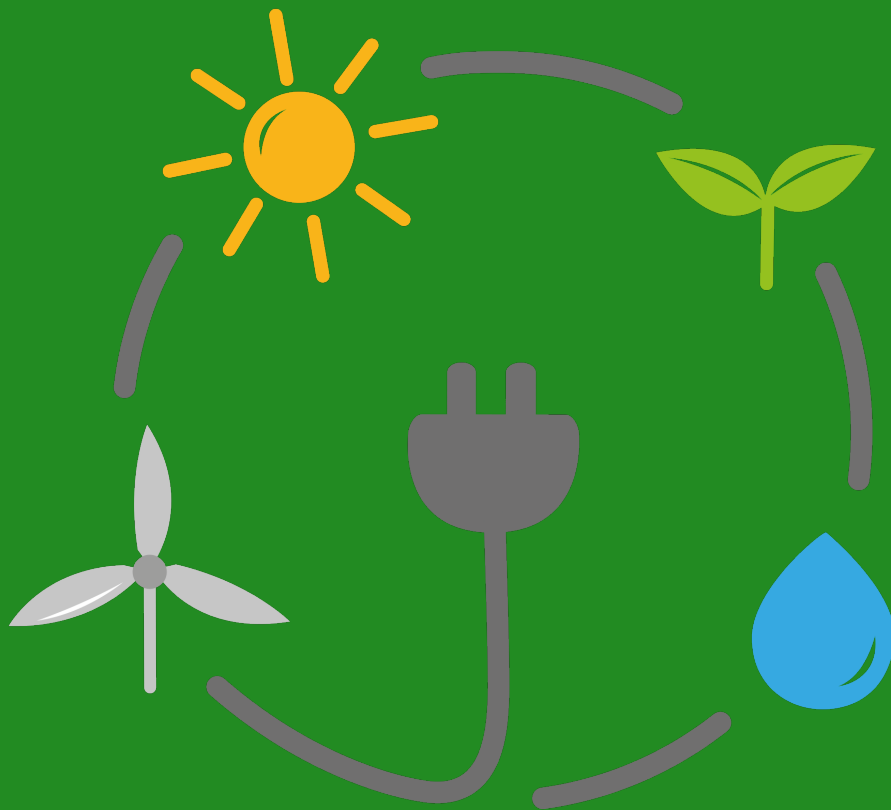




คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



พลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย

สัปปีนนท์ เอกอำพน

คำนำ

ตำราเล่มนี้ถูกเขียนขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนเกี่ยวกับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์สำหรับนักศึกษาปี ๓ - ๔ และสำหรับบุคคลทั่วไปที่มีความสนใจทางด้านดังกล่าว โดยที่แม้เนื้อหาบางส่วนจะมีคณิตศาสตร์ขั้นสูงเพื่อช่วยในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร แต่ความตั้งใจหลักของผู้เขียนต้องการจะให้ผู้ที่มีความสนใจและมีพื้นฐานคณิตศาสตร์ระดับมัธยมศึกษาควรจะสามารถอ่านแล้วเข้าใจได้ ทั้งนี้เนื่องจากผู้เขียนเล็งเห็นความสำคัญของการสร้างความเข้าใจพื้นฐานเรื่องของพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงเทคโนโลยีต่างๆที่จะนำไปประยุกต์ใช้เพื่อกักเก็บ แปลง หรือนำพลังงานนี้ไปใช้ เพื่อให้ผู้อ่านจะได้มีความเข้าใจที่ถูกต้อง มีพื้นฐานความรู้ที่เหมาะสมในการทำงานในเทคโนโลยีพลังงานสะอาดในอนาคต หรือแม้แต่สามารถทำความเข้าใจและคำนึงถึงความเหมาะสมของนโยบายหรือโครงการที่เกี่ยวข้องกับพลังงานแสงอาทิตย์ได้โดยไม่เชื่อเพียงคำโฆษณาหรืออวดอ้างที่อาจจะเป็นความจริง

ผู้เขียนหวังว่าข้อมูลที่ได้รับการรวบรวมไว้ในตำราเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านในวงกว้าง มิใช่เฉพาะระดับนักศึกษาหรือนักวิชาการเท่านั้น อย่างไรก็ตามก็ดี ถ้าหากผู้อ่านมีความรู้พื้นฐานทางด้านฟิสิกส์พื้นฐาน จะทำให้สามารถเข้าใจเนื้อหาและบทวิเคราะห์ได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงสามารถนำความรู้ที่ได้รับนำไปวิเคราะห์ข้อมูลอื่นๆได้ด้วยตนเอง

สัปปิณันท์ เอกอำพน

สารบัญ

คำนำ 1

1 พลังงานทดแทน 7

พลังงานแสงอาทิตย์ 7

เซลล์แสงอาทิตย์ 9

พลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ 13

เทอร์โมอิเล็กทริก 14

เซลล์เชื้อเพลิง 23

พลังงานลม 31

พลังงานชีวภาพ 37

การกักเก็บพลังงาน 42

2 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตพลังงาน 52

เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมเบื้องต้น 53

3 ความยั่งยืนในด้านพลังงานของไทย 60

การพัฒนาที่ยั่งยืน 60

พลังงานในประเทศไทย 69

สารบัญรูป

1.1	วงจรเทียบเท่าของเซลล์แสงอาทิตย์	10
1.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากในเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 25°C	12
1.3	ภาพวงจรแสดงคุณสมบัติของเครื่องผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	15
1.4	ประสิทธิภาพความร้อนของ TEG เทียบกับประสิทธิภาพคาร์โนต์	20
1.5	ทิศทางของความเร็วและแรงของลมที่กระทำบนใบกังหันลม	35
1.6	ประสิทธิภาพของกังหันลมแรงยกที่อัตราส่วนความเร็วต่างๆ จะเห็นได้ว่าค่า λ ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ราว 67 ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่สูงถึง 88%	36
1.7	กระบวนการผลิตไบโอเอทานอลจากน้ำตาลและแป้ง (วาดใหม่โดยได้รับอนุญาตจาก [2])	39
1.8	กระบวนการผลิตไบโอเอทานอลจากเซลลูโลส (วาดใหม่โดยได้รับอนุญาตจาก [2])	40
1.9	กระบวนการผลิตไบโอดีเซล (วาดใหม่โดยได้รับอนุญาตจาก [2])	41
1.10	ความผันแปรของอุปสงค์กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 1 วันในฤดูร้อน ฤดูฝนและฤดูหนาว [1]	43
1.11	แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	45
1.12	แบตเตอรี่ลิเทียม-แคดเมียม	46

1.13 แบตเตอรี่นิเกิลเมทัลไฮไดรด์	46
1.14 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	46
1.15 แผนภูมิเปรียบเทียบพลังงานจำเพาะและความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่ ทุติยภูมิ	47
1.16 ระบบล้อตุนกำลังแบบใช้แบร์ริงแม่เหล็ก	48
1.17 ค่า shape factor ของภาคตัดรูปทรงต่างๆที่ใช้ทำล้อตุนกำลัง	49
2.1 Historical and projected transportation fuel cell system cost	58
2.2 Historical and projected transportation fuel cell system cost	58
2.3 แผนภูมิเปรียบเทียบต้นทุนตลอดการใช้งานของโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงาน ลมแบบบนพื้นดินกับแบบนอกชายฝั่ง	59
3.1 Earthship Brighton, UK	63

สารบัญตาราง

1.1 เอนทัลปีของการก่อเกิด (H_0) และพลังงานอิสระของกิบส์ (G_0) ของสาร ต่างๆ	28
1.2 อัตราส่วนความแข็งแรงต่อมวลของวัสดุสำหรับผลิตล้อตุ้มกำลัง	50
1.3 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับออกแบบล้อตุ้มกำลัง	50
2.1 ต้นทุนวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิเล็กทริกในปัจจุบัน	55

1 พลังงานทดแทน

พลังงานแสงอาทิตย์

I'd put my money on the sun
and solar energy. What a
source of power! I hope we
don't have to wait until oil and
coal run out before we tackle
that.

Thomas A. Edison

เวลาพูดถึงพลังงานแสงอาทิตย์นั้น หลายคนอาจจะนึกถึงแดดร้อนๆในช่วงเดือนมีนาคมหรือเมษายน แต่จริงๆแล้วจะรู้ไหมว่าพลังงานที่มีอยู่ในแสงอาทิตย์นั้นประกอบด้วยหลายส่วน การจะดึงดวงพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้ได้เต็มที่มีนั้น จำเป็นที่เราจะต้องมีความเข้าใจถึงส่วนประกอบเหล่านี้

เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นมาจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นต่างๆ ดังนั้นเราควรจะเริ่มทำความเข้าใจเกี่ยวกับการแผ่รังสีของวัตถุดำก่อน

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

การแผ่รังสีของวัตถุดำ (blackbody radiation) เกิดจากการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากความร้อนของวัตถุซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์กับสิ่งแวดล้อม ซึ่งช่วงความถี่และความเข้มข้นของคลื่นต่าง ๆ นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงแล้วไม่มีวัตถุใดที่มีการแผ่รังสีเหมือนวัตถุดำแท้จริง โดเนเฉพาะอย่างยิ่งดาวฤกษ์อย่างพระอาทิตย์นั้นก็ไม่ใช่

ได้อยู่ในสภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อม แต่ความเข้าใจเรื่องของการแผ่รังสีนี้ก็สามารถนำมาใช้ทำความเข้าใจส่วนประกอบของแสงอาทิตย์ได้

ยกตัวอย่างเช่น ในวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำนั้น ในห้องมืดจะมองเห็นเป็นสีดำ เนื่องจากช่วงคลื่นที่แผ่ออกมาเป็นช่วงอินฟราเรดซึ่งมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงราว 500°C การแผ่รังสีเริ่มเข้าอยู่ในช่วงความถี่ที่ตามองเห็น (visible spectrum) และจะเริ่มมีสีแดง เมื่ออุณหภูมิสูงมากจะออกเป็นสีฟ้าขาว เมื่อวัตถุมีการแผ่รังสีเป็นสีขาว แสดงว่ามีการแผ่รังสีบางส่วนออกมาเป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ดวงอาทิตย์ซึ่งมีอุณหภูมิที่ผิวประมาณ 5800 K นั้น มีการแผ่รังสีออกมามากที่สุดในช่วงคลื่นแสงและอินฟราเรด และมีจำนวนอีกเล็กน้อยในช่วงอัลตราไวโอเล็ต

ทิศทางของแสงอาทิตย์

เนื่องจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา และพลังงานของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนพื้นที่หนึ่งๆขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแสงและมุมตกกระทบ เพื่อจะเพิ่มพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับ เราสามารถออกแบบอุปกรณ์ให้มีความสามารถในการติดตามดวงอาทิตย์ (solar tracking) ซึ่งในปัจจุบันมีเทคโนโลยีหลายวิธีที่ใช้ในการติดตาม ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่

การติดตามแบบใช้พลังงาน

การติดตามดวงอาทิตย์แบบใช้พลังงานหรือที่เรียกว่า Active Tracking นั้น เป็นการใช้ระบบ Feedback Loop โดยใช้ตัวรับแสงเพื่อช่วยในการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ประเมินผล แล้วส่งสัญญาณให้กับระบบควบคุมให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

การติดตามแบบไม่ใช้พลังงาน

วิธีการติดตามดวงอาทิตย์แบบไม่ใช้พลังงาน (Passive Tracking) ใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในการสร้างความเปลี่ยนแปลงในกลไกเพื่อจะปรับทิศทางของตัวรับแสง ซึ่งมีตัวอย่างดังนี้

1. แผ่นโลหะประกอบ

ระบบติดตามแสงอาทิตย์โดย ... ทำมาจากน้ำหนัที่ประกอบเข้ากับแผ่นโลหะ 2 ชนิดซึ่งมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนต่างกัน เมื่อแผ่นโลหะประกอบได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ โลหะทั้งสองชนิดจะขยายตัวไม่เท่ากันทำให้เกิดการโค้งงอของแผ่น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการปรับถ่วงน้ำหนักตัวรับแสงได้

2. ท่อบรรจุของเหลว-แก๊ส

ระบบติดตามด้วยหลักการนี้ใช้ของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำบรรจุในท่อสองด้านของตัวรับแสง ด้านที่ได้รับแสงจะเกิดความร้อน ทำให้ของเหลวที่อยู่ด้านในเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊ส ผลักดันให้ของไหลที่เหลือไปอยู่ที่ด้านที่ไม่โดนแสง ทำให้เกิดความไม่สมดุลของน้ำหนักของตัวรับแสง ซึ่งจะปรับทิศทางตามความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นโดยหันเข้าหาทิศทางของดวงอาทิตย์

วิธีการติดตามแสงอาทิตย์

กลไกในการติดตามแสงอาทิตย์ทำได้โดยการควบคุมมุมของแผงติดตามซึ่งมุมที่อยู่ควบคุมนี้จะเป็นมุมที่ตั้งฉากกันเพื่อให้การควบคุมแต่ละมุมเป็นอิสระต่อกัน โดยวิธีการติดตามมีสองแบบดังนี้

1. Clock-declination โดยมุมที่ใช้ในการควบคุมคือมุมตามทิศตะวันตก (θ_{CL}) และมุมเงย (θ_{DE})
2. Pseudo-azimuthal ควบคุมโดยใช้มุมอซิมูทและมุมเงย

เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell หรือ Photovoltaic cell) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงโดยใช้ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้ดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

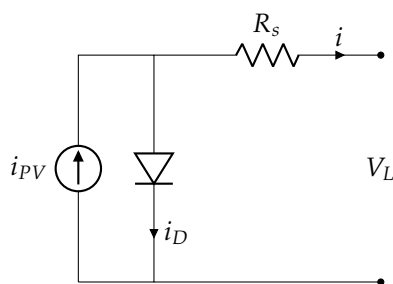
จริงๆแล้วปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุอื่นๆ นอกจากเซลล์สุริยะด้วย แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจาก

ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ไม่มีทิศทางหรือแนวโน้มใดๆ จึงทำให้ไม่มีกระแสลัพท์เกิดขึ้น จำเป็นจะต้องมีวิธีบังคับการไหลของอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดกระแสได้ นั่นเป็นสาเหตุที่เซลล์สุริยะจำเป็นต้องมีการออกแบบวงจรพิเศษ

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ในเซลล์สุริยะนั้น ระบบวงจรที่จะบังคับทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนที่เกิดจากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกคือ P-N junction ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำประเภทบวก (P-type) กับประเภทลบ (N-type) โดยที่สาร P-type นั้นมีหลุมอิเล็กตรอนเนื่องมาจากการ dope สารที่ขาดอิเล็กตรอนลงไปในซิลิกอน ส่วนสาร N-type นั้นมีอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากการ dope สารที่มีอิเล็กตรอนอิสระลงไป เมื่อนำสารทั้งสองแบบมาเชื่อมต่อกัน หลุมอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่เข้าหากันทำให้เกิด **Depletion Zone** ซึ่งป้องกันการไหลของอิเล็กตรอนอีก เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบ อิเล็กตรอนอิสระและหลุมอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจึงถูกบังคับให้ไหลผ่านความต้านทานภายนอกซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น

ปริมาณกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์สร้างขึ้นได้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพของ P-N junction ในการป้องกันกระแสนย้อนกลับ และประสิทธิภาพของวัสดุเซลล์ในการสร้างอิเล็กตรอนเมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ ซึ่งระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรเทียบเท่าได้โดยไดโอดและความต้านทานภายในดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1: วงจรเทียบเท่าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรเทียบเท่าดังกล่าว สามารถเขียนสมการแสดงปริมาณกระแสที่เซลล์สุริยะได้ว่า กระแสที่ไหลผ่านไปที่โหลดภายนอกเท่ากับกระแสที่เซลล์สุริยะสร้างได้ลบด้วยกระแสที่ไหลย้อนผ่าน P-N junction

$$i = i_{PV} - i_D \quad (1.1)$$

ปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน P-N junction ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (T) และความต่างศักย์ของโหนดภายนอก (V) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i_D = i_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (1.2)$$

เมื่อแทนสมการ 1.2 ลงในสมการ 1.1 จะได้สมการ

$$i = i_{PV} - i_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (1.3)$$

โดยที่ i_0 คือกระแสนอนกลับอิมิตัวของ P-N junction, i_{PV} คือกระแสจากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก และ i คือกระแสที่ผ่านตัวต้านทานภายนอก

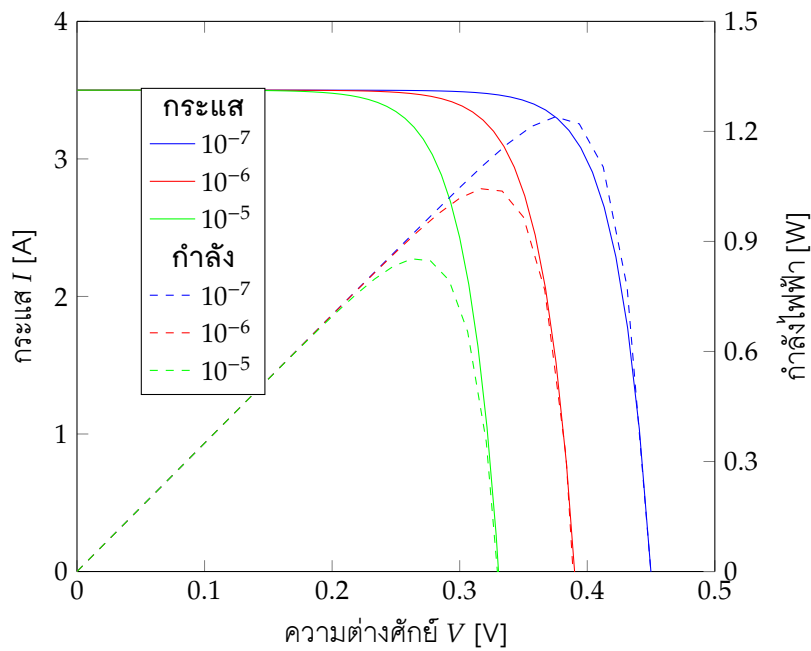
เซลล์สุริยะสามารถผลิตกำลังได้สูงสุดเมื่อ

$$\begin{aligned} P_{out} &= iV \\ \frac{dP_{out}}{dV} &= 0 \\ \exp \left(\frac{eV_{maxP}}{kT} \right) &= \frac{1 + \frac{i_{PV}}{i_0}}{1 + \frac{eV_{maxP}}{kT}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

สังเกตว่าสมการนี้มีค่า V_{maxP} อยู่ทั้งสองด้าน ไม่สามารถแก้สมการเชิงวิเคราะห์ได้ จำเป็นต้องแก้สมการเชิงตัวเลข

ประสิทธิภาพสูงสุดของแผงเซลล์สุริยะเกิดในตอนที่แผงผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\begin{aligned} P_{max} &= \frac{V_{maxP}(i_0 + i_{PV})}{1 + \frac{eV_{maxP}}{kT}} \\ \eta_{max} = \eta_{maxP} &= \frac{P_{max}}{I_{in}} = \frac{V_{maxP}(i_0 + i_{PV})}{I_{in} \left(1 + \frac{eV_{maxP}}{kT} \right)} \end{aligned}$$



รูปที่ 1.2: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากในเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 25°C

Example กำลังและประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

เซลล์สุริยะหนึ่งมีพื้นที่ 2 m² ในคู่มือระบุว่ามีความสมบัติดังนี้

Properties	Value (A/m ²)
i_{pv}	$0.3I_{rad}$
i_0	10^{-8}

บริเวณที่ติดตั้งมีกำลังจากแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ย 250 W/m² ระหว่างการทำงาน แผงเซลล์สุริยะจะมีอุณหภูมิ 50 C จงคำนวณหา

1. กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้
2. ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะนี้

Solution จากสมการ 1.4 เราจะสามารถคำนวณหาค่าความต่างศักย์ที่สร้างกระแสไฟฟ้าสูงสุด $P_{\max P}$ ได้ดังนี้

$$\exp\left(\frac{eV_{\max P}}{kT}\right) = \frac{1 + \frac{i_{PV}}{i_0}}{1 + \frac{eV_{\max P}}{kT}}$$

$$\exp\left(\frac{1.6 \times 10^{-19} V_{\max P}}{1.38 \times 10^{-23} \times (50 + 273)}\right) = \frac{1 + \frac{0.3 \times 250}{10^{-8}}}{1 + \frac{1.6 \times 10^{-19} V_{\max P}}{1.38 \times 10^{-23} \times (50 + 273)}}$$

$$V_{\max} = 0.549 \text{ V}$$

เมื่อคำนวณ $V_{\max P}$ ได้แล้วเราจะสามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะสามารถสร้างได้เท่ากับ

$$P_{\max} = \frac{V_{\max P}(i_0 + i_{PV})}{1 + \frac{kT}{eV_{\max P}}}$$

$$= \frac{0.549(10^{-8} + 75)}{1 + \frac{1.38 \times 10^{-23}(50 + 273)}{1.6 \times 10^{-19}(0.549)}}$$

$$P_{\max} = 39.189 \text{ W}$$

ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้หารด้วยกำลังของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผง

$$\eta = \frac{P_{\max}}{I_{rad}}$$

$$= \frac{39.189}{250}$$

$$= 0.157$$

พลังงานความร้อนแสงอาทิตย์

พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้รับการนำมาใช้ตั้งแต่โบราณกาลในชีวิตประจำวันไม่ว่าจะเป็นการถนอมอาหาร การตากแห้ง หรือเพื่อกับเก็บไว้ใช้ในภายหลัง ในบทนี้ เราจะมาพิจารณาการเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างพลังงานความร้อนและการนำพลังงานนั้นมาใช้

เทอร์โมอิเล็กทริก

เทอร์โมอิเล็กทริกซิตี (thermoelectricity) เป็นการแปลงพลังงานโดยตรงจากความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสารที่สามารถแปลงพลังงานด้วยวิธีนี้ได้เรียกว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีความน่าสนใจเนื่องจากในปัจจุบันในโลกของเรายังมีแหล่งพลังงานความร้อนราคาถูกอยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นแหล่งพลังงานพลังงานแสงอาทิตย์ หรือพลังงานความร้อนเหลือใช้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่างๆ โดยในการแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric effect) ซึ่งสามารถแบ่งย่อยออกเป็นปรากฏการณ์ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกัน 3 อย่างดังต่อไปนี้

ปรากฏการณ์ซีเบ็ค

เทอร์โมอิเล็กทริกซิตีเป็นปรากฏการณ์การเกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นบนตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนไป โดยมีหลักการมาจากการแพร่ (diffusion) ของพาหะของประจุ (charge carrier) ในสารเมื่อได้รับความร้อน โดยในสารตัวนำและกึ่งตัวนำทั่วไปจะมีทั้งอิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) ซึ่งมีประจุลบ และหลุม (holes) ซึ่งมีประจุบวก เมื่อวัสดุได้รับความร้อน พาหะในสารจะแพร่ตัวออกไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การสะสมของพาหะเหล่านี้ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้น

เมื่อนำไปต่อกับภาระภายนอกจะทำให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นได้

สารทุกชนิดมีความสามารถในการสร้างศักย์ไฟฟ้าจากการแพร่ของพาหะประจุที่ต่างกัน โดยค่าความสามารถนี้เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) ซึ่งอธิบายความสามารถศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากอุณหภูมิที่แตกต่างได้ดังนี้

$$V = \int_{T_L}^{T_H} (S_p - S_n) dT = \int_{T_L}^{T_H} S_{pn} dT \quad (1.5)$$

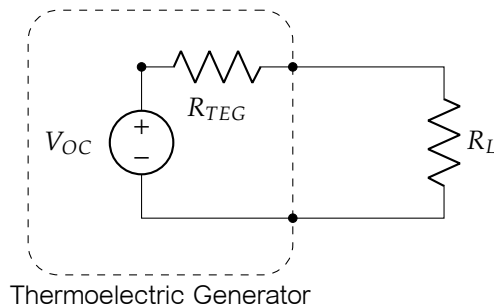
ซึ่งหากเราสมมติว่าค่าสัมประสิทธิ์นี้เป็นอิสระจากอุณหภูมิ จะสามารถเขียนสมการ 1.5 ใหม่ได้ว่า

$$V = S_{pn}\Delta T = S_{pn}(T_H - T_L)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์สำหรับวัสดุทั่วไปที่มีสมบัติเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้มีดังนี้

Material	$S, \text{ V / K} \times 10^{-6}$
Aluminum	-0.2
Constantan	-47
Copper	3.5
Iron	13.6
Platinum	-5.2
Germanium	375
Silicon	-455
Bismuth Telluride	200

อย่างไรก็ดี ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกจากวัสดุหนึ่งๆนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กเพียงอย่างเดียว เนื่องจากลักษณะการทำงานและการต่อเชื่อมของเทอร์โมอิเล็กทริกกับวงจรไฟฟ้านั้นเป็นเหมือนแบตเตอรี่ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนอธิบายเป็นวงจรได้ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3: ภาพวงจรแสดงคุณสมบัติของเครื่องผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

ซึ่งจะเห็นว่าเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเหมือนแหล่งศักย์ไฟฟ้า (V) ที่มีความต้านทานภายใน (R_{TEG})

$$V_L = S_{pn}\Delta T - iR_{int}$$

$$R_{int} = R_p + R_n$$

นอกจากนี้ อีกวิธีที่สามารถใช้เพิ่มกระแสไฟฟ้าก็คือการต่อคู่เทอร์โมอิเล็กทริ

กแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า เช่นเดียวกับการต่อแบตเตอรี่ AA หรือ AAA หลายก้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบพกพาทั้งหลาย ถ้าสมมติว่าต่อเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด m คู่ จะได้สมการไฟฟ้าว่า

$$V = mS_{pn}\Delta T$$

$$R_{teg} = mR_{int}$$

$$V_L = mS_{pn}\Delta T - imR_{int}$$

การที่จะสามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ให้ได้มากที่สุด จึงจำเป็นจะต้องมีการปรับความต้านทานภาระ (Load resistance, R_L) ให้เหมาะสม เพื่อให้มีการสูญเสียไปกับความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกให้น้อยที่สุด ซึ่งความต้านทานภาระที่เหมาะสมนี้สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$P_L = iV_L = imS_{pn}\Delta T - i^2mR_{int}$$

$$\frac{dP_L}{di} = 0 = m(S_{pn}\Delta T - 2iR_{int})$$

$$i_{maxP} = \frac{S_{pn}\Delta T}{2R_{int}}$$

$$i = \frac{V}{R} = \frac{mS_{pn}\Delta T}{mR_{int} + R_L}$$

$$R_L = mR_{int}$$

หมายความว่า ความต้านทานภาระควรจะเท่ากับความต้านทานภายใน ซึ่งนี้เรียกว่า load matching ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ได้กับการผลิตไฟฟ้าด้วยกระบวนการอื่นๆได้เช่นกัน

ปรากฏการณ์เพลเทียร์

ปรากฏการณ์เพลเทียร์เป็นปรากฏการณ์ที่ตรงกันข้ามกับปรากฏการณ์ซีเบ็ค ในกรณีของปรากฏการณ์ซีเบ็คนั้น ผลต่างของอุณหภูมิสร้างให้เกิดความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า ส่วนปรากฏการณ์เพลเทียร์เป็นการสร้างผลต่างของอุณหภูมิเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เปรียบเทียบได้กับกรณีของปรากฏการณ์แม่เหล็กไฟฟ้าในมอเตอร์ ซึ่งเมื่อใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวนำ

ซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการหมุน ในทางตรงกันข้าม ถ้านำตัวนำ
ไปหมุนภายในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นเช่นกัน

ประโยชน์ของปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำความ
เย็น โดยตัวทำความเย็นที่อาศัยหลักการนี้เรียกว่าตัวทำความเย็นเพลเทียร์
(Peltier cooler) โดยอัตราการกำจัดความร้อนสามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{\text{peltier}} = m S_{pn} T_H i \quad (1.6)$$

ซึ่งตัวทำความเย็นนี้มีจุดเด่นเช่นเดียวกับตัวผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริ
ก นั่นคือไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว จึงทำให้มีอัตราการสึกหรอน้อยกว่า
ระบบทำความเย็นแบบใช้สารทำความเย็นทั่วไป ลดความซับซ้อนของ
ระบบทำความเย็น รวมถึงลดค่าซ่อมแซมและดูแลรักษาได้ แม้ปัจจุบัน
ประสิทธิภาพจะยังไม่ดีเท่ากับระบบทำความเย็นแบบทั่วไป และมีราคาสูง
เมื่อเทียบกับอัตราการกำจัดความร้อน แต่ก็ได้มีการนำมาใช้ในกรณีที่มีพื้นที่
การติดตั้งจำกัด เช่นระบบทำความเย็นในหน่วยประมวลผล (processor)
ของคอมพิวเตอร์

ปรากฏการณ์ทอมสัน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์
ซีเบ็กของแต่ละวัสดุนั้นมักจะแปรผันกับอุณหภูมิ ดังนั้นในกรณีที่วัสดุมี
อุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กก็อาจจะไม่สม่ำเสมอได้เช่น
กัน และเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุนี้ก็จะทำให้เกิดการเกิดปรากฏการณ์
เพลเทียร์เกิดขึ้นได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า'ปรากฏการณ์ทอมสัน' ดังตาม
ชื่อของลอร์ดเคลวิน (ชื่อจริง William Thomson) ซึ่งได้ทำนายการเกิด
ปรากฏการณ์นี้ในตัวนำที่มีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอดังที่ได้กล่าวมาแล้วใน
ส่วนของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กของแต่ละวัสดุ
นั้นมักจะแปรผันกับอุณหภูมิ ดังนั้นในกรณีที่วัสดุมีอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ
ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กก็อาจจะไม่สม่ำเสมอได้เช่นกัน และเมื่อมีกระแสไฟฟ้า
ไหลผ่านวัสดุนี้ก็จะทำให้เกิดการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์เกิดขึ้นได้ ปรากฏ
การณ์นี้เรียกว่า'ปรากฏการณ์ทอมสัน' ดังตามชื่อของลอร์ดเคลวิน (ชื่อ
จริง William Thomson) ซึ่งได้ทำนายการเกิดปรากฏการณ์นี้ในตัวนำที่มี
อุณหภูมิไม่สม่ำเสมอและทำการทดลองจนสามารถพิสูจน์ได้จริง

ในกรณีที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J ไหลผ่านตัวนำที่มีค่าสัมประสิทธิ์

ทอมสัน K อัตราการเกิดความร้อนจะมีค่าเท่ากับ

$$q_{thomson} = -KJ \cdot \nabla T$$

สังเกตว่าในสมการนี้ กำลังความร้อนที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น W/m^3 เนื่องจากคุณสมบัติของตัวนำไม่สม่ำเสมอ กำลังความร้อนจึงไม่คงที่และต้องอาศัยการอินทิเกรตเพื่อหาค่าบนพื้นที่หรือปริมาตร

หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก

ในระหว่างการทำงานจริงมักมีปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสองอย่างขึ้นไปเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ต่างๆและผลที่เกิดขึ้นกับเทอร์โมอิเล็กทริก อย่างไรก็ตาม กิติ สำหรับในตำราเล่มนี้ จะขอกล่าวถึงความสัมพันธ์เมื่อเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานที่สถานะคงที่ (steady state) ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิที่จุดต่างๆคงที่ ในที่นี้เราจะพิจารณาที่ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นดังต่อไปนี้

1. ความร้อนจากแหล่งความร้อนเข้าสู่ด้านร้อน Q_{in}
2. ความร้อนจากปรากฏการณ์การเกิดความร้อนของจูล Q_{joule}

$$Q_{joule} = i^2 R$$

3. ความร้อนออกจากด้านร้อนไปสู่ด้านเย็นด้วยการนำความร้อน Q_{cold}

$$Q_{cold} = K \Delta T$$

4. ความร้อนออกจากด้านร้อนด้วยปรากฏการณ์เพลเทียร์ $Q_{peltier}$

$$Q_{peltier} = S_{pn} T_H i$$

ที่สถานะคงที่ อัตราการได้รับความร้อนและสูญเสียความร้อนเท่ากัน ซึ่งอัตราการได้รับความร้อน (Q_{in}) มาจาก

$$Q_{in} + Q_{joule} = Q_{cold} + Q_{peltier}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{in} &= Q_{cold} + Q_{peltier} - Q_{joule} \\
 &= mS_{pn}T_H i + K\Delta T - \frac{i^2 R_{teg}}{2}
 \end{aligned}$$

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ผ่านตัวต้านทานเท่ากับ

$$P_{out} = i^2 R_L$$

ซึ่งเราสามารถเอามาเขียนเป็นสมการประสิทธิภาพความร้อนของ TEG เท่ากับ

$$\eta = \frac{P_{out}}{Q_{in}} \quad (1.7)$$

$$= \frac{i^2 R_L}{mS_{pn}T_H i + K\Delta T - \frac{i^2 R_{teg}}{2}} \quad (1.8)$$

กำหนดอัตราส่วน

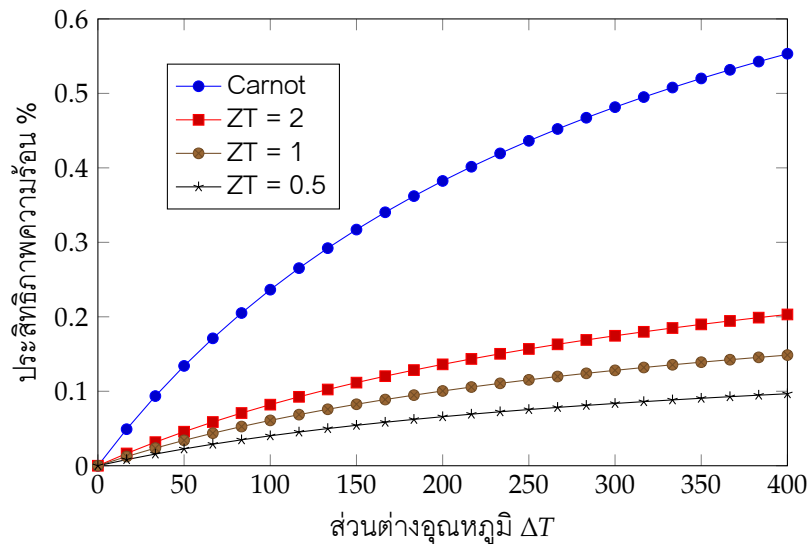
$$Z = \frac{S_{pn}^2}{K_{teg} R_{teg}} \quad (1.9)$$

ซึ่งเรียกว่า figure of merit และแทนค่าเข้าในสมการ 1.7 จะสามารถเขียนสมการประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกได้ว่า

$$\eta = \frac{\Delta T}{2T_H + \frac{2}{Z} - \frac{\Delta T}{2}} \quad (1.10)$$

จากสมการข้างต้น ที่อุณหภูมิ T_H และ T_L ใดๆ ประสิทธิภาพของ TEG จะสูงสุดเมื่อมีค่า Z สูง ซึ่งแปลว่าวัสดุจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กสูง นำความร้อนได้ดี และมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ซึ่งคุณสมบัติสองอย่างหลังนี้หาได้ยาก เพราะวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ก็มักจะนำความร้อนได้ดีเช่นกัน ส่วนวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ก็มักจะเป็นฉนวนความร้อนด้วย

ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อนส่วนใหญ่ (นอกจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน) มักจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพเป็นสัดส่วนเทียบกับประสิทธิภาพคาร์โนต์ซึ่งเป็นประสิทธิภาพสูงสุดในทางทฤษฎีของเครื่องยนต์ความร้อนใดๆ



รูปที่ 1.4: ประสิทธิภาพความร้อนของ TEG เทียบกับประสิทธิภาพคาร์โนต์

จากรูป 1.4 จะเห็นว่าแม้ที่ $ZT = 2$ ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกยังมีค่าอยู่ที่ประมาณ 10% - 20% ของประสิทธิภาพคาร์โนต์ ซึ่งนับว่ายังต่ำมากเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายในทั่วไปซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 50% - 80% ของประสิทธิภาพคาร์โนต์

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

จากสมการ 1.9 จะเห็นว่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้า การนำความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ก การที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพสามารถทำได้โดยใช้วิธีการขั้นสูงในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุหรือใช้วัสดุที่มีขนาดเล็กมาก ... วัสดุที่ได้รับความสนใจและได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกได้แก่

1. สารประกอบแฮลโคเจนของบิสมัท (Bismuth Chalcogenides)

สารประกอบในกลุ่มนี้ อย่างบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) และบิสมัทซีลีไนด์ (Bi_2Se_3) ถือเป็นเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดที่อุณหภูมิห้องกลุ่มหนึ่ง โดยมีค่า figure of merit (ZT) อยู่ที่ประมาณ 0.8 - 1.0

บิสมัทเทลลูไรด์เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องที่ดี และสามารถนำมาใช้สำหรับการทำความเย็นได้ที่อุณหภูมิประมาณ 300 K (27 °C)

สารประกอบเหล่านี้ได้มาจากการผลิตผลึกเดี่ยวด้วยวิธีของ Czochralski บางส่วนถูกผลิตโดยการเย็นตัวจากของเหลวหรือเทคนิคการขึ้นรูปโลหะผง วัสดุอย่างหลังนี้จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบผลึกเดี่ยว แต่จะมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าและทนต่อความบกพร่องทางโครงสร้างและสิ่งแปลกปลอมได้ดีกว่า การสร้างความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าสามารถทำได้โดยเพิ่มสารป้อนหรือเทลลูเรียมเข้าไปในสารประกอบให้เกินความไม่สมดุล หรือการเพิ่มสารแปลกปลอมจำพวกฮาโลเจนเข้าไป การใช้สารประกอบเทลลูไรด์ยังไม่สามารถใช้ในวงกว้างได้เนื่องจากเทลลูเรียมมีพิษและเป็นธาตุที่หาได้ยาก

2. ตะกั่วเทลลูไรด์ (PbTe)

งานวิจัยโดย Heremans และคณะแสดงให้เห็นว่าตะกั่วเทลลูไรด์ที่โด๊ปด้วยเทลเลียมมีค่า figure of merit สูงถึง 1.5 ที่อุณหภูมิ 773 K นอกจากนี้ งานวิจัยโดย Snyder และคณะได้รายงานว่าสามารถสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีค่า $ZT = 1.4$ ที่อุณหภูมิ 750 K โดยใช้ตะกั่วเทลลูไรด์ และยังสามารถสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกที่มี $ZT = 1.8$ ที่อุณหภูมิ 850 K โดยใช้ตะกั่วเทลลูไรด์ซีลีไนต์ที่โด๊ปด้วยโซเดียม (sodium-doped $PbTe_{1-x}Se_x$)

มีรายงานจากงานวิจัยโดย Biswas และคณะว่าสามารถแปลงพลังงานความร้อนเหลือทิ้งเป็นไฟฟ้าด้วยประสิทธิภาพ 15 - 20% (เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่า ZT ถึง 2.2) ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดที่เคยมีการรายงาน

3. สารประกอบคลาเทรตอินทรีย์ (Inorganic Clathrates)

กลุ่มสารประกอบเหล่านี้มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไปว่า $A_xB_yC_{46-y}$ สำหรับกลุ่มที่ 1 และ $A_xB_yC_{136-y}$ สำหรับกลุ่มที่ 2 โดยที่ B และ C เป็นธาตุในหมู่ III และ IV ซึ่งประกอบตัวเป็นเหมือนกรอบล้อม A ไว้

การออกแบบเทอร์โมอิเล็กทริก

การเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถทำได้โดยการออกแบบขนาดวัสดุหรือเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของด้านร้อนและเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก

1. ตัวอย่าง: การวิเคราะห์เทอร์โมอิเล็กทริก เทอร์โมอิเล็กทริกทำมาจาก $PbTe-Bi_2Te_3$ ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

ขาคจากวัสดุทั้งสองชนิดมีพื้นที่หน้าตัด (16 mm^2) และความยาว (4 mm) เท่ากัน ที่สภาวะคงที่อุณหภูมิด้านร้อนเท่ากับ 200 C และด้านเย็นเท่ากับ 50 C จงคำนวณหา

Properties	P-type	N-type
Seebeck coefficient 10^{-6}	300	-100
Electrical resistivity 10^{-6}	9	10
Thermal conductivity	1.2	1.4

- (a) ค่า Z ของเทอร์โมอิเล็กทริกนี้
- (b) กำลังสูงสุดที่เทอร์โมอิเล็กทริกนี้ผลิตได้
- (c) ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกนี้

2. เฉลย: การวิเคราะห์เทอร์โมอิเล็กทริก

(a) ค่า Z สามารถคำนวณได้จากสมการ $Z = \frac{S_{pn}^2}{K_{teg}R_{teg}}$

$$S_{pn} = S_p - S_n = 0.0003 - (-0.0001) \\ = 0.0004$$

$$K_{teg} = K_p + K_n = \frac{\kappa_p A}{L} + \frac{\kappa_n A}{L} \\ = \frac{1.6 \times 10^{-5}}{4.00 \times 10^{-3}} (1.2 + 1.4) \\ = 0.0104$$

$$R_{teg} = R_p + R_n = \frac{\rho_p L}{A} + \frac{\rho_n L}{A} \\ = \frac{0.004}{1.6e-05} (1.2 + 1.4) \\ = 0.00475$$

$$Z = \frac{S_{pn}^2}{K_{teg}R_{teg}} \\ = 0.00324$$

- (b) กำลังสูงสุดที่ TEG สามารถผลิตได้มาจากการ load matching โดยการให้ $R_L = R_{teg}$

$$P_L = iV_L \\ = i \left(S_{pn} \Delta T - i^2 R_{teg} \right) \\ = \frac{S_{pn} \Delta T}{2R_{teg}} \left(S_{pn} \Delta T - \frac{S_{pn} \Delta T}{2R_{teg}} R_{teg} \right) \\ = \frac{S_{pn}^2 \Delta T^2}{4R_{teg}} \\ = \frac{0.0004^2 (200 - 50)^2}{4(0.00475)} \\ = 1.89 \times 10^{-1}$$

(c) ประสิทธิภาพของ TEG สามารถคำนวณได้จากสมการ 1.10

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\Delta T}{2T_H + \frac{2}{Z} - \frac{\Delta T}{2}} \\ &= \frac{200 - 50}{2(200 + \frac{2}{0.00324} + \frac{200-50}{2})} \\ &= 0.159\end{aligned}$$

เซลล์เชื้อเพลิง

It doesn't matter whether you can or cannot achieve high temperature superconductivity or fuel cells, they will always be on the list because if you could achieve them they would be extremely valuable.

Martin Fleischmann

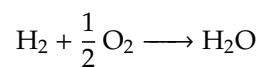
เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งแตกต่างจากการใช้เครื่องยนต์ในการปั่นไฟซึ่งเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกลแล้วจึงเป็นพลังงานไฟฟ้าในที่สุด เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเพียงขั้นตอนเดียว และยังไม่มีขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน จึงทำให้สามารถทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีในรูปแบบอื่น

จุดเด่นของเซลล์เชื้อเพลิงคือสามารถนำการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการสันดาปมาใช้ได้โดยตรง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (electrochemical reactions) ซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับแบตเตอรี่ ข้อแตกต่างของแบตเตอรี่คือสารเคมีหรือเชื้อเพลิงทั้งหมดจะถูกบรรจุอยู่ในภายในตัวแบตเตอรี่ ในขณะที่เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงถูกเก็บไว้แยกกัน และถูกดึงเข้ามาใช้เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นเท่านั้น

ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง

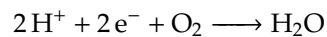
ปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง

อันที่จริงแล้ว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงก็คือปฏิกิริยาการสันดาป แต่เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์เคมีไฟฟ้า เราจึงควรทำความเข้าใจกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่มีการแลกเปลี่ยนระหว่างการเกิดปฏิกิริยาขึ้น ยกตัวอย่างเช่น

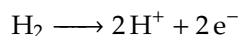


ในปฏิกิริยานี้ มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจน โดยที่ไฮโดรเจนเป็นผู้ให้ ส่วนออกซิเจนเป็นผู้รับ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน เรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ซึ่งมาจากการรวมกันของปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) และออกซิเดชัน (oxidation reaction) ซึ่งปฏิกิริยาข้างต้นสามารถแบ่งออกเป็นปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันได้ดังนี้

1. ปฏิกิริยารีดักชัน



2. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



ในปฏิกิริยารีดักชัน สารจะมีการรับอิเล็กตรอน (จาก H^+ ซึ่งมีเลขประจุเป็น +1 ไปเป็น H_2O ซึ่งไฮโดรเจนมีประจุเป็น 0) ส่วนในปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารจะมีการปล่อยอิเล็กตรอน (จาก H_2 ซึ่งมีประจุเป็น 0 เป็น H^+ ซึ่งมีประจุเป็น +1)

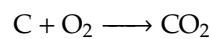
พลังงานที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง

พลังงานตั้งต้นของเซลล์เชื้อเพลิงมาจากพลังงานเคมีของสารตั้งต้น แล้วพลังงานเคมีคืออะไร พลังงานเคมีคือพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในพันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลใดๆ และจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดปฏิกิริยาสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ขึ้น ซึ่งพลังงานในพันธะเคมีเหล่านี้สามารถวัดได้โดยใช้ enthalpy of formation (ΔH_f) ซึ่งพลังงานงานที่จะสามารถแปลงเป็น

พลังงานไฟฟ้าได้มาจากพลังงานเคมีที่ได้รับการปลดปล่อยจากปฏิกิริยารีดอกซ์ (ΔH)

$$\Delta H = \sum (\Delta H)_{products} - \sum (\Delta H)_{reactants}$$

ค่า enthalpy of formation ของสารทั่วไปสามารถหาได้จากตาราง



$$\begin{aligned}\Delta H &= \sum (\Delta H)_{products} - \sum (\Delta H)_{reactants} \\ &= \Delta H_{\text{CO}_2} - \Delta H_{\text{C}} - \Delta H_{\text{O}_2} \\ &= -394 \times 10^3 - 0 - 0 \\ &= -394 \times 10^3 \text{ J/mol CO}_2\end{aligned}$$

ในตัวอย่างนี้ พลังงานที่เปลี่ยนแปลงเป็นลบ แสดงว่าพลังงานของผลิตภัณฑ์น้อยกว่าของสารตั้งต้น หมายถึงมีการคายพลังงานออกมา ซึ่งเป็นปกติสำหรับปฏิกิริยาสันดาปทั่วไป เรียกได้อีกอย่างว่าปฏิกิริยาการคายพลังงาน (exothermic reaction)

แต่พลังงานที่คายออกมาไม่สามารถถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมด จะต้องมีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ในกรณีที่ปฏิกิริยาเป็นแบบย้อนกลับได้ การสูญเสียพลังงานความร้อนเท่ากับ

$$\text{Heat Loss} = \int T dS$$

ที่สภาวะคงที่ การสูญเสียความร้อนจะกลายเป็น

$$\text{Heat Loss} = T \Delta S$$

หากเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพ 100% พลังงานเคมีที่เหลือจะสามารถ

แปลงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมด

$$W_e = \Delta H - T\Delta S$$

แต่หากปฏิกิริยาไม่ได้เกิดแบบย้อนกลับได้ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จะน้อยกว่านี้

พลังงานอิสระของกิบส์

พลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs Free Energy, GFE) เป็นฟังก์ชันสถานะ (state function) ค่าสัมบูรณ์ของพลังงานอิสระของกิบส์หาได้ยากและไม่ได้มีประโยชน์นัก ส่วนที่มีประโยชน์จริงๆ คือผลต่างหรือพลังงานที่เปลี่ยนไประหว่างสารตั้งต้นกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งใช้อธิบายว่าปฏิกิริยาหนึ่งๆ สามารถเกิดขึ้นเองได้หรือไม่ หาได้จาก

$$G = H - TS \quad (1.11)$$

เมื่อทำการหาอนุพันธ์ของ GFE ในกระบวนการที่มีอุณหภูมิคงที่ (isothermal process)

$$dG = dH - TdS \quad (1.12)$$

สำหรับความเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของเอนทัลปีและเอนโทรปี

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1.13)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตได้ในสมการ 1.13 ซึ่งพลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาใดๆ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta G = \sum \Delta G_{products} - \sum \Delta G_{reactants} \quad (1.14)$$

จากสมการ 1.14 หากพิจารณาปฏิกิริยาของสารที่เป็นแก๊สอุดมคติ จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ทางอุณหพลศาสตร์ได้ดังนี้

$$dU = TdS - PdV$$

$$H = U + PV$$

หาค่าอนุพันธ์ของ H ได้

$$\begin{aligned} dH &= dU + PdV + VdP \\ &= TdS - PdV + PdV + VdP \\ &= TdS + VdP \end{aligned}$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

$$VdP = dH - Tds = dG$$

หากพิจารณาสารตั้งต้น 1 mol จะได้ว่า

$$\begin{aligned} PV &= R_u T \\ V &= \frac{R_u T}{P} \end{aligned}$$

พิจารณาเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะคงที่ จะได้ว่า T เป็นค่าคงที่

$$\begin{aligned} \int_{G_0}^G dG &= \int_{P_0}^P \frac{R_u T}{P} dP \\ G - G_0 &= R_u T \ln \frac{P}{P_0} \end{aligned}$$

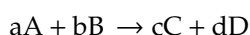
โดยกำหนดให้ G_0 คือพลังงานอิสระของกิบส์อ้างอิงที่อุณหภูมิ 25 °C และความดัน 1 บรรยากาศ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการพลังงานอิสระของกิบส์เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันได้โดย

$$G = G_0 + R_u T \ln P$$

ซึ่งพลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนไปในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถอ้างอิงค่า H_0 และ G_0 ได้จากตารางที่ 1.1

พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี

ในปฏิกิริยาเคมี พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนไปเท่ากับส่วนต่างระหว่างพลังงานของผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้น ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของปฏิกิริยา



พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนไปเท่ากับ

$$\Delta G = G_{0C} + G_{0D} - G_{0A} - G_{0B} - R_u T \left(\ln P_C^c + \ln P_D^d - \ln P_A^a - \ln P_B^b \right)$$

$$\Delta G = \Delta G_0 + R_u T \ln \frac{P_C^c P_D^d}{P_A^a P_B^b}$$

Compound or ion	H_0 ($\times 10^3$ J/mol)	G_0 ($\times 10^3$ J/mol)
CO	-110	-137.5
CO ₂	-394	-395
CH ₄	-74.9	-50.8
H ₂ O(l)	-286	-237
H ₂ O(g)	-241	-228
LiH	+128	+105
NaCO ₂	-1122	-1042
CO ₃ ⁻²	-675	-529
H ⁺	0	0
Li ⁺	-277	-293
OH ⁻	-230	-157
CH ₃ OH(g)	-201	-162.6

ตารางที่ 1.1: เอนทาลปีของการก่อเกิด (H_0) และพลังงานอิสระของกิบส์ (G_0) ของสารต่างๆ

ถ้าหากพลังงานเคมีทั้งหมดสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และมีอิเล็กตรอน n ตัวถูกปล่อยออกมาต่อ 1 โมเลกุลของสารตั้งต้น เราจะสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$W_e = \Delta G = qE_g = neE_g \quad (1.15)$$

โดยที่ W_e คือพลังงานไฟฟ้า q คือประจุไฟฟ้าที่มีการแลกเปลี่ยน และ E_g คือ ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

ศักย์ไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

จากสมการ 1.15 ศักย์ไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถสร้างได้เท่ากับพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปหารด้วยประจุที่มีการแลกเปลี่ยน ดังนั้นหากทุกๆโมเลกุลของสารตั้งต้นมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน n ตัว สมการแสดงศักย์ไฟฟ้าต่อ 1 mol ของสารตั้งต้นจะเป็น

$$E_g = \frac{W_e}{-nF} = E_g^0 + \frac{R_u T}{nF} \ln \frac{P_A^a P_B^b}{P_C^c P_D^d} \quad (1.16)$$

โดยที่ F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ซึ่งมีค่าเท่ากับประจุของอิเล็กตรอนจำนวน 1 mol $= 6.02 \times 10^{23} \times 1.6 \times 10^{-19} = 9.65 \times 10^4$ C สมการ 1.16 นี้ถูกตั้งชื่อตามผู้ค้นพบว่า สมการเนิร์นสท์ (Nernst Equation)

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ในทางทฤษฎี หากพลังงานอิสระของกิบส์จากปฏิกิริยาทั้งหมดถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าสูงที่สุด

$$\eta_{\max} = \frac{W_{e,\max}}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (1.17)$$

ในทางปฏิบัติแล้ว ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในเซลล์เชื้อเพลิงมักจะมีการสูญเสียพลังงานความร้อนและอื่นๆ ทำให้ศักย์ไฟฟ้าไม่สูงถึง E_g ที่คำนวณได้ด้วย

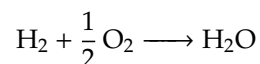
สมการของเนิร์นสต์ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะเหลือ

$$\eta = \frac{W_e}{\Delta H} = \frac{nFV_L}{\Delta H} \quad (1.18)$$

ตัวอย่าง: ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนได้รับไฮโดรเจนจากถังอัดความดันที่ 5 atm ในขณะที่ออกซิเจนได้มาจากอากาศที่ 1 atm ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาเป็นไอน้ำที่ 1 atm อุณหภูมิขณะที่เซลล์ทำงานอยู่ที่ 200 C คำนวณศักย์ไฟฟ้าที่เซลล์ผลิตได้และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนี้

เฉลย: ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน จากสมการการสันดาปไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิง



- อุณหภูมิที่เซลล์ทำงาน = 200° C = 200 + 273 = 473 K
- เนื่องจากอากาศมีออกซิเจนอยู่ประมาณ 21% ความดันของออกซิเจนเข้าสู่เซลล์มีค่าเป็น $0.21 \times 1 = 0.21 \text{ atm}$
- มีการปล่อยและรับอิเล็กตรอน 2 ตัวต่อ 1 โมเลกุลของน้ำ ($n = 2$)

จากสมการที่ 1.16 เราสามารถแทนค่าเพื่อหาศักย์ไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E_g = \frac{W_e}{-nF} = -\frac{\Delta G_0}{nF} + \frac{R_u T}{nF} \ln \frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{1/2}}{P_{\text{H}_2\text{O}}}$$

จะสามารถแทนค่าได้โดยอ้างอิงปริมาณต่อ 1 mol H_2O

$$\begin{aligned} E_g &= -\frac{-228000.0 - 0 - 0.5(0)}{-296500.0} + \frac{8.314473}{296500.0} \ln \frac{(5)(0.21)^{0.5}}{1} \\ &= \frac{-231261}{-296500.0} \\ &= 1.198 \text{ V} \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\Delta G_0 - RT \ln(P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{0.5} / P_{\text{H}_2\text{O}})}{\Delta H_{\text{water}}} \\ &= \frac{-231261}{-286000} \\ &= 0.809\end{aligned}$$

ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้เมทานอลโดยตรง

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง

พลังงานลม

พลังงานลมนับเป็นอีกพลังงานหนึ่งที่เกิดจากการไหลของอากาศ ดังนั้น การแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าจึงเป็นการแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้เราจะกล่าวถึงหลักการ วิธี และประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานลมด้วยเทคโนโลยีปัจจุบัน รวมถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ในการผลิตไฟฟ้าจากระดับเล็กไปจนถึงระดับใหญ่

หลักการแปลงพลังงานลม

พลังงานลมเป็นพลังงานจลน์ที่มีส่วนประกอบมาจากมวลของอากาศและความเร็วลม ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว คำจำกัดความของพลังงานจลน์คือ

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

แต่เนื่องจากลมมีการเคลื่อนที่ต่อเนื่อง จึงสะดวกกว่าที่จะอธิบายถึงพลังงานลมในรูปของ กำลังลม แทนโดยใช้อัตราการไหลของมวลแทน

$$\frac{dE}{dt} = P_w = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \quad (1.19)$$

หากเราสมมติว่าลมมีความเร็วคงที่ จะสามารถคำนวณอัตราการไหลของมวลได้ว่า

$$\dot{m} = \rho A v \quad (1.20)$$

เมื่อแทนสมการ 1.20 ลงในสมการ 1.19 จะได้สมการแสดงกำลังของลมที่ความเร็ว v

$$P_w = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1.21)$$

ถ้ามีการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อดักและแปลงกำลังลมนี้เป็นกำลังไฟฟ้า ความเร็วลมขาออก v_o ต้องน้อยกว่าความเร็วลมขาเข้า v_i ดังนั้นความเร็วลมและอัตราการไหลของมวลผ่านอุปกรณ์เฉลี่ยคือ

$$v_{avg} = \frac{v_i + v_o}{2} \quad (1.22)$$

$$\dot{m} = \frac{\rho A}{2} (v_i + v_o) \quad (1.23)$$

ดังนั้น ในทางทฤษฎีแล้วกำลังที่อุปกรณ์ดึงมาจากลมได้เท่ากับผลต่างของกำลังลมขาเข้ากับขาออก

$$\begin{aligned} P_{output} &= P_i - P_o \\ &= \frac{\dot{m}}{2} (v_i^2 - v_o^2) \\ &= \frac{\rho A}{4} (v_i + v_o) (v_i^2 - v_o^2) \end{aligned} \quad (1.24)$$

ซึ่งเราสามารถหาค่าของความเร็วลมขาออกซึ่งทำให้อุปกรณ์สามารถผลิตกำลังได้สูงสุด โดยการหาอนุพันธ์ของสมการกำลังแล้วตั้งให้เท่ากับศูนย์ เพื่อแก้สมการ

$$\begin{aligned}\frac{dP_{turbine}}{dk} = 0 &= \frac{d}{dk} \left[\frac{\rho A v_i^3}{4} (1+k)(1-k^2) \right] \\ 0 &= \frac{d}{dk} [1+k-k^2-k^3] \\ 0 &= 1-2k-3k^2 \\ k &= \frac{1}{3}, -1\end{aligned}$$

เนื่องจากลมขาออกไม่สามารถไหลย้อนกลับได้ (v_o เท่ากับ $-v_i$ ไม่ได้) ดังนั้นคำตอบสมการเดียวที่เป็นไปได้คือ $v_o = v_i/3$ ซึ่งทำให้อุปกรณ์ในอุดมคติสามารถเก็บกำลังลมได้

$$\begin{aligned}v_o &= \frac{v_i}{3} \\ P_{turbine,max} &= \frac{8}{27} \rho A v_i^3 = \frac{16}{27} P_{in} \\ \eta_{max} &= \frac{16}{27} = 59.3\%\end{aligned}$$

ซึ่งค่าสูงสุดนี้เรียกว่า ค่าจำกัดของเบทซ์ (Betz limit) ซึ่งวิเคราะห์กังหันลมโดยไม่ได้มีการคำนึงถึงคุณสมบัติอากาศพลศาสตร์ของใบพัดต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพของกังหัน เพื่อให้การวิเคราะห์ของเรามีความแม่นยำ เราจะทำการศึกษาหลักการทำงานของอากาศพลศาสตร์ และผลของรูปร่างของใบพัดและการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพของกังหันลม

อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม

อันที่จริงแล้ว การจะวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของกังหันนั้นจำเป็นต้องพิจารณาการไหลของอากาศในขณะที่กังหันหมุนเพื่อพิจารณาแรงที่อากาศกระทำและกำลังที่เกิดขึ้น ซึ่งเราจะใช้หลักการอากาศพลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลม

หากพิจารณาหลักการทางอากาศพลศาสตร์ กังหันลมที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทขึ้นอยู่กับแรงซึ่งขับเคลื่อนใบพัดในกังหัน

1. กังหันลมแรงต้าน (Drag-based Wind Turbine)
2. กังหันลมแรงยก (Lift-based Wind Turbine)

ย้อนหลังไปถึงหลักอากาศพลศาสตร์ วัตถุใดๆที่ถูกลมกระทบจะเกิดแรงต้านและแรงยกขึ้น ซึ่งแรงทั้งสองสามารถเขียนเป็นสมการได้โดย

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho A v^2$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho A v^2$$

โดยที่ C_L และ C_D คือสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้าน ดังนั้น ในการสร้างกังหันลมจึงสามารถใช้แรงหนึ่งหรือทั้งสองในการขับเคลื่อนและสร้างกำลัง โดยกำลังที่กังหันสามารถดึงออกมาได้ $P_{turbine}$ เท่ากับผลคูณภายในของแรง \mathbf{F} และความเร็วของใบพัด \mathbf{u}

$$P_{turbine} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{u}$$

ในกรณีของกังหันแบบแรงต้าน ทิศทางการไหลของลมจะไปในทิศทางเดียวกับแรงต้านเสมอ ดังนั้นสมการกำลังที่ผลิตได้จะมาจาก

$$P = \mathbf{D} \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{2} \rho A (v - u)^2 u$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_D (u v^2 - 2 v u^2 + u^3)$$

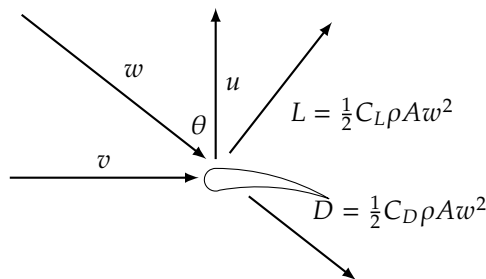
$$C_P = C_D (\lambda - 2\lambda^2 + \lambda^3)$$

โดยที่ $\lambda = v/u$ เป็นอัตราส่วนของความเร็วลมต่อความเร็วกังหัน จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ผลิตได้ C_P มีค่ามากที่สุดเมื่อ $\lambda = 1/3$ เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้ว่า

$$C_{P \max} = \frac{4}{27} C_D$$

ซึ่งสำหรับกังหันที่มีสัมประสิทธิ์แรงต้านสูงอย่างเช่น $C_D = 1.2$ จะได้ว่า $C_P = 0.1778$

ในกรณีของกังหันลมแรงยก ทิศทางการไหลของลมนั้นจะตั้งฉากกับความเร็วของใบพัดเสมอ ซึ่งทำให้ไม่มีข้อจำกัดเรื่องความเร็วกังหันที่เร็วกว่าลม โดยที่รูปแสดงทิศทางของความเร็วและแรงที่เกิดขึ้นบนกังหันลมแรงยกสามารถแสดงได้ดังรูป



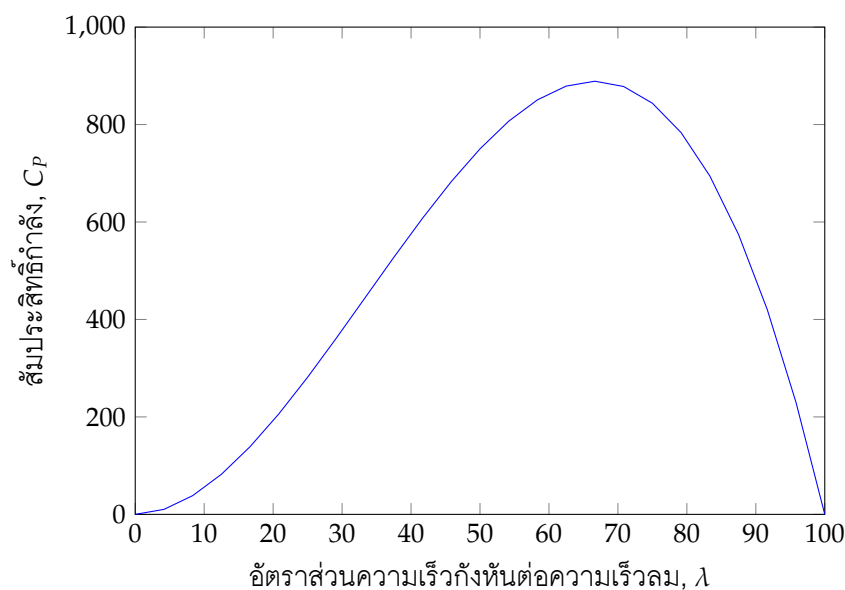
รูปที่ 1.5: ทิศทางของความเร็วและแรงของลมที่กระทำบนใบกังหันลม

ถ้าเรากำหนดให้ $\gamma = \frac{C_D}{C_L}$ เป็นอัตราส่วนของแรงต้านต่อแรงยกที่เกิดขึ้น เราจะสามารถเขียนสมการแสดงกำลังที่กังหันลมแรงยกสร้างขึ้นได้ว่า

$$\begin{aligned} P &= (\mathbf{L} + \mathbf{D}) \cdot \mathbf{u} \\ P &= \frac{1}{2} \rho A w^2 \left(C_L \frac{v}{w} u - C_D \frac{u}{w} u \right) \\ P &= \frac{1}{2} \rho A \sqrt{u^2 + v^2} \left(C_L u v - C_D u^2 \right) \\ C_P &= C_L \sqrt{1 + \lambda^2} \left(\lambda - \gamma \lambda^2 \right) \end{aligned}$$

สำหรับชิ้นส่วนภาคตัดขวางปีกอากาศยานทั่วไป $\gamma = 0.01$ ที่ $C_L = 0.6$

จะเห็นได้ว่ากังหันลมแบบแรงยกนั้นมีประสิทธิภาพต่อพื้นที่ใบพัดสูงกว่ากังหันแบบแรงต้านหลายเท่าตัว จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าพลังงานลมอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 1.6: ประสิทธิภาพของกังหันลมแรงยกที่อัตราส่วนความเร็วต่างๆ จะเห็นได้ว่าค่า λ ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ราว 67 ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่สูงถึง 889!

การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

นอกจากเรื่องของการเลือกกังหันตามหลักการทำงานแล้ว ยังมีคุณลักษณะอื่นๆ ที่ผู้ใช้สามารถเลือกออกแบบกังหันลมได้ เช่น

แนวแกนกังหัน

กังหันลมผลิตไฟฟ้ามีทั้งแบบที่มีแกนหมุนตามแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งแต่ละแบบมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบอยู่ดังนี้

1. ค่าติดตั้งและซ่อมแซม กังหันแบบตั้งสามารถรับลมได้จากทุกทิศทาง และสามารถติดตั้งอุปกรณ์ปั่นไฟฟ้าไว้ใกล้กับพื้นได้ จึงสะดวกต่อการติดตั้งและซ่อมแซม ในขณะที่กังหันแบบแนวนอนจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ทุกอย่างในแนวเดียวกับกังหัน จึงมีค่าใช้จ่ายส่วนนี้ที่สูงกว่า
2. ประสิทธิภาพ เมื่อติดตั้งที่ความสูงที่สมควรและหันหน้าเข้าหาทิศทางลมแล้ว กังหันแบบแนวนอนจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า

วัสดุผลิตกังหัน

เนื่องจากกังหันต้องหมุนอยู่ตลอดเวลา ภาระที่สำคัญที่ใบพัดจะได้รับคือ แรงสู่ศูนย์กลางซึ่งขึ้นอยู่กับมวล ดังนั้นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับวัสดุที่จะนำมาใช้ออกแบบกังหันคือจะต้องมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อมวลสูง (high strength-to-mass ratio) ในอดีตวัสดุที่ใช้ในการผลิตกังหันลมได้แก่ ไม้เนื้อแข็ง (แข็งแรง น้ำหนักเบา แต่ไม่ทนทานต่อความชื้น) และโลหะเบาอย่างอลูมิเนียม (แข็งแรง เบา ขึ้นรูปง่าย แต่ไม่ทนทานต่อการล้า) ในปัจจุบันวัสดุที่ตอบโจทย์นี้ได้เป็นอย่างดีคือคาร์บอนไฟเบอร์เคลือบโพลีเมอร์ (CFRP) ซึ่งมีน้ำหนักเบาและความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปเป็นรูปทรงที่ซับซ้อนได้ง่ายและมีความทนทานต่อการล้าได้ดี

พลังงานชีวภาพ

Ethanol and biodiesel allow people to burn a cleaner form of energy.

Mark Kennedy

วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้นำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นหมวดย่อย 4 หมวดดังนี้

แป้งและน้ำตาล

บรรดากลุ่มวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบหลักเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทแป้งและน้ำตาลทั้งหลาย อาทิเช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อย กากน้ำตาล หัวบีทรูท เป็นต้น

เซลลูโลส

เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบหลักเป็นเซลลูโลส ซึ่งแม้จะนับเป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ชนิดหนึ่ง แต่เนื่องจากเซลลูโลสนั้นมีการเรียงตัวของกลูโคสที่ต่างจากแป้ง จึงทำให้ต้องใช้กระบวนการผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่ต่างกัน ตัวอย่างของวัตถุดิบเหล่านี้ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ ชีเลื่อย

น้ำมัน

วัตถุดิบจำพวกพืชที่สามารถนำเมล็ดหรือผลมาผลิตน้ำมัน อันได้แก่ ปาล์ม น้ำมัน ถั่วเหลือง มะพร้าว รวมถึงน้ำมันเหลือใช้จากการประกอบอาหารด้วย

ซากวัสดุเหลือใช้

วัสดุเหลือใช้หรือขยะชีวภาพต่างๆเช่น เศษอาหาร มูลสัตว์

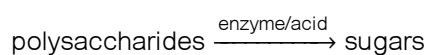
ไบโอเอทานอล

ไบโอเอทานอลเป็นเอทานอล(หรือเอทิลแอลกอฮอล์)ที่ผลิตมาจากวัตถุดิบทางชีวภาพด้วยกระบวนการหมัก ซึ่งวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้หมักเพื่อผลิตเอทานอลมาจากวัตถุดิบในหมวดแป้งและน้ำตาลและเซลลูโลส

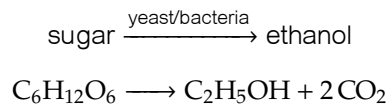
กระบวนการผลิตเอทานอล

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบพวกแป้งและน้ำตาลและเซลลูโลสมาจากกระบวนการหมักซึ่งมีปฏิกิริยาหลักดังนี้

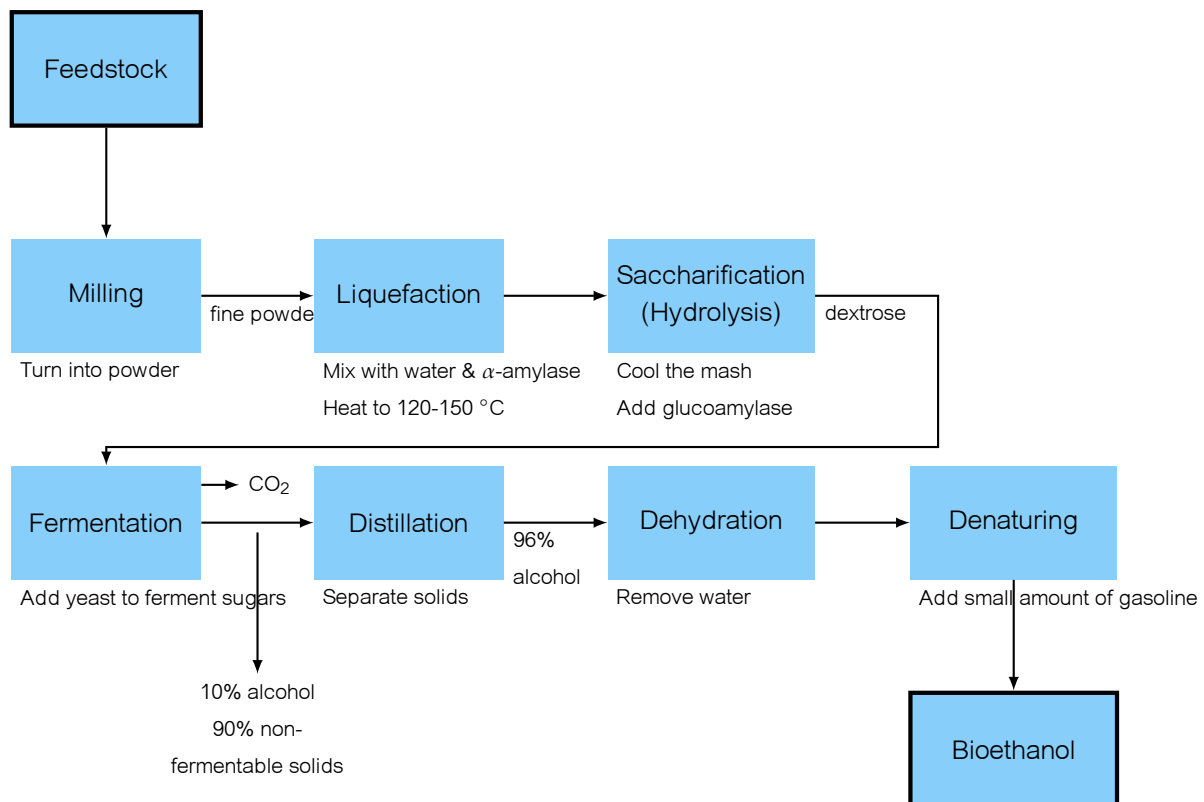
1. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)



2. ปฏิกิริยาหมัก (Fermentation)



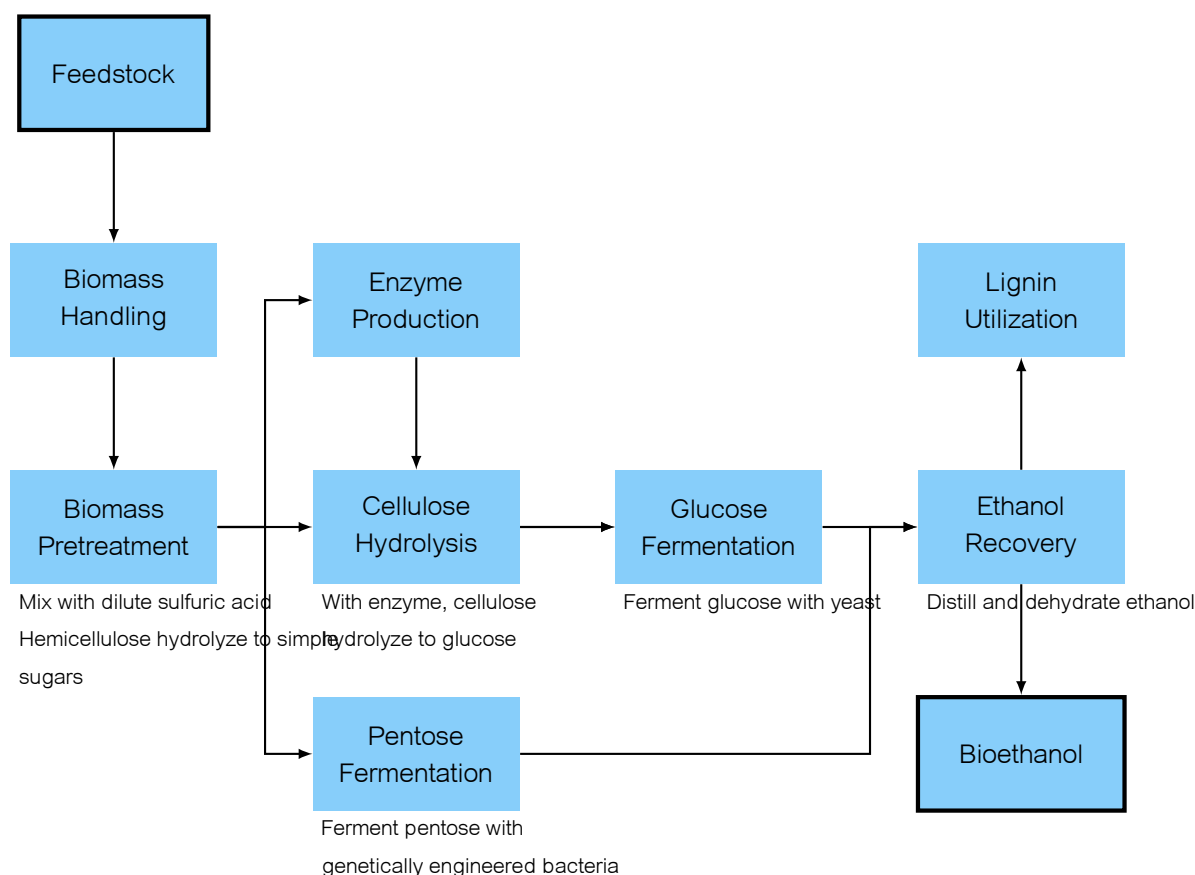
ขั้นตอนการผลิตจริงเริ่มจากการนำวัตถุดิบตั้งต้นเช่น ข้าวโพด มาไม่จนเป็นผงละเอียดแล้วผสมกับน้ำเพื่อเตรียมเข้ากระบวนการเปลี่ยนเป็นน้ำตาล สารละลายน้ำตาลที่ได้จะถูกนำไปผสมกับยีสต์เพื่อหมักเป็นแอลกอฮอล์ (เอทานอล) ยีสต์เปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ซึ่งผสมกับน้ำ เพื่อที่จะได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น จำเป็นจะต้องนำสารละลายเอทานอลที่ได้จากการหมักไปกลั่นเอาน้ำออก เมื่อได้ความบริสุทธิ์ที่ต้องการแล้ว จำเป็นจะต้องมีทำให้เอทานอลแปรสภาพด้วยการเติมน้ำมันเบนซินลงไปเพื่อป้องกันการนำไปใช้บริโภค เอทานอลที่ผลิตจากกระบวนการนี้เรียกว่า เอทานอลรุ่นที่ 1 (1st-generation ethanol) ซึ่งกระบวนการทั้งหมดสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 1.7



ในกรณีที่วัตถุดิบตั้งต้นเป็นพวกเซลลูโลส การผลิตเอทานอลจะมีความแตกต่างกับวัตถุดิบจำพวกแป้ง โดยจะเริ่มจากการนำวัตถุดิบมาตัดไม้ หรือ บด (biomass handling) เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับขั้นตอนต่อไป ซึ่งจะนำวัตถุดิบที่ผ่านการตัดย่อยเบื้องต้นแล้วมาย่อยสลายโดยใช้กรดกำมะถัน (biomass pretreatment) ทำให้เนื้อไม้สลายตัวเป็นเซลลูโลส เดมเอนไซม์

รูปที่ 1.7: กระบวนการผลิตไบโอเอทานอลจากน้ำตาลและแป้ง (วาดใหม่โดยได้รับอนุญาตจาก [2])

ลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (cellulose hydrolysis) ย่อยออกมาเป็นกลูโคสซึ่งสามารถนำไปหมักเป็นเอทานอลได้ นอกจากนี้ในการย่อยด้วยกรดกำมะถัน อาจจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลเพนโทสมาด้วย ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้แบคทีเรียพิเศษเพื่อเปลี่ยนให้เป็นเอทานอล หลังจากนั้นเอทานอลที่ได้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการกำจัดน้ำออกเพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยที่เอทานอลที่ได้จะเรียกว่า เอทานอลรุ่นที่ 2 (2nd-generation ethanol) หรือเอทานอลขั้นสูง (advanced ethanol)



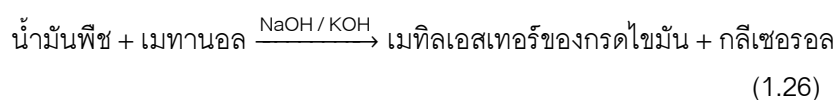
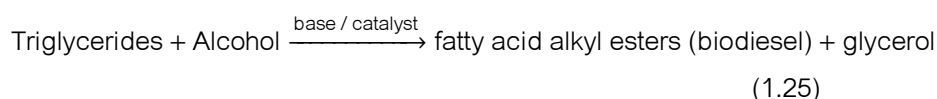
รูปที่ 1.8: กระบวนการผลิตไบโอเอทานอลจากเซลลูโลส (วาดใหม่โดยได้รับอนุญาตจาก [2])

ความแตกต่างระหว่างเอทานอลรุ่นที่ 1 และรุ่นที่ 2

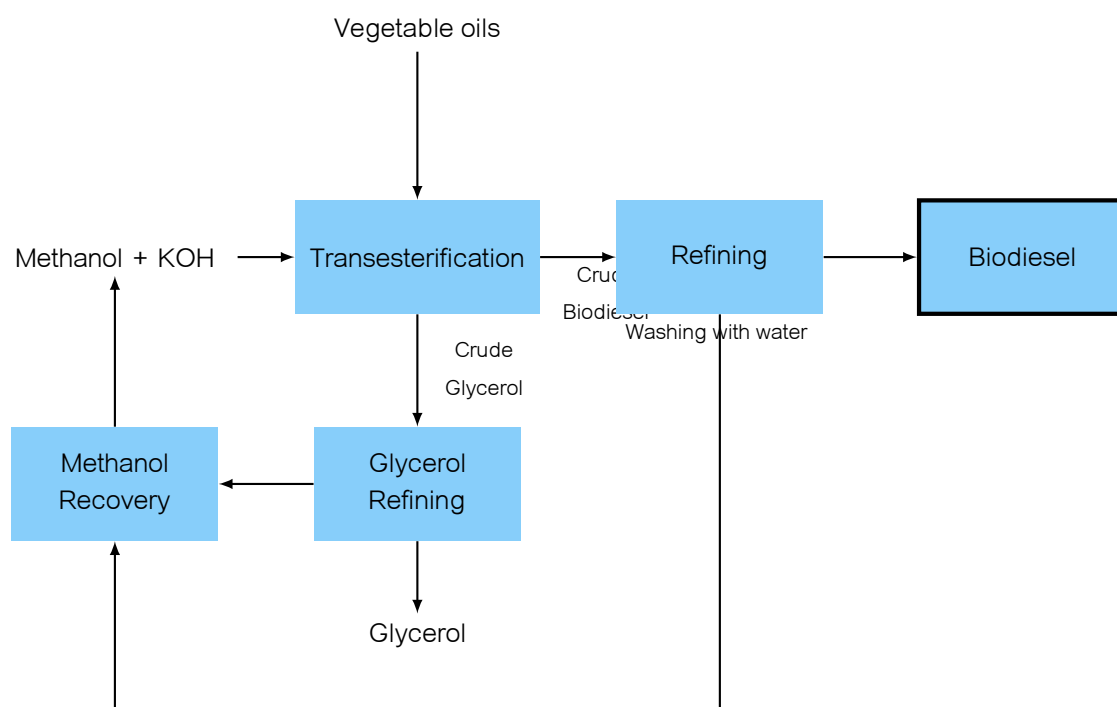
เอทานอลรุ่นที่ 1 ใช้วัตถุดิบซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลและแป้งที่สามารถนำมาใช้เป็นอาหารได้ ดังนั้นการนำวัตถุดิบเหล่านี้มาผลิตเป็นเอทานอลย่อมทำให้วัตถุดิบ

ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นสารประกอบเอสเทอร์ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างไขมันจากพืชหรือสัตว์กับแอลกอฮอล์ ซึ่งสามารถนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซลได้ ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากไขมันหรือน้ำมันตั้งต้นเรียกว่าทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) ซึ่งเกิดจากการดไขมันทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ในสภาพแวดล้อมที่เป็นด่างจนเกิดเป็นแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid alkyl ester) ซึ่งเรียกได้อีกอย่างคือไบโอดีเซล และกลีเซอรอล ดังสมการ



กระบวนการผลิตไบโอดีเซลสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังนี้

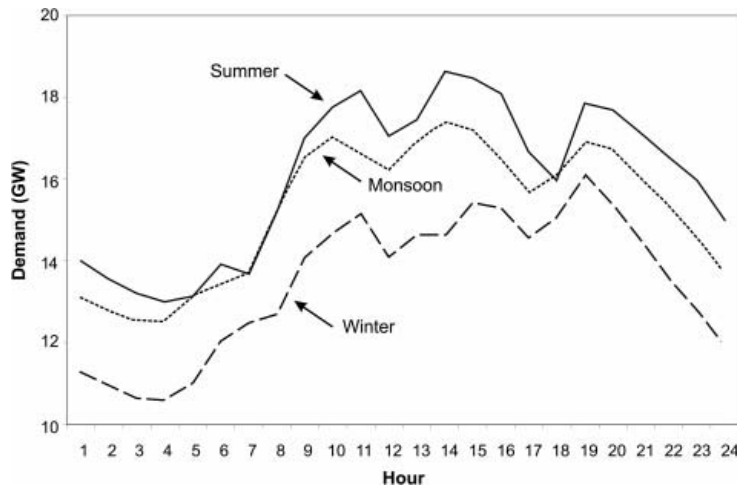


การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและใช้สารเคมีที่สามารถหาซื้อได้ไม่ยาก ประกอบกับเครื่องจักรทางเกษตรกรรมส่วนใหญ่มี

รูปที่ 1.9: กระบวนการผลิตไบโอดีเซล (วาดใหม่โดยได้รับอนุญาตจาก [2])

ความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิต

นอกจากปัญหาด้านความไม่แน่นอนของอุปทานแล้ว ก็ยังมีปัญหาเรื่องความไม่แน่นอนของอุปสงค์ด้วย ซึ่งความผันผวนนี้เกิดได้ขึ้นตามฤดูกาลและช่วงเวลาของวัน ดังแสดงในภาพ ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของอุปสงค์และอุปทาน



รูปที่ 1.10: ความผันแปรของอุปสงค์กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 1 วัน ในฤดูร้อน ฤดูฝนและฤดูหนาว [1]

ดังนั้น การจะลดผลกระทบจากความผันผวนของอุปสงค์และอุปทานจากแหล่งพลังงานทดแทนเช่นพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานลม จำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์กับเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพเพื่อเก็บพลังงานส่วนเกินไว้แล้วสามารถดึงพลังงานที่เก็บไว้มาใช้ในช่วงที่มีความต้องการได้โดยไม่ต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานโดยตรง

วิธีการกับเก็บพลังงานจากแสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทก็มีจุดเด่นและจุดด้อยต่างกันไป พึงคำนึงไว้เสมอว่าไม่มีเทคโนโลยีใดที่ดีกว่าเทคโนโลยีอื่นในทุกสถานการณ์ เราจึงควรทำความเข้าใจประเด็นต่างๆ ที่สำคัญเหล่านี้ไว้ เพื่อจะได้นำเทคโนโลยีเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

บ่อกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์

บ่อกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ในที่นี้หมายถึงบ่อกักเก็บของเหลวซึ่งสามารถกักเก็บความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ ในปัจจุบันบ่อกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนมากใช้สารละลายเกลือคลอไรด์หรือซัลเฟตในน้ำ หลักการทำงานของบ่อดังกล่าวคือการแบ่งชั้นของสารละลายตามความเข้มข้น โดยสารละลายที่มีความเข้มข้นมากจะ

ตกอยู่ที่ชั้นล่างเนื่องจากมีความหนาแน่นสูง และสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยจะลอยอยู่ด้านบนเนื่องจากมีความหนาแน่นน้อย ซึ่งการแบ่งชั้นนี้จะป้องกันการหมุนเวียนของสารละลายเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งในบ่อน้ำปกติเมื่อได้รับความร้อน จะมีการหมุนเวียนขึ้นเนื่องจากน้ำที่ร้อนกว่าจะมีการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นลดลงและลอยขึ้นสู่ด้านบน แต่ในบ่อน้ำที่มีการแบ่งชั้นของสารละลายนี้จะไม่มีการหมุนเวียนของสารละลาย ทำให้สามารถกักเก็บความร้อนไว้ได้

กระบวนการสร้างบ่อกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์มีอยู่ 2 วิธี

บ่อกักเก็บแบบประดิษฐ์

บ่อกักเก็บพลังงานแบบนี้สร้างโดยการเติมสารละลายที่มีความเข้มข้นจากสูงลงไปสู่ชั้นล่างแล้วลดลงต่ำลงเมื่อเพิ่มระดับน้ำขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อเต็มเสร็จบ่อก็จะสามารถกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ไว้ได้

บ่อกักเก็บแบบเกิดเอง

บ่อประเภทนี้อาศัยหลักการของการละลายอิมตัวของเกลือในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยที่ความสามารถในการละลายแปรผันตรงกับอุณหภูมิของตัวทำละลาย ซึ่งเกลือที่จะนำมาใช้ในบ่อประเภทนี้ จำเป็นจะต้องมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายต่ออุณหภูมิสูง เพื่อที่จะได้สามารถสร้าง gradient ของความเค็มต่อความลึกได้สูง และมีความสามารถในการเก็บความร้อนได้ดี

แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่เราจะพูดถึงในบทนี้เป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิ หรือแบตเตอรี่ที่ประจุไฟใหม่ได้ (rechargeable batteries หรือ secondary cell) เพื่อนำมาใช้เป็นตัวกลางกักเก็บพลังงานจากการผลิตไฟฟ้าของพลังงานหมุนเวียนชนิดอื่น โดยแบตเตอรี่แบบเติมประจุได้นี้มีหลายชนิด เช่น

- แบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด (lead-acid battery)
- แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม (NiCd)

- แบตเตอรี่นิเกิลเมทัลไฮไดรด์ (nickel-metal hydride, NiMH)
- แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน (lithium-ion, Li-Ion)
- แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน พอลิเมอร์ (lithium-ion polymer, LiPo)

สาเหตุที่แบตเตอรี่แบบนี้สามารถเติมประจุได้เพราะใช้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่สามารถย้อนกลับได้ (reversible electrochemical reaction)

การชาร์จและการคายประจุ

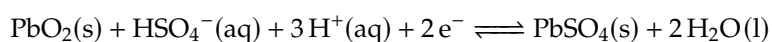
ในระหว่างการเติมประจุ วัสดุที่เป็นขั้วบวกจะถูกออกซิไดซ์และให้อิเลกตรอน ส่วนวัสดุที่เป็นขั้วลบจะถูกรีดิวซ์และรับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดการไหลของกระแสเมื่อต่อให้ครบวงจร สำหรับอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ในแบตเตอรี่อาจเป็นได้ทั้งตัวนำกระแสระหว่างขั้ว (อย่างเช่นในกรณีของแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน) หรืออาจจะเป็นหนึ่งในสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น (เช่นกรณีของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด)

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

ปฏิกิริยาที่ขั้วลบ:



ปฏิกิริยาที่ขั้วบวก:



ข้อดีของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีเก่าและมีใช้อย่างแพร่หลายในรถยนต์ จึงทำให้มีราคาถูกมาก นอกจากนี้ยังสามารถส่งกระแสไฟกระชากได้ดี แต่เนื่องจากมีขนาดใหญ่และประสิทธิภาพต่ำกว่าแบตเตอรี่อื่นๆ จึงทำให้เหมาะกับการใช้เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานขนาดใหญ่มากกว่าสำหรับใช้ในอุปกรณ์พกพา

ตัวแบตเตอรี่เองมีปัญหา

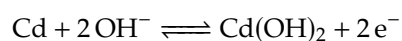


รูปที่ 1.11: แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

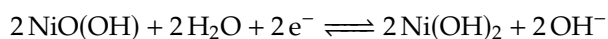
1. การเกิดขึ้นของกัมมันตภาพรังสีที่ขัดขวางกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน
2. การแยกชั้นของน้ำกับกรดซัลฟิวริก ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยา
3. ในบางกรณี H_2 และ O_2 อาจค้างอยู่ด้านในของแบตเตอรี่ทำให้เกิดการระเบิดขึ้น

แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม

แคดเมียม (ชั่วคราว)



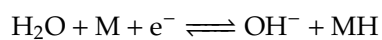
นิกเกิลออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (ชั่วคราว)



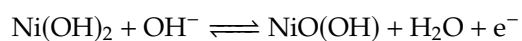
สำหรับข้อดีของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ สามารถเติมประจุใหม่ได้หลายครั้ง ทำ-
งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ อัตราการจ่ายกระแสไม่มีผลกระทบกับความจุประจุ
ส่วนข้อเสียคือแคดเมียมเป็นโลหะหนักที่เป็นพิษอย่างร้ายแรง นอกจากนี้
ยังมีปัญหาเรื่อง ความจำ การเติมประจุ และเนื่องจากมีราคาแพงกว่าแต่มี
ความจุน้อยกว่าแบตเตอรี่แบบนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ ปัจจุบันจึงไม่มีการใช้
แบตเตอรี่ชนิดนี้แล้ว

แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์

ชั่วคราว:



ชั่วคราว:



ข้อดีของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือมีความจุเพิ่มขึ้นเป็น 2-3 เท่าของแบตเตอรี่
NiCd ขนาดเดียวกัน และไม่ต้องพึ่งพาแคดเมียม นอกจากนี้ยังลดปัญหา
เรื่องความจำลงไปได้เยอะ จึงได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
โทรนิกส์ทั่วไปและในรถยนต์ไฟฟ้า

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน



รูปที่ 1.12: แบตเตอรี่
นิกเกิล-แคดเมียม

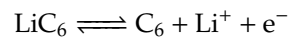


รูปที่ 1.13: แบตเตอรี่นิกเกิล
เมทัลไฮไดรด์

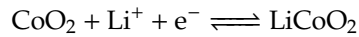


รูปที่ 1.14: แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

Negative:



Positive:

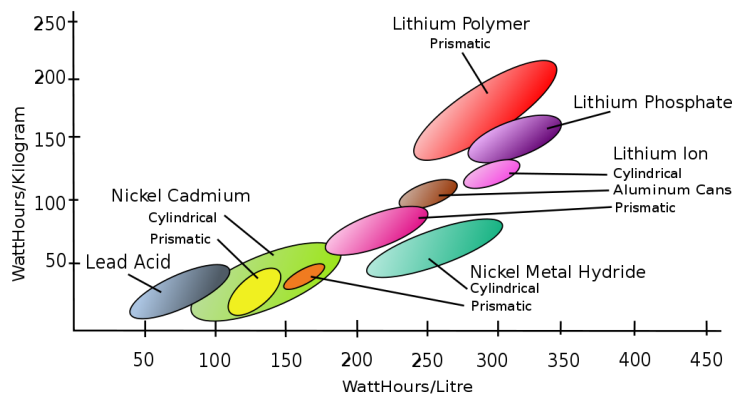


แบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น มีความจุไฟฟ้าสูง น้ำหนักเบา เทบจะไม่มีปัญหาเรื่องความจำ มีอัตราการสูญเสียประจุระหว่างไม่ใช้งานต่ำ แต่ข้อที่พึงพิจารณานอกจากเรื่องราคาที่สูงก็จะเป็นเรื่องของอุณหภูมิในช่วงการใช้งานและช่วงการประจุไฟ ซึ่งหากสูงเกินไปจะทำให้อายุการใช้งานสั้นลงหรือแม้แต่เกิดผลข้างเคียงเช่นแก๊สที่ติดไฟ ทำให้เกิดการระเบิดได้

ส่วนประกอบสำคัญของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนคือ

- ขั้วลบ มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนที่มีรูพรุน (เช่น แกรไฟต์) เคลือบบนแผ่นทองแดง
- ขั้วบวกเป็นลิเทียมเมทัลออกไซด์เคลือบบนแผ่นอะลูมิเนียม
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วยเกลือของลิเทียม เช่น LiPF_6 หรือ LiBF_4 ในตัวทำละลาย เช่น เอทิลีนคาร์บอเนต (ethylene carbonate) ไดเอทิลคาร์บอเนต (diethyl carbonate) และ/หรือ ไดเมทิลคาร์บอเนต (dimethyl carbonate)
- เยื่อเลือกผ่าน (separator) กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง ทำจากพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) และ/หรือพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE)

เปรียบเทียบแบตเตอรี่

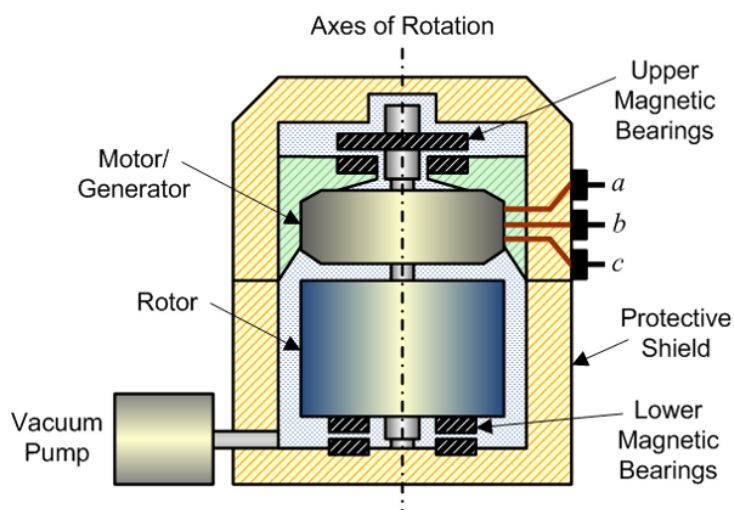


รูปที่ 1.15: แผนภูมิเปรียบเทียบพลังงานจำเพาะและความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่ทุติยภูมิ

ล้อยุนกำลัง

ล้อยุนกำลังเป็นระบบที่เก็บพลังงานที่ต้องการในรูปของพลังงานจลน์จากการหมุนของล้อยุนกำลังด้วยความเร็วสูง เมื่อต้องการนำพลังงานที่เก็บออกมาใช้ก็จะทำให้ความเร็วของล้อยุนกำลังลดลง และเมื่อเติมพลังงานให้ ล้อยุนก็จะหมุนเร็วขึ้น โดยมากแล้วระบบล้อยุนกำลังจะใช้ไฟฟ้าในการเร่งและหน่วงระบบ แต่ระบบที่ใช้พลังงานกลโดยตรงกำลังได้รับการพัฒนาอยู่เช่นกัน

ส่วนประกอบของระบบล้อยุนกำลัง



รูปที่ 1.16: ระบบล้อยุนกำลังแบบใช้แบร์ริงแม่เหล็ก

1. มอเตอร์ - เครื่องปั่นไฟฟ้าเพื่อใช้ในการแปลงพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าและจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานจลน์
2. แบร์ริง ซึ่งเป็นส่วนหลักที่ทำให้มีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานจากแบร์ริงแบบตลับลูกปืนทั่วไป อย่างไรก็ตาม ในระบบล้อยุนกำลังแบบใหม่มักใช้แบร์ริงแบบแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อลดการสูญเสียพลังงานส่วนนี้
3. ในบางกรณี อาจจะมีระบบปั๊มสุญญากาศเพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากแรงเสียดทานอากาศด้วย

พลังงานที่สะสมในล้อตุนกำลัง

พลังงานจลน์ที่สะสมในล้อตุนกำลังสามารถหาได้จากสมการ

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2$$

โดยที่ J คือโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมุมของล้อ และ ω คือความเร็วเชิงมุมของล้อ อย่างไรก็ตาม ล้อตุนกำลังเองก็มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถจะหมุนเร็วเกินไปได้ เนื่องจากเมื่อความเร็วเชิงมุมสูงก็จะมีคามเค้นตามเส้นรอบรูป (hoop stress) สูงขึ้นด้วยเช่นกัน


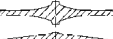
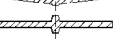
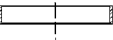

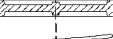
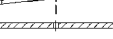

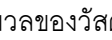
วัสดุสำหรับล้อตุนกำลัง

หากจะพิจารณาหาวัสดุที่เหมาะสมจะนำมาสร้างล้อตุนกำลัง จำเป็นจะต้องพิจารณาถึงพลังงานจำเพาะ (พลังงานต่อมวล) ที่วัสดุสามารถเก็บได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{E}{J} = K \left(\frac{S_{ut}}{\rho} \right)$$

โดยที่ K เป็น shape factor ของล้อตุนกำลัง S_{ut} เป็นค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) และ ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานจำเพาะนั้นขึ้นอยู่กับรูปร่างของล้อและอัตราส่วนความแข็งแรงต่อมวลของวัสดุล้อ

ค่า shape factor ของรูปทรงเรขาคณิตต่างๆมีดังนี้

Fly wheel geometry	Cross section	Shape factor K
Disc		1.000
Modified constant stress disc		0.931
Conical disc		0.806
Flat unpierced disc		0.606
Thin firm		0.500
Shaped bar		0.500
Rim with web		0.400
Single bar		0.333
Flat pierced bar		0.305

รูปที่ 1.17: ค่า shape factor ของภาคตัดรูปทรงต่างๆที่ใช้ทำล้อตุนกำลัง

สำหรับค่าอัตราส่วนความแข็งแรงต่อมวลของวัสดุต่างๆมีดังนี้

การออกแบบล้อตุนกำลังสำหรับรถโดยสารประจำทาง

เราต้องการจะออกแบบล้อตุนกำลังสำหรับรถประจำทางเพื่อใช้ในการชาร์จ

Material	Specific tensile strength (kJ/kg)	Remarks
Ceramics	200 - 2000	Brittle and weak in tension
CFRP	200 - 500	Best performance
GFRP	100 - 400	Almost as good, but cheaper
Beryllium	300	Best metal, but expensive and toxic
High strength steel	100 - 200	Cheaper than Mg and Ti
High strength Al	100 - 200	Cheaper than Mg and Ti
High strength Mg	100 - 200	Equal performance to steel and Al
Ti Alloys	100 - 200	Equal performance to steel and Al
Lead alloy	3	Poor performance
Cast iron	8 - 10	Poor performance

ตารางที่ 1.2: อัตราส่วนความแข็งแรงต่อมวลของวัสดุสำหรับผลิตล้อตุ่นกำลัง

ไผ่ระหว่างจอดรับผู้โดยสาร และขับเคลื่อนรถในช่วงออกตัว เพื่อให้รับพลังงานได้ 50 kJ มีวัสดุให้เลือก 4 วัสดุซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

Material	Density (kg/m ³)	Ultimate Tensile Strength (MPa)
CFRP	1500	550
High strength steel	7800	1500
Cast Iron	7300	200

ตารางที่ 1.3: คุณสมบัติของวัสดุสำหรับออกแบบล้อตุ่นกำลัง

การออกแบบล้อตุ่นกำลังสามารถทำได้โดยใช้สมการคำนวณพลังงานจลน์และความเค้นดังนี้

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2$$

$$J = \frac{1}{2}mr^2$$

$$\sigma_t = \rho r^2 \omega^2$$

ซึ่งจากการวิเคราะห์สมการ หากเรากำหนดให้ล้อตุ่นกำลังจากทุกวัสดุใช้ความหนา t เท่ากัน เราจะสามารถคำนวณรัศมีและมวลของล้อได้ดังนี้

$$E = \frac{1}{4}mr^2\omega^2$$

$$r^2\omega^2 = \frac{\sigma_t}{\rho}$$

$$E = \frac{1}{4}m\frac{\sigma_t}{\rho}$$

$$m = \rho\pi r^2t$$

$$r = \sqrt{\frac{4E}{\pi t\sigma_t}}$$

เมื่อแก้สมการหาค่ารัศมีโดยกำหนดให้ความเค้นมากที่สุดของล้อยก้าน
 $\sigma_t = S_{ut}$ จะได้มวลและรัศมีของล้อยก้านจากวัสดุต่างๆดังนี้

Material	Radius (m)	Mass (kg)
CFRP	0.048	0.545
HSS	0.029	1.040
Cast Iron	0.080	7.300

ซึ่งจะเห็นได้ว่า CFRP ให้ล้อยก้านที่มีมวลเบาที่สุด เนื่องจากอัตราส่วนความแข็งแรงจำเพาะสูงที่สุด แต่หากมีข้อจำกัดเรื่องขนาด ล้อที่ทำจาก HSS มีรัศมีน้อยที่สุด

โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบสูบกลับ

เป็นหลักการกักเก็บพลังงานโดยแปลงพลังงานชนิดอื่น (มักจะเป็นพลังงานไฟฟ้า) มาเป็นพลังงานศักย์ในรูปของน้ำเหนือเขื่อน

2 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตพลังงาน

การจะปฏิรูปเศรษฐกิจ ปกป้อง
ความมั่นคง และรักษาโลกของ
เราจากเงื้อมมือของการ
เปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศนั้น
สิ่งที่จำเป็นที่สุดคือเราจะต้อง
ทำให้พลังงานทดแทนที่สะอาด
กลายเป็นพลังงานที่สร้างกำไรได้

บารัค โอบามา

เคยสงสัยกันบ้างไหมว่า เวลาที่การไฟฟ้าเก็บค่าไฟเราหน่วยละ 3 บาทกว่าๆ นั้น เขาคิดคำนวณกันมาอย่างไร มีหลักฐานอ้างอิงหรือข้อมูลอะไรมาช่วยสนับสนุนนี้ไหม หรือว่าแค่นั่งเทียนกำหนดเลขกลมๆ ขึ้นมา จริงๆ แล้วก็คงไม่ใช่อย่างนั้น และแน่นอนว่าค่าไฟที่เก็บนั้นก็คงไม่ได้เท่าทุนพอดี คงจะต้องมีส่วนบวกเพื่อให้เป็นกำไรไว้ไม่มากก็น้อยเป็นแน่

ในบทนี้ เราจะมาพูดถึงการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลังงานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างการผลิตไฟฟ้าปัจจุบัน (พ.ศ. 2560) โดยส่วนมากยังพึ่งพาเชื้อเพลิงปิโตรเลียมอยู่กับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนซึ่งเราได้กล่าวถึงเทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่ต้องใช้ไปในส่วนที่ 1

หลายครั้งที่วิศวกรโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานศึกษา (ตัวผมเองก็ด้วย) คิดวิเคราะห์ปัญหาทางพลังงานที่มีอยู่ในปัจจุบันโดยยังไม่ได้พิจารณาเรื่องของความเหมาะสมของเทคโนโลยีทางเศรษฐศาสตร์ หรือที่เรียกง่ายๆ ว่าเทคโนโลยีนั้นมันแพงเกินไปหรือเปล่า การจะพิจารณาความเป็นไปได้ที่จะนำเทคโนโลยีพลังงานหนึ่งๆ มาใช้ แม้ว่าจะมีความล้ำสมัย สะอาด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพียงใด หากมีราคาแพงกว่าของเดิมที่ใช้อยู่ปัจจุบัน ก็ยากที่จะโน้มน้าวให้ประชาชนส่วนมากเห็นดีเห็นงามไปด้วย ไม่ใช่ว่าพวก

เขาไม่ได้รักโลก หรือไม่ห่วงเรื่องสิ่งแวดล้อม แต่การจะบอกว่าได้โปรดใช้ของที่แพงขึ้นหน่อยเพื่อให้โลกสะอาดขึ้นก็ฟังดูเป็นข้ออ้างที่อาจจะดูหลักลอยไปสักหน่อย วิธีง่ายที่สุดที่จะชวนให้ประชาชนทั่วไปหันมาสนใจการใช้พลังงานทดแทนอย่างจริงจังก็คือต้องบอกว่าของใหม่นั้น*ถูกกว่า*

ดังนั้น เพื่อจะแน่ใจว่าเทคโนโลยีพลังงานทดแทนของเรานั้นถูกกว่าไฟฟ้าที่ผลิตอยู่ปัจจุบัน เราจำเป็นจะต้องทำความเข้าใจก่อนว่าโครงสร้างต้นทุนการผลิตไฟฟ้า หรือพลังงานอื่นๆที่ใช้ในครัวเรือนปัจจุบันนั้นเป็นอย่างไร

เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมเบื้องต้น

เงินมักจะราคาแพงเกินไปอยู่
เสมอ

Ralph Waldo Emerson

มูลค่าเงินตามเวลา (Time Value of Money)

แนวคิดเรื่องของมูลค่าเงินตามเวลานั้นว่าด้วยมูลค่าของเงินที่เปลี่ยนแปลงไป ขึ้นอยู่กับเวลาที่เรารับหรือจ่ายเงินนั้นออกไป ฟังดูอาจจะแปลกๆอยู่สักหน่อย 100 บาทวันนี้ พรุ่งนี้ก็ยัง 100 บาทอยู่มิใช่หรือ แต่หากเริ่มเพิ่มเวลาเข้าไปเป็น 1 เดือน 1 ปี 10 ปี เงินนี้ก็อาจจะไม่เหมือนเดิมแล้ว พิจารณาได้อย่างง่ายด้วยคำถามนี้ หากมีคนสัญญาว่าจะให้เงินเรา 100 บาทตอนนี้เลยหรือ 100 บาทในอีก 10 ปีข้างหน้า ทุกคนคงตอบพร้อมเป็นเสียงเดียวกันว่า ขอเงิน 100 บาทตอนนี้เลยก็แล้วกัน นั่นเป็นเพราะว่าเงิน 100 บาทตอนนี้มีมูลค่า มากกว่าเงิน 100 บาทในอีก 10 ปีข้างหน้า

ต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (Levelized Cost)

ในมุมมองของหน่วยงานควบคุมราคาหรือคุ้มครองผู้บริโภค ความสามารถในการทำกำไรหรืออัตราผลตอบแทนของโครงการโรงงานผลิตไฟฟ้าหนึ่งมักจะไม่ใช่สิ่งแรกที่น่าสนใจ ราคาต่อหน่วยพลังงานที่ผู้บริโภคจะต้องจ่ายเป็นตัววัดที่สามารถนำมาช่วยพิจารณาความเหมาะสมของการเลือกใช้พลังงานทางเลือกเพื่อผลิตไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
 \text{LCOE} &= \frac{\text{ผลรวมของต้นทุนที่พิจารณามูลค่าเงินตามเวลา}}{\text{ผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้}} \\
 &= \frac{\sum \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum E_t} \\
 &= \frac{\text{มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุน}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมด}}
 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return - IRR)

การจะวิเคราะห์

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value - NPV)

โครงสร้างต้นทุน

ศาสตร์เรื่องการวิเคราะห์โครงสร้างต้นทุนนั้นมีมานานโขอยู่ เริ่มจากปี ... ซึ่งพลังงานก็นับเป็นผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งซึ่งใช้สามารถจะวิเคราะห์ต้นทุนได้ การแบ่งประเภทต้นทุนนั้นสามารถทำได้อยู่หลายวิธี แล้วแต่จุดประสงค์และการนำไปใช้ประโยชน์ อย่างไรก็ตาม ในหนังสือเล่มนี้เราต้องการศึกษาประเภทของต้นทุนเพื่อทำความเข้าใจแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆที่เปลี่ยนไป จึงได้เลือกใช้วิธีการจำแนกต้นทุนตามความสัมพันธ์กับระดับของกิจกรรม ซึ่งสามารถสะท้อนความเปลี่ยนแปลงอันขึ้นอยู่กับระดับการผลิต โดยโครงสร้างต้นทุนแบบนี้สามารถแบ่งออกเป็นประเภทดังนี้

ต้นทุนคงที่ (Fixed Costs)

เป็นต้นทุนส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงระดับการผลิตหนึ่ง ซึ่งทำให้ต้นทุนต่อหน่วยลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการผลิตมากขึ้น

ต้นทุนผันแปร (Variable Costs)

เป็นต้นทุนส่วนที่ต้นทุนรวมมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับการผลิต ใน
ขณะที่ต้นทุนต่อหน่วยยังคงที่

ต้นทุนผสม (Mixed Costs)

เป็นต้นทุนที่มีลักษณะของทั้งต้นทุนคงที่และผันแปรผสมกัน สามารถแบ่งได้
เป็นสองประเภท

1. ต้นทุนกึ่งผันแปร (semi variable cost) เป็นต้นทุนที่จะมีส่วนหนึ่งคงที่
ทุกระดับกิจกรรม และมีส่วนที่ผันแปรไปกับระดับกิจกรรม เช่น ค่า
โทรศัพท์ เป็นต้น บางครั้งก็เป็นการยากที่จะประเมินส่วนที่คงที่หรือ
แปรผันของส่วนนี้
2. ต้นทุนเชิงขั้น (step cost) หรือต้นทุนกึ่งคงที่ (semi fixed cost) หมายถึง
ถึงต้นทุนที่คงที่ในช่วงระดับกิจกรรมหนึ่ง และเปลี่ยนไปคงที่ในอีกระดับ
กิจกรรมหนึ่ง เช่น ค่าผู้ควบคุมงาน เงินเดือน

ต้นทุนของพลังงานจากเทอร์โมอิเล็กทริก

Material Family	Max ZT	Temp (°C)	Efficiency	Material Cost (\$/kg)
Cobalt Oxide	1.4	727	12%	345
Cobalt Oxide	1.4	727	12%	345
Clathrate	1.4	727	12%	5,310
SiGe	0.86	727	9%	6,033
Chalcogenide	2.27	727	16%	730
Half-Heusler	1.42	427	17%	1,988
Skutterudite	1.5	427	18%	562
Silicide	0.93	727	9%	151

ตารางที่ 2.1: ต้นทุนวัสดุที่ใช้ทำเท
อร์โมอิเล็กทริกในปัจจุบัน

เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยราคาต้นทุนไฟฟ้าที่ผลิตจากเทอร์โมอิเล็กทริกด้วย
ราคาปัจจุบัน (พ.ศ. 2561) จะเห็นได้ว่า ต้นทุนหลักมาจากค่าอุปกรณ์เทอร์
โมอิเล็กทริก เนื่องจากยังมีราคาสูงและประสิทธิภาพต่ำ

การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยอุณหภูมิ
ขนาดกลาง

กรณีเปรียบเทียบ 3 แบบ: น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม หรือซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้า

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. การผลิตไฟฟ้าขนาด 1 MW โดยสิ่งก่อสร้างและอุปกรณ์ทั้งหมดมีอายุการใช้งาน 10 ปี
2. ต้นทุนคงที่จากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก อินเวอร์เตอร์ ค่าที่ดิน และค่าติดตั้ง
3. ต้นทุนแปรผันนับจากค่าซ่อมแซมและค่าเชื้อเพลิง(ถ้ามี)
4. ค่าอินเวอร์เตอร์ 22 บาทต่อวัตต์ ค่าเทอร์โมอิเล็กทริกอุณหภูมิสูง 175 บาทต่อวัตต์ ค่าเทอร์โมอิเล็กทริกอุณหภูมิกลาง 525 บาทต่อวัตต์
5. ค่าติดตั้ง 10% ของค่าอุปกรณ์ (TEG + Inverter)
6. ค่าซ่อมแซม 1% ของค่าอุปกรณ์ต่อปี
7. ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าหน่วยละ 4.5 บาท (4.5 บาท / kWh)

ก่อนอื่น เราสามารถคำนวณค่าอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการแปลงไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยค่า TEG และ inverter

เปรียบเทียบต้นทุนระหว่างกรณีที่ 1, 2, และ 3 ได้เป็นตารางดังนี้

Costs (million THB)	Fuel	Waste
TEGs	175	525
Inverters	22	22
Land	1	1
Installation	20	55
Maintenance (per year)	2	5.5
Fuel (per year)	191	0

และยังสามารถแสดงกระแสเงินสดเปรียบเทียบระหว่างกรณีได้ดังนี้

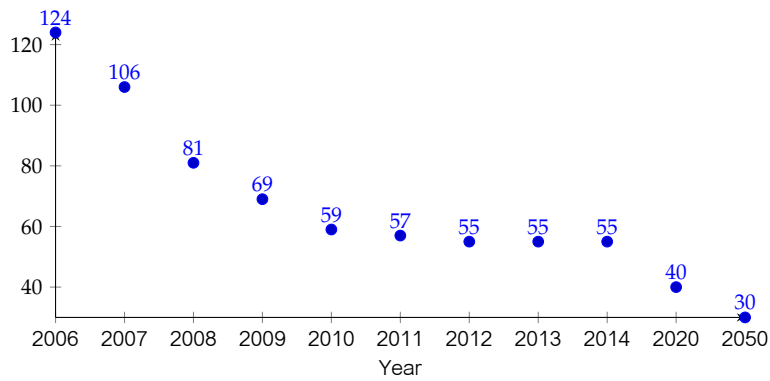
Year	Base	Fuel	Waste	Base-Fuel	Base-Waste
0	0.0	218.0	603.0	-218.0	-603.0
1	39.42	193.0	5.5	-153.6	33.92
2	39.42	193.0	5.5	-153.6	33.92
3	39.42	193.0	5.5	-153.6	33.92
4	39.42	193.0	5.5	-153.6	33.92
5	39.42	193.0	5.5	-153.6	33.92
6	39.42	193.0	5.5	-153.6	33.92
7	39.42	193.0	5.5	-153.6	33.92
8	39.42	193.0	5.5	-153.6	33.92
9	39.42	193.0	5.5	-153.6	33.92
10	39.42	193.0	5.5	-153.6	33.92

ในขณะเดียวกัน ค่าไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้าสามารถสมมติว่าเป็นค่าคงที่ในแต่ละปี ซึ่งหากเปรียบเทียบกับการลงทุนในระบบ TEG ทั้งสองแบบแล้วจะสามารถหาผลต่างของกระแสเงินสดเพื่อจะนำไปใช้หาโครงการที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) สูงสุดได้ดังนี้

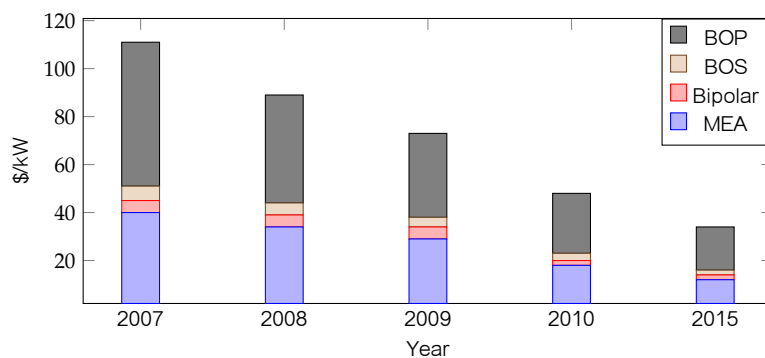
จากผลการวิเคราะห์กระแสเงินสดจะเห็นได้ว่าโครงการสร้างโรงไฟฟ้า TEG ทั้งสองแบบยังมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นลบ หมายความว่าโครงการทั้งสองยังมีผลตอบแทนที่ยังไม่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับใช้กระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้า มาลองพิจารณากันเพิ่มว่า ค่าไฟฟ้าจะต้องเป็นเท่าไรจึงจะทำให้การลงทุนในโรงงาน TEG นี้คุ้มค่าได้

จะเห็นได้ว่ามูลค่าสุทธิของโรงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าไฟจากการไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากมีความคุ้มค่าในการสร้างแหล่งผลิตไฟฟ้าทดแทนมากขึ้น และที่จุดตัดศูนย์เป็นค่าไฟที่ทำให้การลงทุนสร้างโรงไฟฟ้าใหม่นี้คุ้มค่ามากกว่าการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าต่อไป สำหรับโรงไฟฟ้า TEG แบบใช้เชื้อเพลิงอยู่ที่ประมาณ 24 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ส่วนโรงไฟฟ้า TEG แบบใช้ความร้อนเหลือใช้อยู่ที่ประมาณ 7 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง

ต้นทุนของพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิง



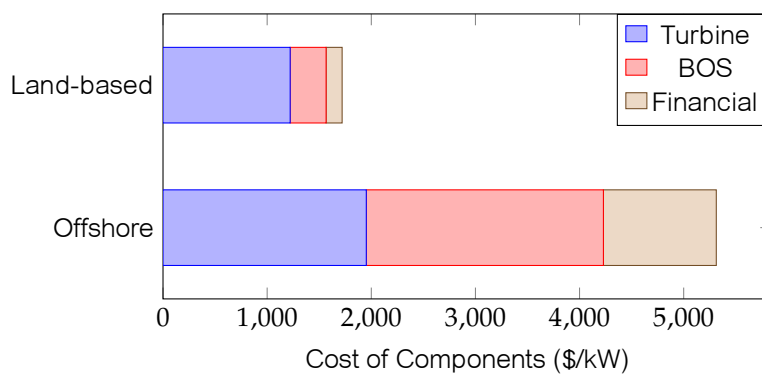
รูปที่ 2.1: Historical and projected transportation fuel cell system cost



รูปที่ 2.2: Historical and projected transportation fuel cell system cost

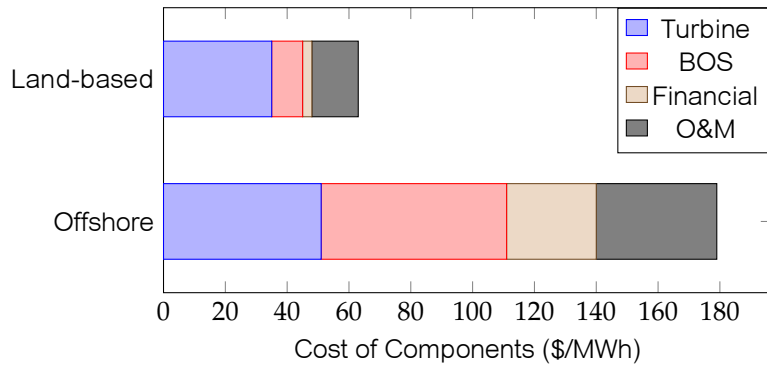
ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

เนื่องจากว่าลมเป็นพลังงานที่ได้เปล่า ต้นทุนในการผลิตส่วนมากจึงมาจากค่าอุปกรณ์กังหัน



การจำลองแบบต้นทุนการผลิตพลังงาน

ความเข้าใจในเรื่องของต้นทุนการผลิตพลังงานในปัจจุบันอันจะส่งผลถึงการยอมรับใช้เทคโนโลยีมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เราควรจะทำให้ความเข้าใจถึงแนวโน้มของต้นทุนของการผลิตพลังงานในอนาคต เพื่อจะสามารถคาดการณ์ถึงเทคโนโลยีใหม่ที่จะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีเดิม รวมถึงสาม



รูปที่ 2.3: แผนภูมิเปรียบเทียบต้นทุนตลอดการใช้งานของโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานลมแบบบนพื้นดินกับแบบนอกชายฝั่ง

รถเตรียมพร้อมในการพิจารณาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความผันผวน และแม้แต่เหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดที่อาจจะส่งผลถึงต้นทุนเหล่านี้ได้

3 ความยั่งยืนในด้านพลังงานของไทย

การพัฒนาที่ยั่งยืน

การพัฒนาที่ยั่งยืนคือการพัฒนา
ที่ตอบโจทยความต้องการใน
ปัจจุบันโดยไม่บั่นทอนศักยภาพ
ของคนรุ่นหลังที่จะตอบโจทย
ความต้องการของตัวเอง

World Commission on
Enviroment and Development,
Our Common Future, the
Brundtland Report, 1987

พลังงานที่ยั่งยืนเพื่อไทย--ฟังดูแล้วเหมือนกับคำโฆษณาของปตท.เมื่อ 20 ปีที่แล้ว ซึ่งความหมายของคำก็อาจจะเปลี่ยนไปตามเวลาด้วยเช่นกันเนื่องจากความเข้าใจในความหมายของคำว่า "ยั่งยืน" ที่เปลี่ยนไป ในบทนี้เราจะมาอภิปรายถึงความหมายของคำว่ายั่งยืน ว่าในบริบทของพลังงานหมายถึงอะไร รวมทั้งอภิปรายถึงสถานการณ์การใช้พลังงานในประเทศไทย ศักยภาพในการผลิตพลังงานทดแทนของประเทศไทย และอนาคตการนำพลังงานทดแทนมาใช้ในประเทศอีกด้วย

เรามักจะได้ยินคำว่ายั่งยืนมาพร้อมกับเรื่องของการพัฒนา ดังนั้น เพื่อจะเข้าใจความหมายของคำว่ายั่งยืน เราจึงควรอภิปรายหลักการและเหตุผลของการพัฒนาอย่างยั่งยืน เพราะอันที่จริงแล้ว การที่ประเทศไทยจะมีพลังงานที่ยั่งยืนได้ย่อมเกิดมาจากการมีอุปทานและอุปสงค์พลังงานที่สมดุลกัน ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีพัฒนาและบริโภคลพลังงานอย่างยั่งยืนด้วย

แล้วความยั่งยืนจริงๆแล้วหมายถึงอะไร ถ้าจะว่ากันตามความหมายจาก

พจนานุกรมแล้วหมายถึงความคงทน ยาวนาน ซึ่งเน้นให้เราประเด็นสำคัญของคำว่ายั่งยืนคือเรื่องสิ่งที่ยังคงอยู่เป็นระยะเวลานาน

ส่วนการพัฒนาที่ยั่งยืนนั้นมีผู้เชี่ยวชาญหลายหน่วยงานเคยให้คำจำกัดความไว้ดังนี้

การพัฒนาที่ยั่งยืนยกระดับคุณภาพชีวิตของประชากรโดยไม่ล้ำความสามารถในการรองรับของระบบนิเวศ -- Caring for the Earth

ความยั่งยืนคือแนวคิดที่ว่ามนุษย์เป็นส่วนหนึ่งของระบบนิเวศ ดังนั้นเราจำเป็นต้องเรียนรู้ที่จะใช้ระบบนิเวศเพื่อความต้องการทางเศรษฐกิจและสังคมของเราอย่างรู้คุณค่า เพื่อรักษาและดำรงไว้ มิใช่เพื่อลดทอนหรือทำลายลง -- Sustainable Community Indicators

จะเห็นได้ว่า ในคำจำกัดความของการพัฒนาที่ยั่งยืนจะมีประเด็นหลักอยู่ 2 ประการ

1. การใช้ทรัพยากรเพื่อพัฒนาและปรับปรุงโดยคำนึงถึงผลกระทบ (ทั้งด้านบวกและลบ) ในระยะยาว
2. การพิจารณาถึงความสมดุลของความต้องการทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม

หลักการของการพัฒนาที่ยั่งยืน

การพัฒนาที่ยั่งยืนประกอบไปด้วยคุณลักษณะ 3 อย่าง

1. การพัฒนาทางเศรษฐกิจ
2. การพัฒนาทางสังคม
3. การพัฒนาทางสิ่งแวดล้อม

การพัฒนาทางเศรษฐกิจ

การพัฒนาทางสังคม

การพัฒนาทางสิ่งแวดล้อม

ตัวอย่างของการพัฒนาที่ยั่งยืน

การพัฒนาที่ยั่งยืนสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายระดับ อย่างเช่น

- ทิวอยู่อาศัยที่ยั่งยืน
- ชุมชนยั่งยืน
- ธุรกิจที่ยั่งยืน
- กระบวนการผลิตที่ยั่งยืน
- การเกษตรแบบยั่งยืน

ทิวอยู่อาศัยที่ยั่งยืน

เรามาลองพิจารณาตัวอย่างของทิวอยู่อาศัยที่ยั่งยืนกัน บ้านที่เห็นนี้ชื่อว่า Earthship Brighton เป็นบ้านดินในประเทศอังกฤษ ซึ่งบ้านนี้สร้างโดยต่อเติมขึ้นมาจากด้านข้างของเนินดิน ดังนั้นเนินดินจึงทำหน้าที่เป็นกำแพงด้านหนึ่งของบ้านไปโดยปริยาย ซึ่งช่วยควบคุมอุณหภูมิในบ้านไม่ให้เย็นหรือร้อนเกินไป เนื่องจากอุณหภูมิของดินจะไม่แกว่งมากเหมือนอุณหภูมิอากาศ ด้านบนของเนินดินมีการปลูกหญ้าและพืชผักสวนครัวเพื่อป้องกันการกัดเซาะดินและผลิตอาหาร มีการติดตั้งแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า และติดตั้งเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ มีถังเก็บน้ำฝนไว้ใช้ ห้องน้ำที่ใช้เป็นแบบส้วมหลุมนอกบ้านเพื่อลดการใช้น้ำ กำแพงของบ้านด้านที่ไม่ใช่เนินดินติดตั้งหน้าต่างขนาดสูงเติมกำแพงเพื่อให้แสงอาทิตย์เข้าได้เต็มที่ ลดความจำเป็นในการใช้หลอดไฟ

ชุมชนที่ยั่งยืน

คราวนี้มาลองพิจารณาความยั่งยืนในระดับที่ใหญ่ขึ้นบ้าง ในชุมชนที่ชื่อว่า Kaikoura ในประเทศนิวซีแลนด์ นับเป็นหนึ่งในชุมชนที่ได้ชื่อว่ามีที่ยั่งยืน อันเนื่องมาจาก



รูปที่ 3.1: Earthship Brighton, UK

- มีระบบนิเวศที่อุดมสมบูรณ์และมีความหลากหลายทำหน้าที่เป็นแหล่งผลิตทรัพยากรให้มนุษย์
- มีรากฐานทางสังคมที่ส่งเสริมคุณภาพชีวิตของประชากรในชุมชน ให้ความสำคัญกับความแตกต่างทางวัฒนธรรม ให้ความสำคัญกับความเท่าเทียมกัน และเล็งเห็นถึงความต้องการของประชากรในรุ่นต่อไป
- มีเศรษฐกิจที่มีความหลากหลายเพียงพอที่จะรับมือกับการเปลี่ยนแปลง สร้างความมั่นคงให้กับประชากรได้ในระยะยาว รวมทั้ง

กรณีศึกษา: ศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวภาพต่อการพัฒนาที่ยั่งยืนในอนุภูมิภาคุ่มแม่น้ำโขง

1. ข้อมูลเบื้องต้น อนุภูมิภาคุ่มแม่น้ำโขง (Greater Mekong Subregion: GMS) ประกอบไปด้วยประเทศและมณฑลที่อยู่ในบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำโขงอันประกอบไปด้วยประเทศกัมพูชา ลาว เมียนมาร์ เวียดนาม มณฑลยูนนาน และมณฑลกวางซีในประเทศจีน มีประชากรรวมกว่า 325 ล้านคน (2008) และมีทรัพยากรธรรมชาติมากมายไม่ว่าจะเป็นไม้ แร่ธาตุ ถ่านหิน ปิโตรเลียม รวมถึงแม่น้ำย่อยอีกหลายสาย
2. ความร่วมมือทางเศรษฐกิจในอนุภูมิภาคุ่มแม่น้ำโขง เป็นแผนความร่วมมือที่เน้นถึงการปฏิรูปทางเศรษฐกิจด้วยเรื่องของการเชื่อมโยงคมนาคม โทรคมนาคม และการค้าขายข้ามชายแดน อันอาจจะส่งผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติไม่ว่าจะเป็นเรื่องของการสูญเสียทางระบบนิเวศน์ พืชพรรณ และสัตว์ป่าต่างๆด้วย
3. ศักยภาพของการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนใน GMS การ

ใช้เชื้อเพลิงที่มีแหล่งที่มาจากใน GMS เองย่อมส่งผลดีต่อความมั่นคงทางด้านพลังงานของอนุภูมิภาค ลดการพึ่งพาการนำเข้าปิโตรเลียม นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างงานและขยายตลาดของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งเป็นการช่วยกระตุ้นเศรษฐกิจภาคการเกษตรและกระจายรายได้สู่ชนบท และท้ายที่สุดแล้วเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่ปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์หรือติดลบ ซึ่งส่งผลดีต่อการป้องกันภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนสภาพของภูมิอากาศ

ความซับซ้อนของการวิเคราะห์โครงการนี้มีจากการที่จะต้องพัฒนา มีการพัฒนาปรับปรุงขนาดใหญ่ครอบคลุมภูมิภาค ต้องมีการส่งเสริมให้ประชากรหันมาใช้เชื้อเพลิงชนิดใหม่ นอกจากนี้ยังมีผู้เกี่ยวข้องที่ได้รับผลประโยชน์และผลกระทบหลายฝ่าย จึงจำเป็นจะต้องมีการวางแผนอย่างรัดกุม วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นจากทุกด้าน

4. ประเด็นที่พึงคำนึงถึงในหนทางสู่เชื้อเพลิงชีวภาพ

- (a) การเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม
- (b) ผลกระทบต่อคนยากจนและคนในชนบท
- (c) เทคโนโลยีและวัตถุดิบที่จะใช้
- (d) โครงสร้างพื้นฐาน
- (e) การบริหารและจัดการ
- (f) นโยบายที่เกี่ยวข้อง

5. การดำเนินการ จากประเด็นที่พึงคำนึง เราสามารถนำมาวิเคราะห์เป็นกลุ่มปัญหาอย่างเช่นเรื่องของกลุ่มอุตสาหกรรมคมนาคม ห่วงโซ่อุปทาน เทคโนโลยีที่เหมาะสม การร่างนโยบาย การสรรหาแหล่งเงินทุนและการสร้างขีดความสามารถ ซึ่งประเด็นเหล่านี้จะต้องนำมาอภิปรายเมื่อได้ไปตรวจเยี่ยมสถานที่จริงที่ประเทศกัมพูชา เวียดนาม ลาว มณฑลยูนนาน และประเทศไทย โดยได้ทำการสัมภาษณ์และรับฟังข้อเสนอแนะ รวมถึงข้อวิพากษ์วิจารณ์จากหลายหน่วยงาน ไม่ว่าจะเป็นบริษัทพลังงานท้องถิ่น นักลงทุน ธนาคารนานาชาติ หน่วยงานพิทักษ์สิ่งแวดล้อม องค์กรเพื่อการพัฒนา สถาบันวิจัย มหาวิทยาลัย หน่วยงานท้องถิ่นด้านอุตสาหกรรม พลังงาน ป่าไม้ สิ่งแวดล้อม เกษตรกรรม คมนาคม พาณิชยกรรม พัฒนาท้องถิ่น และนโยบาย

6. มิติด้านนโยบาย

- แต่ละประเทศควรมีนโยบายเกี่ยวกับเชื้อเพลิงชีวภาพที่สอดคล้องกัน และมีแผนพัฒนาร่วมกันในระยะยาว ทั้งนี้เพื่อให้มีมาตรฐานในการผลิตและใช้เชื้อเพลิงเดียวกัน มีการส่งเสริมการลงทุน การให้แรงจูงใจทางภาษี การกำหนดการใช้ที่ดิน การกำหนดมาตรฐานของเชื้อเพลิงชีวภาพ การกำหนดคุณลักษณะของยานพาหนะ ไบโอดีเซล

- การร่างนโยบายระดับชาติโดยได้รับความร่วมมือจากทุกกระทรวงที่เกี่ยวข้อง
- มีโครงสร้างแรงจูงใจที่จะช่วยเร่งสร้างห่วงโซ่อุปทานสำหรับธุรกิจเชื้อเพลิงชีวภาพรุ่นแรกๆ
- กำหนดมาตรฐานภาคบังคับเพื่อรับประกันคุณภาพและประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อม และเพื่อสร้างความมั่นใจแก่ผู้บริโภค
- การกำหนดมาตรฐานร่วมในภูมิภาคเดียวกัน
- การกำหนดนโยบายอื่นๆที่เกี่ยวข้องเพื่อช่วยในการลดคาร์บอน ลดความยากจน รักษาความหลากหลายชีวภาพ และเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานให้แก่ภูมิภาค

7. มิติด้านการกำกับดูแลและการจัดการ

- การกำกับดูแลการปลูกพืชเชื้อเพลิงชีวภาพในที่สัมปทาน เพื่อลดปัญหาจากการแสวงหาประโยชน์ในทางที่ผิดเช่นการถางป่าหรือทำไร่เลื่อนลอย มีการตรวจสอบผู้ได้รับสัมปทานและติดตามผล มีการจัดแบ่งโซนการเพาะปลูก
- มีการจัดการห่วงโซ่อุปทานดีเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาจากการกระจายตัวของแหล่งผลิต

8. มิติด้านโครงสร้างพื้นฐาน

- ต้องมีการลงทุนอย่างมหาศาลในโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการวิจัยและพัฒนา การกลั่น การกระจายสินค้า และการกักเก็บเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการใช้ในภาคคมนาคม
- การลงทุนจากฝ่ายเอกชนและจากต่างชาติเพื่อส่งเสริมทรัพยากรบางส่วนของอาจจะมียู่จำกัดในท้องถิ่น

9. มิติด้านการใช้เทคโนโลยีและวัตถุดิบที่เหมาะสม

- ต้องเลือกวัตถุดิบที่ไม่ต้องใช้เป็นอาหาร ไม่ต้องใช้พื้นที่เพาะปลูกที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร ยกตัวอย่างเช่น ไม่ไปแย่งพื้นที่ในการปลูกข้าว พืชผัก หรือแม้แต่พืชที่ใช้เป็นอาหารสัตว์ที่นำมาเป็นอาหาร และต้องเป็นพืชที่ให้อัตราผลผลิต (แป้ง น้ำมัน น้ำตาลหรืออื่นๆ)
- พิจารณาการสร้างรายได้เพิ่มเติมจากพืชวัตถุดิบ เช่น นำมาทำเป็นยาสมุนไพร อาหารสัตว์ ปุ๋ยหมัก หรืออาหารเสริม
- ใช้เทคโนโลยีการผลิตที่เหมาะสมกับท้องถิ่น

10. มิติด้านผลกระทบต่อความเป็นอยู่ของคนยากจนและคนในชนบท

- สร้างรายได้เพิ่มเติมให้กับประชาชนทั้งในระดับครัวเรือนและชุมชนจากการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพขนาดเล็ก เช่น การปลูกพืชวัตถุดิบบนที่ดินชายขอบเป็นรายได้เพิ่ม การสร้างงานจากการสร้างโครงสร้างพื้นฐาน หรือการจ้างงานในสวน
- การประเมินความเสี่ยงจากผลผลิตล้นตลาดจากการที่ราคาพืชวัตถุดิบพุ่งสูงขึ้นชั่วคราว ทำให้เกษตรกรหันมาปลูกมากเกินไปจนทำให้ราคาตก ซึ่งตัวอย่างนี้เราเห็นได้เป็นประจำไม่ว่าจะเป็นกรณีของข้าว ยางพารา มะนาว
- การทุจริตสัมปทาน บุกรุกพื้นที่ป่า นายทุนกว้านซื้อที่ดิน การสูญเสียรายได้ การพลัดถิ่นฐานอันมีผลมาจากการพัฒนา การสร้างโครงสร้างพื้นฐานอาจมีผลกระทบต่อความสามารถในการเข้าถึงถนน น้ำ และไฟฟ้า

11. มิติด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม

- การปลูกป่าทดแทนบนที่ดินชายขอบในสวนขนาดใหญ่แม้จะเป็นพื้นที่เพียงเล็กน้อย พื้นที่พุ่มไม้ที่ทางระบบนิเวศบางส่วนเช่นการป้องกันกักเก็บน้ำดิบ
- ในสวนที่มีการจัดการที่ไม่ดี อาจมีปัญหาของการตัดไม้ทำลายป่า การสูญเสียความหลากหลายทางชีวภาพ การแย่งแย่งทรัพยากรธรรมชาติ ผลกระทบกับคุณภาพของดิน
- การให้สัมปทานอาจก่อให้เกิดการตัดไม้ทำลายป่า ซึ่งจะหักล้างกับผลประโยชน์การลดแก๊สเรือนกระจกที่ได้จากการเปลี่ยนมาใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวภาพ

12. สรุป เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นหนทางหนึ่งอันจะพาไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนได้ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของการพัฒนาแหล่งพลังงานในประเทศ สร้างงานและความมั่นคง ขยายตลาดผลผลิตทางการเกษตร และการลดการปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศ อย่างไรก็ตาม ในหนทางการพัฒนานี้ หากไม่มีการจัดการและวางแผนที่ดี อาจเกิดผลเสียขึ้นได้หลายประการตามที่ได้อภิปรายมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศกำลังพัฒนาซึ่งอาจจะมีปัญหาเรื่องของการบังคับใช้กฎ ระเบียบ และมาตรฐานต่างๆ

กรณีศึกษา 2: การพัฒนาและใช้น้ำมันไบโอดีเซลในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ในกรณีศึกษาที่แล้ว โครงการมีขนาดใหญ่ ครอบคลุมพื้นที่ขนาดอนุภูมิภาค คราวนี้เรามาลองทำความเข้าใจโครงการ(สมมติ)ที่มีขนาดเล็กลงในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์(ซึ่งใกล้ตัวเรามากขึ้น) ลองพิจารณาความยั่งยืน

ของนโยบายพัฒนาและบังคับใช้ไบโอดีเซลในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในที่นี้ประเด็นสำคัญที่เราจะต้องพิจารณาก็คือเรื่องของการผลิตไบโอดีเซลในพื้นที่มหาวิทยาลัยและเรื่องของผลกระทบต่อระบบต่างๆภายในมหาวิทยาลัย ซึ่งเราจะสามารถแยกพิจารณาเป็น 3 หัวข้อได้ดังนี้

1. ด้านเศรษฐศาสตร์

- ต้นทุนพลังงานที่เพิ่มขึ้น/ลดลงของมหาวิทยาลัย
- ต้นทุนคมนาคมขนส่งของนักศึกษาและบุคลากร
- ขยายตลาดผลผลิตทางการเกษตร
- โอกาสในการลงทุน/บั่นทอนโอกาสของเทคโนโลยีอื่น

2. ด้านสิ่งแวดล้อม

- การปล่อยมลพิษ
- ของเหลือและมลภาวะจากการผลิต
- ความหลากหลายทางชีวภาพ
- การตัดไม้ทำลายป่า

3. ด้านสังคม

- ความมั่นคงทางพลังงาน
- การสร้างงานหรือการสูญเสียงานในมหาวิทยาลัย
- การจรรยาบรรณ
- ภาพลักษณ์ความเป็นสีเขียว
- การแข่งขันกับการปลูกพืชเป็นอาหารในชุมชนรอบๆ
- โอกาสในการศึกษาระบบ

ตัวบ่งชี้ความยั่งยืน

แม้ว่าเราจะมีความเข้าใจว่าความยั่งยืนหมายถึงอะไร แต่ก็ยังเป็นความเข้าใจในเชิงนามธรรม ซึ่งหากเราต้องการประเมินความยั่งยืนของโครงการหนึ่งๆนั้น การจะใช้เกณฑ์ที่เป็นนามธรรมย่อมจะทำได้ยากหากเราขาดเกณฑ์ที่มีความชัดเจนเพียงพอ จำเป็นที่เราจะต้องมีเกณฑ์ที่เป็นรูปธรรมเป็นตัวเลข มีวิธีวัดที่ชัดเจนเพื่อที่จะสามารถประเมินความยั่งยืนได้อย่างมีประสิทธิภาพและคงเส้นคงวา

ดังนั้น เราจะนำ*ตัวบ่งชี้*มาใช้ในการวัดความยั่งยืน ตัวบ่งชี้มักจะเป็นค่าหรือจำนวนที่ใช้ในการวัดระดับหรือสถานะของสิ่งหนึ่ง

ยกตัวอย่างเช่น หากเราจะหาตัวบ่งชี้ที่จะบอกสถานะความเปรี้ยวของมะนาว บอกว่าเปรี้ยวมาก เปรี้ยวจัด เปรี้ยวนิดหน่อยก็อาจจะไม่ชัดเจน ยิ่งไปกว่านั้น เปรี้ยวมากของแต่ละคนก็ไม่เท่ากัน ดังนั้นตัวบ่งชี้ด้วยค่าพุดจะไม่เหมาะสม เพราะไม่สามารถวัดได้สม่ำเสมอและไม่มีความชัดเจน ในกรณีนี้เราสามารถเอาค่า pH ของน้ำมะนาวมาเป็นตัวบ่งชี้ เนื่องจากมีวิธีการวัดที่ชัดเจนและสม่ำเสมอ

หรือหากต้องการหาตัวบ่งชี้ความสดของมะนาว การจะใช้สีเปลือกหรือวัดความแน่นของเนื้อด้วยการบีบก็จะได้ค่าที่ไม่ชัดเจน ดังนั้นเราสามารถใช้จำนวนวันนับจากวันเก็บเกี่ยวมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ได้ เป็นต้น

แล้วถ้าจะหาตัวบ่งชี้ความยั่งยืนของโครงการ ชุมชน หรือประเทศ จะต้องใช้ตัวบ่งชี้ทางสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจและสังคมตัวใดบ้าง

1. คุณสมบัติของตัวบ่งชี้ที่ดี

- มีความถูกต้องเหมาะสม
- มีความเกี่ยวข้องกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย
- ต้นทุนการเก็บข้อมูลไม่สูงจนเกินไป
- มีความน่าเชื่อถือ
- เข้าใจและตีความได้ง่าย
- มีมาตรฐานเพื่อใช้เปรียบเทียบ
- สามารถแสดงแนวโน้มเมื่อเวลาผ่านไปได้
- ตั้งกรอบทั้งด้านเวลาและบริเวณอย่างเหมาะสม

กระบวนการประเมินความยั่งยืน

การประเมินความยั่งยืนคือการนำเอาตัวบ่งชี้ที่วัดได้มาวิเคราะห์และแปรผลออกมา โดยจริงๆ แล้วผลจะไม่ได้ออกมาเป็นแบบผ่านหรือไม่ผ่าน แต่จะออกมาเป็นค่าตัวบ่งชี้เพื่อช่วยให้ผู้ประเมินมองเห็นในภาพรวมว่าโครงการมีผลกระทบด้านบวกและด้านลบทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมอย่างไรบ้าง และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับโครงการทางเลือกอื่นๆ ได้ โดยกระบวนการประเมินนั้นก็สามารถแยกย่อยออกมา

พลังงานในประเทศไทย

บรรณานุกรม

- [1] Ian Baird and Noah Quastel. "Rescaling and Reordering Nature–Society Relations: The Nam Theun 2 Hydropower Dam and Laos–Thailand Electricity Networks." In: *Annals of the Association of American Geographers* (Aug. 2015). DOI: [10.1080/00045608.2015.1064511](https://doi.org/10.1080/00045608.2015.1064511).
- [2] Sittha Sukkasi. *Biofuels*.