

รายงานการไปราชการ ประชุม สัมมนา ศึกษา ฝึกอบรม ปฏิบัติการวิจัย ดูงาน ณ ต่างประเทศ
และการปฏิบัติงานในองค์การระหว่างประเทศ
กรมส่งเสริมการเกษตร

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป

1.1 ชื่อ-สกุล

(ภาษาไทย)

คำนำหน้า (นาย , นาง , น.ส.) ชื่อ ภัทรพร สกุล มาลาพล

(ภาษาอังกฤษ)

Prefix (Mr. ,Mrs. , Ms.) First Name Pattaraporn Last Name Malapol

1.2 เกี่ยวกับที่ทำงาน

ตำแหน่ง (วิชาการ/บริหาร) นักวิชาการส่งเสริมการเกษตรชำนาญการ

หน่วยงาน (เช่น กอง/สำนัก) สำนักงานส่งเสริมและพัฒนากการเกษตรที่ 6 จังหวัดเชียงใหม่

โทรศัพท์..... 0 5390 8666 โทรสาร..... 0 5390 8665 e-mail: ssk6north@doae.mail.go.th

หน้าที่ความรับผิดชอบ *

- 1. งานพัฒนาเกษตรกรรุ่นใหม่ Young Smart Farmer
- 2. งานโครงการเตรียมความพร้อมทหารกองประจำการสู่การเป็นทายาทเกษตรกรรุ่นใหม่
- 3. ปฏิบัติงานอื่น ๆ ตามที่ได้รับมอบหมาย

1.3 ชื่อเรื่อง/หลักสูตร

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ..... Renewable Energy: Low-Carbon Transition

1.4 วัตถุประสงค์ของการเดินทางไป*

- ☐ ประชุม ☐ สัมมนา ☒ ฝึกอบรม ☐ ปฏิบัติการวิจัย
- ☐ ดูงาน ☐ ปฏิบัติงานในองค์การระหว่างประเทศ

1.5 แหล่งให้ทุน

ชื่อองค์กร/หน่วยงาน ผู้ให้ทุน Renewable Energy: Low-Carbon Transition

ประเภทของแหล่งทุน *

- ☐ ทุนของหน่วยงานต้นสังกัด ☒ ทุนของหน่วยงานอื่นๆ
- ☐ ทุนของหน่วยงานต้นสังกัดและหน่วยงานอื่นๆ ☐ ทุนส่วนตัว

1.6 ประเทศที่ไป (ตอบได้มากกว่า 1 ประเทศ)*

- 1) ...สาธารณรัฐสิงคโปร์.....
- 2)
- 3)
- 4)

1.7 งบประมาณ – วันเดินทาง*

งบประมาณ บาท

จากวันที่ 2 / พฤศจิกายน / 2568 ถึงวันที่ 8 / พฤศจิกายน / 2568

1.8 ภายใต้โครงการ/หน่วยงาน

ชื่อโครงการ Singapore Cooperation Programme 2025/2026

ของหน่วยงาน รัฐบาลสิงคโปร์

1.9 คุณวุฒิ/วุฒิบัตรที่ได้รับ Certificate of Completion on Renewable Energy: Low-Carbon Transition

ส่วนที่ 2 บทคัดย่อหรือสรุปย่อของหลักสูตร เพื่อประโยชน์ในการสืบค้น (ภาษาไทย/อังกฤษ)

2.1 บทคัดย่อหรือสรุปย่อของหลักสูตร*

การฝึกอบรมหลักสูตร Renewable Energy: Low-Carbon Transition จัดขึ้นระหว่างวันที่ 3 – 7 พฤศจิกายน 2568 ณ สาธารณรัฐสิงคโปร์ โดยรัฐบาลสิงคโปร์และดำเนินการฝึกอบรมโดย KPMG Services Pte.Ltd. ผู้เข้าร่วมอบรมประกอบด้วยผู้แทนจากประเทศต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับภาคพลังงานหมุนเวียนทั้งสิ้น 20 ราย หลักสูตรนี้มุ่งเสริมสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาด โดยเชื่อมโยงองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยี นโยบาย ความร่วมมือระหว่างประเทศ และกลไกทางการเงิน เพื่อให้ผู้เข้าร่วมการอบรมสามารถนำแนวคิดและแนวทางไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาโครงการหรือวางนโยบายด้านพลังงานในบริบทของตนเองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผ่านการเรียนรู้เชิงบูรณาการในประเด็นดังนี้

1. รากฐานของการเปลี่ยนผ่าน (Foundations of the Transition)

เรียนรู้แนวโน้มสำคัญของการเปลี่ยนผ่านพลังงาน เทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนหลัก และความท้าทายในการขยายการใช้งาน โดยมุ่งเน้นความเสมอภาคทางพลังงานและบทบาทของระบบพลังงานแบบกระจายศูนย์ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

2. การจัดการคาร์บอนและโซลูชันด้านสภาพภูมิอากาศ (Carbon Management & Climate Solutions)

ศึกษาเทคโนโลยี CCUS (Carbon Capture, Utilisation and Storage) และบทบาทในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก พร้อมทั้งทำความเข้าใจตลาดคาร์บอน แรงจูงใจทางนโยบาย และโครงการ CCUS ที่กำลังพัฒนาในสิงคโปร์และภูมิภาค

3. นโยบายพลังงานและความร่วมมือระดับภูมิภาค (Energy Policy & Regional Cooperation)

วิเคราะห์นโยบายพลังงานระดับโลกและระดับภูมิภาคที่สนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่คาร์บอนต่ำ เช่น ความร่วมมือของอาเซียน ข้อตกลงพหุภาคี และกรอบกำกับดูแลด้านพลังงาน เพื่อสร้างการเข้าถึงพลังงานที่ยั่งยืนและเท่าเทียม

4. กลยุทธ์ด้านสภาพภูมิอากาศและนวัตกรรมพลังงานของสิงคโปร์ (Singapore's Climate Strategy & Energy Innovation)

เรียนรู้แนวทางและนโยบายหลักของ “Singapore Green Plan 2030” รวมถึงนวัตกรรมด้านพลังงานหมุนเวียน การเงินสีเขียว และโครงการด้านประสิทธิภาพพลังงานที่ช่วยขับเคลื่อนประเทศสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ

5. การเงินและเศรษฐศาสตร์ของพลังงานหมุนเวียน (Finance & Economics of Renewable Energy)

โครงสร้างทางการเงินและเศรษฐศาสตร์ของโครงการพลังงานหมุนเวียน ครอบคลุมต้นทุนการลงทุน รูปแบบการจัดหาเงินทุน และเครื่องมือสนับสนุน เช่น การประมูลพลังงาน เพื่อขยายการลงทุนพลังงานสะอาดอย่างยั่งยืน

ส่วนที่ 3 ข้อมูลที่ได้รับจากการศึกษา ฝึกอบรม ดูงาน ประชุม/สัมมนา ปฏิบัติการวิจัย และการไปปฏิบัติงาน ในองค์การระหว่างประเทศ

3.1 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับแนวทางการเปลี่ยนผ่านสู่สังคมคาร์บอนต่ำในระดับโลกและระดับภูมิภาค และความรู้ด้านพลังงานหมุนเวียนและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
- 2) เพื่อศึกษาระบบบริหารจัดการคาร์บอนและเทคโนโลยี CCUS สำหรับการประยุกต์ใช้ในภาคส่วนต่าง ๆ
- 3) เพื่อเรียนรู้กรอบความร่วมมือและนโยบายด้านพลังงานที่สนับสนุนการบูรณาการ พลังงานสะอาด
- 4) เพื่อเสริมทักษะด้านการเงินและเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนพลังงานหมุนเวียน

3.2 เนื้อหาที่เป็นสาระสำคัญในเชิงวิชาการ ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

ไม่น้อยกว่า 1 หน้ากระดาษ A4 (หากมีรายงานฯ แยกต่างหากโปรดแนบไฟล์ PDF ขนาดไม่เกิน 5 MB ส่งด้วย)

กระแสการเปลี่ยนผ่านพลังงาน (Energy Transition) กำลังกลายเป็นวาระสำคัญของเศรษฐกิจโลก เนื่องจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และความจำเป็นในการลดการพึ่งพาพลังงานฟอสซิลที่มีความเสี่ยงด้านราคาและภูมิรัฐศาสตร์ ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกจึงเร่งวางกลยุทธ์เพื่อก่อสร้างระบบพลังงานที่สะอาด มีประสิทธิภาพ และยั่งยืน โดยมีพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) เป็นหัวใจหลักของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

1. การเปลี่ยนผ่านพลังงานโลก (Global Energy Transition)

สถานการณ์พลังงานโลกในปัจจุบัน มีความต้องการไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการเติบโตของเมือง อุตสาหกรรมดิจิทัล และการใช้รถยนต์ไฟฟ้า โดย International Energy Agency: IEA ระบุว่า พลังงานหมุนเวียนและนิวเคลียร์จะรองรับความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทั้งหมดในช่วง 2025–2027 พลังงานหมุนเวียนครองสัดส่วนกว่า 95% ของการเติบโตของไฟฟ้าใหม่ทั่วโลก โดยเฉพาะในจีน สหรัฐอเมริกา และยุโรป ซึ่งเป็นผู้นำในตลาดพลังงานหมุนเวียนระดับโลก ความก้าวหน้าเหล่านี้ทำให้พลังงานหมุนเวียน

กลายเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าที่มีต้นทุนสามารถแข่งขันได้กับฟอสซิลในหลายประเทศ เนื่องจากมีปัจจัยที่ผลักดันการเปลี่ยนผ่านพลังงาน ได้แก่

- 1) การลดลงของต้นทุน Solar PV และ Wind โดย Solar PV ลดลงกว่า 80% ภายใน 10 ปี
- 2) ความจำเป็นที่ต้องลดก๊าซเรือนกระจกตามนโยบายระดับโลก เช่น Paris Agreement
- 3) ความมั่นคงพลังงานและราคาฟอสซิลที่ผันผวน

1.1 ความจำเป็นของการเปลี่ยนผ่านพลังงาน

การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ถึง Net Zero ภายในปี 2050 ต้องอาศัยการปรับโครงสร้างระบบพลังงานโลกในสามด้านสำคัญ ได้แก่

- 1) การเพิ่มสัดส่วนการใช้ไฟฟ้า (Electrification) ในส่วนของ End-use เช่น ภาคขนส่ง อาคารที่อยู่อาศัย และอุตสาหกรรม

- 2) การยกระดับประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency) เพื่อชะลอการเติบโตของความต้องการพลังงาน

- 3) การขยายกำลังผลิตพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy Scale-up & Storage) ควบคู่กับระบบกักเก็บพลังงาน

ซึ่งการเปลี่ยนผ่านดังกล่าวไม่ใช่เพียงการเปลี่ยนเทคโนโลยีพลังงาน แต่เป็นการเปลี่ยนระบบเศรษฐกิจโลกตั้งแต่โครงสร้างอุตสาหกรรม แรงงาน เทคโนโลยี ไปจนถึงความมั่นคงทางพลังงานของประเทศ

1.2 เส้นทางเปลี่ยนผ่าน (Energy Transition Pathways)

องค์กรระหว่างประเทศ เช่น IEA และ International Renewable Energy Agency: IRENA เสนอว่า ภายในปี 2030 ต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานเป็น 2 เท่า (Doubling Energy Efficiency) ขยายกำลังผลิตพลังงานหมุนเวียน เป็น 3 เท่า (Triple Renewable Power Capacity) และลงทุนในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Grid infrastructure) เพื่อลดการใช้พลังงานจากถ่านหิน น้ำมัน และแก๊ส รวมไปถึงการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและจำกัดอุณหภูมิโลกไว้ไม่เกิน 1.5°C ตามข้อตกลงปารีสและ Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC

2. สถานการณ์พลังงานหมุนเวียนของโลก

2.1 การเติบโตของกำลังผลิต

ปี 2023–2024 ถือเป็นช่วงที่พลังงานหมุนเวียนเติบโตเร็วที่สุดในประวัติศาสตร์แม้จะมีความท้าทายในด้านนโยบายและข้อกำหนดต่าง ๆ ก็ตาม โดยมีการเพิ่มกำลังผลิตสูงขึ้นถึง 22% หรือมากกว่า 685 GW และคาดว่าจะในปี 2025 จะเพิ่มขึ้นถึง 750–840 GW ซึ่งประเทศจีนเป็นผู้นำครองสัดส่วนมากกว่า 57% ของกำลังผลิตที่เพิ่มขึ้นทั่วโลก แนวโน้มนี้สะท้อนว่าพลังงานหมุนเวียนกำลังเคลื่อนจาก “ทางเลือก” สู่ “ระบบหลักของโลก” (Mainstream Energy Source)

2.2 ความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น

แม้พลังงานหมุนเวียนจะมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว แต่ความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นต่อเนื่องก็ทำให้หลายประเทศเผชิญความตึงตัวด้านโครงข่ายไฟฟ้า โดยต้องเร่งเพิ่มประสิทธิภาพระบบโครงข่ายและ

การกักเก็บพลังงานควบคู่กัน จากรายงาน Electricity 2025 ของ IEA พบว่า ความต้องการไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 4.3% และคาดว่าในปี 2025 – 2027 จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องใกล้เคียง 4% ต่อปี ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูงขึ้นนั้น ได้แก่ รถไฟฟ้า (EV) Data Centers และ Heat pump และคาดว่า 95% ของความต้องการที่เพิ่มขึ้นนั้นจะถูกตอบสนองด้วยพลังงานหมุนเวียน เช่น โซลาร์ ลม และน้ำ

3. เทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน

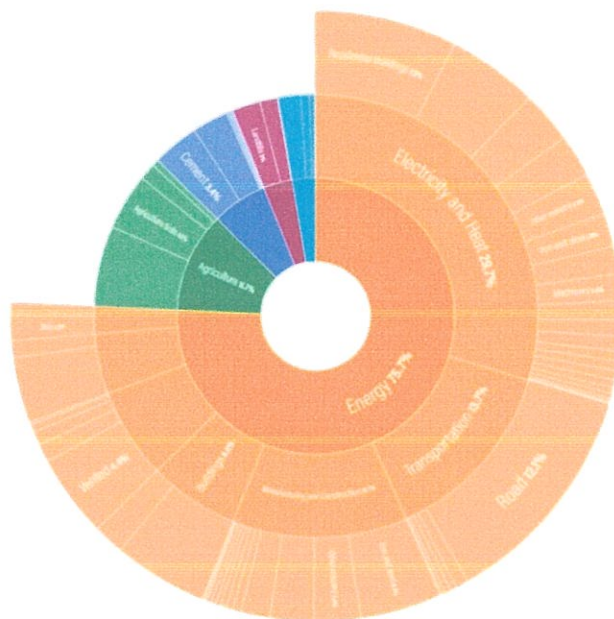
พลังงานหมุนเวียน คือ พลังงานที่ได้จากแหล่งธรรมชาติซึ่งมีอัตราการทดแทนสูงกว่าปริมาณที่บริโภค การผลิตพลังงานหมุนเวียนก่อให้เกิดการปล่อยมลพิษต่ำกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลมาก การเปลี่ยนจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งปัจจุบันมีส่วนการปล่อยมลพิษที่สูงที่สุด ไปสู่พลังงานหมุนเวียนถือเป็นกุญแจสำคัญในการแก้ไขวิกฤตสภาพภูมิอากาศ

ภาคอุตสาหกรรมที่มีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดในปี 2021 ได้แก่ Energy 75%, Agriculture 11.7%, Industrial Processes 6.5%, Waste 3.4%, และ LULUCF 2.7%

Global greenhouse gas emissions by sector and end use, 2021

Today, greenhouse gas emissions can be traced back to five economic sectors:

- **Energy**
- **Agriculture**
- **Industrial processes**
- **Waste**
- **Land use, land-use change and forestry**



Source: WRI Climate Watch

แหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญ

1) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy)

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่มากที่สุดและถือว่าเป็นพลังงานที่สะอาดที่สุดสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้แม้ในสภาพที่มีเมฆมาก ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่โลกสกักกั้นได้นั้นสูงกว่าปริมาณการใช้พลังงานทั่วโลกประมาณ 10,000 เท่า

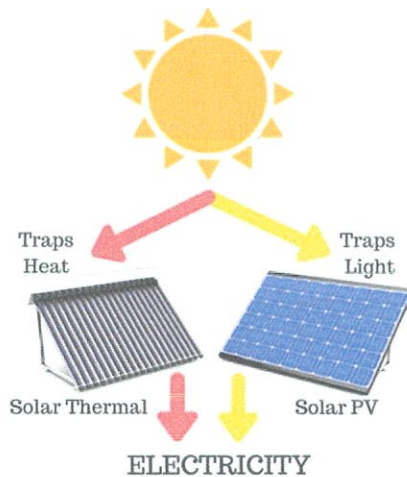
เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ทั้งความร้อน ความเย็น แสงธรรมชาติ ไฟฟ้า และเชื้อเพลิง เทคโนโลยีเหล่านี้แปลงแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือความร้อน โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์หรือกระจกที่รวมรังสีดวงอาทิตย์ไว้ด้วยกัน

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีที่เติบโตเร็วที่สุด และเป็นตัวขับเคลื่อนหลักของการเปลี่ยนผ่านพลังงานโลก คิดเป็น 75% ของการเพิ่มกำลังผลิตพลังงานหมุนเวียนปี 2023 และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นถึง 80% ของการเติบโตใหม่ในปี 2030 มีการกระจายตัวทั้งในระบบ Utility-scale และ Distributed Solar เช่น โซลาร์บนหลังคา และต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์ลดลงมากกว่า 80% ในรอบ 10 ปี ทำให้สามารถแข่งขันกับฟอสซิลได้ในหลายประเทศโดยไม่ต้องพึ่งพาเงินอุดหนุน ซึ่งประเทศสิงคโปร์ได้จัดทำโปรเจก Tengoh Floating Solar Farm สามารถผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้ถึง 60MWp ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 32,000 tCO₂ และส่งกระแสไฟฟ้าให้ที่อยู่อาศัย จำนวน 16,000 หลังคาเรือนต่อปี ถือว่าเป็นหนึ่งในฟาร์มโซลาร์ลอยน้ำที่ใหญ่ที่สุดในโลก



Source: Sembcorp Industries

เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ Solar Photovoltaic (PV) Panels และ Solar Thermal Systems ซึ่งมีการทำงานที่แตกต่างกันเพื่อวัตถุประสงค์ที่ต่างกัน โดย Solar PV จะทำการแปลงแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ Photovoltaic ทำให้สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้กับที่อยู่อาศัย ธุรกิจ หรือส่งกลับไปกักตุนได้ ส่วน Solar Thermal Systems เน้นการกักเก็บแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อนมากกว่ากระแสไฟฟ้า และนำไปใช้กับการทำความร้อน heating water หรือ space heating



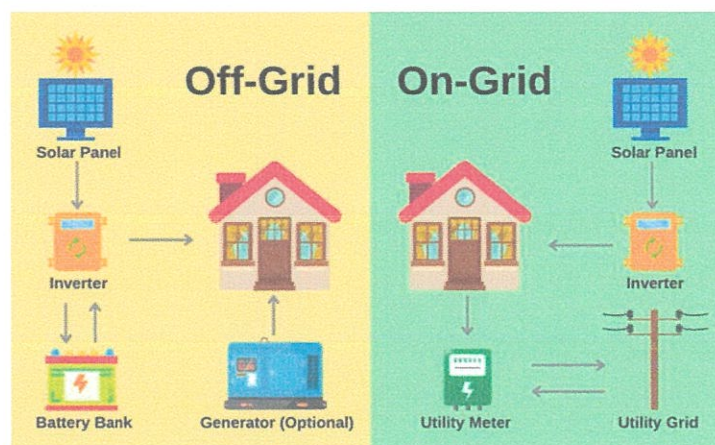
Source: How Does Solar Work? | Department of Energy,

Solar thermal power plants - U.S. Energy Information Administration (EIA)

Solar PV สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท จากการนำไปใช้และเทคโนโลยี ได้แก่ on-grid และ off-grid

1. ระบบโซลาร์เซลล์แบบ off-grid สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่ไม่มีโครงข่ายไฟฟ้า ปัจจุบันระบบโซลาร์เซลล์แบบ off-grid มักติดตั้งในพื้นที่ห่างไกลจากโครงข่ายไฟฟ้า เช่น พื้นที่ชนบทหรือเกาะนอกชายฝั่ง แต่ก็สามารถติดตั้งภายในเมืองได้ในกรณีที่ไม่มีสะดวกหรือมีค่าใช้จ่ายสูงในการดึงไฟฟ้าจากโครงข่ายไฟฟ้า

2. ระบบโซลาร์เซลล์แบบ on-grid ส่วนใหญ่มักติดตั้งบนอาคารหรือติดตั้งบนพื้นดิน หากไม่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ สำหรับอาคารจะติดตั้งบนหลังคาหรือติดตั้งเข้ากับตัวอาคาร หรือ Building Integrated Photovoltaics (BIPV) ในกรณี BIPV โมดูลโซลาร์เซลล์มักจะแทนที่ส่วนประกอบอื่น ๆ ของอาคาร เช่น กระเบื้องหน้าต่าง หรือแผ่นปิดหลังคา/ผนัง จึงใช้งานได้สองวัตถุประสงค์และช่วยลดต้นทุนบางส่วน



Source: Handbook for Solar Photovoltaic (PV) Systems (EMA)

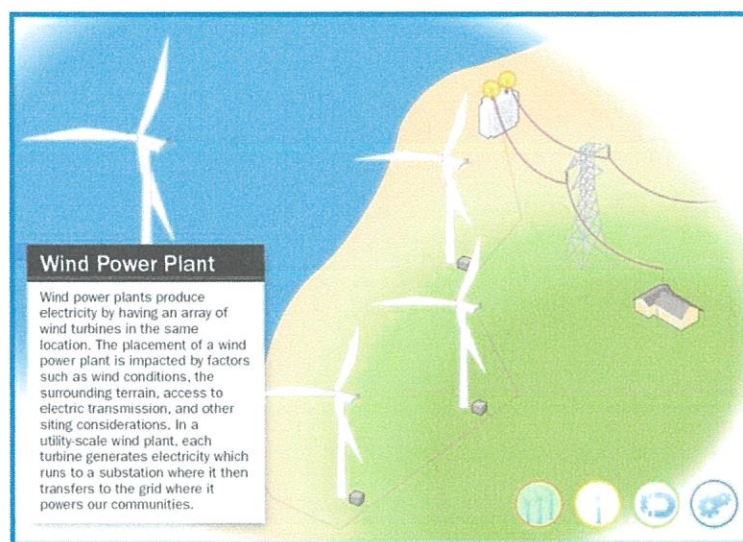
2) พลังงานลม (Wind Energy)

พลังงานลม เป็นพลังงานหมุนเวียนรูปแบบหนึ่งที่ใช้ประโยชน์จากพลังงานลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยกังหันลมเพื่อแปลงการเคลื่อนที่ของใบพัดที่ถูกผลักโดยอากาศ (พลังงานจลน์) ให้เป็น

พลังงานไฟฟ้า ซึ่งต้องอาศัยเทคโนโลยีบางอย่าง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่บนยอดหอคอย ด้านหลังใบพัด และอยู่ในส่วนหัว (nacelle) ของกังหันลม และ IEA คาดว่าภายในปี 2030 การผลิตพลังงานลมมีสัดส่วนเพิ่มขึ้น เกือบถึง 940 GW ต่อปี หรือคิดเป็น 70% ของที่ผลิตได้เมื่อปี 2023

พลังงานลมมีเทคโนโลยี 2 แบบ ได้แก่

1. เทคโนโลยี Onshore wind ใช้ประโยชน์จากทรัพยากรลมในท้องถิ่นเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วการติดตั้งและบำรุงรักษาจะง่ายและประหยัดกว่าเมื่อเทียบกับ Offshore wind
2. เทคโนโลยี Offshore wind คือ ฟาร์มกังหันลมที่ตั้งอยู่เหนือน้ำ ซึ่งความเร็วลมที่สูงกว่าและสม่ำเสมอกว่า สามารถนำไปสู่การผลิตพลังงานได้มากขึ้น แม้ว่าจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า แต่การติดตั้งนอกชายฝั่งมักมีต้นทุนที่สูงกว่าและมีความท้าทายด้านโลจิสติกส์ในการพัฒนา

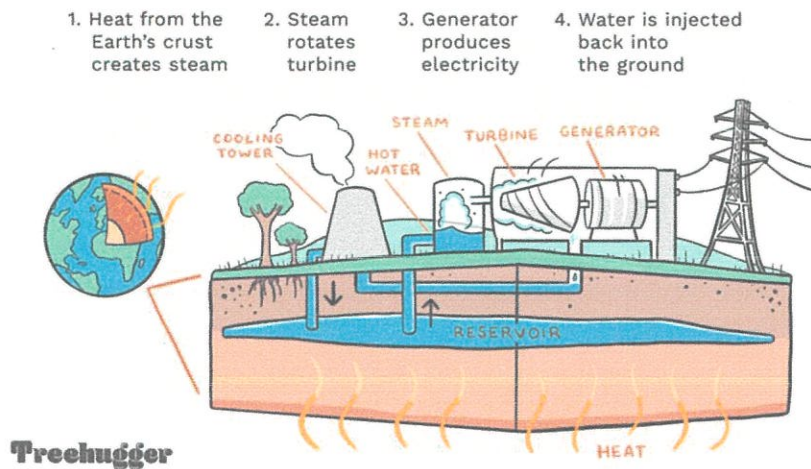


Source: spglobal.com

3) พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal Energy)

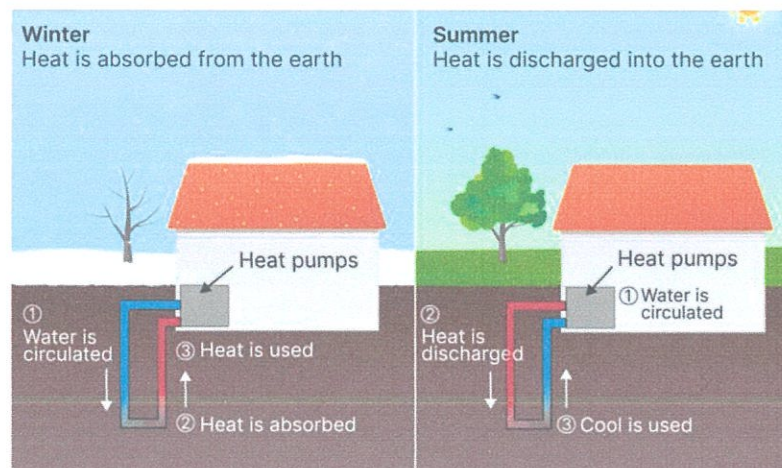
พลังงานความร้อนใต้พิภพ คือ พลังงานความร้อนตามธรรมชาติของโลกที่ถูกกักเก็บไว้ใต้เปลือกโลก ซึ่งมาจากการก่อตัวของโลกเมื่อหลายพันล้านปีก่อนและการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสี มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ในหลากหลายรูปแบบ เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า การทำความร้อนสำหรับอาคาร การเกษตร และการใช้งานทางอุตสาหกรรม

Geothermal power plants ผลิตไฟฟ้าโดยใช้ความร้อนจากส่วนลึกของโลก โดยทั่วไปแล้ว โรงไฟฟ้าเหล่านี้ต้องการแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพที่มีอุณหภูมิสูง ตั้งแต่ 300°F ถึง 700°F ซึ่งสามารถเข้าถึงได้ผ่านบ่อไอน้ำแห้งหรือบ่อน้ำร้อน กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการแปลงความร้อนนี้เป็นไอน้ำ ซึ่งนำไปขับเคลื่อนกังหันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยโรงไฟฟ้าเหล่านี้มีขนาดกะทัดรัดและมีพื้นที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานอื่นๆ เช่น ถ่านหิน หรือพลังงานแสงอาทิตย์ โรงไฟฟ้าเหล่านี้มีประสิทธิภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิภาคที่มีกิจกรรมความร้อนใต้พิภพสูง เช่น พื้นที่ภูเขาไฟ



Source: Treehugger / Hilary Allison

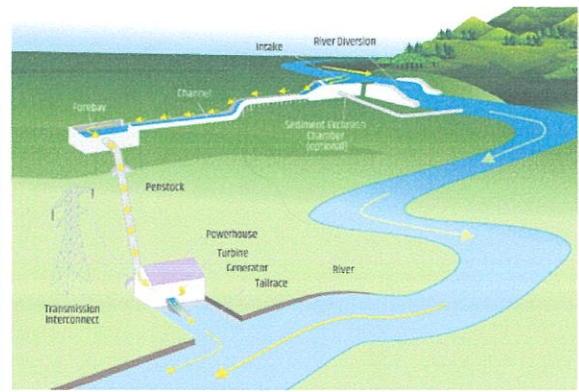
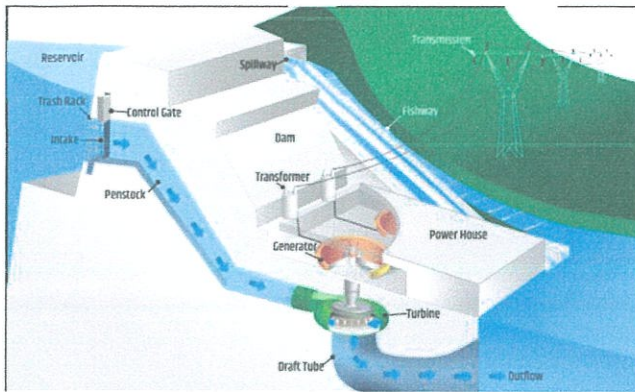
ขณะที่ Geothermal heat pumps ทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิที่ค่อนข้างคงที่ของโลกใกล้พื้นผิว ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 45°F ถึง 75°F ส่วนใหญ่ใช้เพื่อทำความร้อนและทำความเย็นอาคารมากกว่าการผลิตกระแสไฟฟ้า ระบบนี้ทำงานโดยการหมุนเวียนของเหลวผ่านท่อใต้ดิน ดูดซับความร้อนจากพื้นดินในฤดูหนาว และกระจายความร้อนกลับสู่พื้นดินในฤดูร้อน Geothermal heat pumps ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอาคารที่พักอาศัยและอาคารพาณิชย์ แม้จะมีต้นทุนที่สูงแต่ก็ส่งผลตอบแทนที่คุ้มค่าในระยะยาว



Source: A Student's Guide to Global Climate Change | US EPA

4) พลังงานน้ำ (Hydropower)

พลังงานน้ำ หรือที่รู้จักกันในชื่อพลังงานไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นพลังงานหมุนเวียนรูปแบบหนึ่งที่ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ประโยชน์จากพลังงานจากการเคลื่อนที่ของน้ำ กระบวนการนี้โดยทั่วไปเกี่ยวข้องกับการใช้เขื่อนหรือโครงสร้างผันน้ำเพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลตามธรรมชาติของแม่น้ำหรือแหล่งน้ำอื่น ๆ เมื่อน้ำไหลผ่านกังหันน้ำ พลังงานศักย์โน้มถ่วงหรือพลังงานจลน์ของน้ำจะถูกแปลงเป็นพลังงานกล ซึ่งจะถูกละเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พลังงานน้ำมีบทบาทสูงในการสร้างเสถียรภาพให้ระบบไฟฟ้า แต่การขยายกำลังผลิตใหม่ลดลงเพราะข้อจำกัดด้านพื้นที่และผลกระทบต่อระบบนิเวศ



Source: U.S. Department of Energy

1. เขื่อนไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydropower Dam)

เขื่อนไฟฟ้าพลังน้ำเป็นโรงงานขนาดใหญ่ที่ใช้เขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำในอ่างเก็บน้ำ น้ำที่กักเก็บนี้จะถูกปล่อยออกมาผ่านกังหันน้ำ ซึ่งจะหมุนและกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ความสามารถในการควบคุมการไหลของน้ำช่วยให้เขื่อนสามารถตอบสนองความต้องการไฟฟ้าที่ผันผวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบพลังงานน้ำประเภทนี้เรียกว่า การกักเก็บน้ำ (impoundment) และสามารถให้พลังงานได้จำนวนมาก โดยเฉพาะในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด อ่างเก็บน้ำที่สร้างขึ้นโดยเขื่อนเหล่านี้ไม่เพียงแต่ผลิตกระแสไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังมีวัตถุประสงค์หลายประการ เช่น การควบคุมน้ำท่วม การชลประทาน และกิจกรรมสันทนาการ อย่างไรก็ตาม การสร้างเขื่อนอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงการเปลี่ยนแปลงระบบนิเวศและส่งผลกระทบต่อรูปแบบการอพยพของปลา โดยในประเทศไทย

2. โรงไฟฟ้าระบบน้ำไหลผ่าน (Run-of-River)

ระบบน้ำไหลแบบแตกต่างจากเขื่อนไฟฟ้าพลังน้ำแบบดั้งเดิมตรงที่ใช้ประโยชน์จากการไหลตามธรรมชาติของแม่น้ำโดยไม่จำเป็นต้องมีอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ ระบบเหล่านี้จะเบี่ยงน้ำบางส่วนผ่านช่องทางหรือท่อส่งน้ำ ซึ่งน้ำจะไหลไปยังกังหันน้ำโดยตรง พลังงานที่ผลิตได้จะแปรผันตามกระแสน้ำในแม่น้ำ และแม้ว่าระบบเหล่านี้จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง แต่ก็มีคามยืดหยุ่นน้อยกว่าในแง่ของการกักเก็บพลังงานเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้เขื่อน โดยทั่วไป ระบบน้ำไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพธรรมชาติของแม่น้ำเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ อย่างไรก็ตาม ระบบเหล่านี้อาจยังคงส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในท้องถิ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีการเบี่ยงน้ำอย่างมีนัยสำคัญ

5) พลังงานชีวมวล และพลังงานชีวภาพ

พลังงานชีวมวล คือ พลังงานที่ผลิตจากชีวมวล หรือวัสดุชีวภาพที่ได้จากสิ่งมีชีวิตหรือสิ่งมีชีวิตที่เพิ่มมีชีวิต ซึ่งรวมถึงเศษพืช เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และของเสียจากสัตว์ สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนโดยผลิตได้ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การเผาไหม้หรือการหมัก ซึ่งเป็นทางเลือกทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล

การใช้พลังงานชีวมวลขยายตัวมากที่สุดในภาคอุตสาหกรรม รองลงมาคือภาคการขนส่งและภาคอาคาร พลังงานชีวมวลสมัยใหม่มีราคาถูกกว่าไฮโดรเจนและเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์ และมีนโยบายสนับสนุนที่เข้มแข็งในหลายภูมิภาค ตัวอย่างเช่น มีมากกว่า 60 ประเทศที่มีนโยบายเชื้อเพลิงชีวภาพเหลว ในขณะที่มีเพียงสหภาพยุโรปและสหราชอาณาจักรเท่านั้นที่มีข้อกำหนดด้านเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์

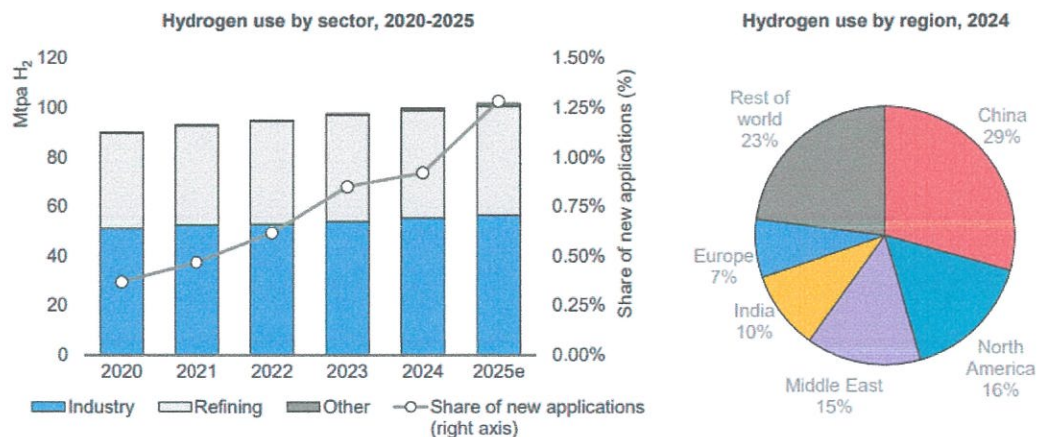
ส่วนพลังงานชีวมวลแบบแข็งส่วนใหญ่ถูกใช้เพื่อความร้อน โดยมีสัดส่วนการเพิ่มขึ้นจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนใหญ่สะท้อนถึงการขยายตัวของการผลิตน้ำตาลและเอทานอลในประเทศอินเดีย การเติบโตที่เหลือส่วนใหญ่มาจากการติดตั้งเตาชีวมวลสำหรับทำอาหารและทำความร้อนที่ได้รับการปรับปรุงในแถบแอฟริกา อินเดีย และจีน

6) พลังงานไฮโดรเจน (Hydrogen Power)

พลังงานไฮโดรเจน หมายถึง การใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงาน ไฮโดรเจนถือเป็นเชื้อเพลิงสะอาด เพราะเมื่อนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง จะผลิตเพียงน้ำเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้เท่านั้น จึงเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล

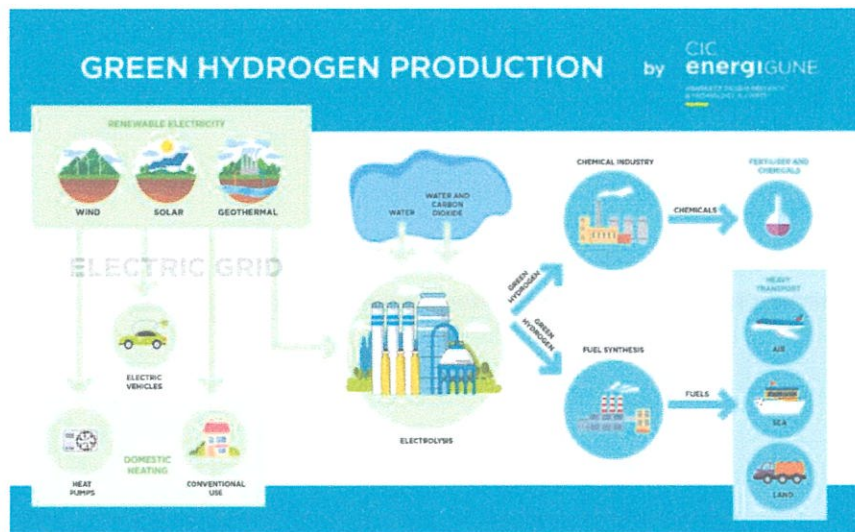
ปริมาณการใช้ไฮโดรเจนทั่วโลกพุ่งแตะระดับเกือบ 100 ล้านตันในปี 2024 เพิ่มขึ้นเพียง 2% จากปี 2023 ความต้องการไฮโดรเจนในแต่ละภูมิภาคยังคงสอดคล้องกับปีที่ผ่านมาโดยภาพรวม โดยจีนเป็นผู้บริโภครายใหญ่ที่สุด โดยมีสัดส่วนมากกว่าหนึ่งในสี่ของความต้องการทั้งหมด

Figure 2.1 Hydrogen demand by sector and by region, 2020-2025



Notes: "Other" includes transport, power generation, production of hydrogen-based fuels, buildings and biofuels upgrading. The estimated value for 2025 (2025e) is a projection based on trends observed until July 2025.
Sources: IEA analysis based on data from [Argus Media Group](#). All rights reserved, [International Fertilizer Association](#), [World Steel Association](#).

ไฮโดรเจนสีเขียวคือตัวพาพลังงานสะอาดและยั่งยืนที่ผลิตขึ้นผ่านกระบวนการ Electrolysis ซึ่งเกี่ยวข้องกับการแยกน้ำ (H₂O) ให้เป็นไฮโดรเจน (H₂) และออกซิเจน (O₂) โดยใช้ไฟฟ้า วิธีการนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากสามารถใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนได้ ทำให้ไฮโดรเจนที่ผลิตได้เป็น "พลังงานสะอาด" หรือปราศจากคาร์บอน และคาดว่าจะมีบทบาทมากในอุตสาหกรรมหนัก เช่น เหล็ก ปูนซีเมนต์ และการขนส่งหนัก แต่ยังมีต้นทุนสูงและต้องการการขยายโครงสร้างพื้นฐานในวงกว้าง



ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของไฮโดรเจนประเภทต่าง ๆ ได้แก่

- ไฮโดรเจนสีเขียว (Green Hydrogen) เป็นทางเลือกที่สะอาดที่สุด ปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ตลอดกระบวนการผลิต
- ไฮโดรเจนสีน้ำเงิน (Blue Hydrogen) ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเมื่อเทียบกับไฮโดรเจนสีเทา (Grey Hydrogen) แต่ยังคงก่อให้เกิดมลพิษทางคาร์บอน เนื่องจากประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนที่ไม่สูง
- ไฮโดรเจนสีเทามีต้นทุนทางสิ่งแวดล้อมสูงที่สุด โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นทั้งหมดสู่ชั้นบรรยากาศ

Differences between Green Hydrogen and Grey/Blue Hydrogen

	transitional solutions			
Color	GREY HYDROGEN	BLUE HYDROGEN	TURQUOISE HYDROGEN*	GREEN HYDROGEN
Process	SMR or gasification	SMR or gasification with carbon capture (85-95%)	Pyrolysis	Electrolysis
Source	Methane or coal	Methane or coal	Methane	Renewable electricity

Note: SMR = steam methane reforming.

* Turquoise hydrogen is an emerging decarbonisation option.

4. Integrating Renewable Energy into Power Systems

การผนวกพลังงานหมุนเวียนเข้าระบบไฟฟ้าต้องอาศัยโครงข่ายที่มีความยืดหยุ่นสูง เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง Smart Grid, Battery Energy Storage Systems (BESS), Virtual Power Plants (VPP) และระบบควบคุมแบบเรียลไทม์ ส่วน Distributed Energy Resources (DERs) เช่น โซลาร์บนหลังคา แบตเตอรี่ในบ้าน การชาร์จ-จ่ายไฟของ EV และ Demand Response จะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น ลดภาระของโครงข่ายหลัก และเปิดโอกาสให้ผู้บริโภคมีบทบาทเป็นผู้ผลิตพลังงาน (prosumers)

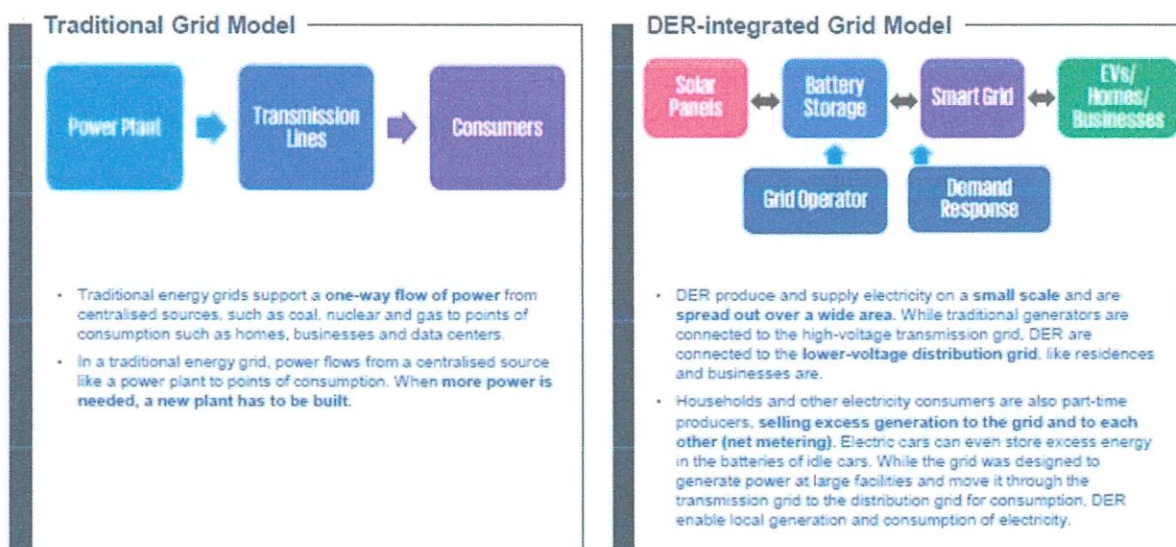
แม้ว่าพลังงานหมุนเวียนจะมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว แต่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าในหลายประเทศยังไม่พร้อมรองรับพลังงานที่ผันผวนสูง ทำให้เกิดคอขวดด้านสายส่ง (Transmission Bottleneck) ดังนั้นการผนวกพลังงานหมุนเวียนเข้าสู่ระบบจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีและการวางแผนหลายด้าน เช่น

1) การยกระดับโครงข่ายไฟฟ้า โดยใช้

- Smart Grid และ Digital Grid เพื่อเพิ่มการควบคุมแบบ real-time
- Battery Energy Storage Systems (BESS) ลดปัญหาความผันผวนของแหล่งพลังงาน
- Virtual Power Plants (VPP) รวมศักยภาพของระบบพลังงานกระจายตัว
- Forecasting & Monitoring Tools สำหรับคาดการณ์และบริหารจัดการการผลิต

2) Distributed Energy Resources (DERs)

แหล่งพลังงานแบบกระจาย (Distributed Energy Resources: DERs) คือแหล่งพลังงานขนาดเล็กที่มักตั้งอยู่ใกล้กับพื้นที่ที่มีการใช้ไฟฟ้า เช่น แผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาและแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้า การขยายตัวอย่างรวดเร็วของแหล่งพลังงานเหล่านี้ไม่เพียงแต่ส่งผลต่อวิธีการผลิตไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อวิธีการซื้อขาย การส่งมอบ และการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วย ซึ่ง DERs ทำให้เกิดความยืดหยุ่นของระบบส่งไฟฟ้า ต้นทุนลดลงจากการลดการสูญเสียจากระบบส่งไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด ส่งเสริมพลังงานสะอาดและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และยังช่วยให้ผู้บริโภคสามารถผลิตและจัดการพลังงานของตนเองได้



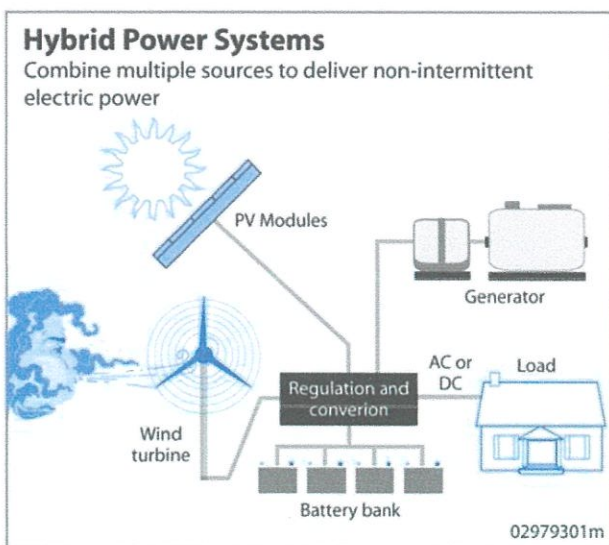
ตัวอย่างของ DERs มีดังนี้

1. Solar Panels (rooftop or community solar)
2. Wind Turbines
3. Battery Storage Systems
4. Combined Heat and Power (CHP) Units
5. Electric Vehicles (EVs) with bi-directional charging
6. Smart Thermostats and Appliances
7. Demand Response Systems



3) Hybrid Systems & Integrated Systems

ระบบโซลาร์ PV แบบไฮบริดมีลักษณะเด่นคือการผสมผสานเทคโนโลยีต่าง ๆ ในสถานที่เดียวกัน และใช้จุดเชื่อมต่อกริดเดียวกัน ซึ่งการใช้ระบบไฮบริดนี้ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการประสานต้นทุนด้วยการใช้โครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและลดต้นทุนทางการเงินสำหรับพลังงานหมุนเวียน และยังสามารถใช้ระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อช่วยกักเก็บพลังงานหมุนเวียนส่วนเกินไว้และนำเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด



5. Scaling Renewable Energy Deployment and a Just Transition

สิ่งสำคัญที่ต้องตระหนักเมื่อประเมินโอกาสในการขยายขนาดพลังงานหมุนเวียน คือความท้าทายที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการบำรุงรักษา หรือแม้กระทั่งการเร่งผลักดันที่จำเป็นต่อการบรรลุพันธสัญญา G20 ที่จะเพิ่มกำลังการผลิตพลังงานหมุนเวียนเป็นสามเท่าภายในปี 2573 การขาดแคลนดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อไปทั่วโลก และอาจจะส่งผลต่อการบรรลุเป้าหมายของข้อตกลงปารีส

นอกจากนี้ โลกกำลังเผชิญกับ “วิกฤตพลังงานสามเท่า” คือการแสวงหาพลังงานที่ปลอดภัย ราคาไม่แพง และยั่งยืน หากปราศจากการขยายขนาดแหล่งพลังงานหมุนเวียนอย่างรวดเร็ว การพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลอาจคงอยู่นานกว่าที่กลยุทธ์ในปัจจุบันคาดการณ์ไว้ เพื่อเปลี่ยนไปสู่การขับเคลื่อนพลังงานคาร์บอนต่ำ จึงจำเป็นต้องเชื่อมช่องว่างระหว่างความต้องการพลังงานของสังคมและความสามารถของภาคส่วนพลังงานหมุนเวียนในการตอบสนองความต้องการเหล่านี้

5.1 อุปสรรคความท้าทายของการเร่งพลังงานหมุนเวียน

จากรายงานของ KPMG ระบุอุปสรรคสำคัญ 10 ประการ ได้แก่

1. โครงสร้างตลาดไฟฟ้าไม่เอื้อต่อการเติบโต
2. ความเสี่ยงด้านต้นทุนเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้น
3. ความล้าสมัยของโครงข่ายไฟฟ้า
4. การอนุญาตใช้เวลานาน
5. Supply chain ถูกจำกัดโดยผู้ผลิตไม่กี่ประเทศ
6. ต้นทุนการจัดเก็บพลังงานสูง
7. ความเสี่ยงด้านผลกระทบต่อธรรมชาติและชุมชน
8. ความเสี่ยงในตลาดเกิดใหม่
9. การกระจุกตัวของแร่หายาก
10. ความไม่ยอมรับของสังคม

ซึ่งการแก้ไขอุปสรรคต้องอาศัยการปฏิรูปนโยบาย การลงทุน และความร่วมมือระหว่างภาครัฐ-เอกชนในทุกระดับ

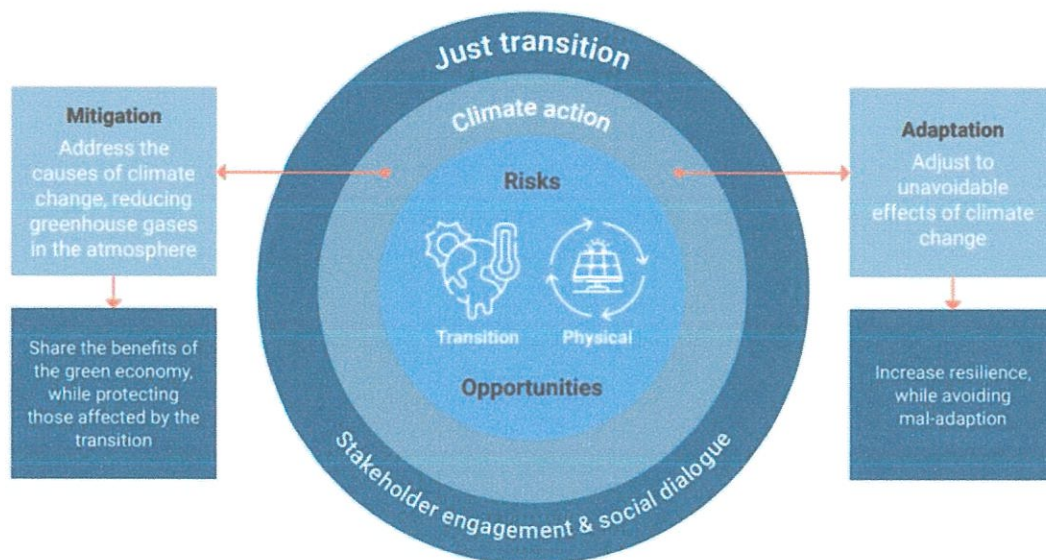
5.2 Just Transition และความเสี่ยงของพลังงานฟอสซิล

การเปลี่ยนผ่านที่เป็นธรรม (Just Transition) คือกรอบการทำงานที่มุ่งสร้างหลักประกันว่าการเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำที่ยั่งยืนนั้นมีความเท่าเทียมและครอบคลุม โดยตอบสนองความต้องการของทุกชุมชน โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุมชนที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดจากการเปลี่ยนแปลงด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ องค์การแรงงานระหว่างประเทศ (ILO) ให้คำนิยามไว้ว่า “การทำให้เศรษฐกิจเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นธรรมและครอบคลุมมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้สำหรับทุกคนที่เกี่ยวข้อง สร้างโอกาสการทำงานที่เหมาะสม และไม่ทิ้งใครไว้ข้างหลัง” ต้องมีการ reskill/upskill แรงงาน และช่วยเหลือชุมชนในพื้นที่พึ่งพาฟอสซิล นอกจากนี้ยังฟอสซิลมีความเสี่ยงกลายเป็น Stranded Assets หากโลกเดินหน้าสู่ Net Zero อย่างจริงจัง โดยหลากหลายประเทศ เช่น อินโดนีเซียตั้งเป้าลดการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลง 50% ภายในปี 2583 และยุติการผลิตไฟฟ้าทั้งหมดภายในปี 2593 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ

Just Energy Transition Partnership (JETP) และพันธสัญญาที่จะลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี 2563 มาเลเซียตั้งเป้าหมายลดกำลังการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลง 50% ภายในปี 2578 และ 100% ภายในปี 2587 เดนมาร์กและคอซตาริกา ร่วมกันก่อตั้ง Beyond Oil and Gas Alliance (BOGA) โดยมุ่งมั่นที่จะยุติการสำรวจน้ำมันและก๊าซธรรมชาติครั้งใหม่ เพื่อให้การเปลี่ยนผ่านเป็นธรรมต้องพิจารณาในประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

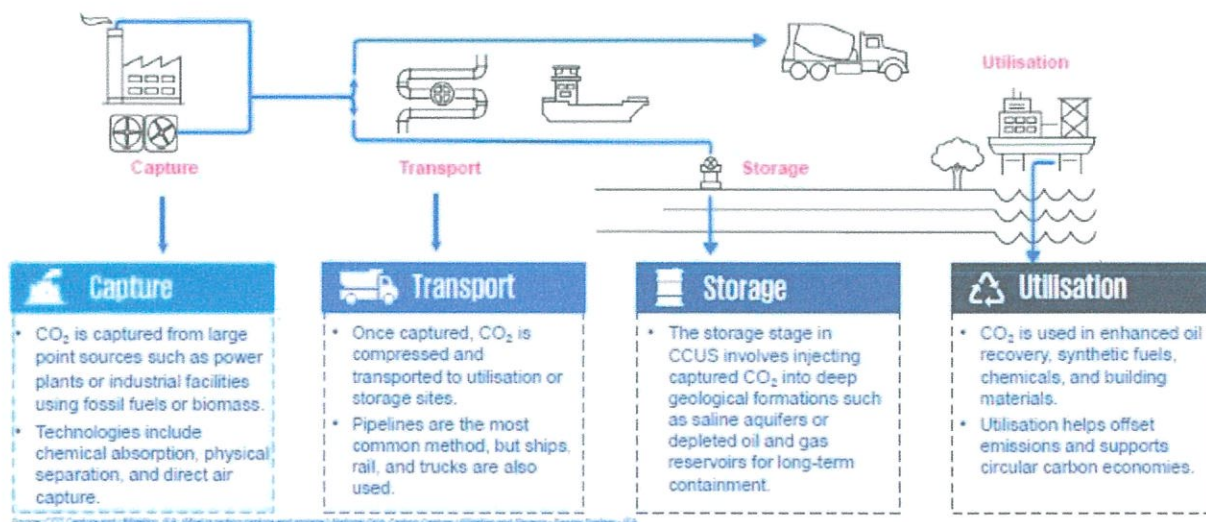
- 1) การช่วยเหลือแรงงานในภาคฟอสซิล
- 2) การพัฒนาทักษะแรงงานใหม่
- 3) การปกป้องชุมชนรายได้น้อย
- 4) การป้องกันผลกระทบต่อชนพื้นเมืองและความหลากหลายทางชีวภาพ

ตัวอย่าง เช่น กลุ่มเหมืองถ่านหินในโปแลนด์ ได้รับเงินทุนจากรัฐบาลและ EU เพื่อฝึกอบรมแรงงานใหม่ การลงทุนในอุตสาหกรรมใหม่ และการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานเพื่อดึงดูดโอกาสทางธุรกิจที่หลากหลาย จึงช่วยบรรเทาผลกระทบทางเศรษฐกิจจากการปิดเหมืองได้ หรือผู้ผลิตรายอื่น เช่น General Motors กำลังฝึกอบรมพนักงานใหม่เพื่อเปลี่ยนไปใช้ยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อให้แน่ใจว่าทักษะของพนักงานยังคงมีความสำคัญและการจ้างงานยังคงอยู่



6. เทคโนโลยี CCUS และบทบาทต่อการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานคาร์บอนต่ำ

เทคโนโลยี Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS) เป็นกระบวนการที่ดักจับ CO₂ จากแหล่งอุตสาหกรรม แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ในผลิตภัณฑ์ เช่น เชื้อเพลิง พลาสติก และวัสดุอื่น ๆ ซึ่งจะช่วยลดการปล่อยมลพิษและให้คาร์บอนมีชีวิตใหม่ที่มีประโยชน์ CCUS เป็นกลไกสำคัญของการขับเคลื่อนสู่เป้าหมาย Net-Zero โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมที่ลดการปล่อยได้ยาก (Hard-to-abate sectors) เช่น เหล็ก ปูนซีเมนต์ และเคมี จากหลักฐานเชิงวิเคราะห์ของ IEA และ IPCC พบว่า CCUS มีส่วนสำคัญต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกทั้งในระยะสั้นและระยะยาว อีกทั้งยังมีบทบาทต่อระบบพลังงานใหม่ เช่น ไฮโดรเจน การผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ และการลบคาร์บอนแบบถาวร (Carbon Dioxide Removal)



6.1 ความจำเป็นและบทบาทของ CCUS ต่อการลดการปล่อยคาร์บอน

ภาคอุตสาหกรรมหนักหลายประเภทมีอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูง และไม่สามารถเปลี่ยนผ่านด้วยพลังงานไฟฟ้าหรือระบบพลังงานสะอาดได้อย่างเต็มรูปแบบ เช่น ปูนซีเมนต์ เหล็ก และเคมี ดังนั้น CCUS จึงมีความจำเป็นต่อการบรรลุเป้าหมาย Net Zero สามารถลดการปล่อยได้ทั้งจากกระบวนการผลิตและปล่อยไอเสีย ซึ่งเทคโนโลยีอื่นไม่สามารถทดแทนได้ ช่วยลดต้นทุนการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หากไม่มี CCUS ต้นทุนการลดโลกร้อนอาจเพิ่มขึ้นกว่า 2 เท่า ซึ่งในขณะนี้หลายประเทศกำลังพิจารณาให้ CCUS เป็นหนึ่งในยุทธศาสตร์ Net Zero (เช่น สหรัฐฯ EU ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย)

6.2 Key CCUS Pathways: DAC, BECCS และแนวทางกำจัดคาร์บอนอื่น ๆ

การบรรลุเป้าหมาย Net Zero ภายในกลางศตวรรษจำเป็นต้องมีเทคโนโลยี CCUS ที่ไม่เพียงลดการปล่อยจากอุตสาหกรรม แต่ยังรวมถึงเทคโนโลยี Carbon Dioxide Removal (CDR) เพื่อกำจัดคาร์บอนสะสมในชั้นบรรยากาศ เทคโนโลยีที่ถือเป็นแกนหลักของ CDR ได้แก่ Direct Air Capture (DAC), Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) และแนวทางกำจัดคาร์บอนอื่น ๆ ที่ใช้กระบวนการทางธรรมชาติและวิศวกรรมร่วมกัน

6.2.1 Direct Air Capture (DAC)

DAC เป็นเทคโนโลยีที่ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศโดยตรง โดยใช้ตัวดูดซับหรือสารละลายเคมีที่มีประสิทธิภาพสูง แม้ความเข้มข้น CO₂ ในอากาศจะต่ำ แต่ DAC มีข้อได้เปรียบสำคัญคือสามารถติดตั้งได้ในทุกพื้นที่และไม่ต้องอาศัยแหล่งปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรม จุดเด่นของ DAC คือ ช่วยสร้างคาร์บอนเครดิตคุณภาพสูง (high-integrity CDR credits) และปล่อยคาร์บอนเป็นศูนย์ สามารถรองรับความต้องการกำจัดคาร์บอนส่วนที่ผลิตไม่ได้ เช่น ภาคการบินและเกษตรกรรม แต่ก็ยังมีข้อจำกัดและความท้าทายคือ ใช้พลังงานจำนวนมากและมีต้นทุนสูงที่สุดในเทคโนโลยี CDR (~300–600 USD/ตัน CO₂)

6.2.2 Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)

BECCS เป็นเทคโนโลยีที่ผสมผสานการผลิตพลังงานจากชีวมวลเข้ากับระบบดักจับและกักเก็บคาร์บอน โดยชีวมวลมีคุณสมบัติดูดซับ CO_2 ในระยะเติบโต เมื่อนำมาผลิตพลังงานและดักจับ CO_2 กลับมาเก็บถาวร จึงเกิดผลลัพธ์เป็นคาร์บอนลบสุทธิ บทบาทสำคัญของ BECCS คือ เป็นแหล่ง negative emissions ระดับใหญ่ที่สุดที่สามารถพัฒนาเชิงพาณิชย์ภายใน 5–10 ปี รองรับการผลิตไฟฟ้าชีวมวล การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ และโรงงานพลังงานความร้อน ซึ่งมีความเหมาะสมสูงในประเทศเกษตรกรรมที่มีเศษวัสดุจำนวนมาก เช่น ประเทศไทย (แกลบ ฟาง ชานอ้อย ชังข้าวโพด ฯลฯ)

6.2.3 แนวทางการกำจัดคาร์บอนอื่น ๆ (Other Carbon Removal Pathways)

นอกจาก DAC และ BECCS ยังมีแนวทางการกำจัดคาร์บอนที่พัฒนาร่วมกับกระบวนการธรรมชาติและอุตสาหกรรม ได้แก่

1) Carbon Mineralisation การทำให้ CO_2 ทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุ เช่น แมกนีเซียม และแคลเซียม เพื่อเปลี่ยนเป็นหินคาร์บอเนต กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นในชั้นหินใต้ดินหรือในวัสดุก่อสร้าง เช่น คอนกรีต ทำให้เกิดการกักเก็บคาร์บอนถาวรในระดับพันปีขึ้นไป

2) Biochar การเผาชีวมวลแบบจำกัดออกซิเจนเพื่อให้ได้ถ่านชีวภาพ ซึ่งสามารถเก็บคาร์บอนได้เป็นเวลาหลายร้อยปี พร้อมทั้งช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน ความสามารถอุ้มน้ำ และลดการใช้ปุ๋ยเคมี จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับพื้นที่เกษตรกรรมในประเทศไทย

3) Ocean-based CDR การดึง CO_2 จากน้ำทะเลผ่านกระบวนการแยกเคมีหรือเร่งปฏิกิริยาแร่ธาตุในทะเล ตัวอย่างเช่น โครงการ Equatic ที่ใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัด CO_2 จากน้ำทะเล พร้อมผลิตไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนสุทธิติดลบ

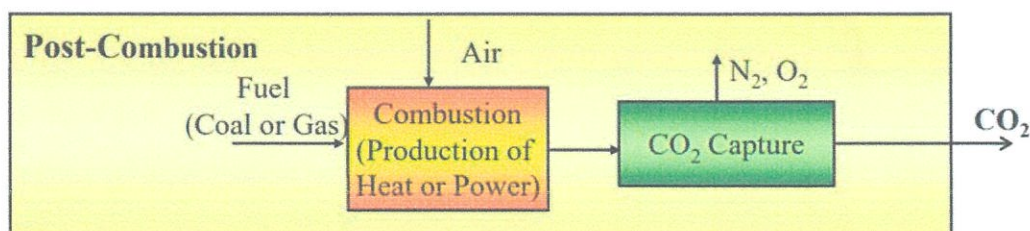
4) Enhanced Weathering การบดแร่ซิลิเกตให้ละเอียดแล้วโปรยลงบนพื้นผิวดินหรือชายฝั่ง เพื่อเร่งปฏิกิริยาดูด CO_2 จากบรรยากาศตามธรรมชาติ แม้ต้องใช้พื้นที่มาก แต่เป็นแนวทางที่มีศักยภาพในระยะยาว

6.3 กระบวนการและเทคโนโลยี CCUS

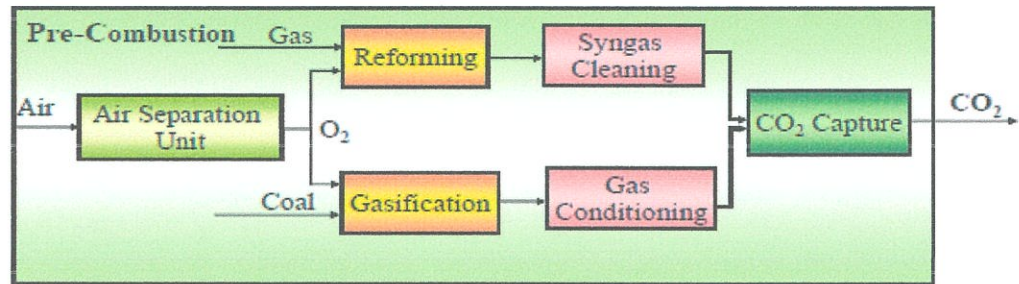
ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1. การดักจับ (Capture)

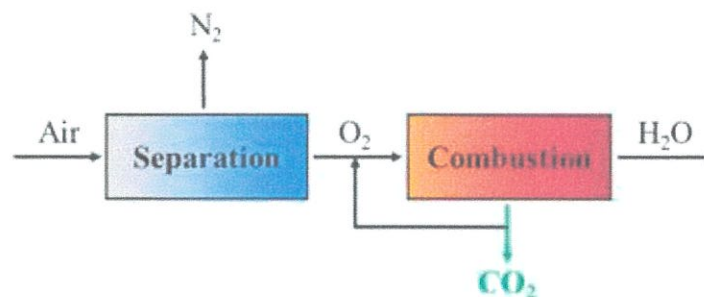
1) Post-combustion กำจัด CO_2 ออกจากก๊าซไอเสียโดยใช้ตัวทำละลายทางเคมี เช่น amine-based solvents เหมาะกับโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม และถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่แพร่หลายที่สุดในปัจจุบัน



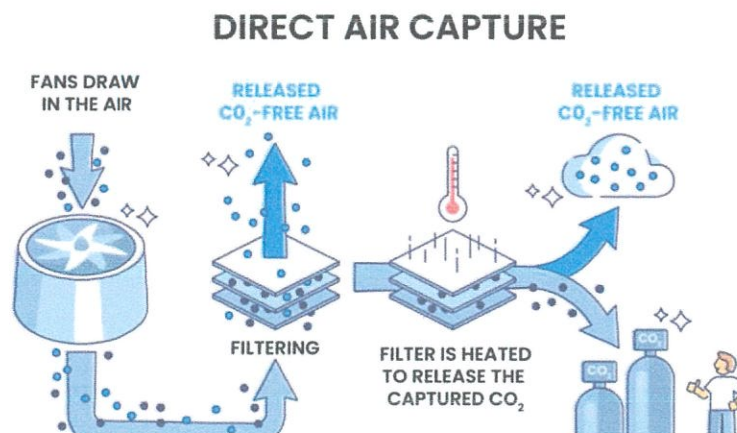
2) Pre-combustion เชื้อเพลิงถูกเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซ; แยก CO_2 ออกก่อนการเผาไหม้
จะเริ่มต้น



3) Oxy-fuel การเผาไหม้ในออกซิเจนช่วยลดความยุ่งยากในการดักจับก๊าซไอเสียที่อุดมไปด้วย CO_2



4) Direct Air Capture (DAC): ดักจับ CO_2 จากอากาศโดยตรงโดยใช้สารดูดซับ แม้จะมีต้นทุนที่สูงมาก แต่ถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีความจำเป็นต่อการลดคาร์บอนให้เป็นศูนย์



2. การขนส่ง (Transport)

- 1) ท่อส่ง: วิธีที่ประหยัดที่สุดสำหรับการขนส่ง CO_2 ขนาดใหญ่
- 2) การขนส่ง: CO_2 เหลวที่ขนส่งในถังสำหรับการขนส่งนอกชายฝั่ง
- 3) การขนส่งทางรถไฟและรถบรรทุก: ใช้สำหรับโซลูชันการขนส่ง CO_2 ขนาดเล็กที่ยืดหยุ่น

3. การใช้ประโยชน์ (Utilisation)

- 1) Mineralisation: CO₂ ทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุเพื่อสร้างคาร์บอเนตที่เสถียร
- 2) Concrete curing: ฉีด CO₂ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีตและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
- 3) Synthetic fuels: CO₂ และไฮโดรเจนถูกแปลงเป็นเชื้อเพลิงเหลวคาร์บอนต่ำ
- 4) Urea production: CO₂ ใช้ในกระบวนการผลิตปุ๋ยแอมโมเนีย
- 5) Algae cultivation: CO₂ กระตุ้นการเจริญเติบโตของสาหร่ายสำหรับเชื้อเพลิงชีวภาพและผลิตภัณฑ์ชีวภาพ
- 6) Carbonated products: CO₂ ใช้ในเครื่องดื่มและการใช้งานในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก
- 7) Plastics and polymers: CO₂ ถูกแปลงเป็นโพลีคาร์บอเนต

4. การกักเก็บถาวร (Storage)

- 1) ชั้นหินอุ้มน้ำเกลือลึก: CO₂ ถูกฉีดเข้าไปในชั้นหินพูนที่อัดแน่นไปด้วยน้ำเกลือลึก
- 2) แหล่งกักเก็บน้ำมันและก๊าซที่หมดแล้ว: โครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่รองรับการกักเก็บ CO₂ ในธรณีวิทยาที่รู้จัก
- 3) Enhanced Oil Recovery (EOR): CO₂ ช่วยเพิ่มผลผลิตน้ำมัน และสามารถกักเก็บก๊าซใต้ดินได้บางส่วน

6.4 ข้อจำกัดและความท้าทายของการใช้ CCUS

6.4.1 ด้านเทคนิค

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมหนัก เช่น ปูนซีเมนต์ เหล็ก และเคมี เกิด CO₂ จากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง ไม่สามารถใช้พลังงานสะอาดทดแทนได้อย่างเต็มรูปแบบ อีกทั้งโรงงานยังมีอายุยาวและตั้งอยู่ใกล้ชุมชน ทำให้ปรับปรุงโครงสร้างท่อและระบบขนส่งทำได้ยาก รวมถึงความหลากหลายของก๊าซไอเสียทำให้การดักจับต้องใช้เทคโนโลยีเฉพาะ

6.4.2 ด้านเศรษฐศาสตร์และต้นทุน

เทคโนโลยีมีต้นทุนสูงทำให้ยังไม่คุ้มเชิงพาณิชย์ การขนส่งและกักเก็บมีต้นทุนสูงขึ้นหากแหล่งกำเนิดอยู่ห่างจากพื้นที่กักเก็บ และในปัจจุบันก็ยังขาดความชัดเจนของรายได้ในอนาคต (เช่น คาร์บอนเครดิต) ทำให้โครงการมีความเสี่ยงสูง

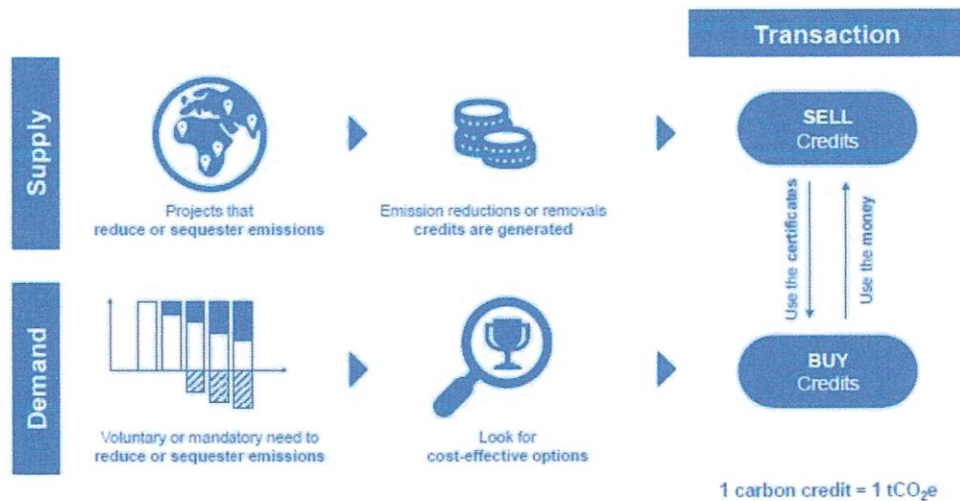
6.4.3 ด้านสิ่งแวดล้อม/สังคม

มีความเสี่ยงการรั่วไหลของ CO₂ ซึ่งจำเป็นต้องมีระบบ monitoring ในระยะยาว และหากใช้พลังงานฟอสซิลในการดักจับ อาจลดประโยชน์สุทธิทางคาร์บอน และการยอมรับของสาธารณะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการ

7. ตลาดคาร์บอนและแรงจูงใจ (Carbon Markets and Incentives)

7.1 กลไกราคาและตลาดคาร์บอน

ตลาดคาร์บอนทำหน้าที่กำหนด “ราคา” ให้กับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทำให้บริษัทต่าง ๆ ต้องเลือกลดการปล่อย (mitigation) หรือ ซื้อโควตา (allowances) หรือ ลงทุนในเทคโนโลยี เช่น CCUS ที่ทำให้ต้นทุนระยะยาวต่ำกว่า ซึ่งหากไม่มีการกำหนดราคาคาร์บอน CCUS จะไม่คุ้มค่าทางการเงิน เพราะต้นทุนดักจับอยู่ที่ประมาณ 50–150 USD/tCO₂ ขึ้นกับเทคโนโลยี



7.2 ประเภทของ Carbon Pricing

7.2.1 Carbon Tax

เป็นภาษีที่เก็บจากการปล่อย CO₂ โดยตรง ประเทศที่มีการใช้การเก็บภาษีคาร์บอน ได้แก่ สิงคโปร์ อยู่ที่อัตรา \$25/tCO₂e และจะเพิ่มขึ้นแบบขั้นบันไดเป็น \$45–50 ในปี 2030 ญี่ปุ่น และ แคนาดา มีข้อดีคือสามารถคาดการณ์ราคาได้ เหมาะสำหรับวางแผนการลงทุนใน CCUS แต่มีข้อเสียคือหากราคาคาร์บอนในตลาดต่ำเกินไป ทำให้เกิดแรงจูงใจในระดับที่ต่ำเนื่องจากไม่คุ้มค่า



7.2.2 Emission Trading System (ETS)

การกำหนด “เพดานการปล่อย (cap)” และให้ผู้ประกอบการสามารถซื้อหรือขายโควต้าได้ ตัวอย่างประเทศที่มีการใช้ระบบ ETS ได้แก่ ประเทศเกาหลีใต้ จีน และประเทศในยุโรป ซึ่งการที่มีราคาคาร์บอนที่สูงและคงที่ ทำให้บริษัทในอุตสาหกรรมปูนและเหล็กลงทุนติดตั้ง CCUS

7.2.3 Voluntary Carbon Markets (VCM)

ใช้สำหรับโครงการที่ลดหรือกักเก็บ CO₂ แต่ไม่อยู่ในระบบ ETS เช่น ป่าไม้ ไบโอชาร์ CCUS-based Removal Offsets (future category)

7.3 แรงจูงใจของประเทศหลัก

ในหลายประเทศที่มีการสร้างแรงจูงใจให้มีการลงทุนใน CCUS เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดการปล่อยคาร์บอน เช่น

- สหรัฐอเมริกา ให้เครดิตภาษีสูงสุด ~85 USD/t (storage) ทำให้โครงการ CCUS ในโรงไฟฟ้าและอุตสาหกรรมเกิดขึ้นมากที่สุดในโลก
- สหภาพยุโรปมีการสนับสนุนโครงการ CCS/CCUS และร่วมกับ CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) โดยจำกัดให้อุตสาหกรรมของประเทศคู่ค้าจำเป็นต้องลดคาร์บอน เช่น แผนลงทุน CCS ในการผลิตปูน-เหล็กเพื่อส่งออกสู่ EU
- สิงคโปร์ ได้มีการเก็บภาษีคาร์บอนเพิ่มขึ้นแบบขั้นบันไดและจะอยู่ที่ประมาณ S\$45–50 ในปี 2030 รวมถึงการอนุญาตให้อุตสาหกรรมใช้ International Carbon Credits เป็นส่วนหนึ่งของภาระหน้าที่ภาษี และสนับสนุนบริษัทที่ลงทุนโครงสร้าง CCUS Hub รวมถึงดำเนินการเจรจา CCS Transport & Storage ร่วมกับอินโดนีเซีย-มาเลเซีย

7.4 บทบาทตลาดคาร์บอนต่อโครงสร้างพื้นฐาน CCUS

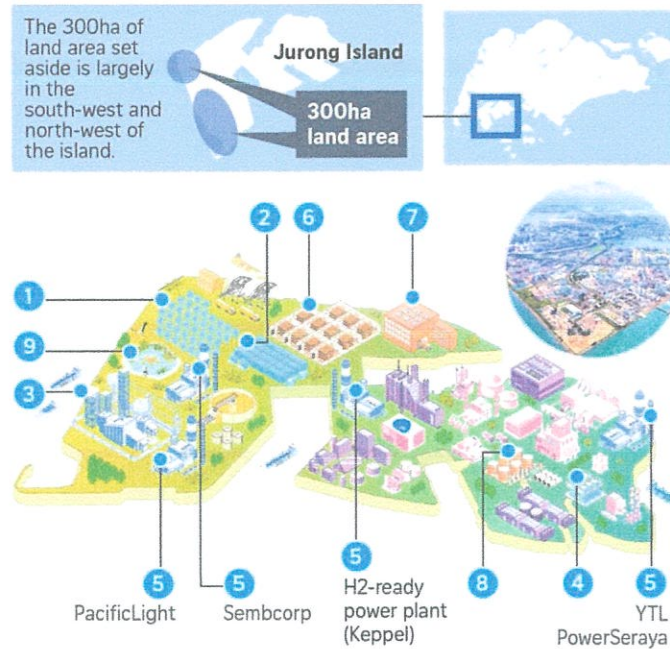
การซื้อขายคาร์บอนในตลาดส่งผลให้สามารถสร้างความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของ CCUS (Financial Viability) ซึ่งจะเป็นการช่วยลดต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรมหนัก กระตุ้นให้เกิดโครงสร้างพื้นฐานร่วม (Shared CO₂ Networks) และเปิดโอกาสให้ภาคเอกชนสร้างรายได้จาก Carbon Credits

8. Singapore's Perspective on CCUS and Key CCUS Initiatives

ประเทศสิงคโปร์ให้ความสำคัญกับ CCUS เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านพื้นที่สำหรับพลังงานหมุนเวียนขนาดใหญ่ และพึ่งพาอุตสาหกรรมปิโตรเคมี/ refining/ energy hub เป็นรายได้หลัก ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนา CCUS เพื่อรักษาความสามารถแข่งขันของภาคอุตสาหกรรม ลดความเสี่ยงจาก CBAM ของสหภาพยุโรป และมีความต้องการทำให้สิงคโปร์เป็น “Regional Carbon Services Hub” ซึ่งสิงคโปร์มองว่ามีโอกาสเติบโตของอุตสาหกรรมบริการ สามารถเป็นศูนย์กลางของการซื้อ-ขาย carbon credits แต่แม้สิงคโปร์จะมีศักยภาพด้านการเงินและนโยบาย แต่ไม่มีแหล่งกักเก็บภายในประเทศ จึงยังคงต้องมโนบายความร่วมมือกับประเทศเพื่อนบ้าน เช่น ประเทศอินโดนีเซียและมาเลเซีย โดยโครงการที่สำคัญของสิงคโปร์ ได้แก่ Carbon Capture Testbed at Jurong Island, Utilisation project: production of synthetic

fuels (methanol/kerosene), Mineralisation R&D with JTC + industrial partners, Algae-based utilisation pilot plant

Jurong Island's green shift



NOTE: The locations of these projects are not mapped to scale.

9. นโยบายพลังงานระดับโลก (Global Energy Policy Landscape)

9.1 เป้าหมาย Net Zero 2050 และความสำคัญของพลังงาน

วิสัยทัศน์ Net Zero ภายในปี 2050 เป็นหนึ่งในจุดศูนย์กลางของนโยบายพลังงานระหว่างประเทศ โดยอาศัยกรอบ Paris Agreement ซึ่งทุกประเทศสมาชิกต้องตั้งเป้า NDCs (Nationally Determined Contributions) เพื่อจำกัดอุณหภูมิโลกให้อยู่ในระดับ “ต่ำกว่า 2°C” หรือ “พยายามไม่เกิน 1.5°C”

การบรรลุ Net Zero ต้องอาศัยหลายแนวทางควบคู่ ได้แก่

- 1) Decarbonising Energy Supply ขยายพลังงานหมุนเวียนและเลิกใช้ถ่านหิน
- 2) Electrification of End-use ผลักดัน EV, heat pump, grid modernization
- 3) Energy Efficiency ปรับปรุงอาคาร เครื่องจักร และกระบวนการผลิต
- 4) Carbon Capture & Storage ดักจับคาร์บอนในอุตสาหกรรมหนัก เช่น ซีเมนต์ เหล็ก
- 5) Green Fuels ใช้ไฮโดรเจนเขียวและเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอุตสาหกรรมและคมนาคมหนัก

9.2 กรอบนโยบายระหว่างประเทศ

1) Paris Agreement เป็นรากฐานทางการเมือง ระดับชาติ และระหว่างประเทศสำหรับนโยบายลดคาร์บอน

2) SDG 7 (Sustainable Development Goal 7) ส่งเสริมการเข้าถึงพลังงานสะอาด ราคา ย่อมเยา ซึ่งเป็นเป้าหมายที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนผ่านพลังงาน

3) European Green Deal & Fit for 55 ตัวอย่างนโยบายภูมิภาคที่ออกแบบเพื่อเร่งลดการปล่อยคาร์บอนภายในยุโรป ผ่านมาตรการเช่นตลาดคาร์บอน (EU ETS) และ Fit for 55 ที่เร่งลดการปล่อยก๊าซ 55% ภายในปี 2030 การเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy Directive) และการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Directive)

4) กลไกตลาดคาร์บอน & carbon pricing เป็นกลไกสำคัญที่ช่วย “internalize” ต้นทุนสิ่งแวดล้อมของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

9.3 การลงทุนและการเงินระหว่างประเทศ

หลายประเทศต้องการการลงทุนมหาศาลเพื่อขยายโครงสร้างพื้นฐานพลังงานหมุนเวียนและระบบกักเก็บพลังงาน บทบาทของสถาบันการเงินระหว่างประเทศ มีความสำคัญในการสนับสนุนโปรเจกต์พลังงานสะอาด โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา รัฐบาลควรมีการกำหนดนโยบายให้ชัดเจน (long-term stable policy) เพื่อดึงดูดการลงทุนภาคเอกชนในพลังงานสะอาด

10. ASEAN Energy Cooperation and National Policies

10.1 APAEC – ASEAN Plan of Action for Energy Cooperation

APAEC เป็นแผนนโยบายพลังงานระหว่าง 10 ประเทศสมาชิกอาเซียน กำหนดเป้าหมายการพัฒนาความมั่นคงด้านพลังงาน การเข้าถึง ความยั่งยืน และการบูรณาการตลาดพลังงาน โดยระยะที่ 1 (2016–2020) มุ่งประเด็นเช่น ASEAN Power Grid การอนุรักษ์พลังงาน เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด ฯลฯ และระยะที่ 2 (2021–2025) ขยายประเด็นด้าน “พลังงาน” ให้รวมการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาด (low carbon) และความยืดหยุ่น (resilience) โดยมีธีม “accelerating energy transition และ strengthening energy resilience”

โครงการหลัก ได้แก่

- 1) ASEAN Power Grid (APG) ขยายการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าข้ามพรมแดน
- 2) Trans-ASEAN Gas Pipeline (TAGP) พัฒนาโครงข่ายก๊าซเพื่อให้เกิดตลาดร่วม
- 3) Coal & Clean Coal Technology ใช้ถ่านหินให้สะอาดขึ้น (เช่น co-firing, CCS)
- 4) Energy Efficiency & Conservation (EE&C) ลดความเข้มพลังงานของภาคเศรษฐกิจ
- 5) Renewable Energy (RE) ส่งเสริมการลงทุนในเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ไฮโดรเจน และแบตเตอรี่

6) Regional Energy Policy & Planning ประสานนโยบายพลังงานระหว่างประเทศสมาชิก

7) Civilian Nuclear Energy การพัฒนาเทคโนโลยีนิวเคลียร์พลเรือนเพื่อพลังงาน

10.2 เป้าหมายและความมุ่งมั่นใหม่ (APAEC 2026–2030)

แผน APAEC ฉบับ 2026–2030 ได้รับรองโดยอาเซียน มีเป้าหมายสำคัญ ได้แก่ สัดส่วนพลังงานหมุนเวียน (RE) เป็น 30 % ของ Total Primary Energy Supply (TPES) ภายในปี 2030 สัดส่วน RE ในกำลังการผลิตไฟฟ้า (installed capacity) ให้ถึง 45% ภายใน 2030 และการลดความเข้มพลังงาน (energy intensity) 40% เมื่อเทียบกับปีฐาน (2005) ซึ่งกลยุทธ์ของ APAEC 2026–2030 มุ่งสร้าง

“โครงสร้างพื้นฐานพลังงานเชื่อมโยง” (connectivity) ระหว่างสมาชิกอาเซียนเพื่อเสริมความมั่นคงและเร่งการเปลี่ยนผ่านไปสู่พลังงานคาร์บอนต่ำ ยังรวมถึงการส่งเสริมนวัตกรรมและเทคโนโลยีเกิดใหม่ เช่น ไฮโดรเจน ระบบจัดเก็บพลังงาน smart grid และการซื้อขายไฟฟ้าในระดับภูมิภาค

10.3 จุดแข็งและศักยภาพของความร่วมมืออาเซียน

การมีกรอบความร่วมมือระหว่างประเทศสมาชิกอาเซียนที่สนับสนุนการเปลี่ยนผ่านพลังงาน การนำเทคโนโลยีใหม่และการลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานพลังงานสะอาดเข้าสู่ตลาดด้วยความร่วมมือถือเป็นศักยภาพของภูมิภาคในการขยายตลาดพลังงานหมุนเวียนที่ยั่งยืน ทำให้ประเทศสมาชิกสามารถค้าไฟฟ้าข้ามพรมแดน ซึ่งเอื้อต่อการใช้พลังงานหมุนเวียนที่อาจมีความผันผวนได้ อีกทั้งยังมีความสามารถในการรองรับการเปลี่ยนผ่านพลังงานแบบไฮบริด ไม่เพียงแต่พลังงานหมุนเวียนเท่านั้นแต่ยังรวมถึง clean coal แก๊ส รวมถึงการจัดเก็บอีกด้วย

10.4 ความท้าทายและอุปสรรค

แม้ว่าจะมีศักยภาพในด้านของเทคโนโลยี แต่เนื่องจากความไม่เท่าเทียมทางเศรษฐกิจ ประเทศสมาชิกในอาเซียนมีระดับพัฒนาเศรษฐกิจและโครงสร้างพื้นฐานพลังงานต่างกัน ทำให้ความสามารถในการลงทุนในเทคโนโลยีสะอาดมีความแตกต่างกันด้วย รวมไปถึงการดำเนินโครงการระดับภูมิภาคจำเป็นต้องอาศัยนโยบายและกฎหมายร่วม มาตรการความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า ซึ่งอาจเผชิญกับปัญหาทางเทคนิค กฎหมาย และการอนุญาตข้ามพรมแดน

11. Regulatory Frameworks for Integration

11.1 บทบาทของนโยบายด้านการเข้าถึงตลาด (Open Access)

การกำหนดนโยบาย Open Access ช่วยให้ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (เช่น ผู้ผลิตพลังงานหมุนเวียน) สามารถเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าและขายไฟเข้าสู่ระบบได้ นโยบายเปิดตลาดไฟฟ้า ส่งเสริมการแข่งขัน ซึ่งอาจลดต้นทุนพลังงานและกระตุ้นการลงทุนในเทคโนโลยีสีเขียว

11.2 มาตรฐานด้านการเชื่อมต่อโครงข่าย (Grid Codes & Licensing)

กฎและมาตรฐานทางเทคนิคที่ควบคุมการดำเนินงาน การเชื่อมต่อ และประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งจะกำหนดวิธีที่ผู้ผลิตไฟฟ้า ผู้ประกอบการระบบส่งไฟฟ้า และผู้บริโภคมีปฏิสัมพันธ์กับโครงข่ายไฟฟ้า มุ่งหวังที่จะรับประกันความน่าเชื่อถือ คุณภาพ ความปลอดภัย และการเข้าถึงตลาดอย่างเป็นธรรมของระบบ ซึ่งปัจจุบันหลายประเทศได้ออก grid codes เพื่อรองรับ vRE แล้ว ได้แก่ สหรัฐอเมริกา และยุโรป

11.3 เครื่องมือจูงใจเชิงนโยบายสนับสนุนและมาตรการส่งเสริม (Incentives)

นโยบายการสนับสนุน เช่น Feed-in Tariffs ส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน อาจใช้ในช่วงเริ่มต้นเพื่อเร่งการติดตั้งพลังงานหมุนเวียน และมีระบบจูงใจให้ติดตั้งแบตเตอรี่ demand response การจัดการโหลด ในภาคการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและรองรับพลังงานหมุนเวียน การใช้ภาษีคาร์บอนหรือระบบซื้อขายคาร์บอน (carbon credits) เพื่อส่งเสริมให้เทคโนโลยีสะอาดมีการแข่งขันได้ รวมไปถึงการกำกับดูแลโดยใช้ข้อมูล (Data-driven Regulation) เช่น การใช้มิเตอร์อัจฉริยะ การพยากรณ์ที่

ขับเคลื่อนด้วย AI และการจัดการกริดแบบเรียลไทม์ เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานและพฤติกรรมผู้ใช้ การส่งเสริมความโปร่งใสในตลาดพลังงาน โดยให้ข้อมูลกับสาธารณะเกี่ยวกับปริมาณการผลิต RE การส่งผ่านไฟฟ้า และปริมาณการปล่อยก๊าซ การมีส่วนร่วมของประชาชน (stakeholder engagement) ในการออกแบบนโยบายซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนผ่านยั่งยืนและได้รับการยอมรับมากขึ้น

12. Singapore's Green Plan 2030 และเป้าหมายด้านสภาพภูมิอากาศ

12.1 ภาพรวมและโครงสร้าง 5 เสาหลักของ Singapore's Green Plan

Green Plan 2030 เป็นกรอบยุทธศาสตร์ระดับชาติที่กำหนดเป้าหมายชัดเจนเพื่อให้สิงคโปร์มุ่งสู่ Net Zero ปี 2050 โดยมี 5 เสาหลัก ได้แก่

- 1) City in Nature – เพิ่มพื้นที่สีเขียวและความยืดหยุ่นของระบบนิเวศในเมือง
- 2) Energy Reset – ปรับระบบพลังงานให้สะอาดและมีประสิทธิภาพสูง
- 3) Sustainable Living – ลดของเสีย น้ำ และคาร์บอนในชีวิตประจำวัน
- 4) Green Economy – สร้างงานใหม่ เพิ่มความสามารถในการแข่งขันธุรกิจสีเขียว
- 5) Resilient Future – เพิ่มความพร้อมต่อความเสี่ยงสภาพภูมิอากาศ

นโยบายเหล่านี้ถูกออกแบบให้ส่งเสริมความมั่นคงพลังงาน ความสามารถแข่งขันเศรษฐกิจ และความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมแบบบูรณาการ

12.2 เป้าหมายสำคัญด้านพลังงานและคาร์บอน

สิงคโปร์มีความพยายามในการขับเคลื่อนสู่ Net Zero ภายในปี 2050 โดยมียุทธศาสตร์ดำเนินการผ่าน 4 วัตถุประสงค์หลัก ได้แก่ 1) การเปลี่ยนผ่านภาคธุรกิจ 2) การลงทุนในเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำ CCUS, Low-carbon hydrogen, Solar และระบบ storage 3) ความร่วมมือระหว่างประเทศ และ 4) การใช้พลังงานสะอาดในระดับชุมชน เช่น การขนส่งพลังงานสะอาด

แต่เนื่องจากข้อจำกัดด้านพื้นที่ จึงเน้นการผลิตพลังงานหมุนเวียนจากโซลาร์เป็นหลัก และมีเป้าหมายในการเพิ่มกำลังการผลิตโซลาร์เป็น 2 GWp ภายในปี 2030 มาตรการยานยนต์สะอาด ผลักดันการใช้ EV และเพิ่มการติดตั้ง EV charging points 60,000 จุด และทำให้การขนส่งทั้งหมดใช้พลังงานสะอาดภายในปี 2040 เพิ่มอาคารที่มีมาตรฐาน Super Low Energy ซึ่งสามารถช่วยประหยัดพลังงานได้มากกว่า 60% และ Green Mark รวมถึงการศึกษาและพัฒนาไฮโดรเจน การกักเก็บพลังงาน และ CCUS ควบคู่ไปด้วย เพื่อมุ่งสู่อุตสาหกรรมสีเขียวและบริการคาร์บอนในระดับภูมิภาค และ

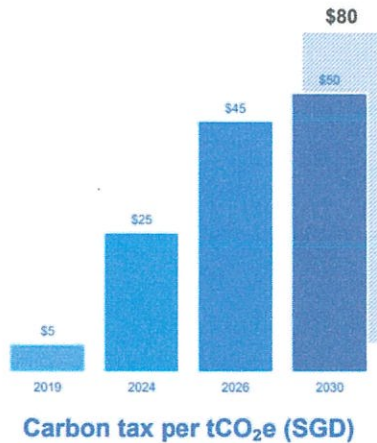
12.3 Nationally Determined Contribution (NDC)

สิงคโปร์ปรับเป้าหมาย NDC ปี 2035 เป็น ลดการปล่อยคาร์บอนเหลือเพียง 45–50 MtCO₂e และสนับสนุนการใช้กลไกตลาดคาร์บอน Article 6–ITMOs เพื่อลดต้นทุนการลดคาร์บอนในระยะยาว

13. กลไกภาษีคาร์บอนและผลกระทบต่อเศรษฐกิจสีเขียว

13.1 Carbon Tax ของสิงคโปร์

สิงคโปร์เป็นประเทศแรกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่บังคับใช้ภาษีคาร์บอนครอบคลุมกว่า 80% ของการปล่อยทั่วประเทศ โดยมีทิศทางปรับราคาขึ้นอย่างชัดเจน นโยบายนี้เป็นแรงจูงใจสำคัญต่ออุตสาหกรรมให้ลงทุนด้านประสิทธิภาพพลังงานและเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำ



- S\$25/tCO₂e (2024–2025)
- S\$45/tCO₂e (2026–2027)
- เป้าหมายระยะยาว S\$50–80/tCO₂e ภายในปี 2030

13.2 การเชื่อมโยงกับตลาดคาร์บอนและ ITMOs

การอนุญาตให้ใช้ carbon credits สูงสุด 5–10% ช่วยให้อุตสาหกรรมสามารถบริหารต้นทุนและกระตุ้นการเติบโตของ Carbon Services Hub เพื่อลดต้นทุนการลดคาร์บอนในระยะยาว ซึ่งสิงคโปร์มุ่งเป็นศูนย์กลางคาร์บอนระดับภูมิภาค

14. ความก้าวหน้าในการพัฒนาพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy)

14.1 การขยายโซลาร์พลังงานแสงอาทิตย์

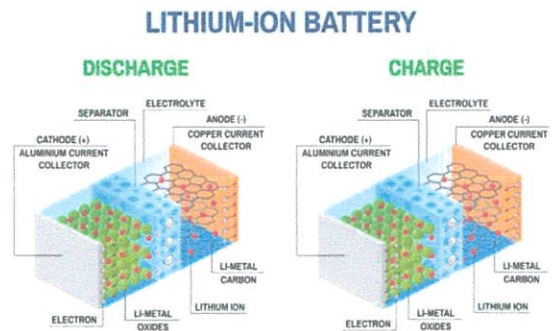
แม้ว่าสิงคโปร์จะมีข้อจำกัดด้านพื้นที่ แต่สามารถบรรลุเป้าหมาย 1.5 GWp ล่วงหน้า และมุ่งสู่ 2 GWp ภายในปี 2030 โดยมีการพัฒนาโซลาร์ผ่านหลายรูปแบบ ได้แก่

- 1) Floating Solar เช่น โครงการที่ Tengeh Reservoir (60 MWp)
- 2) โซลาร์บน HDBs มากกว่า 3,900 อาคาร (SolarNova)
- 3) โซลาร์ภาคอุตสาหกรรมผ่านโครงการ JTC SolarRoof/SolarLand
- 4) โซลาร์สำหรับบ้านพักอาศัยและอาคารเชิงพาณิชย์



14.2 นวัตกรรมระบบกักเก็บพลังงาน (Energy System Storage: ESS)

ESS มีบทบาทสำคัญต่อการเสถียรของระบบไฟฟ้าที่พึ่งพาพลังงาน intermittent เช่น โซลาร์ ตัวอย่างสำคัญคือโครงการที่ Jurong Island ESS 285 MWh ซึ่งถือเป็นโครงการที่ใหญ่ที่สุดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ใช้งาน Lithium แบตเตอรี่ที่ตอบสนองเร็วและช่วยเสริมความมั่นคงของกริดไฟฟ้า



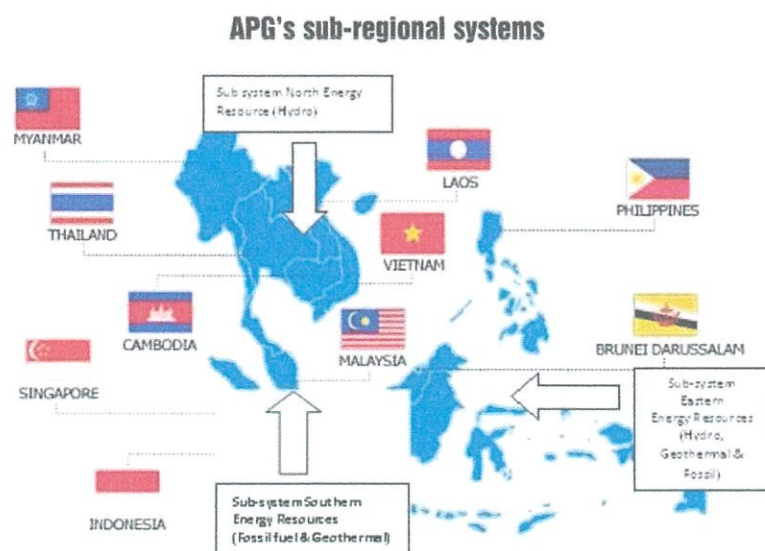
15. ความร่วมมือด้านพลังงานระดับภูมิภาคและ ASEAN Power Grid

15.1 กลยุทธ์นำเข้าไฟฟ้าคาร์บอนต่ำ

สิงคโปร์มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ผลิตไฟฟ้าสะอาด จึงใช้แนวทางนำเข้าไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้าน โดยตั้งเป้านำเข้า 4 GW ภายในปี 2035 และปรับเพิ่มเป็น 6 GW ณ ปัจจุบัน ออกใบอนุญาตนำเข้าพลังงานจากอินโดนีเซีย กัมพูชา เวียดนาม และออสเตรเลีย

15.2 LTMS-PIP และกรอบ APG

โครงการ Lao–Thailand–Malaysia–Singapore Power Integration Project (LTMS-PIP) เป็นตัวอย่างสำคัญของความร่วมมือพหุภาคี โดยระยะที่ 1 มีการนำเข้า 100 MW ขยายเป็น 200 MW ในระยะที่ 2 และเปิดทางการซื้อขายไฟฟ้าแบบหลายทิศทาง



Source: HAPUA presentation at the GTR conference, "Power Transmission in Southeast Asia"

16. Singapore's energy efficiency programmes

สิงคโปร์ตั้งเป้าการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในทุกภาคส่วนเป็นรากฐานสำคัญของการเปลี่ยนผ่านสู่คาร์บอนต่ำและบรรลุเป้าหมายการปล่อยมลพิษสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี 2050

16.1 มาตรการด้านอุตสาหกรรม

- 1) Energy Efficiency Fund (E2F) สนับสนุนเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูง
- 2) Energy Efficiency Grant (EEG) สำหรับภาคอาหารและค้าปลีก
- 3) มาตรฐานประสิทธิภาพระบบ เช่น มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ระบบลมอัด เครื่องทำน้ำเย็น

16.2 Green Buildings และโครงสร้างเมืองยั่งยืน

Singapore Green Building Masterplan 2030 ตั้ง "เป้าหมาย 80-80-80" ดังนี้

- 1) 80% อาคารต้องเป็นอาคารสีเขียว
- 2) 80% โครงการใหม่ต้องเป็น Super Low Energy
- 3) 80% อาคารประสิทธิภาพสูงต้องลดการใช้พลังงานเทียบฐานปี 2005

16.3 ประสิทธิภาพภาคขนส่ง

- 1) เป้าหมาย EV 100% ภายในปี 2040
- 2) ติดตั้ง 60,000 EV charging points ภายในปี 2030
- 3) ขยายเครือข่ายรถไฟฟ้าถึง 360 km ในต้นทศวรรษ 2030

17. นวัตกรรมเชิงนโยบาย และการเงินสีเขียว (Green Finance & Policy Innovations)

17.1 การเงินสีเขียวเพื่อสนับสนุนโครงการพลังงานสะอาด

สิงคโปร์มีพันธกรณีภายใต้แผนสีเขียวปี 2030 ที่จะระดมเงินทุนสีเขียวมูลค่า 5,000 ล้านดอลลาร์ผ่านพันธบัตรภายในปี 2030 เพื่อให้สิงคโปร์กลายเป็นศูนย์กลางชั้นนำด้านการเงินสีเขียวที่จะช่วยอำนวยความสะดวกในการเปลี่ยนผ่านของเอเชียไปสู่อนาคตที่มีคาร์บอนต่ำ โดยมีเครื่องมือขับเคลื่อนสำคัญ ได้แก่ 1) Carbon Tax 2) Singapore-Asia Taxonomy 3) MAS Green Bond และ 4) Loan Grant schemes

กรอบทางการเงินที่รัฐบาลจัดทำขึ้นในรูปแบบของการใช้จ่ายภาครัฐและการระดมทุนทางการเงินสีเขียว ได้สร้างรากฐานและเป็นบริบทที่โครงการพลังงานสะอาดหลักของสิงคโปร์ดำเนินการอยู่ โดยมีเสาหลักทางการเงินหลัก ประกอบด้วย

1) Financing Asia's Transition Partnership (FAST-P) ซึ่งเปิดตัวในการประชุม COP28 ระดมเงินทุนจากภาครัฐ ภาคเอกชน และองค์กรการกุศลเพื่อการเปลี่ยนผ่านพลังงานสะอาดของเอเชีย สิงคโปร์ให้คำมั่นสัญญาสนับสนุนเงินทุนแบบมีเงื่อนไข (COP29) มูลค่า 500 ล้านดอลลาร์สหรัฐ โครงการ Green Investments Partnership ได้รับเงินทุนสนับสนุน 10 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในรอบแรกเมื่อเดือนกันยายน 2568 ซึ่งดึงดูดนักลงทุนจากออสเตรเลีย เนเธอร์แลนด์ สหราชอาณาจักร และสหภาพยุโรป โดย FAST-P มุ่งเป้าไปที่พลังงานหมุนเวียน โครงสร้างพื้นฐานยานยนต์ไฟฟ้า การขนส่งที่ยั่งยืน และการจัดการน้ำทั่วเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โครงการนี้ช่วยลดความเสี่ยงของโครงการที่มีมูลค่าทางบัญชีต่ำ ช่วยให้โรงไฟฟ้าไฮโดรเจนอย่าง Keppel และ PacificLight สามารถเข้าถึงแหล่งเงินทุนที่มีการแข่งขันสูงได้

2) Future Energy Fund บริหารจัดการโดยสำนักงานตลาดพลังงาน (Energy Market Authority) กองทุนนี้สนับสนุนเงินทุนสำหรับสายเคเบิลใต้น้ำสำหรับการนำเข้าพลังงานหมุนเวียน สถานีขนส่งไฮโดรเจน และศักยภาพด้านพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่อการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานของสิงคโปร์

18. Economics of Renewable Energy Projects

18.1 ภาพรวมการระดมทุนและแนวโน้มการเติบโต

ความต้องการพลังงานหมุนเวียนทั่วโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยคาดว่าภายในปี 2030 จะมีการติดตั้งกำลังผลิตใหม่กว่า 4,600 GW โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนสูงสุดของการเติบโตทั้งหมด สะท้อนแนวโน้มตลาดโลกที่มุ่งลดคาร์บอนจากภาคพลังงาน และการพัฒนาความสามารถของเทคโนโลยีให้ต้นทุนต่ำลงอย่างต่อเนื่อง

การเจริญเติบโตดังกล่าวผลักดันให้เกิดกลไกเงินทุนหลากหลาย เช่น Green bonds, Concessional loans, Grants, Blended finance, และ Power purchase agreement (PPA) โดยโครงสร้างเงินทุนทั่วไปอยู่ที่สัดส่วนหนี้สินต่อส่วนผู้ถือหุ้นประมาณ 70:30 หรือ 80:20 ขึ้นอยู่กับระดับความเสี่ยงและความน่าเชื่อถือของโครงการ

18.2 โครงสร้างต้นทุนโครงการพลังงานหมุนเวียน

โครงการพลังงานหมุนเวียนจำเป็นต้องมีการวางแผนทางการเงิน โดยพิจารณาจากตัวชี้วัดต่าง ๆ ได้แก่ Capital Expenditure per kilowatt (CAPEX), Operating Expenditure per kilowatt (OPEX), Levelised Cost of Energy (LCOE), และ Marginal Abatement Cost Curve (MACC) เพื่อประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจและผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศ ตัวชี้วัดเหล่านี้เป็นแนวทางในการตัดสินใจลงทุน การเลือกเทคโนโลยี และกรอบนโยบาย ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาดทั่วโลก โดย

CapEx คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเบื้องต้นที่จำเป็นต่อการสร้างโครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงานหมุนเวียน ซึ่งรวมถึงค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ต่างๆ เช่น แผงโซลาร์เซลล์ กังหันลม ระบบสายส่ง ครอบคลุมค่าใช้จ่ายในการจัดหาที่ดิน การเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า และบริการด้านวิศวกรรม จัดซื้อจัดจ้าง และก่อสร้าง (EPC)

OpEx คือ ค่าใช้จ่ายต่อเนื่องในการดำเนินงานและบำรุงรักษาสินทรัพย์พลังงานหมุนเวียน ซึ่งรวมถึงการบำรุงรักษาตามปกติ การประกันภัย การฝึกอบรมพนักงาน และการติดตามผลการปฏิบัติงาน ตัวอย่างเช่น ฟาร์มพลังงานแสงอาทิตย์ใช้โดรนและเซ็นเซอร์สำหรับการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ ช่วยลดระยะเวลาหยุดทำงานและค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบ

LCOE คือ ค่าที่ใช้เพื่อประเมินและเปรียบเทียบต้นทุนเฉลี่ยต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง (MWh) ของไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดอายุโครงการ ครอบคลุมค่าใช้จ่ายด้านการลงทุน (CAPEX) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (OPEX) ต้นทุนทางการเงิน และผลผลิตพลังงานที่คาดการณ์ไว้

MACC คือ ต้นทุนต่อหนึ่งตันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่หลีกเลี่ยงได้ และช่วยจัดลำดับความสำคัญของเทคโนโลยีโดยพิจารณาจากผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศและความคุ้มค่า ซึ่ง

พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมมักอยู่ในกลุ่มที่มีต้นทุนต่ำแต่ส่งผลกระทบสูง ซึ่งทำให้เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

18.3 ต้นทุนตลอดอายุโครงการ (Lifecycle Cost)

ต้นทุนทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดอายุโครงการพลังงานหมุนเวียนทั้งหมด แบ่งเป็น 4 ระยะ ได้แก่ 1) Development Stage ครอบคลุมกิจกรรมทั้งหมดที่นำไปสู่การตัดสินใจที่จะดำเนินโครงการ แนวคิดและความเป็นไปได้ การจัดโครงสร้างและพิจารณาทุกระยะ 2) Construction Stage ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของขั้นตอนการสร้างหรือติดตั้งอุปกรณ์ และแรงงาน รวมถึงการดำเนินการและการทดสอบระบบ 3) Operational Stage ครอบคลุมค่าใช้จ่ายต่อเนื่องในการดำเนินงานและการบำรุงรักษา ซึ่งรวมถึงการดำเนินการและการบำรุงรักษา และ 4) Decommissioning Stage ครอบคลุมค่าใช้จ่ายในการจัดการเมื่อสิ้นสุดโครงการอย่างปลอดภัย และฟื้นฟูพื้นที่หากจำเป็น

19. Mobilising Capital for Renewable Energy

19.1 รูปแบบการจัดหาเงินทุนหลัก (Financing Approaches)

- Project Finance เป็นรูปแบบที่ใช้มากที่สุดในโครงการพลังงานหมุนเวียนขนาดใหญ่ เช่น Solar farm ขนาดใหญ่ Wind farm, Hydro, และ ESS มีข้อดีคือไม่กระทบงบดุลของบริษัทผู้พัฒนา และเพิ่มโอกาสในการเข้าถึงเงินกู้ขนาดใหญ่ แต่มีข้อจำกัดคือต้องการสัญญา Power Purchase Agreement: PPA ระยะยาวที่มั่นคง และจะต้องผ่านการตรวจสอบทางเทคนิค สิ่งแวดล้อม และกฎหมายอย่างละเอียด

- Corporate Finance เป็นรูปแบบที่ใช้ความแข็งแกร่งทางการเงินของบริษัทเพื่อกู้เงินแทนรายได้ของโครงการ ข้อดีคือกระบวนการปล่อยกู้ง่ายกว่า และเหมาะกับบริษัทพลังงานรายใหญ่ แต่มีข้อจำกัดคือเป็นการเพิ่มภาระหนี้ในงบดุลบริษัท

- Public-Private Partnership (PPP) เป็นรูปแบบการร่วมทุนระหว่างรัฐและเอกชน โดยรัฐสนับสนุนโครงสร้างพื้นฐานหรือการรับประกันความเสี่ยง และเอกชนลงทุนด้านเทคโนโลยี การดำเนินงาน และการจัดการโครงการ ซึ่งเหมาะกับโครงการที่ภาคเอกชนแบกรับความเสี่ยงเพียงลำพังไม่ได้ เช่น ระบบโครงข่ายไฟฟ้า Microgrid หรือ offshore wind

19.2 บทบาทของสถาบันการเงินระหว่างประเทศ (DFIs/ MDBs)

สถาบันการเงินต่าง ๆ เช่น ADB, World Bank, IFC, AIIB มีบทบาทสำคัญในภาคพลังงานหมุนเวียน คือ การผลักดันนโยบายสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านพลังงาน การสนับสนุนมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม และสังคม ช่วยลดความเสี่ยงและเพิ่มความน่าเชื่อถือของโครงการผ่านเงินกู้ดอกเบี้ยต่ำ เช่น Clean Technology Fund (CTF) Green Climate Fund (GCF) รวมไปถึงการรับประกันความเสี่ยงทางการเมืองและนโยบาย

20. Risk Assessment and Mitigation

20.1 ประเภทของความเสียหายหลักในโครงการพลังงานหมุนเวียน

1) Construction Risk (ความเสี่ยงระหว่างก่อสร้าง) เป็นความเสี่ยงสำคัญที่สุดช่วงเริ่มต้นของโครงการ เนื่องจากการลงทุนสูงและไม่สามารถรับรายได้จนกว่าจะแล้วเสร็จ เช่น ความล่าช้าในการก่อสร้าง (construction delay) ต้นทุนบานปลาย (cost overrun) การจัดซื้อจัดจ้างอุปกรณ์ล่าช้า โดยเฉพาะอุปกรณ์นำเข้า เช่น inverter, turbine blades ความเสี่ยงด้านราคาเหล็ก แผงโซลาร์ และวัตถุดิบสำคัญ และปัญหาด้านแรงงาน ส่งผลให้ต้นทุนดอกเบี้ยช่วงก่อสร้างเพิ่มขึ้น (Interest During Construction: IDC) และกระทบต่อการคาดการณ์กระแสเงินสดทั้งหมดของโครงการ

2) Operational Risk (ความเสี่ยงระหว่างดำเนินการ) เกิดขึ้นหลังจากโครงการเริ่มผลิตไฟฟ้า การเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ เช่น degradation rate ของแผง PV อยู่ที่ประมาณ 0.5–0.8% ต่อปี การหยุดเดินระบบ (downtime) ประสิทธิภาพต่ำกว่าเกณฑ์ (underperformance) ค่าใช้จ่ายซ่อมบำรุงที่ผันผวนตามอายุอุปกรณ์ ความผิดพลาดด้านระบบ monitoring, SCADA

3) Market Risk (ความเสี่ยงด้านตลาดและรายได้) ราคาไฟฟ้าจากตลาดเสรีผันผวน ความต้องการใช้ไฟฟ้าลดลงจากเศรษฐกิจหรือฤดูกาล ความเสี่ยงด้านอัตราแลกเปลี่ยน (FX risk) ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาต่างประเทศ การยกเลิกสัญญาซื้อไฟฟ้าในบางประเทศ (PPA off-taker default) ทำให้เกิดผลกระทบด้านรายได้ที่ไม่แน่นอน ส่งผลต่อความสามารถใช้หนี้ (Debt Service Coverage Ratio: DSCR)

4) Political & Regulatory Risk (ความเสี่ยงด้านนโยบายและข้อกำหนด) มักเกิดในประเทศกำลังพัฒนา เช่น การเปลี่ยนนโยบายอุดหนุนพลังงาน ความล่าช้าด้านใบอนุญาต (permitting bottlenecks) การปรับกฎเกณฑ์ grid connection ความเสี่ยงจากรัฐวิสาหกิจผู้รับซื้อไฟฟ้า (off-taker creditworthiness) ทำให้นักลงทุนต้องการผลตอบแทนสูงขึ้น (higher risk premium)

20.2 เครื่องมือบริหารความเสี่ยง

1) Long-Term Power Purchase Agreements (PPAs) เป็นเครื่องมือบรรเทาความเสี่ยงที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถให้ความมั่นคงด้านรายได้ในระยะยาว 15–25 ปี ลดความเสี่ยงด้านตลาด และช่วยให้โครงการได้รับเงินกู้จากสถาบันการเงิน เช่น FIT, Curtailment compensation (หากรัฐมีการสั่งลดการผลิต) และการค้ำประกันการชำระเงิน

2) Insurance & Guarantees ครอบคลุมความเสี่ยงการก่อสร้าง การดำเนินงาน และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า เช่น Construction insurance, Operational insurance, Weather insurance สำหรับ solar & wind, Performance Guarantee Insurance

3) Hedging Instruments ใช้ควบคุมความผันผวนของอัตราดอกเบี้ยและอัตราแลกเปลี่ยน เช่น FX hedging (สำหรับ solar/wind ที่นำเข้าอุปกรณ์), Interest rate swap, Commodity hedging (ซื้อออลูมิเนียม-ลิเทียมล่วงหน้า)

4) PPP Frameworks & Government Support รัฐบาลช่วยลดความเสี่ยงโดยการปรับขั้นตอนการอนุญาตโครงการ การค้ำประกันความเสี่ยงทางการเมือง (policy stability) การสนับสนุนเชื่อมต่อสายส่ง และการลดภาษีนำเข้า (import duty exemption)

21. Renewable Energy Auctions and Procurement

การประมูลพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy Auctions) เป็นกลไกหลักที่หลายประเทศใช้เพื่อจัดซื้อพลังงานหมุนเวียนด้วยต้นทุนที่ต่ำและโปร่งใส โดยสร้างการแข่งขันระหว่างผู้พัฒนาโครงการ (developers) ทำให้เกิดการลดต้นทุนอย่างยั่งยืน เพิ่มประสิทธิภาพการลงทุน และช่วยให้รัฐสามารถควบคุมคุณภาพโครงการได้ดีขึ้น

การประมูลพลังงานหมุนเวียนมีวัตถุประสงค์ คือ

- 1) ลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน
- 2) เพิ่มความโปร่งใสและประสิทธิภาพในการจัดซื้อไฟฟ้า
- 3) คัดเลือกผู้พัฒนาโครงการที่มีความพร้อม
- 4) จัดการความเสี่ยงด้านราคาและเทคโนโลยี
- 5) สนับสนุนเป้าหมายพลังงานสะอาดระยะยาวของประเทศ

21.1 รูปแบบและกลไกการออกแบบการประมูล (Auction Design)

การออกแบบการประมูลเป็นหัวใจที่กำหนดผลลัพธ์ของราคา ความเสี่ยง และความสำเร็จของโครงการ รูปแบบที่ใช้ในระดับสากล ได้แก่

1) Pay-as-Bid Auction (แบบจ่ายตามราคาที่เสนอ) ผู้ชนะจะได้รับราคาตามที่ตนเสนอ มีข้อดีคือผู้เสนอมีความสนใจในการเสนอราคาที่แท้จริง แต่มีข้อเสียที่ผู้เสนอพยายามเสนอราคาแข่งขัน อาจแพงหรือถูกเกินไป รูปแบบนี้ใช้บ่อยในประเทศอินเดีย บราซิล

2) Uniform Price Auction (ราคาเดียวสำหรับผู้ชนะทั้งหมด) ผู้ชนะได้รับราคาเดียวกันตามราคาของผู้เสนอราคาสุดท้ายที่ชนะ สามารถลดแรงกดดันในการคาดการณ์ราคาตลาด แต่มีข้อเสียคืออาจทำให้ผู้เสนอคาดหวังให้ได้ราคาสูงกว่าความเป็นจริง นิยมในบางประเทศในยุโรป

3) Vickrey Auction (Second-Price Sealed Bid) ผู้เสนอที่เสนอราคาต่ำที่สุดชนะ แต่ได้รับราคาของผู้เสนอถัดไป เสริมแรงจูงใจให้เสนอราคาต้นทุนจริง ใช้ในบางประเทศพัฒนาแล้ว

4) Hybrid Auctions ในหลายประเทศใช้ระบบผสม ไม่ได้ตัดสินที่ราคาเพียงอย่างเดียว แต่รวมถึงสถานะทางการเงิน แผนงานการก่อสร้าง ความพร้อมด้านเทคนิค และขีดความสามารถด้านสิ่งแวดล้อมและสังคม ใช้บ่อยในการประมูลโครงการ Offshore Wind หรือโครงการที่ต้องการผลลัพธ์ด้านสังคม

21.2 ขั้นตอนของการประมูลและกระบวนการจัดหาไฟฟ้า (Procurement Process)

โดยทั่วไปประกอบด้วย 6 ระยะหลัก ได้แก่

1) Pre-qualification (PQ) การคัดกรองผู้เข้าร่วมเบื้องต้น เช่น ความสามารถทางการเงิน ประสบการณ์โครงการ และประกาศนียบัตรด้านเทคนิค (technology certificate) ซึ่งกระบวนการนี้ช่วยลดความเสี่ยงในการดำเนินงานโครงการ

2) Bid Submission การยื่นข้อเสนอราคาและเอกสารประกอบ เช่น การประเมินต้นทุนโครงการ (CAPEX/OPEX) ข้อเสนอ Grid Connection และข้อเสนอด้านที่ดินและสัญญาเช่า

3) Bid Evaluation พิจารณาตามราคาเสนอ (LCOE หรือ tariff-based) ความพร้อมของโครงการ ความสามารถในการรองรับกริด ข้อเสนอคุณภาพด้านเทคโนโลยี ประเทศยุโรปบางแห่งใช้วิธี weighted evaluation เช่น ราคา 70% และคุณภาพ 30%

4) Awarding & Contracting ประกาศรายชื่อผู้ชนะและทำสัญญา PPA โดยมีองค์ประกอบสำคัญ เช่น Tariff structure ระยะเวลา 15–25 ปี การใช้ดัชนีอ้างอิงราคา ค่าชดเชยเมื่อเกิดการลดปริมาณหรือยกเลิก และค่าปรับเมื่อการดำเนินการก่อสร้างโครงการล่าช้า

5) Financial Close สถาบันการเงินตรวจสอบความน่าเชื่อถือ (bankability) หากผู้ชนะไม่สามารถจัดหาเงินทุนในเวลาที่กำหนด โควต้าจะถูกเพิกถอน

6) Project Delivery & Commercial Operation Date (COD) ภาครัฐติดตามความก้าวหน้าการก่อสร้าง การทดสอบระบบ (commissioning test) การส่งไฟฟ้าเข้าระบบตามเวลา COD มีบทลงโทษ หาก COD ล่าช้า เช่น หักเงินประกันผลงาน (performance bond)

21.3 ปัจจัยความเสี่ยงและอุปสรรคที่ทำให้การประมูลล้มเหลว (Auction Risks & Failure Factors)

1) Underbidding Risk (เสนอราคาต่ำเกินจริง) เกิดขึ้นบ่อยในตลาดแข่งขันสูง ส่งผลกระทบต่อโครงการ ทำให้ล่าช้าหรือไม่เกิดขึ้นจริง

2) Grid Connection Bottleneck ผู้ชนะหลายรายไม่สามารถเชื่อมต่อกริดได้ตามกำหนด

3) Policy Instability การเปลี่ยนแปลงระเบียบหรือข้อกำหนดอย่างกะทันหัน เช่น การยกเลิกหรือชะลอสัญญา PPA หรือปรับโครงสร้างราคาหลังการประมูล

4) Currency & Interest Rate Risks ตลาดพลังงานหมุนเวียนที่ต้องนำเข้าอุปกรณ์มีต้นทุนที่สูงขึ้นทำให้ LCOE ที่เสนอไว้ต่ำเกินจริง

5) Off-taker Creditworthiness Risk ผู้รับซื้อไฟฟ้า เช่น รัฐวิสาหกิจ มีสถานะการเงินไม่มั่นคง ทำให้นักลงทุนเรียกร้อง PPA ที่เข้มแข็งหรือการค้ำประกันจากรัฐ

3.3 ประโยชน์ที่ได้รับต่อหน่วยงานภายในสังกัดของกรมส่งเสริมการเกษตร

(โปรดระบุอย่างชัดเจน เข้าใจง่าย และนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้)

การอบรมครั้งนี้ช่วยเพิ่มขีดความสามารถของหน่วยงานในการส่งเสริมเกษตรกรไทยให้ปรับตัวสู่ระบบการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ สนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาเกษตรคาร์บอนต่ำของกรมส่งเสริมการเกษตรและยุทธศาสตร์ชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ดังนี้

1. ด้านองค์ความรู้และนวัตกรรม หน่วยงานได้รับแนวคิด เทคโนโลยี หรือวิธีการใหม่ ๆ ที่สามารถนำมาปรับใช้กับงานส่งเสริมการเกษตร เช่น พลังงานหมุนเวียนในภาคเกษตร การจัดการคาร์บอน หรือระบบเกษตรอัจฉริยะ

2. ด้านการพัฒนาโครงการและนโยบาย ความรู้ที่ได้รับสามารถนำมาพัฒนาแผนงาน โครงการ หรือกิจกรรมที่สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ของหน่วยงาน เช่น เกษตรยั่งยืน/ BCG Economy/ Smart Farmer/ เกษตรคาร์บอนต่ำ

3. ด้านการสร้างเครือข่ายและศักยภาพบุคลากร หน่วยงานมีโอกาสขยายความร่วมมือกับองค์กรระหว่างประเทศ หรือพัฒนาเจ้าหน้าที่ให้มีทักษะในการส่งเสริมการเกษตรสมัยใหม่

ส่วนที่ 4 ปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะ

4.1 ปัญหา/อุปสรรค

เนื้อหาบางส่วนมีความเชิงเทคนิคสูงและมีศัพท์เฉพาะ ทำให้ต้องใช้เวลาในการทำความเข้าใจเพิ่มเติม ตัวอย่างจากต่างประเทศบางกรณีศึกษาอาจยังห่างไกลจากบริบทการเกษตรไทย จึงต้องตีความเพิ่มเติมก่อนนำไปประยุกต์ใช้

4.2 ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ

หน่วยงานผู้ให้ทุนทั้งในและต่างประเทศได้ให้การสนับสนุนและประสานงานอย่างมีประสิทธิภาพ เจ้าหน้าที่ให้คำแนะนำที่ชัดเจนและเป็นประโยชน์ในทุกขั้นตอนของการเข้าร่วมโครงการ ทั้งในด้านเอกสาร การเดินทาง ส่งผลให้การเข้าร่วมอบรมเป็นไปอย่างราบรื่นและบรรลุตามวัตถุประสงค์ของโครงการ

ส่วนที่ 5 จะนำความรู้ที่ได้รับไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานอย่างไรบ้าง

* ขอให้ระบุข้อเสนอแนะ/แนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้หรือขยายผลการยกระดับการพัฒนาภาคการเกษตรของประเทศไทย

แนวทางในการยกระดับภาคการเกษตรของประเทศไทยให้ก้าวสู่ “ระบบการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พึ่งพาพลังงานสะอาด และปล่อยคาร์บอนต่ำ” ดังนี้

1. พัฒนานองค์ความรู้และเทคโนโลยีด้านพลังงานสะอาดในภาคเกษตร เพื่อสนับสนุนการใช้พลังงานหมุนเวียนในกิจกรรมการผลิต เช่น ระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ โรงอบผลผลิตพลังงานสะอาด ฟาร์มอัจฉริยะ และการจัดการของเสียทางการเกษตรให้เกิดพลังงานชีวมวล

2. ยกระดับการส่งเสริมเกษตรคาร์บอนต่ำ (Low-carbon Agriculture) โดยนำแนวคิดเรื่องการบริหารจัดการคาร์บอนและตลาดคาร์บอนมาประยุกต์ใช้ในแผนงานส่งเสริมการเกษตร เช่น การพัฒนาเกษตรกรต้นแบบด้าน Carbon Credit หรือกิจกรรมดูดซับคาร์บอนในพื้นที่เกษตร การเพิ่มมูลค่าเศรษฐกิจเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งเป็นการช่วยลดมลพิษจากการเผาในพื้นที่เกษตร รวมถึงการสร้างโอกาสทางรายได้จากกิจกรรมดูดซับคาร์บอน

3. สนับสนุนการขับเคลื่อนนโยบาย BCG Economy และเป้าหมาย Carbon Neutrality 2050 โดยบูรณาการพลังงานหมุนเวียนกับระบบเกษตรยั่งยืน ลดการพึ่งพาพลังงานฟอสซิล เพื่อให้สอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาของประเทศไทย

4. เพิ่มศักยภาพบุคลากรและสร้างเครือข่ายความร่วมมือกับภาคเอกชน มหาวิทยาลัย และองค์กรระหว่างประเทศ เพื่อแลกเปลี่ยนองค์ความรู้และเทคโนโลยีด้านพลังงานสะอาดในภาคเกษตร

ส่วนที่ 6 ความคิดเห็นของผู้บังคับบัญชา

รายงานสรุปผลการเข้าร่วมอบรมมีศทพครบถ้วนและสะท้อน
ถึงการได้รับความรู้ด้านพลังงานหมุนเวียน การจัดการคาร์บอน
และแนวทางการเปลี่ยนผ่านสู่สังคมคาร์บอนต่ำอย่างเป็นระบบ
เนื้อหา มีตาม เชื่อมโยง กับภารกิจของ กรมส่งเสริมการเกษตร
และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนงานส่งเสริมการเกษตร
ในระดับพื้นที่ได้ อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

ลงชื่อ.....

ตำแหน่ง (นางสาววรพรรณ ..อังคสิทธิ์).....

นางสาววรพรรณ ..อังคสิทธิ์
นักพัฒนาบุคคลชำนาญการพิเศษ รักษาการแทน
ผู้อำนวยการสำนักงานส่งเสริมและพัฒนากิจการเกษตรที่ ๖ จังหวัดเชียงใหม่

ผู้ประสานงาน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวภัทรพร มาลาพล

โทรศัพท์ 0 5390 8666

e-mail: ssk6north@doae.mail.go.th