

06

พลังงานและความยั่งยืนในอนาคต: โอกาสและความท้าทาย ENERGY AND SUSTAINABLE FUTURE: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES

ศุภวิน วัชรมูล^a และ รุ่งกานต์ นุ้ยสินธุ์^b✉

^{a,b}ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Supawin Watcharamul^a and Roongkan Nuisin^b✉

^{a,b}Department of Environmental Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University

✉roongkan.n@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการทบทวนสถานการณ์และความต้องการใช้ทรัพยากรสำหรับการบริโภคอุปโภคและพลังงาน ซึ่งมีตัวแปรจากปัจจัยหลายด้าน ได้แก่ ความก้าวหน้าของอุตสาหกรรม เทคโนโลยี และการเพิ่มจำนวนประชากร โดยเฉพาะการดำรงชีวิตในสังคมปัจจุบันที่ต้องการความสะดวกสบายมนุษย์เป็นผู้บริโภคในลำดับขั้นสุดท้ายในห่วงโซ่อาหาร กิจกรรมจากมนุษย์จึงสัมพันธ์กับสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศอย่างเลี่ยงไม่ได้ การพัฒนาเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมทำให้ทรัพยากรโลกถูกนำมาใช้ในปริมาณมาก เกิดผลกระทบต่อความหลากหลายทางชีวภาพ การเพิ่มจำนวนประชากรทำให้ปริมาณและอัตราการใช้พลังงานจากแหล่งกำเนิดพลังงานมากขึ้น ส่งผลต่อทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไปซึ่งมีปริมาณจำกัด ทั้งยังมีอัตราเกิดขึ้นทดแทนช้า การเสื่อมถอยของระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : พลังงาน ทรัพยากร ฟอสซิล ทดแทนได้

Abstract

This article reviews the situation of affordable resources needs for human and energy consumption has been dramatically increased due to various factors, for example, industrial and technology development and population growth. With the present style of comfort-living and having humans as the top consumer in the food web, there is no doubt that any anthropogenic activities can affect other living organisms in the ecosystem. Developments in technology and industries consume enormous amounts of natural resources and cause adverse effects on biodiversity. Population growth is also one of the major problems that increases the world's energy consumption, which results in the reduction of non-renewable natural resources. These non-renewable resources are limited and cannot be recovered. Our ecosystems and environment conditions are being greatly destroyed.

Keywords : Energy, Resource, Fossil, Renewable

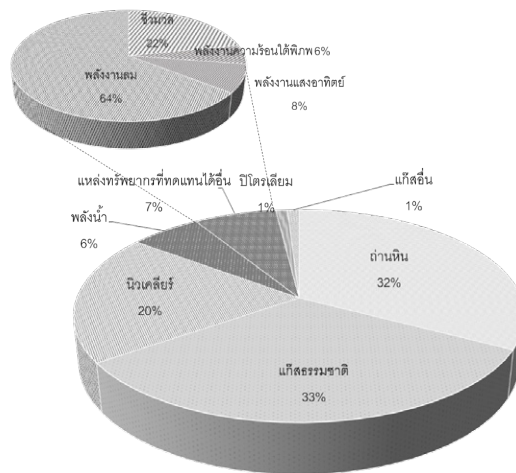


บทนำ

ความยั่งยืน (sustainability) เป็นสิ่งที่มนุษย์ตระหนักถึงมากขึ้นในปัจจุบันและมีความสำคัญต่อการกำหนดทิศทางและนโยบายในการพัฒนาประเทศ ความยั่งยืนมีความจำเป็นต่อการสร้างสมดุลในสังคมระหว่างการพัฒนาคุณภาพชีวิตมนุษย์และการอนุรักษ์ทรัพยากร องค์ประกอบสำคัญที่จะกล่าวถึงในบทความนี้ คือ พลังงาน เนื่องจากพลังงานมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ การพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลังงานเพื่อตอบสนองการใช้ประโยชน์ของพลังงานรูปแบบต่าง ๆ สำหรับอุปโภคในการเป็นเชื้อเพลิงกำเนิดไฟฟ้า การผลิตอุตสาหกรรม และการขนส่ง ต้องอาศัยทรัพยากรหลายแหล่ง ทั้งทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปและทรัพยากรที่หมุนเวียนได้ ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงเมื่อนำทรัพยากรมาใช้งาน ประกอบด้วย ปริมาณสำรองของทรัพยากรนั้น เทคโนโลยีที่ใช้ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ รวมทั้งผลกระทบต่อระบบนิเวศ ปัญหาสิ่งแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก เป็นต้น บทความนี้จะอภิปรายภาพรวมของทรัพยากรหลักสำหรับผลิตพลังงาน โอกาสในการใช้ทรัพยากรทดแทน เพื่อความยั่งยืนของทรัพยากรธรรมชาติและตอบสนองการใช้พลังงานในอนาคต

พลังงานจากทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป

ทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป (non-renewable resources) คือ ทรัพยากรธรรมชาติที่หมดสิ้นและธรรมชาติไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่เพื่อทดแทนทรัพยากรเดิมที่หมดลงไปได้ หรือมีอัตราการเกิดขึ้นทดแทนใช้เวลานานเทียบเท่ากับระยะเวลาการใช้งาน ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติและสินแร่ จึงต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด สถานการณ์พลังงานโลกในช่วงเวลาที่ผ่านมา พลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่ได้จากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel) ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน ร้อยละ 32.9 23.8 และ 29.2 ตามลำดับ (BP, 2016) ในขณะที่พลังงานนิวเคลียร์ ร้อยละ 4.4 และพลังงานจากทรัพยากรที่ทดแทนได้ ร้อยละ 0.8 ประเทศสหรัฐอเมริกา มีสัดส่วนของพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งต่าง ๆ ได้แก่ แก๊สธรรมชาติ ถ่านหินและเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ร้อยละ 33 32 และ 20 ตามลำดับ (ภาพที่ 1) หน่วยงาน U.S. Energy Information Administration (U.S. EIA) ซึ่งเป็นหน่วยงานหนึ่งของกระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกา ประมาณตัวเลขของความต้องการพลังงานในโลกว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยหน่วยพลังงานที่ใช้ในภาคหลัก ได้แก่ ที่อยู่อาศัย พาณิชยกรรม อุตสาหกรรม และขนส่ง มีค่า 21.6 18.0 30.6 และ 21.7 quads BTU ตามลำดับ (quad เป็นหน่วยของพลังงาน ย่อมาจากคำว่า quadrillion โดย 1 quad มีค่าเท่ากับ 10^{15} BTU หรือ 1.055×10^{18} จูล: BTU ย่อมาจากคำว่า British Thermal Unit คือ หน่วยที่ใช้วัดปริมาณความร้อนในระบบเครื่องปรับอากาศ 1 BTU คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้ให้น้ำ 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 องศาฟาเรนไฮต์ (EIA, 2012) นอกเหนือจากประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีการใช้ปริมาณพลังงานสูงแล้ว การพัฒนาทางอุตสาหกรรมอย่างก้าวกระโดดของประเทศจีนและประเทศกำลังพัฒนาอื่น ทำให้เพิ่มอัตราความต้องการอุปโภคพลังงานสูงขึ้นมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดความร้อน ขณะที่ประเทศที่พัฒนาแล้วต้องการใช้พลังงานด้านขนส่งและอุตสาหกรรม จึงส่งผลกระทบต่อประเภทของพลังงานและแหล่งพลังงานที่นำมาใช้ได้



ภาพที่ 1: แหล่งพลังงานหลักและปริมาณที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าของประเทศสหรัฐอเมริกา ปี พ.ศ. 2558
ที่มา : ดัดแปลงจาก EIA (2012)

1.พลังงานจากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิล

แหล่งพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลประเภทหลัก คือ ถ่านหิน น้ำมันและแก๊สธรรมชาติ มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) เกิดขึ้นจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์ ถูกแปรสภาพด้วยกระบวนการทางความร้อนใต้พิภพ (geothermal processing) กระบวนการนี้ใช้เวลานานกว่าล้านปี แหล่งสำรองของเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณมากและสะสมตามบริเวณต่าง ๆ บนเปลือกโลก แหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งสำคัญสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเฉพาะจากถ่านหินมากกว่าร้อยละ 40 (EIA, 2016a) ซึ่งคาดการณ์ว่าในปี พ.ศ. 2593 ประเทศที่มีความต้องการและใช้กระแสไฟฟ้าต่อจำนวนประชากรมากที่สุด ได้แก่ จีนและสหรัฐอเมริกา ตามลำดับ (EIA, 2016a) เนื่องจากการเติบโตทางเศรษฐกิจและจำนวนประชากร แม้ว่าแหล่งสำรองของทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นตัวชี้วัดพลังงานที่จะใช้ได้ในอนาคต ความท้าทายหนึ่งของทรัพยากรนี้ คือ การร่อยหรอของทรัพยากรและอัตราการใช้งานของน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติ (Zgurovsky, 2012) ซึ่งคาดการณ์ว่าจะหมดภายในระยะเวลา 34-43 ปี และ 37-70 ปี ตามลำดับ (Lior, 2008)

นอกจากนี้ความตระหนักด้านสิ่งแวดล้อมและคุณภาพชีวิต ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก จากการปลดปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศและแก๊สเรือนกระจก (greenhouse gas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากกระบวนการผลิตพลังงาน ในข้อตกลงแคนคูน 2010 (Cancun 2010) ณ เมืองแคนคูน ประเทศเม็กซิโก (UNFCCC, 2011) ได้กำหนดให้จำกัดการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกไม่เกิน 2 องศาเซลเซียส และปริมาณของแก๊สเรือนกระจกที่สะสมอยู่ในบรรยากาศในหน่วยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า คือ 450 ส่วนในล้านส่วน (part per million หรือ ppm) ภายในปี พ.ศ. 2593 ในขณะที่ปริมาณของแก๊สเรือนกระจกในยุคก่อนอุตสาหกรรม (ก่อนปี พ.ศ. 2393) มีปริมาณ

แก๊สเรือนกระจกอยู่ 280 ส่วนในล้านส่วน โดยปริมาณแก๊สเรือนกระจกเพิ่มขึ้นปีละประมาณ 2 ส่วนในล้านส่วน โดยเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์และปศุสัตว์ (Meure et al., 2006; IEA, 2012) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกมีผลต่อความแปรปรวนของสภาวะภูมิอากาศทั่วโลก ความถี่ในการเกิดพายุรุนแรง กระแสน้ำวนในมหาสมุทร ความแห้งแล้ง ปริมาณธาตุอาหาร การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของมหาสมุทร (Solomon et al., 2007) มีผลกระทบต่อเนื่องกับระบบนิเวศของสิ่งมีชีวิตทั้งบนบกและในทะเล เช่น การวางไข่ของปลา การเพิ่มปริมาณของแพลงก์ตอน เป็นต้น เนื่องจากอุณหภูมิมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระบบที่ควบคุมการทำหน้าที่ทางชีวภาพของสิ่งมีชีวิต (Brierley & Kingsford, 2009) จากปัญหาสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิลดังกล่าว จึงทำให้มีแนวโน้มของการใช้พลังงานทดแทนจากแหล่งทรัพยากรที่นำกลับมาใช้ใหม่เพิ่มขึ้น มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่เพื่อเปลี่ยนรูปพลังงานอื่นๆ เช่น การทำปฏิกิริยาฟิวชั่นที่อุณหภูมิต่ำ การแยกไฮโดรเจนจากน้ำหรือพลังงานแสงอาทิตย์ การใช้เอทานอลจากพืช เป็นต้น ถึงแม้ผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่สามารถทดแทนการใช้พลังงานจากทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิลได้อย่างสมบูรณ์ แต่สามารถลดปริมาณคาร์บอนที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศและสิ่งแวดล้อมได้

1.1 น้ำมันดิบ

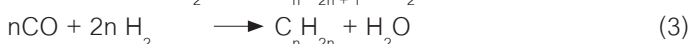
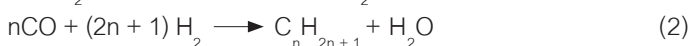
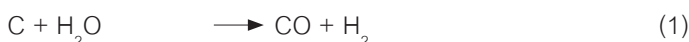
น้ำมันดิบ เกิดจากการขุดเจาะแหล่งสำรองปิโตรเลียมที่กักเก็บไว้ตามพื้นที่ต่าง ๆ ของโลก แหล่งสำรองน้ำมันดิบแหล่งใหญ่ เช่น ประเทศแถบตะวันออกกลาง เวเนซุเอลา แคนาดา เป็นต้น แม้ว่ายังมีการค้นพบแหล่งน้ำมันดิบใหม่เพิ่มขึ้นแต่ทรัพยากรประเภทนี้ใช้แล้วหมดสิ้นไป อัตราการผลิตน้ำมันดิบจึงได้มีผลกระทบต่อราคาน้ำมันดิบในโลกที่เพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเชื้อเพลิง จำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีการกลั่นและแยกสาร รวมทั้งหาแหล่งสำรองหรือใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลกลุ่มอื่นเป็นทางเลือกทดแทนน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติแบบดั้งเดิม ตัวอย่างเช่น ททรายน้ำมัน (oil sand) ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลสูงแต่มีข้อเสีย คือ ค่าพลังงานสุทธิต่ำเมื่อเทียบกับน้ำมันดิบ นอกจากนี้การใช้น้ำมันหรือแก๊สธรรมชาติที่ถูกกักเก็บในชั้นหินดินดาน เรียกว่า หินน้ำมัน (shale oil หรือ tight oil) ลึกลงไปได้เปลือกโลกก็มีความน่าสนใจ แต่ต้องใช้เทคโนโลยีการขุดเจาะที่ซับซ้อนกว่า หินน้ำมัน คือ แร่เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่อยู่ในรูปแบบหินดินดาน มีอินทรีย์สารในรูปของแข็งไม่ละลาย เรียกว่า เคโรเจน (kerogen) ผนึกไว้ในช่องว่างระหว่างเนื้อหิน (Speight, 2012a) อินทรีย์สารเหล่านี้เกิดจากซากสิ่งมีชีวิต มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน เช่น สปอร์ เกสรพืช เปลือกไม้ ลำต้นพืช ยางไม้ รวมทั้งสาหร่าย (Scouten, 1990) แหล่งหินน้ำมันกระจายตัวอยู่ในหลายส่วนของพื้นโลก แหล่งที่มีปริมาณมากและมีศักยภาพในการนำขึ้นมาใช้อยู่ที่ทางด้านตะวันตกของประเทศสหรัฐอเมริกา มีปริมาณสำรองประมาณ 1.5 ล้านล้านบาร์เรล (Speight, 2012a) น้ำมันจากชั้นดินดาน (shale oil) และแก๊ส (shale gas) ที่กักเก็บและแทรกอยู่ตามรูพรุนของหินน้ำมัน ผลิตโดยการสลายตัวทางความร้อนของอินทรีย์สารเคโรเจน โดยอุณหภูมิในการสกัดในช่วง 400-500 องศาเซลเซียส (Speight, 2012b) กระบวนการผลิตน้ำมันจากหินน้ำมัน เป็นลักษณะการทำเหมือง มีสองแบบ คือ

ก) การทำนอกพื้นที่ (ex situ) คือ การทำเหมืองแบบเปิด ดำเนินการโดยเตรียมแร่ เผาใหม่ด้วยความร้อนสูง ผลิตน้ำมันจากหินดินดาน การกลั่นแยกสาร วิธีนี้มีข้อดี คือ ประสิทธิภาพการนำอินทรีย์วัตถุในหินน้ำมันออกมาสูงถึงประมาณร้อยละ 70-90 โดยน้ำหนักของหินน้ำมัน ควบคุมกระบวนการผลิตง่าย ทำซ้ำได้ สำหรับข้อเสียของกระบวนการนี้ เช่น การทำเหมืองเปิดมีค่าใช้จ่ายสูง การเข้าถึงแหล่งหินน้ำมัน กากแร่และการปนเปื้อนของเสียสู่น้ำใต้ดิน

ข) การทำในพื้นที่ (in situ) ซึ่งให้ความร้อนแก่หินน้ำมันใต้ดิน ณ แหล่งกำเนิด โดยทั่วไปทำโดยผ่านอากาศร้อนลงไปทำให้เกิดการเผาไหม้ในชั้นหินน้ำมัน (Scouten, 1990) กระบวนการนี้จะลด

ปัญหาจากการทำเหมืองเปิด การจัดการของเสีย แต่ข้อจำกัด คือ ปริมาณน้ำมันจากหินดินดานที่ได้มีน้อย เนื่องจากการแทรกตัวของน้ำมันออกมาจากหินที่แน่นไว้ และการถ่ายเทความร้อนลงไปสู่ชั้นหินผก ซึ่งอาจมีการเพิ่มประสิทธิภาพโดยใช้การขุดเจาะแยกแก็สโดยทำให้หินร้าว (hydraulic fracturing หรือ fracking) ใช้วิธีฉีดน้ำ ทราเยและสารเคมี เช่น สารลดแรงตึงผิว เมทานอลและกรด ด้วยกำลังอัดสูงเข้าไปในชั้นหินลึกใต้ดิน ทำให้ชั้นหินปล่อยน้ำมันและแก็สที่กักเก็บไว้ออกมา (API, 2014; Kings, 2017) วิธีการนี้มีความเสี่ยงสูงและอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากต้องใช้น้ำปริมาณมาก เกิดของเสียและน้ำเสียปริมาณสูง มีโอกาสปนเปื้อนในน้ำใต้ดินและปลดปล่อยแก็สเรือนกระจก รวมถึงเปลี่ยนคุณภาพของน้ำใต้ดิน ทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวตามมา ปัจจุบันแหล่งสำรองแก็สธรรมชาติหรือน้ำมันจากหินดินดานและถ่านหิน ยังถือว่ามียังเพียงพอต่อการนำขึ้นมาใช้ไปอีกกว่า 500 ปี เพื่อเป็นแหล่งพลังงานสำคัญสำหรับผลิตความร้อนและกระแสไฟฟ้า

นอกจากนี้กระบวนการฟิชเชอร์-โทรปช์ (fischer-tropsch) กระบวนการนี้ใช้สังเคราะห์สารประเภทไฮโดรคาร์บอน โอเลฟินส์ พาราฟินและผลิตภัณฑ์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ จากปฏิกิริยาคายความร้อนทางเคมี (Torres Galvis & de Jong, 2013) การสังเคราะห์ฟิชเชอร์-โทรปช์เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์น้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ยังเปลี่ยนรูปถ่านหินเป็นน้ำมันได้โดยเปลี่ยนเป็นแก็สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H₂) หรือเรียกว่า แก็สสังเคราะห์ (synthetic gas หรือ syngas) ไปเป็นไฮโดรคาร์บอนกลุ่มพาราฟินเหลว (liquid paraffin hydrocarbon) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทรานซิชัน (transition metals) เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์บนตัวรองรับ (supported cobalt catalysis) ตัวอย่างแก็สสังเคราะห์จากถ่านหินดังสมการที่ 1 กระบวนการแปรสภาพเป็นแก็ส (gasification) ของถ่านหินที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยเปลี่ยนรูปไอน้ำของแก็สธรรมชาติหรือสารไฮโดรคาร์บอนเหลว ให้เป็นแก็สไฮโดรเจน และสมการที่ 2 การเปลี่ยนของผสมแก็สสังเคราะห์ คือ แก็สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน เกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรคาร์บอนเหลวและน้ำ ส่วนสมการที่ 3 การเปลี่ยนแก็สสังเคราะห์เป็นโอเลฟินส์



1.2 ถ่านหิน

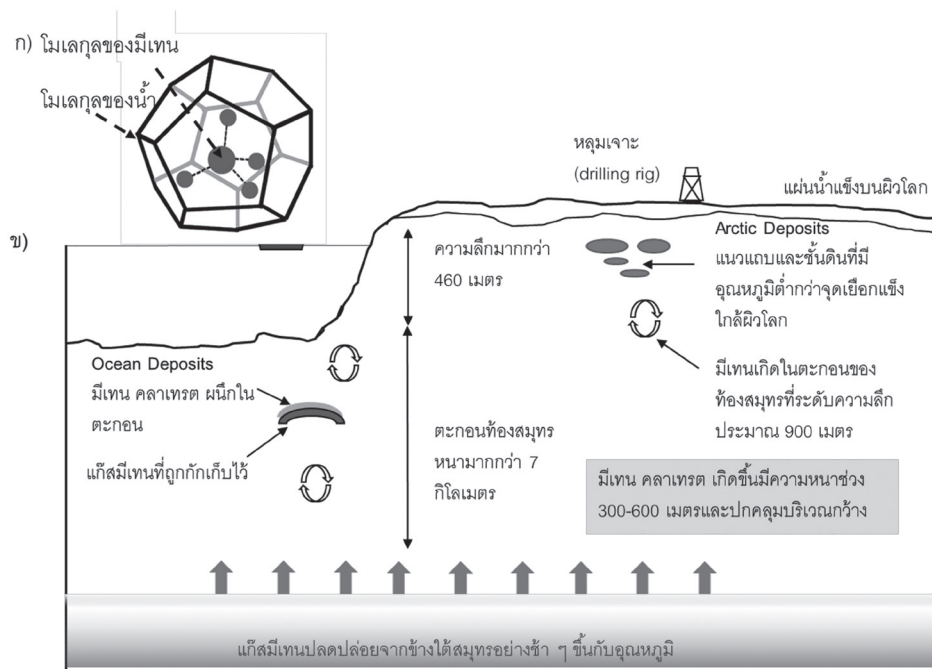
ปริมาณกระแสไฟฟ้าในโลกที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงถ่านหิน มีประมาณร้อยละ 25 (Speight, 2013) หากน้ำมันดิบมีราคาสูงขึ้นในอนาคต การนำถ่านหินมาใช้เป็นแหล่งผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ก็จะมีคามได้เปรียบ เนื่องจากมีราคาถูก มีปริมาณสำรองกระจายตัวอยู่ตามแหล่งต่าง ๆ เชื้อเพลิงถ่านหินจะมีสำรองไปได้อีกประมาณ 106-200 ปี (IEA, 2012) แม้ว่าการทำเหมืองถ่านหิน กระบวนการผลิตและการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน มีผลกระทบสูงต่อการก่อมลภาวะในสิ่งแวดล้อม การปลดปล่อยแก็สคาร์บอนไดออกไซด์ แก็สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) แก็สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) สู่ชั้นบรรยากาศ ฝุ่นละอองและอนุภาคขนาดเล็ก รวมถึงปรอทซึ่งเข้าสู่กระแสเลือดได้ดี ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ หากปรอทปนเปื้อนในอาหาร ทำให้เกิดพิษต่อระบบประสาท

ปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหินได้ใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (clean coal technology) เป็นเทคโนโลยีการลดมลพิษเมื่อนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ทำโดย ก) ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินคุณภาพดี ให้ค่าความร้อนสูง ข) ปรับปรุงกระบวนการทำความสะอาดถ่านหิน เพื่อลดปริมาณขี้เถ้าและกำมะถันที่ปะปนอยู่ในถ่านหิน ค) เพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ถ่านหินโดยปรับปรุงเทคโนโลยีการเผาไหม้ถ่านหิน ซึ่งพิจารณาจากหลักเทอร์โมไดนามิกส์ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน ตัวอย่างเทคโนโลยีการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตถ่านหินสะอาด เช่น เทคโนโลยีการเผาไหม้ผงถ่านหินละเอียด (pulverized fuel combustion) โดยการบดถ่านหินให้มีขนาดเล็กมากและพ่นเข้าไปในเตาเผาพร้อมอากาศ การเผาไหม้แบบเหนือวิกฤติยวดยิ่งโดยใช้หม้อกำเนิดแรงดันสูง (Ultra-Super Critical หรือ USC) เพื่อเพิ่มสภาวะของไอน้ำให้อยู่ในสภาวะที่มีความดันและอุณหภูมิสูงกว่าสภาวะวิกฤติยวดยิ่ง คือ ที่ความดันสูงกว่า 37.5 เมกะปาสกัล และ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (Nicole, 2013) และเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันกับวัฏจักรความร้อนร่วม (Integrated Gasification Combined Cycle หรือ IGCC) เทคโนโลยีนี้นิยมใช้ผลิตแก๊สจากถ่านหินเพื่อใช้ในระบบกังหันแก๊ส (gas turbine) มากกว่าการเผาไหม้ถ่านหินโดยตรง มีประสิทธิภาพในการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น (Beer, 2007; Bilgen, 2016) ง) เทคโนโลยีหลังการเผาไหม้ โดยลดและควบคุมการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ รวมทั้งฝุ่นละอองต่าง ๆ เช่น กำจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ โดยใช้แอมโมเนียเข้าไปทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ได้ผลของปฏิกิริยาเป็นไนโตรเจนและน้ำ (Thowarth, 2007; Bilgen, 2016) วิธีการนี้มีประสิทธิภาพเมื่อใช้ร่วมกับเทคโนโลยีการเผาไหม้ผงถ่านหินละเอียด กระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization หรือ FGD) โดยใช้น้ำผสมกับหินปูนพ่นเข้าไปจับกับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ผสมอยู่ในแก๊สทั้ง ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยาได้เป็นแคลเซียมซัลไฟต์หรือแคลเซียมซัลเฟต รวมทั้งตกตะกอนเป็นยิปซัม ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อไปได้ (Thowarth, 2007) และเกิดน้ำเสียที่อาจมีองค์ประกอบของปรอท ซึ่งต้องนำไปกำจัดต่อไป กระบวนการควบคุมการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้การดักจับคาร์บอนและกักเก็บไว้ (Carbon Capture and Storage หรือ CCS) ไม่ให้ออกสู่บรรยากาศ (Suarez-Ruiz & Crelling, 2008) ซึ่งอาจเก็บไว้ใต้โครงสร้างทางธรณีวิทยา โดยส่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปใต้ดิน หรือกักเก็บไว้บนดินเพื่อนำไปใช้ต่อโดยพืช แต่เทคโนโลยีนี้ยังต้องมีการพัฒนาต่อไป เพื่อให้การกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีประสิทธิภาพดี ไม่เกิดการรั่วไหลออก และเทคโนโลยีการดักจับฝุ่น โดยใช้เครื่องดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต เป็นเครื่องมือที่ใช้ร่วมกับเทคโนโลยีการเผาไหม้ผงถ่านหินละเอียด ประสิทธิภาพในการดักมวลฝุ่นละอองสูงถึงร้อยละ 99 (Liqiang & Yongtao, 2011; Bilgen, 2016)

1.3 แก๊สธรรมชาติ

การใช้แก๊สธรรมชาติเริ่มขยายตัวขึ้น เนื่องจากเทคโนโลยีในการขุดเจาะพัฒนาขึ้นและความต้องการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม ประเทศที่มีแหล่งสำรองแก๊สธรรมชาติปริมาณมาก ได้แก่ สหรัฐอเมริกาและจีน แก๊สธรรมชาติถือเป็นพลังงานสะอาด ราคาถูก องค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ มีเทน (CH_4) แต่มีเทนที่รั่วไหลและปลดปล่อยสู่บรรยากาศระหว่างกระบวนการขุดเจาะ ก็มีศักยภาพเป็นแก๊สก่อภาวะโลกร้อนได้ พลังงานจากแก๊สธรรมชาติที่เป็นทางเลือกในอนาคต คือ แหล่งสำรองเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีปริมาณมากและถูกกักเก็บในรูปมีเทนไฮเดรต (methane hydrate) หรือมีเทนคลาเทรต (methane clathrate) ซึ่งเป็นสารที่ประกอบด้วยมีเทนในรูปผลึกโครงสร้างคล้ายน้ำแข็งแห้ง โครงผลึกแบบโดเดคา

อีตรอน (dodecahedron, 5^{12}CH_4) (ภาพที่ 2 ก) สภาวะการเกิดมีเทนคลาเทรตเกิดจากแก๊สมีเทนและน้ำรวมกันที่อุณหภูมิต่ำกว่า -25 องศาเซลเซียส และความดันช่วง 3 ถึง 5 เมกะปาสคัล ทำให้ผลึกมีเทนคลาเทรตที่มีโครงสร้างคล้ายน้ำแข็ง ลักษณะเป็นของแข็งเสถียรโดยโมเลกุลน้ำก่อตัวเป็นกรงผลึกโมเลกุลของแก๊สมีเทนไว้ภายใน ผลึกมีเทนคลาเทรตผิวกับตะกอนที่ระดับความลึกกว่า 300 ถึง 500 เมตร กักเก็บภายใต้ตะกอนท้องสมุทรลึก (Ruppel, 2011) (ภาพที่ 2ข) จากการสำรวจทางธรณีวิทยา พบว่ามีเทนคลาเทรตมีปริมาณสำรองมากกว่าแหล่งสำรองของเชื้อเพลิงฟอสซิลในปัจจุบัน แม้ว่าแก๊สมีเทนนี้ถูกปลดปล่อยออกมาจากท้องสมุทรตามธรรมชาติ ส่งผลต่อการเกิดภาวะโลกร้อนอย่างช้า ๆ ถ้าหากมีเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการนำแก๊สมีเทนจากมีเทนคลาเทรตขึ้นมาใช้ประโยชน์ได้ ก็จะช่วยแก้ปัญหาภาวะขาดแคลนพลังงาน ลดการเกิดภาวะโลกร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง รวมทั้งควบคุมการเผาไหม้มีเทน ไม่ให้เพิ่มระดับคาร์บอนในบรรยากาศ



ภาพที่ 2: ภาพจำลองของ ก) โครงสร้างแบบโดเดคาไฮดรอนมีเทน คลาเทรต

และ ข) การกักเก็บมีเทน คลาเทรตใต้พื้นสมุทรที่ระดับลึก

ที่มา : Suess, Bohrmann, Greinert & Lausch (1999); Harrison (2010); ดัดแปลงจาก National Energy Technology Laboratory (2011)

1.4 พลังงานนิวเคลียร์

พลังงานนิวเคลียร์เป็นเชื้อเพลิงชนิดที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แหล่งพลังงานนิวเคลียร์จากแร่กัมมันตรังสี การใช้พลังงานนิวเคลียร์สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า คิดเป็นประมาณร้อยละ 15 ของพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าทั้งหมด โดยเฉพาะประเทศสหรัฐอเมริกา แหล่งพลังงานนิวเคลียร์จากแร่กัมมันตรังสียูเรเนียม (^{235}U) มีปริมาณสำรองประมาณ 5 ล้านตัน มีข้อดีด้านลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก แต่การทำเหมืองแร่กัมมันตรังสีก็ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ปลดปล่อยฝุ่นละออง

ขนาดเล็ก โลหะหนักและกรดจากเหมืองสู่น้ำใต้ดิน นอกจากนี้การสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต้องคำนึงความปลอดภัย เนื่องจากอุบัติเหตุการระเบิดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เมืองเชอร์โนบีล ประเทศยูเครน ใน พ.ศ. 2529 และอุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เมืองฟูกูชิมะ ประเทศญี่ปุ่น ที่เสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวและสึนามิ เมื่อ พ.ศ. 2554 ทำให้กัมมันตรังสีเกิดการรั่วไหลและแพร่กระจายสู่อากาศ น้ำและดิน ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ มีระยะเวลาค่าครึ่งชีวิตของกัมมันตรังสียาวนาน และต้องฟื้นฟูความเสียหายจากการรั่วไหลของกัมมันตรังสีในวงกว้าง รวมถึงการกำจัดกากของเสียนิวเคลียร์ที่ปลอดภัย (WWF International Report, 2011) เนื่องจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์จำเป็นต้องมีการปิดระบบ เพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงยูเรเนียมทุกกระยะ 12 ถึง 24 เดือน ของเสียอันตรายจากกากกัมมันตรังสีที่ผ่านการใช้งานแล้วจะถูกนำไปกักเก็บใต้ดินลึกกว่าหนึ่งกิโลเมตรในบริเวณห่างไกล และแร่ยูเรเนียมมีค่าครึ่งชีวิตถึงกว่าหนึ่งพันปี

2. พลังงานจากแหล่งที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้

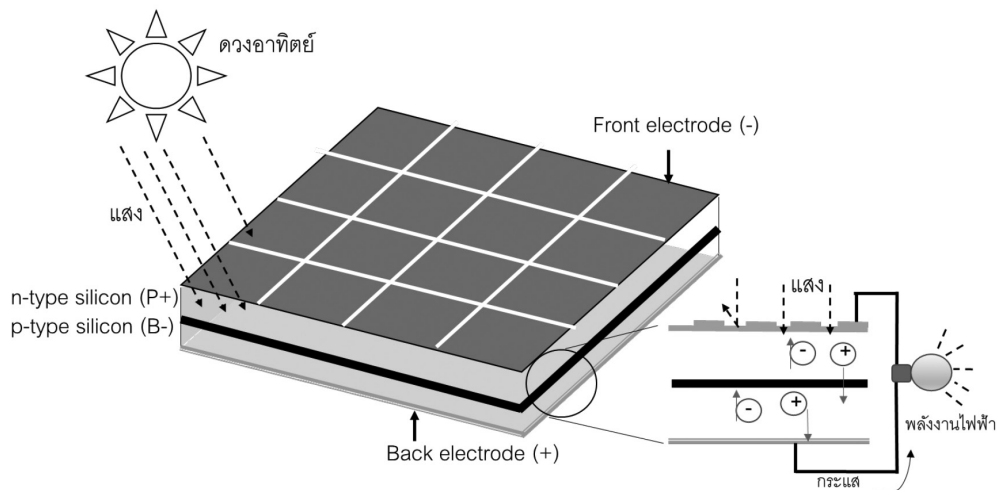
การพัฒนาที่ยั่งยืน โดยใช้เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากทรัพยากรที่ทดแทนได้ หรือพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) เป็นอีกทางเลือกในการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้แก่ ไฟฟ้าพลังน้ำ (hydro-electricity) พลังงานลม (wind energy) พลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) และพลังงานจากชีวมวลหรือมวลชีวภาพ (biomass) เนื่องจากรูปแบบพลังงานจากแหล่งที่นำกลับมาใช้ใหม่แบบดั้งเดิม เช่น โรงไฟฟ้าพลังน้ำต้องอาศัยการสร้างเขื่อนขนาดใหญ่และจำกัดทางเดินของแม่น้ำ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้กำลังจากพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของน้ำ ที่เกิดจากการไหลของกระแสน้ำและการปล่อยน้ำจากที่สูง ควบคุมอัตราการไหลของน้ำคงที่และมีกำลังมากพอในการผลิตกระแสไฟฟ้า ปัจจุบันจำนวนโรงไฟฟ้าพลังน้ำเริ่มคงตัว ตัวอย่างการสร้างโรงไฟฟ้าเขื่อนสามโตรก (Three Gorges Dam) ประเทศจีน โครงการขนาดใหญ่ที่มีกำลังผลิตกระแสไฟฟ้าพลังน้ำมากถึง 22.5 กิกะวัตต์ แต่ต้องเสียค่าทดแทนทางเศรษฐกิจและสังคมจากการใช้พื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อกักเก็บน้ำ เกิดน้ำท่วมเหนือเขื่อนเป็นบริเวณกว้าง ประชากรต้องย้ายถิ่นฐานและสูญเสียที่ดินทำกิน เปลี่ยนแปลงระบบนิเวศ ทำลายกิจกรรมการวางไข่ที่ต้นน้ำของปลา เปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและเคมีของแม่น้ำ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลาย และตะกอนท้องน้ำ รวมถึงปริมาณน้ำท้ายเขื่อนน้อยลง ข้อจำกัดเหล่านี้มีผลให้การสร้างเขื่อนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในอนาคตจะทำได้ยากขึ้น (Manatunge et al., 2018)

2.1 พลังงานลม

การพัฒนาพลังงานลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีสัดส่วนการผลิตประมาณร้อยละ 1.2 ในประเทศสหรัฐอเมริกาและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคต เนื่องจากพลังงานลมมีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์และความได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์ คือ ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยพลังงาน เปรียบเทียบกับการสร้างโรงไฟฟ้าถ่านหินหรือโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ประเทศขนาดเล็กหลายประเทศได้ลงทุนสร้างกังหันลม (wind farm) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม สำหรับแปลงพลังงานจลน์ในกระแสลมเป็นพลังงานกล ปัจจุบันที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้แก่ พื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งกังหันลมบนบก ชายฝั่งทะเลและนอกชายฝั่งทะเล (offshore) กระแสลมที่ระดับความสูงมาก (high altitude) จะมีประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอมากกว่ากระแสลมที่ระดับต่ำใกล้แผ่นดิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดกังหันลม ความสามารถในการกักเก็บพลังงาน ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกังหันลม เช่น กังหันลมตามชายฝั่งมีผลต่อประชากรนกอพยพเพราะมักติดตั้งอยู่ในเส้นทางการอพยพของนกย้ายถิ่นทำให้นกอพยพถูกใบกังหันตาย และการสร้างรังของนกตามโครงสร้างของกังหันลม (Marris & Fairless, 2007) ส่วนการติดตั้งกังหันลมนอกชายฝั่งต้องคำนึงถึงระบบนิเวศทางทะเล

2.2 พลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์เกิดจากโลกได้รับแสงจากดวงอาทิตย์ แหล่งพลังงานนี้ไม่มีวันหมดสิ้น การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic cells) จึงเป็นทางเลือกในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงที่ตกกระทบบนวัตถุเป็นกระแสไฟฟ้าโดยใช้ตัวสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน (silicon) แกลเลียม อาร์เซไนด์ (gallium arsenide) อินเดียม ฟอสไฟด์ (indium phosphide) เป็นต้น เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า ขั้นตอนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจากการดูดซึมแสงเพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอน (electron) – หลุม (hole) หรือเอ็กซิตอน (exciton) อย่างไม่อย่างหนึ่ง และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบ เพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์หรือวงจรภายนอก เซลล์แสงอาทิตย์จึงทำงานได้ ดังภาพที่ 3 เซลล์แสงอาทิตย์ถูกใช้หลายชุดประกอบเข้าด้วยกันเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 3: ภาพจำลองการแปลงแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกกับสารกึ่งตัวนำ
ที่มา : ดัดแปลงจาก Thomason (2015)

พลังงานมวลชีวภาพ

ในระบบสิ่งมีชีวิตทุกกิจกรรมที่เกิดขึ้นบนโลกเริ่มต้นจากการใช้พลังงานแสง กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช (photosynthesis) เริ่มจากแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกถูกจับไว้โดยพืชและเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมี (chemosynthesis) ในรูปมวลชีวภาพ แต่ประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อใช้งานได้เทียบเท่ากับฟลักซ์ของพลังงานแสงอาทิตย์ (solar flux) ที่ได้รับยังมีน้อย มวลชีวภาพที่พืชสังเคราะห์ให้เป็นแหล่งอาหาร มีการถ่ายทอดตามลำดับในห่วงโซ่อาหารจากผู้ผลิตสู่ผู้บริโภค ถ่ายทอดพลังงานผ่านระดับการกินอาหาร (trophic level) ในสายใยอาหาร (food web) พลังงานแสงอาทิตย์ที่พืชเก็บไว้ในรูปพลังงานศักย์ มีค่าความร้อนต่ำ พลังงานจากมวลชีวภาพหรือชีวมวลจึงเป็นพลังงานทางอ้อมจากการเปลี่ยนรูปพลังงานที่กักเก็บในมวลชีวภาพจากสิ่งมีชีวิต ให้เป็นพลังงานรูปแบบอื่น มวลชีวภาพใช้วัตถุดิบจากของเหลือทิ้งทางการเกษตรและอาหารที่ถูกทิ้งโดยกระบวนการ

ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic digestion) มีศักยภาพในการใช้ผลิตแก๊สชีวภาพ (biogas) พลังงานที่ได้เป็นแหล่งความร้อน องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ คือ แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณน้อย ความชื้น เป็นต้น ทั้งนี้เทคโนโลยีการใช้มูลชีวภาพยังขยายส่วนและพัฒนาได้ในอนาคต โดยเฉพาะการเปลี่ยนรูปของเหลือทิ้งจากการเกษตรอื่นๆ เช่น อาหาร ขยะอินทรีย์จากชุมชน ของเสียจากปศุสัตว์ ผลิตภัณฑ์พลอยได้จากอุตสาหกรรมต่างๆ และมูลชีวภาพจากสัตว์เลี้ยง ไม้ เศษวัสดุ เศษหญ้า เป็นต้น ดังตารางที่ 1 มูลชีวภาพถือเป็นทรัพยากรที่หมุนเวียน ทดแทนได้ และใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนเช่นเดียวกับพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ กระบวนการผลิตและที่มาของพลังงานมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก การผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากพืชช่วยลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ช่วงร้อยละ 32-71 (Gumienna, Szambelan & Jelen, 2014) เนื่องจากระยะเวลาในการปลูกพืชและเก็บเกี่ยวผลผลิตนั้นใช้เวลาสั้น การปลูกพืชปริมาณมากช่วยลดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศด้วย สิ่งที่ต้องคำนึงถึงหากมีการส่งเสริมให้ใช้พลังงานจากมูลชีวภาพ เช่น การใช้ที่ดินอย่างเหมาะสม เลือกรูปแบบพืชพลังงานและตลาดที่รองรับวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการผลิต เป็นต้น

ตารางที่ 1: กระบวนการเปลี่ยนมูลชีวภาพเป็นพลังงาน

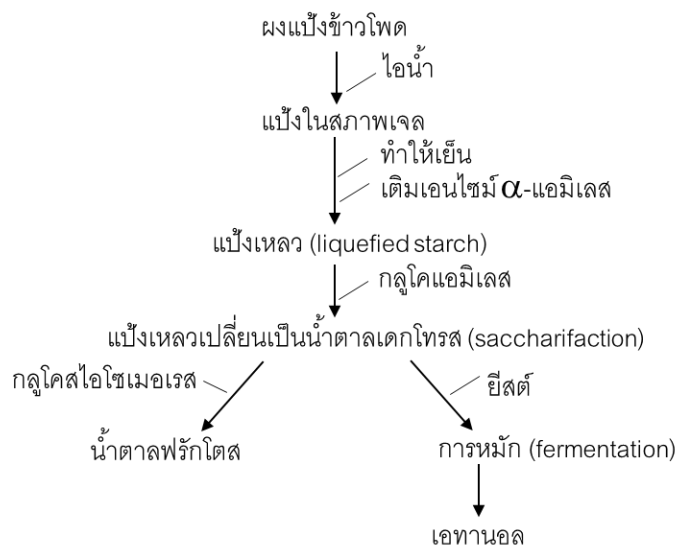
วัตถุดิบตั้งต้น (feedstock)	วิธีการเปลี่ยนรูปและแปรรูป (conversion routes)	รูปแบบพลังงานและการใช้ประโยชน์
พืชน้ำมัน น้ำมันใช้แล้ว ไบโอมัสสัตว์	ทรานส์-เอสเตอร์ฟิเคชัน หรือไฮโดรจิเนชัน	ความร้อน
น้ำตาลและแป้ง	ไฮโดรไลซิสและการหมัก	ความร้อน
ลิกโนเซลลูโลส เช่น ไม้ ฟาง จี้เสื่อ ของเสียจากชุมชน	แก๊สซิฟิเคชัน หรือการเผาไหม้ด้วยความร้อนสูง	พลังงานไฟฟ้า
ของเสียอินทรีย์ กากตะกอน ของเสียจากปศุสัตว์ เศษอาหาร สำหรับทะเล	แก๊สซิฟิเคชัน หรือการเผาไหม้ด้วยความร้อนสูง การย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน	พลังงาน แก๊สชีวภาพ
สัตว์ขนาดเล็ก และแบคทีเรีย	การย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน การคัดแปรรูปด้วยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ เคมีและอื่น ๆ	เชื้อเพลิง เช่น เอทานอล เมทานอล ไบโอดีเซล และบิเทน

ที่มา: คัดแปลงจาก EEA (2013)

การผลิตเอทานอลจากพืช (bioethanol) และนำเอทานอลมาผสมกับน้ำมันแก๊สโซลีนสำหรับเชื้อเพลิงในยานพาหนะ ช่วยลดการปลดปล่อยมลภาวะสู่บรรยากาศเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิง เอทานอลเป็นสารอินทรีย์มีอะตอมของออกซิเจนร้อยละ 35 มีสมบัติการละลายน้ำและย่อยสลายทางชีวภาพได้ กระบวนการผลิตเอทานอลจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร จึงไม่มีของเหลือทิ้งและใช้วัตถุดิบอย่างคุ้มค่า ซึ่งมีข้อดีสำหรับการใช้งานมากกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิลหลายด้าน เช่น มีค่าออกเทนสูงช่วยเพิ่มค่าออกเทนให้ความร้อนสูงและเผาไหม้สะอาด ลดการปลดปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ปลดปล่อยฝุ่นละอองขนาดเล็กปริมาณน้อย ประเทศบราซิลเป็นประเทศที่มีการใช้อ้อยเพื่อผลิตเอทานอลมากที่สุด และประเทศอื่นได้ส่งเสริมการผลิตเอทานอลจากพืชหลักมาทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ อ้อย ข้าวโพด ธัญพืชอื่นและเมล็ดเรพซีด (rapeseed) ที่เป็นพืชในตระกูลมัสตาร์ด การ

ผลิตเอทานอลจากพืชจำแนกตามวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ น้ำตาล แป้งและเซลลูโลส โดยน้ำตาลได้จากพืชหลัก คือ อ้อย ชูการ์บีต (sugar beet) และกากน้ำตาล ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปน้ำตาลซูโครสเป็นเอทานอลได้โดยตรง สำหรับวัตถุดิบของพอลิแซ็กคาไรด์จากมวลชีวภาพ คือ แป้ง เซลลูโลสและของเสียอินทรีย์ ตัวอย่างเทคโนโลยีชีวภาพเพื่อเปลี่ยนมวลชีวภาพเป็นเอทานอลและใช้เอนไซม์เปลี่ยนรูปเซลลูโลสให้เป็นสารเคมีในอุตสาหกรรมอื่น ดังนี้

การเปลี่ยนเอทานอลจากแป้ง แป้งเป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่มีความเหมาะสมในการผลิตเอทานอลและได้รับการพัฒนามายาวนานในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดาและประเทศในสหภาพยุโรป (Bialas, Szymanowska & Grajek, 2010) กระบวนการผลิตเอทานอลจากแป้ง แสดงอย่างง่ายดังภาพที่ 4 แป้งข้าวโพดเปลี่ยนเป็นเอทานอลโดยกระบวนการหมักในระดับอุตสาหกรรม กระบวนการทางเคมีและการกลั่น ตัวแปรสำคัญในการเปลี่ยนโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์ในเม็ดแป้งให้เป็นเอทานอล คือ เอนไซม์กลุ่มแอมิโลไลติก (amylolytic enzymes) ได้แก่ อัลฟา-แอมิเลส (α -amylase) และกลูโคแอมิเลส (glucoamylase) ปริมาณเอทานอล 10 ลิตร จะใช้ข้าวโพดประมาณ 25 กิโลกรัม สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในกระบวนการเปลี่ยนรูปเอทานอลจากแป้ง คือ ใช้ปริมาณเอนไซม์มาก สิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการให้ความร้อนแก่แป้ง และพลังงานในการกลั่นแยกเอทานอล มีของเสียอินทรีย์และน้ำเสียจากกระบวนการผลิตสูง (Prasad, Singh & Joshi, 2007) ทางเลือกในการแก้ไขปัญหาในระดับอุตสาหกรรม เช่น พัฒนาหรือปรับปรุงศักยภาพเอนไซม์ หรือเร่งอัตราการย่อยสลายแป้งให้เร็วขึ้น เป็นต้น (Bai, Anderson & Moo-Young, 2008)

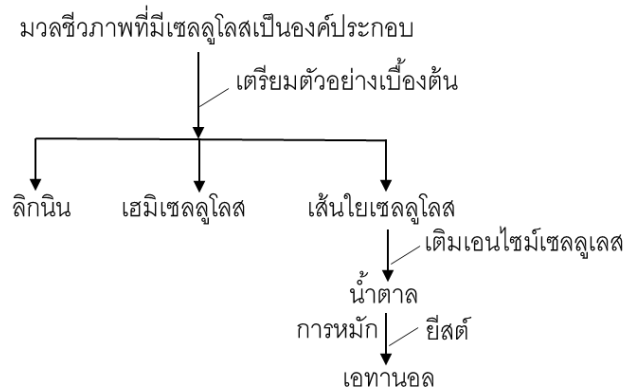


ภาพที่ 4: กระบวนการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาลและเอทานอล

ที่มา : ดัดแปลงจาก Prasad et al. (2007); Bialas et al. (2010)

การเปลี่ยนเอทานอลจากมวลชีวภาพกลุ่มลิกโนเซลลูโลสิก (lignocellulosic biomass) ถูกพัฒนาขึ้นอย่างเป็นลำดับ โดยกระบวนการผลิตประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ คือ เตรียมตัวอย่างพืชเบื้องต้น (pretreatment) ใช้เอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) เพื่อย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และกระบวนการหมักให้ได้เอทานอล ข้อได้เปรียบของการใช้มวลชีวภาพกลุ่มนี้เป็นวัตถุดิบ

ตั้งต้น คือ หาง่าย ราคาถูก มีปริมาณหมุนเวียนมาก เช่น ฟางข้าว หญ้า ชังข้าวโพด เศษไม้ ขี้เลื่อย กากมันสำปะหลัง กากปาล์ม แกลบ เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ ขึ้นกับ แหล่งเซลลูโลส การเตรียมตัวอย่างเบื้องต้นด้วยความร้อนและสารเคมี เพื่อให้เอนไซม์ย่อยสลายเซลลูโลส ได้ในขั้นตอนถัดไป การแยกเส้นใยเซลลูโลสออกจากองค์ประกอบอื่นในผนังเซลล์พืช เช่น ลิกนินและเฮมิเซลลูโลส การเลือกชนิดของจุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้สูง และชนิดจุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์สำหรับ เปลี่ยนรูปน้ำตาลโมเลกุลเล็ก เช่น ไซโลส (xylose) เป็นเอทานอล (Chen & Fu, 2016) ตัวอย่างการเตรียมเอทานอลจากเซลลูโลส ดังภาพที่ 5



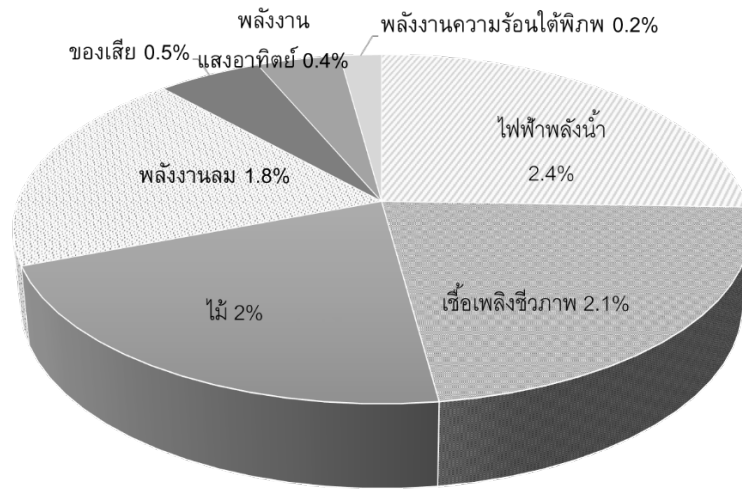
ภาพที่ 5: กระบวนการเปลี่ยนวัตถุดิบกลุ่มลิกโนเซลลูโลสเป็นเอทานอล

ที่มา : ดัดแปลงจาก Kumar, Delwiche & Stroeve (2009)

3) การเปลี่ยนของเสียอินทรีย์และเศษอาหารเป็นเอทานอล ใช้กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด (acid hydrolysis) และไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ของแบคทีเรียได้ผลผลิตเป็นน้ำตาล หลังจากนั้นหมักน้ำตาลเพื่อเปลี่ยนเป็นเอทานอลโดยใช้ยีสต์ ยีสต์สายพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการหมักคือ *Sacchromyces cerevisiae* เอทานอลที่ได้นำไปกลั่นให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น (Akpan, Alhakim & Ijah, 2008)

พลังงานความร้อนใต้พิภพ

พลังงานความร้อนใต้พิภพ (geothermal energy) ถูกใช้มานานตั้งแต่สมัยโรมันเพื่อให้ความอบอุ่นในอาคารและแหล่งอาบน้ำแร่ พลังงานความร้อนใต้พิภพไม่ได้มีจำกัดเฉพาะบริเวณที่มีภูเขาไฟเท่านั้น สายน้ำอุ่นที่มีความร้อนสูงพอสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ความอบอุ่นในบ้านเรือนและอุตสาหกรรม พลังงานความร้อนใต้พิภพมีความสม่ำเสมอกว่าพลังงานหมุนเวียนอื่น เช่น พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งแปรผันตามภูมิอากาศ ประเทศไอซ์แลนด์ใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพผลิตกระแสไฟฟ้าเกือบ 1 ใน 4 ส่วนของแหล่งพลังงาน เนื่องจากมีกระแสน้ำร้อนใต้ดินมาก จึงสร้างโรงไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพได้ การขยายตัวของปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพแต่ละปีเพิ่มขึ้นกว่าร้อยละ 5 แม้ว่าการแสน้ำร้อนใต้โลกจะมีองค์ประกอบของสารปนเปื้อนก็ตาม การสร้างระบบปิดในการนำความร้อนจากกระแสน้ำร้อนขึ้นมาใช้ก็ช่วยลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ เปรียบเทียบปริมาณการบริโภคพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนแยกตามประเภท ดังภาพที่ 6 สัดส่วนของร้อยละปริมาณพลังงานหมุนเวียนจำแนกตามประเภทจากมากไปน้อย ได้แก่ ไฟฟ้าพลังน้ำ เชื้อเพลิงชีวภาพ ไม้ พลังงานลม ของเสีย พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานความร้อนใต้พิภพ



ภาพที่ 6: การใช้พลังงานจากแหล่งทดแทนได้จำแนกตามประเภท ในปี พ.ศ. 2558

ที่มา : EIA (2016b)

แนวโน้มของพลังงานในอนาคต

แม้ว่าทรัพยากรจากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลทั้งน้ำมันดิบ แก๊สธรรมชาติและถ่านหินจะมีปริมาณสำรองร่อยหรอลง จากความต้องการพลังงานของโลกเนื่องจากปัจจัยหลัก คือ จำนวนประชากร การพัฒนาอุตสาหกรรมและความเติบโตทางเศรษฐกิจ แต่แหล่งกำเนิดพลังงานนี้ถือว่ามีความสำคัญ เนื่องจากได้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง โดยในอนาคตการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินมีข้อได้เปรียบกว่าน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติ เนื่องจากราคาและการกระจายตัวของแหล่งถ่านหินเกิดเป็นบริเวณกว้าง คาดการณ์ว่า จะมีความต้องการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าสูงถึงร้อยละ 50 ในปี พ.ศ. 2573 (Osborne, 2013) อย่างไรก็ตาม ปัญหาของระบบพลังงานของโลกต่อสิ่งแวดล้อม คือ ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของระดับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก เกิดผลกระทบต่อเนื่องจากสภาวะที่อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น ทำให้ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น มีความแห้งแล้งหรือเกิดจำนวนพายุมาก การแก้ปัญหาเพื่อลดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน แสวงหาแหล่งพลังงานใหม่และเพิ่มประสิทธิภาพของพลังงานที่ผลิตได้ด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีการสร้างโรงไฟฟ้าถ่านหินไปสู่เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด เพื่อลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก มีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และกักเก็บแก๊ส นำของเสียมาหมุนเวียนและใช้ใหม่ ในขณะที่หลายประเทศให้ความสำคัญด้านพลังงานทดแทนจากทรัพยากรที่หมุนเวียนได้ คาดการณ์ว่าพลังงานหมุนเวียนจะใช้ในปริมาณร้อยละ 40-80 ของพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบพลังงานทั้งหมดในปี พ.ศ. 2593 (IEA, 2014) เพื่อรองรับปริมาณการใช้พลังงานในอนาคตใน 4 ด้าน ได้แก่ ผลิตรกระแสไฟฟ้า ความร้อนและความเย็น ขนส่งและสาธารณูปโภคและบริการ

สรุป

บทความนี้ได้อภิปรายรูปแบบของทรัพยากรหลักสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานในปัจจุบันและการเติบโตของทรัพยากรหมุนเวียนรูปแบบใหม่ รวมทั้งการลดปัญหาของการนำทรัพยากรมาใช้งานต่อสิ่งแวดล้อม การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก ซึ่งนำไปสู่สภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก โดยพัฒนาเทคโนโลยีใหม่มาทดแทน เช่น การผลิตพลังงานเชื้อเพลิงด้วยเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด ลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นการแก้ปัญหามลพิษอากาศ การหาทรัพยากรรูปแบบใหม่เพื่อใช้ประโยชน์ เช่น การขุดค้นมีเทนจากใต้สมุทร การพัฒนาพลังงานความร้อนใต้พิภพ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ รวมทั้งมวลชีวภาพ ซึ่งจะเป็นความท้าทายด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี ควบคู่กับโอกาสในการพัฒนาและแข่งขันได้ทางเศรษฐกิจศาสตร์ ต้นทุน รวมทั้งนโยบายด้านพลังงานในระดับประเทศและภูมิภาค เพื่อแสดงทิศทางการพัฒนาทรัพยากรทดแทนที่มีประสิทธิภาพ ใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน การขับเคลื่อนทางเศรษฐกิจและความมั่นคงทางพลังงานต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Akpan, U.G., Alhakim, A.A., & Ijah, U.J.J. (2008). Production of ethanol fuel from organic and food wastes. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 13, 1-11.
- API (American Petroleum Institute). (2014). Hydraulic fracturing: Unlocking America's natural gas resources. *American Petroleum Institute*. July 2014, DM2014-146.
- Bai, F.W., Anderson, W.A., & Moo-Young, M. (2008). Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnology Advances*, 26, 89-105.
- Beer, J.M. (2007). High efficiency electric power generation: The environmental role. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(2), 107-134.
- Bialas, W., Szymanowska, D., & Grajek, W. (2010). Fuel ethanol production from granular corn starch using *Saccharomyces cerevisiae* In a long term repeated SSF process with full stillage recycling. *Bioresource Technology*, 101(9), 3126-3131.
- Bilgen, S. (2016). Pollution control techniques and technologies for cleaner coal. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(22), 3308-3314.
- BP. (2016). *BP Statistical Review of World Energy*, 65th Ed., London: BP p.l.c.
- Brierley, A.S., & Kingsford, M.J. (2009). Impacts of climate change on marine organisms and ecosystems. *Current Biology*, 19(14): 602-614.
- Chen, H., & Fu, X. (2016). Industrial technologies for bioethanol production from lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 468-478.
- EEA (European Environmental Agency). (2013). EU bioenergy potential from a resource efficiency perspective, *EEA Report No 6/2013*, pp.14.
- EIA (U.S. Energy Information Administration). (2012). *Annual Energy Review 2011* (pp. 1). Washington: U.S. Energy Information Administration's (EIA)
- EIA (U.S. Energy Information Administration). (2016a). *The International Energy Outlook 2016 (IEO2016) with Projections to 2040*, DOE/EIA-0484 May 2016, pp. 83.
- EIA (U.S. Energy Information Administration). (2016b). *September Monthly Review*. DOE/EIA-0035(2016/9)
- Gumienna, M., Szambelan, K., & Jelen, H. (2014). Evaluation of ethanol fermentation parameters for bioethanol production from sugar beet pulp and juice. *Journal of the Institute of Brewing*, 120(4), 543-549.
- Harrison, E.S. (2010). Natural gas hydrates. *Coursework for Physics 240*. USA: Stanford University.
- IEA (International Energy Agency). (2012). World Energy Outlook 2012. Organisation for Economic Co-operation and Development: Paris and Washington, DC.; 2012.
- IEA (International Energy Agency). (2014). Extended Energy balances of OECD countries 1960-2012 and of non-OECD countries 1971-2012. International Energy Agency (IEA): Paris, France.

- Kings, H. (2017). Hydraulic Fracturing of Oil & Gas Wells Drilled in Shale. *Geoscience News and Information*. Retrieve July, 2017, from <http://geology.com/articles/hydraulic-fracturing/>
- Kumar, P. Barret, D.M., Delwiche, M.J., & Stroeve, P. (2009). Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48, 3713-3729.
- Liqiang, Q., & Yongtao, Y. (2011). Characteristics and the behavior in electrostatic precipitators of high-alumina coal fly ash from the Jungar power plant, Inner Mongolia, China. *Journal of Hazardous Materials*, 192, 222-225.
- Lior, N. (2008). Energy resources and use: The present situation and possible paths to the future. *Energy*, 33, 842-857.
- Marris, E., & Fairless, D. (2007). Wind farms' deadly reputation hard to shift. *Nature*, 447, 126.
- Meure, C.M., Etheridge, D., Trudinger, C., Steele, P., Langenfelds, R., van Ommen, T., Smith, A., & Elkins, J. (2006). Law dome CO₂, CH₄ and N₂O ice core records extended to 2000 years BP. *Geophysics Research Letters*, 33, L14810.
- Nicole, K. (2013). Status of advanced ultra-supercritical pulverized coal technology. *IEA Clean Coal Centre, CCC/229*. December 2013, 1-57.
- National Energy Technology Laboratory. (2011). *Energy Resource Potential of Methane Hydrate: An Introduction to the Science and Energy Potential of a Unique Resource*. (pp.10). USA: United States Department of Energy, February 2011.
- Osborne, D. (2013). *The coal handbook: Towards Cleaner Production. Volume 1: Coal Production*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited.
- Prasad, S., Singh, A., & Joshi, H.C. (2007). Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues. *Resources, Conservation and Recycling*, 50, 1-39.
- Ruppel, C.D. (2011). Methane hydrates and contemporary climate change. *Nature Education Knowledge*, 3(10), 29.
- Scouten, C. (1990). Part IV: Oil Shale. in *Fuel Science and Technology Handbook*. Speight, J.G. (Ed.), (pp. 795-1053), New York: Marcel Dekker Inc.
- Speight, J.G. (2012a). Kerogen. in *Shale Oil Production Processes*. (pp. 75-92). Amsterdam: Elsevier.
- Speight, J.G. (2012b). Mining and retorting. in *Shale Oil Production Processes*. (pp. 93-122). Amsterdam: Elsevier.
- Speight, J.G., (2013). In *Coal-fired Power Generation Handbook*. Beverly, USA: Scrivener Publishing.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., & Miller, H.L. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 996). Cambridge: Cambridge University Press,
- Suarez-Ruiz, I., & Crelling, J. C. (2008). *Applied Coal Petrology: The Role of Petrology in Coal Utilization*. Burlington: Elsevier Ltd.

- Suess, E., Bohrmann, G., Greinert, J., & Lausch, E. (1999). Flammable ice. *Scientific American* 281 (November 1999), 76-83.
- Thomason, A. (2015). Union of Concerned Scientists: Science for a Healthy Planet and Safer World. Retrieve July, 2017, from <http://www.ucsusa.org/clean-energy/renewable-energy/how-solar-panels-work#.V6p6wCh97IU>
- Thowarth, H. (2007). *Trace Element Behavior in Pulverized Fuel Fired Power Plants: Impact of Fuels and Emission Control Technologies* (pp. 25). Göttingen: Cuvillier Verlag.
- Torres Galvis, H.M., & de Jong, K.P. (2013). Catalysts for production of lower olefins from synthesis gas: A review. *ACS Catalysis* 3, 2130-2149.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). (2011). Report of the Conference of the Parties on Its Sixteenth Session. *The Cancun Agreements, United Nations Climate Change Conference*: Mexico; November 29-December 10, 2010.
- WWF International Report. (2011). *The Energy Report 100% Renewable Energy by 2050* (pp.19). Switzerland: WWF.
- Zgurovsky, M. (2012). *Sustainable Development Global Simulation: Analysis of Quality and Security of Human Life*, Croatia: InTech Publisher.