลยีเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อลดการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ตัวอย่างเช่น

- A1: พลังงานลม** คือ พลังงานที่ได้จากการเคลื่อนที่ของลมที่เกิดจากการไหลของอากาศในชั้นบรรยากาศ โดยใช้กังหันลมในการแปลงพลังงานจลน์ของลมให้เป็นพลังงานกล จากนั้นพลังงานกลจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งาน พลังงานลมเป็นพลังงานสะอาดและยั่งยืน ไม่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลและส่งเสริมการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพ⁴
 - ตัวอย่างการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น โครงการโรงไฟฟ้าพลังงานลม หาดกังหัน จังหวัดนครศรีธรรมราชถึงจังหวัดสงขลา ประเทศไทย มีขนาดกำลังการผลิตรวม 126 เมกะวัตต์ และโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานลมหุนามจังหวัดชัยภูมิ มีขนาดกำลังการผลิตรวม 260 เมกะวัตต์⁵
- A2: พลังงานชีวมวล** คือ พลังงานที่ได้จากสิ่งมีชีวิตหรือวัสดุอินทรีย์ที่มาจากพืชและสัตว์ เช่น ไม้ เศษวัสดุทางการเกษตร ขยะชีวภาพ และมูลสัตว์ กระบวนการผลิตพลังงานจากชีวมวลสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายวิธี ดังนี้
 - การเผาไหม้ (Combustion): การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยการเผาไหม้เพื่อผลิตความร้อนสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ประมาณ 70 – 90% เมื่อเทียบกับการใช้ถ่านหินหรือเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่น ๆ

- การแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel Production): การแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว เช่น เอทานอลและไบโอดีเซล สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ประมาณ 50 – 90% เมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันเบนซินหรือดีเซล
 - การย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion): การย่อยสลายชีวมวลโดยไม่มีออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งสามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าหรือความร้อนได้
 - การผลิตถ่านชีวภาพ (Biochar Production): การเผาไหม้ชีวมวลในสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำเพื่อผลิตถ่านชีวภาพที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือปรับปรุงคุณภาพดินได้ สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ประมาณ 30 – 50% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ถ่านหิน^{6,7}
- ตัวอย่างการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น โรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทยทั้งหมด 7 แห่ง ได้แก่ จังหวัดสุพรรณบุรี สิงห์บุรี ขอนแก่น ชัยภูมิ กาฬสินธุ์ เลย และอยุธยา มีกำลังการผลิตรวม 463 เมกะวัตต์ สามารถส่งไฟฟ้าให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ และการไฟฟ้าฝ่ายภูมิภาค ได้ถึง 197 เมกะวัตต์⁸
3. **A3: สาหร่ายน้ำมัน** เป็นแหล่งพลังงานต้นทุนต่ำและยั่งยืนสามารถเติบโตได้โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการผลิตน้ำมันผ่าน การสังเคราะห์แสง สาหร่ายมีข้อดี คือ เติบโตได้ทั้งในน้ำจืดหรือน้ำเกลือ ไม่ต้องการพื้นที่มาก ไม่ใช้น้ำมาก อัตราเจริญเติบโตสูงมาก ไม่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนอาหารของมนุษย์ และที่สำคัญให้สัดส่วนน้ำมันสูงมาก ซึ่งการเลี้ยงมีทั้งระบบบ่อเปิด (Open Ponds) รางน้ำ (Raceways) และปฏิกิริยาชีวภาพให้แสง (Photo Bio Reactors)⁹
- ตัวอย่างการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น ฟาร์มขนาด 350 เอเคอร์ ซึ่งตั้งอยู่ทางตะวันตกเฉียงใต้ของมิสซิสซิปปี-โอเดสซา รัฐเท็กซัส ประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก สีเขียวสายพันธุ์ตามธรรมชาติกลางแจ้งในบ่อน้ำกร่อยแบบเปิด โดยใช้แสงแดดและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากท้องถิ่น เพื่อผลิตน้ำมันและอาหารเสริมที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น Omega-3 ซึ่งสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารและผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร¹⁰
4. **B1: การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานสำหรับยานยนต์: รถยนต์น้ำมันเชื้อเพลิงใช้น้ำมันเบนซินหรือดีเซลเป็นแหล่งพลังงาน** โดยมีเครื่องยนต์สันดาปภายในที่มีหลักการทำงาน คือ การเผาไหม้หรือการระเบิดของส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ แล้วเกิดการออกซิไดซ์ (Oxidizing) กระทั่งมีการขยายตัวและแตกตัวภายในห้องเผาไหม้ แรงระเบิดจากการเผาไหม้จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานใช้ขับเคลื่อนตัวรถยนต์ เครื่องยนต์ประกอบด้วยชิ้นส่วนเคลื่อนไหวนานาชิ้น เช่น ลูกสูบ เพลาข้อเหวี่ยง และวาล์ว ซึ่งทำงานร่วมกันเพื่อเปลี่ยนพลังงานจากการเผาไหม้เป็นพลังงานกล ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานประมาณ 20 – 30% เนื่องจากการสูญเสียพลังงานมากในรูปของความร้อนและการเสียดสีระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิง¹¹ ส่วนรถยนต์พลังงานไฟฟ้าใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน โดยมีหลักการทำงาน คือ แบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในการขับเคลื่อนล้อ องค์ประกอบหลักสำหรับการขับเคลื่อนประกอบด้วย แบตเตอรี่ อุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า และมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้ามีการสูญเสียพลังงานน้อย ทำให้รถยนต์พลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงถึง 85 – 90% จึงช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากขึ้น ทั้งในเรื่องค่าซ่อมบำรุงและค่าพลังงาน เพราะไฟฟ้ามีราคาถูกกว่าพลังงานเชื้อเพลิง ที่สำคัญคือ ไม่มีการปล่อยไอเสียทำให้ไม่สร้างมลภาวะให้แก่โลกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม¹²
- ตัวอย่างการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น การผลิตรถยนต์ไฟฟ้าประเภท Battery Electric Vehicle (BEV) ณ รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขณะขับขี่ เนื่องจากใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าจาก

แบตเตอรี่เป็นตัวขับเคลื่อนเพียงอย่างเดียว ทำให้ไม่ต้องใช้น้ำมันเบนซินหรือดีเซลซึ่งเป็นแหล่งที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมลพิษอื่น ๆ¹³

5. B2: การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานสำหรับหลอดไฟให้แสงสว่าง: หลอดไส้ (Incandescent Lamp) ทำงานโดยให้กระแสไฟฟ้าผ่านไส้หลอดเพื่อเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อน เมื่ออุณหภูมิของไส้หลอดสูงขึ้นจะทำให้เกิดแสงสว่างออกมา อย่างไรก็ตาม เมื่อมีความร้อนสะสมมาก ๆ อายุการใช้งานจะยิ่งสั้นลง และการสูญเสียพลังงานไปกับความร้อนทำให้หลอดไส้กินไฟมาก ในทางกลับกัน หลอดไฟ Light Emitting Diode (LED) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในปัจจุบัน แสงสว่างจะเกิดจากการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนภายในสารกึ่งตัวนำสองชนิด เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจุดต่อเชื่อมระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสอง จะเกิดการปล่อยแสงสว่างออกมา ความแตกต่างสำคัญ คือ ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน หลอดไฟ LED ใช้พลังงานน้อยกว่าหลอดไส้ถึง 80 – 90% ทำให้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า อายุการใช้งานยาวนานกว่าหลอดไส้ ให้แสงสว่างที่เรียบเนียน ไม่มีการกระพริบ และมีสีแสงที่ใกล้เคียงกับแสงธรรมชาติมากกว่า ไม่มีสารอันตรายอย่างปรอทอยู่ภายใน จึงปลอดภัยกว่าหากเกิดการแตกหัก^{14, 15}

- ตัวอย่างการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น หลอดไฟ LED รุ่น ซูเฮตต้า (SOLHETTA) ที่มีอายุการใช้งานนานกว่า 25,000 ชั่วโมง ประหยัดพลังงานได้มากกว่ารุ่นก่อน ๆ ประมาณ 25% และให้แสงสีวอร์มไวท์ที่สว่างนวลตาเป็นธรรมชาติ¹⁶

6. B3: การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในขณะเดียวกันสามารถดักจับ กักเก็บ และใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- ได้อีกด้วย:** การเผาไหม้เชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนพลังงานสะสมในเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ให้เป็นพลังงานความร้อนผ่านการเผาไหม้ หลังจากนั้น พลังงานความร้อนจะถูกใช้ในการต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำที่มีแรงดันสูง ซึ่งไอน้ำที่มีแรงดันสูงนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ ทำให้กังหันหมุนและสร้างพลังงานกล กังหันที่หมุนจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกระแสไฟฟ้า¹⁷ ซึ่งจะถูกส่งไปยังเครือข่ายไฟฟ้าเพื่อใช้งานต่อไป การเผาไหม้เชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก ดังนั้น การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Capture) ในกระบวนการนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญ การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการดึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากการเผาไหม้ จึงจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าเพื่อให้สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ได้มากที่สุด ได้แก่

- การเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel Combustion): เป็นกระบวนการเผาไหม้ที่ใช้การผสมออกซิเจนบริสุทธิ์กับเชื้อเพลิงแทนการใช้อากาศ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก กระบวนการนี้มีจุดเด่นที่สำคัญ คือ การใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผาไหม้ ทำให้กระบวนการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่บริสุทธิ์มากขึ้น ทำให้ง่ายต่อการดักจับและกักเก็บ เทคโนโลยีนี้ยังอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาและยังไม่มีการใช้งานในวงกว้าง
- การดักจับก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion Capture): กระบวนการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนที่เชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้ในโรงไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนเชื้อเพลิงฟอสซิลให้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบหลัก คือ ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกออกและดักจับ ส่วนไฮโดรเจนจะถูกนำไปเผาไหม้ในเครื่องยนต์หรือกังหันเพื่อผลิตพลังงาน วิธีนี้มีประสิทธิภาพมากกว่าการดักจับหลังการเผาไหม้ แต่มีความซับซ้อนและค่าใช้จ่ายสูงกว่า

- การดักจับหลังการเผาไหม้ (Post-combustion Capture): กระบวนการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากที่เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ในโรงไฟฟ้า เช่น การใช้สารละลายเอมีนในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชนิดอื่น ๆ ในไอเสีย จากนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารละลายเอมีนจะถูกแยกออกจากกันเพื่อให้ตัวทำละลายเอมีนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ กระบวนการนี้มักจะดำเนินการที่บริเวณปล่องควันของโรงไฟฟ้า เป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเติบโตเร็วที่สุดในอุตสาหกรรม

หลังจากการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในโรงไฟฟ้า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกและทำให้บริสุทธิ์ จากนั้นจะถูกบีบอัดเพื่อขนส่งไปยังสถานที่สำหรับนำไปกักเก็บโดยการอัดลงในช่องว่างทางธรณีวิทยาใต้ผิวดิน หรือถูกนำไปใช้ประโยชน์ด้วยการแปลงเป็นเชื้อเพลิง เช่น ก๊าซมีเทน เมทานอล และน้ำมันเบนซิน¹⁸⁻²¹ เทคนิคการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การกักเก็บ และการนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่น ๆ มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3 – 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 เทคนิคการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์²¹⁻²³

เทคโนโลยี	ภาพรวม	สถานะเทคโนโลยี
1. การดูดซึมทางเคมี (Chemical Absorption)	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกแยกออกจากส่วนผสมของก๊าซโดยการทำปฏิกิริยากับสารเคมี เช่น โมโนเอทานอลามีนและแอมโมเนีย จากนั้นสารละลายที่ดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกทำให้ร้อนเพื่อแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเป็นก๊าซบริสุทธิ์ การใช้ตัวทำละลายที่มีเอมีนถือเป็นเทคนิคการแยกที่ทันสมัยที่สุด	เทคนิคนี้ได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลายมานานหลายทศวรรษ และปัจจุบันถูกนำมาใช้ในโครงการขนาดเล็กและขนาดใหญ่ทั่วโลก ทั้งในด้านการผลิตไฟฟ้าการแปรรูปเชื้อเพลิง และการผลิตทางอุตสาหกรรม
2. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)	การใช้พื้นผิวแข็ง เช่น อะลูมินา ถ่านกัมมันต์ ออกไซด์ของโลหะ และซีโอไลต์ ผ่านแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงที่เกิดจากการปฏิสัมพันธ์ทางกายภาพระหว่างโมเลกุล หลังจากการจับตัว ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกปล่อยออกมาโดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือความดัน	ปัจจุบันเทคนิคนี้ถูกใช้เป็นหลักในกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติ และการผลิตเอทานอล เมทานอล และไฮโดรเจน โดยมีโรงงานเชิงพาณิชย์ 9 แห่งที่เปิดดำเนินการอยู่
3. การใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane)	การใช้เมมเบรนหรือเยื่อบางในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซผสม โดยอาศัยความสามารถของเมมเบรนในการให้ก๊าซชนิดหนึ่งผ่านได้มากกว่าก๊าซชนิดอื่น	ในกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติจะอยู่ในขั้นตอนการสาธิต สำหรับการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพมีใช้ในเชิงพาณิชย์ ส่วนการบำบัดก๊าซไอเสียยังอยู่ในระหว่างการพัฒนา
4. การหมุนเวียนแคลเซียม (Calcium Looping)	การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์หลักสองตัว ในเครื่องปฏิกรณ์แรก ปูนขาวถูกใช้เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระแสก๊าซเพื่อสร้างแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นแคลเซียมคาร์บอเนตจะถูกส่งไปยังเครื่องปฏิกรณ์ที่สอง ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตจะแยกเป็นปูนขาวและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ จากนั้นปูนขาวจะถูกวนกลับไปยังเครื่องปฏิกรณ์แรก	ขณะนี้อยู่ในขั้นนำร่อง/ก่อนเชิงพาณิชย์ และได้รับการทดสอบแล้ว เช่น ในเครื่องเผาไหม้ฟลูอิดเบดที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงและในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์
5. การหมุนเวียนสารเคมี (Chemical Looping)	เหมือนกับการหมุนเวียนแคลเซียม ในเครื่องปฏิกรณ์แรก อนุภาคโลหะ เช่น เหล็กหรือแมงกานีส ถูกใช้เพื่อจับออกซิเจนจากอากาศเพื่อสร้างออกไซด์ของโลหะ ซึ่งจะถูกส่งไปยังเครื่องปฏิกรณ์ที่สองเพื่อทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงเป็นการสร้างพลังงานและกระแสความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้โลหะลดรูป จากนั้นโลหะจะวนกลับไปเครื่องปฏิกรณ์แรก	เทคโนโลยีนี้ได้รับการทดสอบผ่านการดำเนินโครงการนำร่องประมาณ 35 โครงการที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ถ่านหิน ก๊าซ น้ำมัน และชีวมวล

ตารางที่ 4 วิธีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์^{18, 20, 24, 25}

วิธีการกักเก็บคาร์บอน	รายละเอียด
1. การกักเก็บทางธรณีวิทยา (Geological Storage)	การฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงใต้ผิวดินในช่องว่างทางธรณีวิทยา เป็นวิธีที่ใช้ทั่วไปในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอาจเข้าไปในพื้นที่เช่น แหล่งน้ำมันหรือแหล่งก๊าซที่หมดสิ้น รอยต่อถ่านหินที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ หรือชั้นหินที่มีน้ำเค็มอยู่
2. การกักเก็บทางมหาสมุทร (Ocean Storage)	การฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่มหาสมุทรโดยตรงที่ระดับความลึกมาก เพื่อให้ละลายหรือก่อตัวเป็นสารประกอบที่เสถียร ในปัจจุบันยังไม่ถือเป็นวิธีการที่ใช้ได้ เนื่องจากอาจมีผลกระทบต่อระบบนิเวศทางทะเล
3. การกักเก็บในรูปแบบของแร่คาร์บอเนต (Mineral Carbonation)	การทำปฏิกิริยาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับหินที่มีรูพรุนบางประเภทเพื่อสร้างแร่ธาตุที่เสถียรเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในเวลาหลายพันปี อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้สามารถเร่งได้ด้วยเทคโนโลยีทางอุตสาหกรรม ซึ่งถึงแม้จะเป็นวิธีแก้ปัญหามีประสิทธิภาพสำหรับการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระยะยาว แต่ปัจจุบันมีค่าใช้จ่ายสูงและใช้พลังงานมาก
4. การกักเก็บทางชีวภาพ (Biological Sequestration)	การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีธรรมชาติ เช่น การใช้พืชดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสังเคราะห์แสง การปลูกป่า และเทคนิคการทำฟาร์มคาร์บอน เพื่อเพิ่มพื้นที่สำหรับกักเก็บและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ตารางที่ 5 การใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์^{25 - 29}

การใช้ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	รายละเอียด
1. การใช้งานโดยตรง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (Non-conversion)	การเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของพืชในเรือนกระจก: การเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเรือนกระจกช่วยส่งเสริมกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้พืชเจริญเติบโตได้เร็วขึ้น
	การใช้ในกระบวนการทางการแพทย์: การใช้ในระบบระบายความร้อนของเครื่องมือแพทย์ ใช้ในกระบวนการแพร่กระจายก๊าซในการผ่าตัด และสามารถช่วยกระตุ้นการหายใจเมื่อผสมกับออกซิเจนในการดูแลทางการแพทย์
	การใช้ในกระบวนการผลิตอาหารและเครื่องดื่ม: การใช้ในการทำน้ำอัดลม เบียร์ และไวน์ เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเชื้อรา ใช้ในกระบวนการสกัดคาเฟอีนออกจากกาแฟ และในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำแข็งแห้ง
	การใช้เพิ่มปริมาณการผลิตน้ำมัน: การละลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปในน้ำมันบางส่วน ซึ่งช่วยลดความหนืดของน้ำมันและทำให้สามารถดึงออกมาจากชั้นหินได้ง่ายขึ้น
2. การเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ผ่านกระบวนการทางเคมีและชีวภาพ (Conversion)	การผลิตเชื้อเพลิง: การผลิตเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น เมทานอล มีเทน น้ำมันเบนซิน และเชื้อเพลิงการบิน เกี่ยวข้องกับการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนในกระบวนการผลิต การผลิตเมทานอลและมีเทนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงพาณิชย์เป็นไปได้ในตลาดที่มีทั้งพลังงานหมุนเวียนที่มีต้นทุนต่ำและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึง 74 – 93% เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตทั่วไป
	การผลิตสารเคมี: การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทนเชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตสารเคมี เช่น พอลิเมอร์ โฟม และเรซิน โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแทนที่ส่วนหนึ่งของวัตถุดิบที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในกระบวนการผลิต ซึ่งพอลิเมอร์ที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 20% โดยน้ำหนัก จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 15% เมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตทั่วไป
	การผลิตวัสดุก่อสร้าง: การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทนน้ำในการผลิตคอนกรีต เรียกว่าการบ่มด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นหนึ่งในการใช้งานที่เติบโตเต็มที่และมีแนวโน้มมากที่สุดในการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์และมวลรวมในการก่อสร้าง แต่การนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ยังคงอยู่ในขั้นตอนเริ่มต้นของการพัฒนา

- ตัวอย่างการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์: โรงไฟฟ้าในรัฐมิสซิสซิปปี ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้เทคโนโลยีการผลิตพลังงานร่วมกับการผลิตก๊าซ (Integrated Gasification Combined Cycle: IGCC) ซึ่งเป็นกระบวนการแปลงถ่านหินให้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ก๊าซเชื้อเพลิงนี้ใช้ในการขับเคลื่อนกังหันก๊าซเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และความร้อนที่เกิดจากการขับเคลื่อนกังหันก๊าซจะถูกใช้ในการผลิตไอน้ำเพื่อขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพิ่มเติม ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานสูงขึ้น นอกจากนี้ โรงไฟฟ้ายังสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตได้ถึง 65% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้จะถูกอัดและนำไปใช้ในกระบวนการเพิ่มการผลิตน้ำมัน (Enhanced Oil Recovery: EOR)³⁰

จากตัวอย่างบริษัทที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำ จะเห็นว่าเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำเป็นวิธีการและเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการใช้พลังงานที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยลงในกระบวนการผลิตและการใช้งานต่าง ๆ โดยเทคโนโลยีนี้มุ่งเน้นการพัฒนาและใช้งานแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การลดการใช้พลังงานที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจะช่วยลดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและสร้างการพัฒนาที่ยั่งยืนในอุตสาหกรรมและสังคมทั่วโลก นับเป็นการร่วมมือที่สำคัญในการพัฒนาด้านเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพ เพื่อยกระดับการพัฒนาที่ยั่งยืนของประเทศทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม

คณะผู้จัดทำ

- | | |
|-------------------|--------------|
| 1. รศ.ดร.กานติส | สุดสาคร |
| 2. ผศ.ดร.วิกานดา | วราห์บัณฑิต |
| 3. รศ.ดร.ชนินทร์ | ปัญญาพรผล |
| 4. รศ.ดร.ปวีณา | ประไพยนา |
| 5. ผศ.ดร.ศุภพัชรี | รอดเดชา |
| 6. ผศ.ดร.พรรณทิศา | ลิ้มแหลมทอง |
| 7. ดร.ณัฏฐ | เจียรสำราญ |
| 8. นางสาวปนัดดา | พิเชฐวานิชย์ |
| 9. นางสาวนันทนัฐ | บุญพบ |

สถานที่ติดต่อ: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทร. 0-2797-0999 ต่อ 1202 – 1204 โทรสาร 0-2561-4621

Application of industry-urban symbiosis and green chemistry for low emission and persistent organic pollutants free industrial development in Thailand.

References:

1. World Economic Forum. (2020). *What are low-carbon emitting technologies? An expert explains*.
<https://www.weforum.org/agenda/2022/02/what-are-low-carbon-emitting-technologies-an-expert-explains/>
2. BP. (2016). *Sustainability Report 2016*.
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/sustainability/archive/archived-reports-and-translations/2016/bp-sustainability-report-2016.pdf>
3. Metta, Julie; An, Yao; Zheng, Huanhuan; Zhang, Lin. (2019). Potentials and opportunities towards the low carbon technologies – From literature review to new classification. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, (2019)10, 1 – 30.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1642834>
4. The Bangkok insight editorial team. (2021). *พลังงานลม หนุนความมั่นคงไฟฟ้าไทย*. The Bangkok insight.
https://www.thebangkokinsight.com/news/environmental-sustainability/561401/#google_vignette
5. บริษัท พลังงานบริสุทธิ์ จำกัด (มหาชน). (n.d). *โรงไฟฟ้าพลังงานลม*. E@Energy Absolute.
<https://energyabsolute.co.th/windpower>
6. ADMIN_FIRST. (2021). *พลังงานชีวมวลคืออะไร*. Thai-A Thai Agency Engineering.
<https://thaia.co.th/2021/03/23/%e0%b8%9e%e0%b8%a5%e0%b8%b1%e0%b8%87%e0%b8%87%e0%b8%b2%e0%b8%99%e0%b8%8a%e0%b8%b5%e0%b8%a7%e0%b8%a1%e0%b8%a7%e0%b8%a5%e0%b8%84%e0%b8%b7%e0%b8%ad%e0%b8%ad%e0%b8%b0%e0%b9%84%e0%b8%a3/>
7. OpenAI. (2020). *ChatGPT-3.5*. Large language model.
<https://chat.openai.com/chat>
8. บริษัทมิตรผล. (n.d). *ภาพรวมธุรกิจไฟฟ้าชีวมวล*. Mittr Phol Group.
<https://www.mittrphol.com/Energy-Business/business/Bio-Power>
9. Arun, J., Gopinath, K. P., Sivaramakrishnan, R., SundarRajan, P., Malolan, R., & Pugazhendhi, A. (2020). Technical insights into the production of green fuel from CO₂ sequestered algal biomass: A conceptual review on green energy. *Science of The Total Environment*, 2021(755).
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142636>
10. Informa Markets. (2013). *Qualitas hits algae production milestone*. New Hope NETWORK.
<https://www.newhope.com/vitamins-and-supplements/qualitas-hits-algae-production-milestone>
11. kitti Phu. (2014). *What is an internal combustion engine and how long will it be with us?*. DirectAsia.
<https://www.directasia.co.th/blog/car/internal-combustion-engine/>
12. Nissan. (n.d.). *Differences between driving technology in each type of car*. Nissan Global.
<https://www.nissan.co.th/experience-nissan/Nissan-EV/different-vehicles-technology.html>
13. Tesla. (2024). *รายงานผลสัมฤทธิ์ปี 2023*. Tesla.
https://www.tesla.com/th_th/impact
14. Chin Power. (n.d.). *Different types of light bulbs*. Chin Power.
<https://chinpower.net/knowledge/lighting-technology-led/>
15. Janjira B. (2024). *How are LED bulbs different from normal ones? What are the ways to choose?*. Green.
<https://green.in.th/%e0%b8%ab%e0%b8%a5%e0%b8%ad%e0%b8%94%e0%b9%84%e0%b8%9f-led.html>
16. IKEA. (2024). *SOLHETTA ชูเฮตต้า*. IKEA.
<https://www.ikea.com/th/th/p/solhetta-led-bulb-e27-470-lumen-globe-opal-white-00498575/>

Application of industry-urban symbiosis and green chemistry for low emission and persistent organic pollutants free industrial development in Thailand.

17. Suthipong Chalermkiat. (n.d.). *Knowledge about power plants*. Electricity Generating Authority of Thailand.
https://mpp.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=82&Itemid=488
18. Amanda McGrath and Alexandra Jonker. (2024). *What is carbon capture and storage (CCS)?*. IBM.
<https://www.ibm.com/think/topics/carbon-capture-storage>
19. Pisut Phianmanakul. (2019). *Gas storage technology*. MBA.
<https://mbamagazine.net/index.php/intelligent/env-4-0/item/428-2017-10-20-05-38-01>
20. Net Zero Techup. (2022). *What is Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)?*. Net Zero Techup.
<https://www.netzerotechup.com/post/carbon-capture-utilization-and-storage-ccus-%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3>
21. Thongthai Witoon. (2011). Technology for capturing and separating carbon dioxide from the combustion of fossil fuels. *KKU Engineering Journal*. 2011(38). 453 – 467.
<https://www.thaiscience.info/Journals/Article/KKEJ/10889815.pdf>
22. Sumitomo Chemical Company, Limited. (n.d.). *Highly efficient carbon dioxide separation by facilitated transport membrane: Application to CCUS technology*. Challenge Zero.
<https://www.challenge-zero.jp/en/casestudy/409>
23. International Energy Agency. (2021). *About CCUS*. IEA 50.
<https://www.iea.org/reports/about-ccus>
24. Alexander Pham. (2022). *Explainer: What Is Carbon Capture and Sequestration?*. Earth.Org.
<https://earth.org/carbon-capture-and-sequestration/>
25. CLEAR Center. (2019). *What is Carbon Sequestration and How Does it Work?*. UC Davis.
<https://clear.ucdavis.edu/explainers/what-carbon-sequestration>
26. International Energy Agency. (2021). *About CCUS*. IEA 50.
<https://www.iea.org/reports/about-ccus>
27. Atlas Copco. (n.d.). *What are the commercial and industrial uses of carbon dioxide?*. Atlas Copco.
<https://www.atlascopco.com/th-th/compressors/wiki/compressed-air-articles/carbon-dioxide-uses>
28. Kreangkrai Maneeintr. (2022). *Part 1: Basic knowledge and benefits of carbon dioxide*. TIChe.
<https://tiche.org/episode-1-fundamental-of-co2-and-its-benefit/>
29. International Energy Agency. (2019). *Putting CO₂ to Use*. IEA 50.
<https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>
30. National Black Chamber of Commerce. (2017). *Kemper, Mississippi: The Best People on the Planet*. The Kemper Power Plant.
<https://kemperproject.org/about-the-kemper-power-plant-in-mississippi/>