



มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

พลังงานงานทดแทนในประเทศไทย

สัปปิณันท์ เอกอำพน

คำนำ

ตำราเล่มนี้ถูกเขียนขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนเกี่ยวกับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์สำหรับนักศึกษาปี ๓ - ๔ และสำหรับบุคคลทั่วไปที่มีความสนใจทางด้านดังกล่าว โดยที่แม้เนื้อหาบางส่วนจะมีคณิตศาสตร์ขั้นสูงเพื่อช่วยในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร แต่ความตั้งใจหลักของผู้เขียนต้องการจะให้ผู้ที่มีความสนใจและมีพื้นฐานคณิตศาสตร์ระดับมัธยมปลายควรจะสามารถอ่านแล้วเข้าใจได้ ทั้งนี้เนื่องจากผู้เขียนเล็งเห็นความสำคัญของการสร้างความเข้าใจพื้นฐานเรื่องของพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงเทคโนโลยีต่างๆที่จะนำไปประยุกต์ใช้เพื่อกักเก็บ แปลง หรือนำพลังงานนี้ไปใช้ เพื่อให้ผู้อ่านจะได้มีความเข้าใจที่ถูกต้อง มีพื้นฐานความรู้ที่เหมาะสมในการทำงานในเทคโนโลยีพลังงานสะอาดในอนาคต หรือแม้แต่สามารถทำความเข้าใจและคำนึงถึงความเหมาะสมของนโยบายหรือโครงการที่เกี่ยวข้องกับพลังงานแสงอาทิตย์ได้โดยไม่เชื่อเพียงคำโฆษณาหรือวาดอ้างที่อาจจะเกินความเป็นจริงในหลายครั้ง

ผู้เขียนหวังว่าข้อมูลที่ได้รับการรวบรวมไว้ในตำราเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านในวงกว้าง มิใช่เฉพาะระดับนักศึกษาหรือนักวิชาการเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถ้าหากผู้อ่านมีความรู้พื้นฐานทางด้านฟิสิกส์พื้นฐาน จะทำให้สามารถเข้าใจเนื้อหาและบทวิเคราะห์ได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงสามารถนำความรู้ที่ได้รับนำไปวิเคราะห์ข้อมูลอื่นๆได้ด้วยตนเอง

สัปปินันท์ เอกอำพน

สารบัญ

I	พลังงานทดแทนเบื้องต้น	7
1	พลังงานแสงอาทิตย์	8
1.1	การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)	8
1.2	ทิศทางของแสงอาทิตย์	8
1.3	เซลล์แสงอาทิตย์	9
1.4	หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	9
1.5	ต้นทุนของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	11
1.6	สภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	12
1.7	พลังงานความร้อนแสงอาทิตย์	13
1.8	คุณสมบัติของตัวรับแสง	13
1.9	เทคโนโลยีนำความร้อนไปใช้ต่อ	13
2	เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectricity)	14
2.1	ปรากฏการณ์ซีเบ็ก (Seebeck Effect)	14
2.2	ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)	16
2.3	ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)	17
2.4	หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก	18
2.5	ต้นทุนของพลังงานจากเทอร์โมอิเล็กทริก	20
3	เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells)	23
3.1	ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง	23
3.2	ปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง	23
3.3	พลังงานที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง	24
3.4	ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	29
3.5	การวิเคราะห์ต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิง	29
4	พลังงานลม	31
4.1	หลักการแปลงพลังงานลม	31
4.2	อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม	33
4.3	การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า	35
4.4	ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าพลังงานลม	35
5	พลังงานชีวภาพ	37
5.1	วัตถุดิบ (Feedstock)	37

5.2	เอทานอล	37
5.3	ไบโอดีเซล	37
5.4	แก๊สชีวภาพ	37
6	การกักเก็บพลังงาน (Energy Storage)	38
6.1	บ่อกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Ponds)	38
6.2	แบตเตอรี่	39
6.3	ล้อตุ่นกำลัง (Flywheel)	39
II	เศรษฐศาสตร์พลังงาน	40
7	การวิเคราะห์ต้นทุน	41
7.1	โครงสร้างต้นทุน	41
7.2	มูลค่าเงินตามเวลา (Time Value of Money)	42
7.3	ต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (Levelized Cost of Energy - LCOE)	42
7.4	อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return - IRR)	43
7.5	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value - NPV)	43
III	ศักยภาพของพลังงานทดแทนในประเทศไทย	44
8	การพัฒนาอย่างยั่งยืน	45

สารบัญรูป

1.1	วงจรเทียบเท่าของเซลล์แสงอาทิตย์	9
1.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ ผลิตได้จากในเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 25°C	11
1.3	เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภท	11
1.4	ประวัติต้นทุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อวัตต์จากปี 1975 - 2015	12
1.5	แผนภูมิแจกแจงต้นทุนของการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในปี 2559	12
2.1	หลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก	14
2.2	การเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	15
2.3	ภาพวงจรแสดงคุณสมบัติของเครื่องผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก	16
2.4	วงจรแสดงการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์	17
2.5	ประสิทธิภาพความร้อนของ TEG เทียบกับประสิทธิภาพคาร์โนต์	19
3.1	Historical and projected transportation fuel cell system cost	29
3.2	Historical and projected transportation fuel cell system cost	30
4.1	ทิศทางของความเร็วและแรงที่เกิดขึ้นบนก้านหลวมแรงยก จะสังเกตได้ว่า ในกรณีนี้ ความเร็วสัมพัทธ์ของลมเมื่อเทียบกับก้านมีค่าเท่ากับ $w =$ $\sqrt{u^2 + v^2}$	34
4.2	ประสิทธิภาพของก้านหลวมแรงยกที่อัตราส่วนความเร็วต่างๆ จะเห็นได้ว่า ค่า λ ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ราว 67 ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่สูงถึง 889!	34
4.3	Historical and projected transportation fuel cell system cost	35
4.4	แผนภูมิเปรียบเทียบต้นทุนตลอดการใช้งานของโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงาน ลมแบบบนพื้นดินกับแบบนอกชายฝั่ง	36

สารบัญตาราง

2.1	ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กของวัสดุต่างๆที่ 25 C	15
2.2	ค่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (2017)	20
3.1	ตารางแสดงค่าเอนทัลปีและพลังงานอิสระของกิบส์ที่สถานะอ้างอิง (1 บรรยากาศ 298 K)	27

ภาค I

พลังงานทดแทนเบื้องต้น

1 พลังงานแสงอาทิตย์

เวลาพูดถึงพลังงานแสงอาทิตย์นั้น หลายคนอาจจะนึกถึงแดดร้อนๆ ในช่วงเดือนมีนาคมหรือเมษายน แต่จริงๆ แล้วจะรู้ไหมว่าพลังงานที่มีอยู่ในแสงอาทิตย์นั้นประกอบด้วยหลายส่วน การจะดึงพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้ได้เต็มที่มีนั้น จำเป็นที่เราจะต้องมีความเข้าใจถึงส่วนประกอบเหล่านี้

เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นมาจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นต่างๆ ดังนั้นเราควรจะเริ่มทำความเข้าใจเกี่ยวกับการแผ่รังสีของวัตถุดำก่อน

1.1 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)

การแผ่รังสีของวัตถุดำเกิดจากการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากความร้อนของวัตถุซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์กับสิ่งแวดล้อม ซึ่งช่วงความถี่และความเข้มข้นของคลื่นต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุดำ กล่าวอย่างง่ายก็คือ ในความเป็นจริงแล้วไม่มีวัตถุใดที่มีการแผ่รังสีเหมือนวัตถุดำแท้จริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งดาวฤกษ์อย่างพระอาทิตย์นั้นก็ไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อม แต่ความเข้าใจเรื่องของการแผ่รังสีนี้ก็สามารถนำมาใช้ทำความเข้าใจส่วนประกอบของแสงอาทิตย์ได้

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

ดวงอาทิตย์ซึ่งมีอุณหภูมิที่ผิวประมาณ 5800 K นั้น มีการแผ่รังสีออกมามากที่สุดในช่วงคลื่นแสงและอินฟราเรด และมีจำนวนอีกเล็กน้อยในช่วงอัลตราไวโอเล็ต

1.2 ทิศทางของแสงอาทิตย์

เนื่องจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา และพลังงานของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนพื้นที่หนึ่งๆ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแสงและมุมตกกระทบ เพื่อจะเพิ่มพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับ เราสามารถออกแบบอุปกรณ์ให้มีความสามารถในการติดตามดวงอาทิตย์ (solar tracking) ซึ่งในปัจจุบันมีเทคโนโลยีหลายวิธีที่ใช้ในการติดตาม ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่

1.2.1 การติดตามแบบใช้พลังงาน

การติดตามดวงอาทิตย์แบบใช้พลังงานหรือที่เรียกว่า Active Tracking นั้นเป็นการใช้ระบบ Feedback Loop โดยใช้ตัวรับแสงเพื่อช่วยในการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ประเมินผลแล้วส่งสัญญาณให้กับระบบควบคุมให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

1.2.2 การติดตามแบบไม่ใช้พลังงาน

1.3 เซลล์แสงอาทิตย์

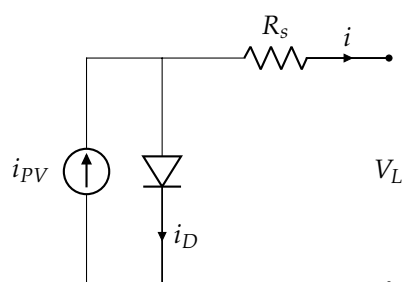
เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell หรือ Photovoltaic cell) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงโดยใช้ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นจากการเคลื่อนไหวของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้ดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

จริงๆแล้วปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุอื่นๆนอกจากเซลล์สุริยะด้วย แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ไม่มีทิศทางหรือแนวโน้มใดๆ จึงทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น จำเป็นจะต้องมีวิธีบังคับการไหลของอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดกระแสได้ นั่นเป็นสาเหตุที่เซลล์สุริยะจำเป็นต้องมีการออกแบบวงจรพิเศษ

1.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ในเซลล์สุริยะนั้น ระบบวงจรที่จะบังคับทิศทางกระแสของอิเล็กตรอนที่เกิดจากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกคือ 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 ซึ่งระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรเทียบเท่าได้โดยไดโอดและความต้านทานภายในดังรูป 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) และความต่างศักย์ของโหลดภายนอก (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 คือกระแสย้อนกลับอิมิตตัวของ P-N junction, i_{PV} คือกระแสจากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก และ i คือกระแสที่ผ่านตัวต้านทานภายนอก

เซลล์สุริยะสามารถผลิตกำลังได้สูงสุดเมื่อ

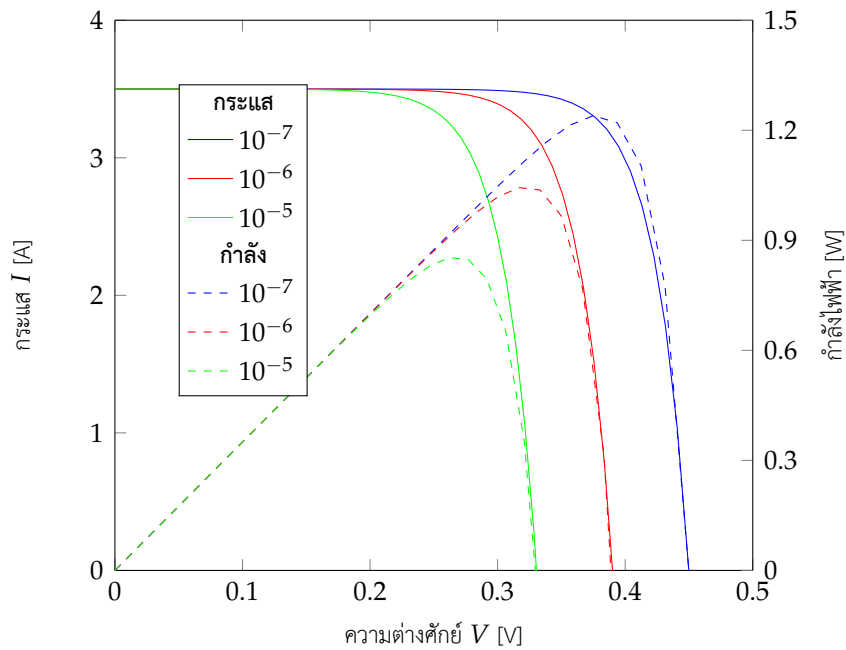
$$\begin{aligned} P_{out} &= iV \\ \frac{dP_{out}}{dV} &= 0 \\ \exp \left(\frac{eV_{max P}}{kT} \right) &= \frac{1 + \frac{i_{PV}}{i_0}}{1 + \frac{eV_{max P}}{kT}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

สังเกตว่าสมการนี้มีค่า $V_{max P}$ อยู่ทั้งสองด้าน ไม่สามารถแก้สมการเชิงวิเคราะห์ได้ จำเป็นต้องแก้สมการเชิงตัวเลข

ประสิทธิภาพสูงสุดของแผงเซลล์สุริยะเกิดในตอนที่แผงผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$P_{max} = \frac{V_{max P}(i_0 + i_{PV})}{1 + \frac{kT}{eV_{max P}}} \quad (1.5)$$

$$\eta_{max} = \eta_{max P} = \frac{P_{max}}{I_{in}} = \frac{V_{max P}(i_0 + i_{PV})}{I_{in} \left(1 + \frac{kT}{eV_{max P}} \right)} \quad (1.6)$$



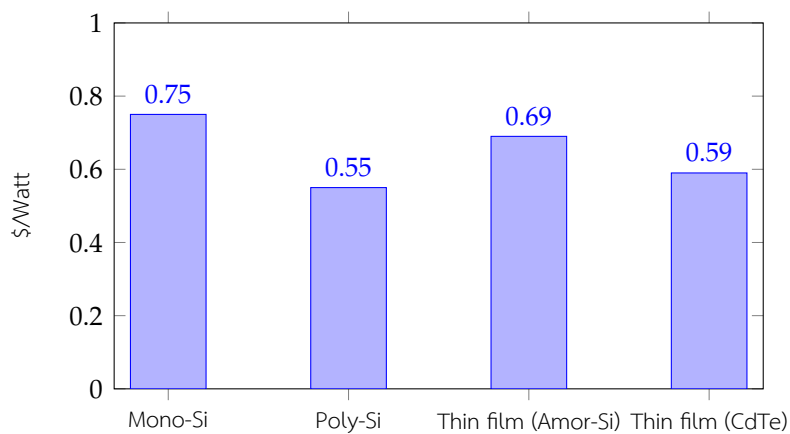
รูปที่ 1.2: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากในเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 25°C

ตัวอย่าง 1.1 คำนวณประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์นี้

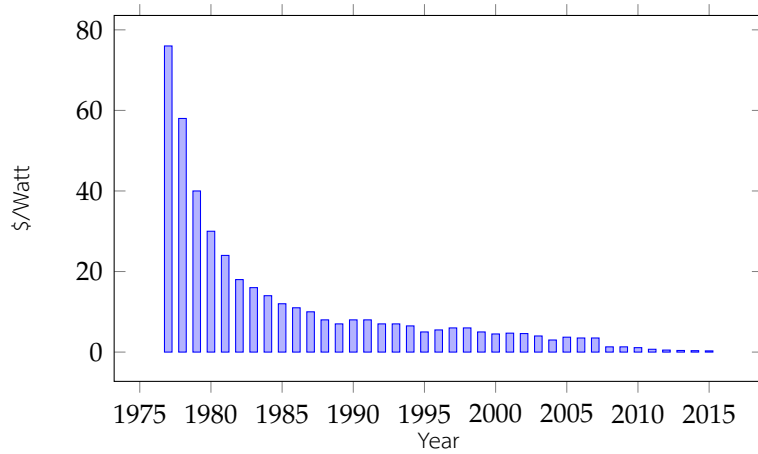
เซลล์สุริยะมีค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร 300 A/m^2 และความหนาแน่นกระแสย้อนกลับอิมิต $5 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2$ ระหว่างการทำงาน แสงมีอุณหภูมิ 50°C

เฉลย 1.1

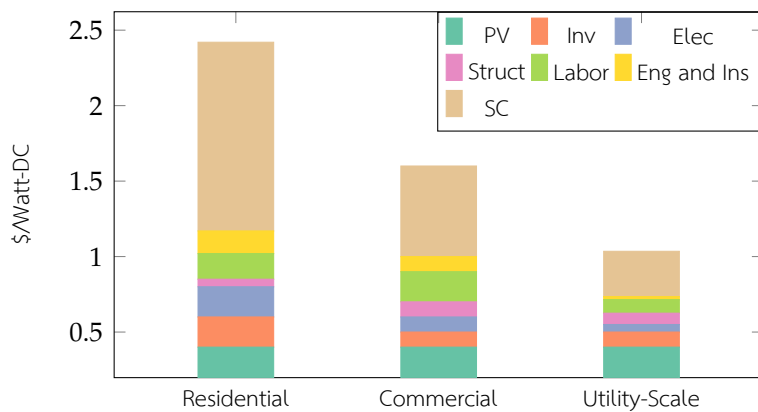
1.5 ต้นทุนของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 1.3: เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภท

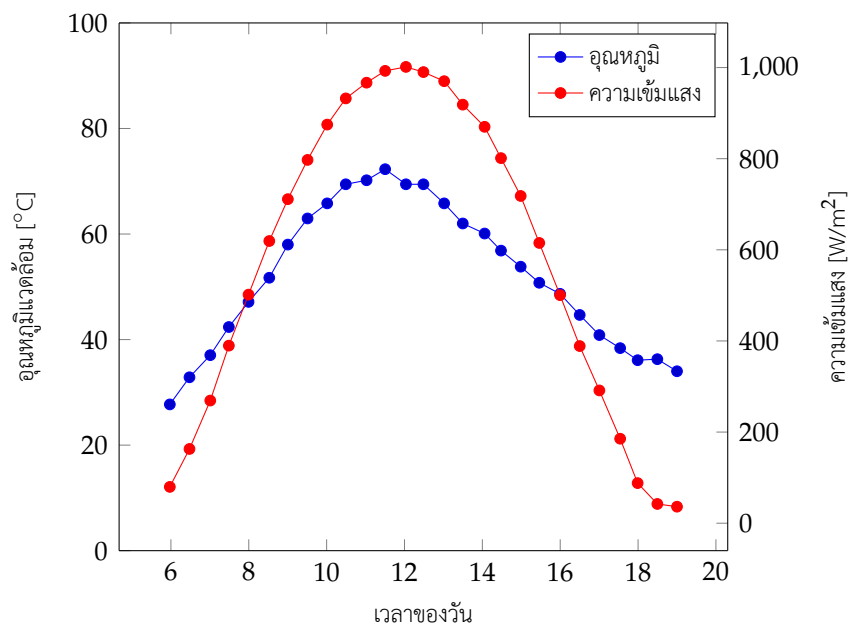


รูปที่ 1.4: ประวัติต้นทุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อวัตต์จากปี 1975 - 2015



รูปที่ 1.5: แผนภูมิแจกแจงต้นทุนของการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในปี 2559

1.6 สภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์



ตัวอย่าง 1.2 การคำนวณต้นทุนไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดอายุโครงการของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบคงที่ แบบติดตั้งตาม 1 แกน และแบบติดตั้งตาม 2 แกน

พิจารณาค่า LCOE โดยมีข้อมูลดังนี้

- ต้องการกำลังการผลิต 1 เมกะวัตต์ และทำงานได้ 11 ชม.ต่อวัน
- Fixed: $1/0.4 = 2.5$ MW, 1-axis: $1/0.65 = 1.54$ MW, 2-axis: 1.25 MW
- ค่าเซลล์แสงอาทิตย์ 20 บาทต่อวัตต์ (อ้างอิงกำลังการผลิต)
- ค่าอินเวอร์เตอร์แปลงไฟ 22 บาทต่อวัตต์
- ค่าโครงสร้าง 10% ของค่าเซลล์ + อินเวอร์เตอร์
- ค่าแรงงานติดตั้ง 10% ของอุปกรณ์ทั้งหมด (ครั้งเดียว)
- ค่าดำเนินงานและซ่อมบำรุง (O & M): 5% ของอุปกรณ์ทั้งหมดต่อปี
- การใช้ที่ดิน $\approx 10 \text{ m}^2$ ต่อกิโลวัตต์ (ราคาที่ดิน 1 ล้านบาทต่อไร่) ติดตั้งบนหลังคา = ไม่มีค่าใช้จ่าย

เฉลย 1.2

1.7 พลังงานความร้อนแสงอาทิตย์

1.7.1 การรับความร้อนโดยตรง

1.7.2 การรับความร้อนแบบรวมแสง

1.8 คุณสมบัติของตัวรับแสง

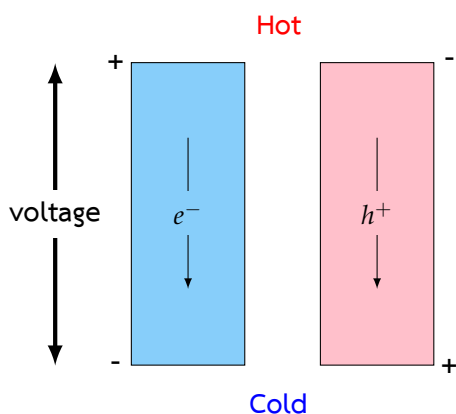
1.9 เทคโนโลยีนำความร้อนไปใช้ต่อ

2 เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectricity)

เทอร์โมอิเล็กทริกคือการแปลงพลังงานโดยตรงจากความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสารที่สามารถแปลงพลังงานด้วยวิธีนี้ได้เรียกว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric materials) ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีความน่าสนใจเนื่องจากในปัจจุบันในโลกของเรายังมีแหล่งพลังงานความร้อนราคาถูกอยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นแหล่งพลังงานพลังงานแสงอาทิตย์ หรือพลังงานความร้อนเหลือใช้ (Waste heat) จากกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่างๆ โดยในการแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric effect) ซึ่งสามารถแบ่งย่อยออกเป็นปรากฏการณ์ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกัน 3 อย่างดังต่อไปนี้

2.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

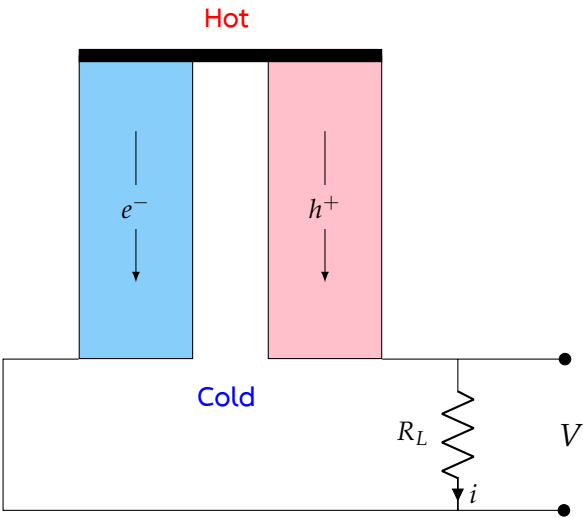
เทอร์โมอิเล็กทริกคือการเกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นบนตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนไป โดยมีหลักการมาจากการแพร่ (diffusion) ของพาหะของประจุ (charge carrier) ในสารเมื่อได้รับความร้อน โดยในสารตัวนำและกึ่งตัวนำทั่วไปจะมีทั้งอิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) ซึ่งมีประจุลบ และหลุม (holes) ซึ่งมีประจุบวก เมื่อวัสดุได้รับความร้อน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



รูปที่ 2.1: หลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

เมื่อนำไปต่อกับภาระภายนอกจะทำให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นได้

สารทุกชนิดมีความสามารถในการสร้างศักย์ไฟฟ้าจากการแพร่ของพาหะประจุที่ต่างกัน โดยค่าความสามารถนี้เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) ซึ่งอธิบายความสามารถ



รูปที่ 2.2: การเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันได้ดังนี้

$$V = \int_{T_L}^{T_H} (S_p - S_n) dT = \int_{T_L}^{T_H} S_{pn} dT \tag{2.1}$$

ซึ่งหากเราสมมติว่าค่าสัมประสิทธิ์นี้เป็นอิสระจากอุณหภูมิ จะสามารถเขียนสมการ 2.1 ใหม่ได้ว่า

$$V = S_{pn} \Delta T = S_{pn} (T_H - T_L) \tag{2.2}$$

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

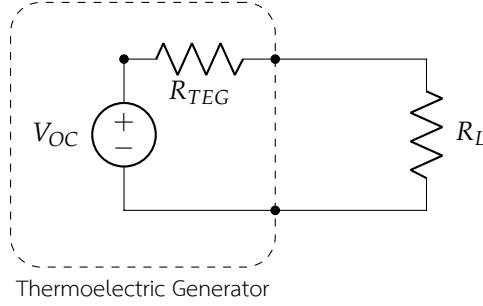
ตารางที่ 2.1: ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กของวัสดุต่างๆที่ 25 C

อย่างไรก็ดี ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกจากวัสดุหนึ่งๆนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กเพียงอย่างเดียว เนื่องจากลักษณะการทำงานและการต่อเชื่อมของเทอร์โมอิเล็กทริกกับวงจรไฟฟ้านั้นเป็นเหมือนแบตเตอรี่ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนอธิบายเป็นวงจรได้ดังนี้

จากภาพ 2.3 จะเห็นว่าเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเหมือนแหล่งศักย์ไฟฟ้า (V) และมีความต้านทานภายใน (R_{TEG})

$$V_L = S_{pn} \Delta T - i R_{int} \tag{2.3}$$

$$R_{int} = R_p + R_n \tag{2.4}$$



รูปที่ 2.3: ภาพวงจรแสดงคุณสมบัติของเครื่องผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

นอกจากนี้ อีกวิธีที่จะเพิ่มปริมาณไฟฟ้าก็คือการต่อเทอร์โมอิเล็กทริกแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า เหมือนอย่างเวลาต่อแบตเตอรี่ AA หรือ AAA หลายก้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบพกพาทั้งหลาย ถ้าสมมุติว่าต่อเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด m คู่ จะได้สมการไฟฟ้าว่า

$$V = mS_{pn}\Delta T \quad (2.5)$$

$$R_{teg} = mR_{int} \quad (2.6)$$

$$V_L = mS_{pn}\Delta T - imR_{int} \quad (2.7)$$

การที่จะสามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ให้ได้มากที่สุดจึงจำเป็นจะต้องมีการปรับความต้านทานภาระ (Load resistance, R_L) ให้เหมาะสม เพื่อให้การสูญเสียไปกับความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกให้น้อยที่สุด ซึ่งความต้านทานภาระที่เหมาะสมนี้สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$P_L = iV_L = imS_{pn}\Delta T - i^2mR_{int} \quad (2.8)$$

$$\frac{dP_L}{di} = 0 = m(S_{pn}\Delta T - 2iR_{int}) \quad (2.9)$$

$$i_{maxP} = \frac{S_{pn}\Delta T}{2R_{int}} \quad (2.10)$$

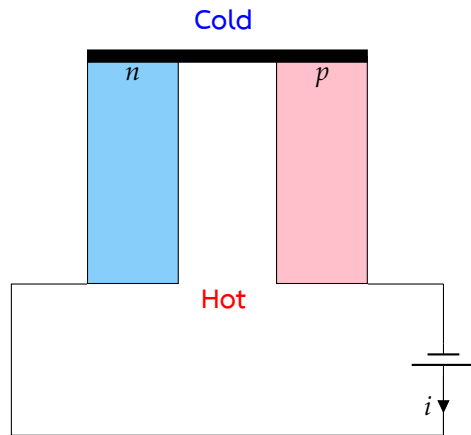
$$i = \frac{V}{R} = \frac{mS_{pn}\Delta T}{mR_{int} + R_L} \quad (2.11)$$

$$R_L = mR_{int} \quad (2.12)$$

หมายความว่า ความต้านทานภาระควรจะเท่ากับความต้านทานภายใน ซึ่งนี้เรียกว่า load matching ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ได้กับการผลิตไฟฟ้าด้วยกระบวนการอื่นๆได้เช่นกัน

2.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่ตรงกันข้ามกับปรากฏการณ์ซีเบ็ค ในกรณีของปรากฏการณ์ซีเบ็ค ความต่างของอุณหภูมิสร้างให้เกิดความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า ส่วนปรากฏการณ์เพลเทียร์เป็นการสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เปรียบเทียบได้กับกรณีของปรากฏการณ์แม่เหล็กไฟฟ้าในมอเตอร์ ซึ่งเมื่อใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวนำซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการหมุน ในทางตรงกันข้าม ถ้านำตัวนำไปหมุนภายในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 2.4: วงจรแสดงการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์

ประโยชน์ของปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำความเย็น โดยตัวทำความเย็นที่อาศัยหลักการนี้เรียกว่าตัวทำความเย็นเพลเทียร์ (Peltier cooler) โดยอัตราการกำจัดความร้อนสามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{\text{peltier}} = mS_{pn}T_H i$$

ซึ่งตัวทำความเย็นนี้มีจุดเด่นเช่นเดียวกับตัวผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก นั่นคือไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว จึงทำให้อัตราการสึกหรอน้อยกว่าระบบทำความเย็นแบบใช้สารทำความเย็นทั่วไป ลดความซับซ้อนของระบบทำความเย็น รวมถึงลดค่าซ่อมแซมและดูแลรักษาได้ แม้ปัจจุบันประสิทธิภาพจะยังไม่ดีเท่าที่ระบบทำความเย็นแบบทั่วไป และมีราคาสูงเมื่อเทียบกับอัตราการกำจัดความร้อน แต่ก็ได้มีการนำมาใช้ในกรณีที่มีพื้นที่การติดตั้งจำกัด เช่นระบบทำความเย็นในหน่วยประมวลผล (processor) ของคอมพิวเตอร์

2.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กของแต่ละวัสดุนั้นมักจะแปรผันกับอุณหภูมิ ดังนั้นในกรณีที่วัสดุมีอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กก็อาจจะไม่สม่ำเสมอได้เช่นกัน และเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุนี้ก็จะทำให้เกิดการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์เกิดขึ้นได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า 'ปรากฏการณ์ทอมสัน' ดังตามชื่อของลอร์ดเคลวิน (ชื่อจริง William Thomson) ซึ่งได้ทำนายการเกิดปรากฏการณ์นี้ในตัวนำที่มีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กของแต่ละวัสดุนั้นมักจะแปรผันกับอุณหภูมิ ดังนั้นในกรณีที่วัสดุมีอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กก็อาจจะไม่สม่ำเสมอได้เช่นกัน และเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุนี้ก็จะทำให้เกิดการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์เกิดขึ้นได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า 'ปรากฏการณ์ทอมสัน' ดังตามชื่อของลอร์ดเคลวิน (ชื่อจริง William Thomson) ซึ่งได้ทำนายการเกิดปรากฏการณ์นี้ในตัวนำที่มีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอและทำการทดลองจนสามารถพิสูจน์ได้จริง

ในกรณีที่ที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J ไหลผ่านตัวนำที่มีค่าสัมประสิทธิ์ทอมสัน K อัตราการเกิดความร้อนจะมีค่าเท่ากับ

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

สังเกตว่าในสมการนี้ กำลังความร้อนที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น W/m^3 เนื่องจากคุณสมบัติของตัวนำไม่สม่ำเสมอ กำลังความร้อนจึงไม่คงที่และต้องอาศัยการอินทิเกรตเพื่อหาค่าบนพื้นที่หรือปริมาตร

2.4 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก

ในระหว่างการทำงานจริงมักมีปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสองอย่างขึ้นไปเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ต่างๆ และผลที่เกิดขึ้นกับเทอร์โมอิเล็กทริก อย่างไรก็ตาม สำหรับในตำราเล่มนี้ จะขอกล่าวถึงความสัมพันธ์เมื่อเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานที่สถานะคงที่ (steady state) ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิที่จุดต่างๆ คงที่ 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

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

$$\begin{aligned} Q_{in} &= Q_{cold} + Q_{peltier} - Q_{joule} \\ &= m S_{pn} T_H i + K \Delta T - \frac{i^2 R_{teg}}{2} \end{aligned} \quad (2.13)$$

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ผ่านตัวต้านทานเท่ากับ

$$P_{out} = i^2 R_L \quad (2.14)$$

ซึ่งเราสามารถเอามาเขียนเป็นสมการประสิทธิภาพความร้อนของ TEG เท่ากับ

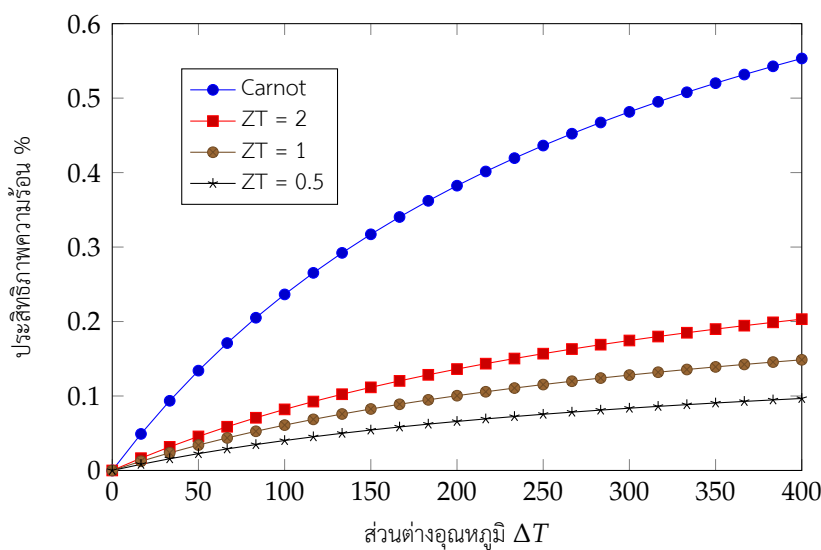
$$\eta = \frac{P_{out}}{Q_{in}} = \frac{i^2 R_L}{m S_{pn} T_H i + K \Delta T - \frac{i^2 R_{teg}}{2}} \quad (2.15)$$

เมื่อแทนค่า $Z = \frac{m^2 S_{pn}^2}{K_{teg} R_{teg}}$ เข้าในสมการ 2.15

$$\eta = \frac{\Delta T}{2 T_H + \frac{\Delta T}{Z} - \frac{\Delta T}{2}} \quad (2.16)$$

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

ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อนส่วนใหญ่ (นอกจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน) มักจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพเป็นสัดส่วนเทียบกับประสิทธิภาพคาร์โนต์ซึ่งเป็นประสิทธิภาพสูงสุดในทางทฤษฎีของเครื่องยนต์ความร้อนใดๆ



รูปที่ 2.5: ประสิทธิภาพความร้อนของ TEG เทียบกับประสิทธิภาพคาร์โนต์

ตัวอย่าง 2.1 เทอร์โมอิเล็กทริกทำมาจาก $PbTe - Bi_2Te_3$ ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

Properties	P-type	N-type
Seebeck Coefficient ($\times 10^{-6}$)	300	-100
Electrical resistivity ($\times 10^{-6}$)	9	10
Thermal conductivity	1.2	1.4

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

1. ค่า Z ของเทอร์โมอิเล็กทริกนี้
2. กำลังสูงสุดที่เทอร์โมอิเล็กทริกนี้ผลิตได้
3. ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกนี้

2.5 ต้นทุนของพลังงานจากเทอร์โมอิเล็กทริก

ต้นทุนวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิเล็กทริกในปัจจุบัน

Material Family	Max ZT	Temp ($^\circ\text{C}$)	Efficiency	Average Cost (\$/kg)	Material
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 2.2: ค่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (2017)

ตัวอย่าง 2.2 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยอุณหภูมิขนาดกลาง

กรณีเปรียบเทียบ 3 แบบ: น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม หรือซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้า

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

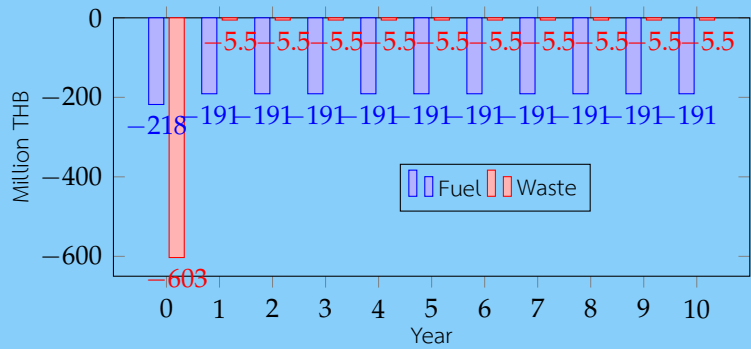
1. การผลิตไฟฟ้าขนาด 1 MW โดยสิ่งก่อสร้างและอุปกรณ์ทั้งหมดมีอายุการใช้งาน 10 ปี
2. ต้นทุนคงที่จากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก อินเวอร์เตอร์ ค่าที่ดิน และค่าติดตั้ง
3. ต้นทุนแปรผันนับจากค่าซ่อมแซมและค่าเชื้อเพลิง(ถ้ามี)
4. ค่าอินเวอร์เตอร์ 22 บาทต่อวัตต์ ค่าเทอร์โมอิเล็กทริกอุณหภูมิสูง 175 บาทต่อวัตต์ ค่าเทอร์โมอิเล็กทริกอุณหภูมิมกลาง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

เฉลย 2.1 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	None

และยังสามารถแสดงกระแสเงินสดเปรียบเทียบระหว่างกรณีได้ดังนี้



ในขณะเดียวกัน ค่าไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้าสามารถสมมติว่าเป็นค่าคงที่ในแต่ละปี ซึ่งหากเปรียบเทียบกับการลงทุนในระบบ TEG ทั้งสองแบบแล้ว จะสามารถหาผลต่างของกระแสเงินสดเพื่อจะนำไปใช้หาโครงการที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) สูงสุดได้ดังนี้

Year	Base	Fuel	Waste	Fuel - Base	Waste - Base
0	0	-218	-603	-218	-603
1	-39.4	-191	-5.5	-151.6	33.9
2	-39.4	-191	-5.5	-151.6	33.9
3	-39.4	-191	-5.5	-151.6	33.9
4	-39.4	-191	-5.5	-151.6	33.9
5	-39.4	-191	-5.5	-151.6	33.9
6	-39.4	-191	-5.5	-151.6	33.9
7	-39.4	-191	-5.5	-151.6	33.9
8	-39.4	-191	-5.5	-151.6	33.9
9	-39.4	-191	-5.5	-151.6	33.9
10	-39.4	-191	-5.5	-151.6	33.9
NPV				-\$1,390	-\$340

จากผลการวิเคราะห์กระแสเงินสดจะเห็นว่าโครงการสร้างโรงไฟฟ้า TEG ทั้งสองแบบยังมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นลบ หมายความว่าโครงการทั้งสองยังมีผลตอบแทนที่ยังไม่น่าพอใจ

เมื่อเปรียบเทียบกับใช้กระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้า

3 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells)

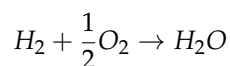
เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งแตกต่างจากการใช้เครื่องย่นไฟในการปั่นไฟซึ่งเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกลแล้วจึงเป็นพลังงานไฟฟ้าในที่สุด เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเพียงขั้นตอนเดียว และยังมีขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน จึงทำให้สามารถทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีในรูปแบบอื่น

จุดเด่นของเซลล์เชื้อเพลิงคือสามารถนำการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการสันดาปมาใช้ได้โดยตรง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงนี้เรียกว่า **ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (electrochemical reactions)** ซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับแบตเตอรี่ ข้อแตกต่างของแบตเตอรี่คือสารเคมีหรือเชื้อเพลิงทั้งหมดจะถูกบรรจุอยู่ในตัวแบตเตอรี่ ในขณะที่เชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงถูกเก็บไว้แยกกัน และถูกดึงเข้ามาใช้เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นเท่านั้น

3.1 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง

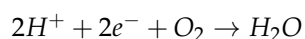
3.2 ปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง

อันที่จริงแล้ว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงก็คือปฏิกิริยาการสันดาป แต่เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์เคมีไฟฟ้า เราจึงควรทำความเข้าใจกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่มีการแลกเปลี่ยนระหว่างการเกิดปฏิกิริยาขึ้น ยกตัวอย่างเช่น



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

ปฏิกิริยารีดักชัน



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



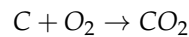
ในปฏิกิริยารีดักชัน สารจะมีการรับอิเล็กตรอน (จาก H^+ ซึ่งมีเลขประจุเป็น +1 ไปเป็น H_2O ซึ่งไฮโดรเจนมีประจุเป็น 0) ส่วนในปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารจะมีการปล่อยอิเล็กตรอน (จาก H_2 ซึ่งมีประจุเป็น 0 เป็น H^+ ซึ่งมีประจุเป็น +1)

3.3 พลังงานที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง

พลังงานตั้งต้นของเซลล์เชื้อเพลิงมาจากพลังงานเคมีของสารตั้งต้น แล้วพลังงานเคมีคืออะไร พลังงานเคมีคือพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในพันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลใดๆ และจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดปฏิกิริยาสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ขึ้น ซึ่งพลังงานในพันธะเคมีเหล่านี้สามารถวัดได้โดยใช้ enthalpy of formation (ΔH_f) ซึ่งพลังงานงานที่จะสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มาจากพลังงานเคมีที่ได้รับการปลดปล่อยจากปฏิกิริยารีดอกซ์ (ΔH)

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

ค่า enthalpy of formation ของสารทั่วไปสามารถหาได้จากตาราง



$$\begin{aligned}\Delta H &= \sum(\Delta H)_{products} - \sum(\Delta H)_{reactants} \\ &= \Delta H_{CO_2} - \Delta H_C - \Delta H_{O_2} \\ &= -394 \times 10^3 - 0 - 0 \\ &= -394 \times 10^3 \text{ J/mol } CO_2\end{aligned}$$

ในตัวอย่างนี้ พลังงานที่เปลี่ยนแปลงเป็นลบ แสดงว่าพลังงานของผลิตภัณฑ์น้อยกว่าของสารตั้งต้น หมายถึงมีการคายพลังงานออกมา ซึ่งเป็นปกติสำหรับปฏิกิริยาสันดาปทั่วไป เรียกได้อีกอย่างว่าปฏิกิริยาการคายพลังงาน (exothermic reaction)

แต่พลังงานที่คายออกมาไม่สามารถถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมด จะต้องมีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ในกรณีที่ปฏิกิริยาเป็นแบบย้อนกลับได้ การสูญเสียพลังงานความร้อนเท่ากับ

$$\text{Heat Loss} = \int TdS \quad (3.1)$$

ที่สภาวะคงที่ การสูญเสียความร้อนจะกลายเป็น

$$\text{Heat Loss} = T\Delta S \quad (3.2)$$

หากเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพ 100% พลังงานเคมีที่เหลือจะสามารถแปลงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมด

$$W_e = \Delta H - T\Delta S \quad (3.3)$$

แต่หากปฏิกิริยาไม่ได้เกิดแบบย้อนกลับได้ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จะน้อยกว่านี้

3.3.1 พลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs Free Energy)

พลังงานอิสระของกิบส์ (GFE) เป็นฟังก์ชันสภาวะ (state function) ค่าสัมบูรณ์ของพลังงานอิสระของกิบส์หาได้ยากและไม่ได้มีประโยชน์นัก ส่วนที่มีประโยชน์จริงๆ คือผลต่างหรือพลังงานที่เปลี่ยนไประหว่างสารตั้งต้นกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งใช้อธิบายว่าปฏิกิริยาหนึ่งๆ สามารถเกิดขึ้นเองได้หรือไม่ หาได้จาก

$$G = H - TS \quad (3.4)$$

เมื่อทำการหาอนุพันธ์ของ GFE ในกระบวนการที่มีอุณหภูมิคงที่ (isothermal process)

$$dG = dH - TdS \quad (3.5)$$

สำหรับความเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของเอนทัลปีและเอนโทรปี

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.6)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตได้ในสมการ 3.3 ซึ่งพลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาใดๆ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta G = \sum \Delta G_{products} - \sum \Delta G_{reactants} \quad (3.7)$$

จากสมการ 3.7 หากพิจารณาปฏิกิริยาของสารที่เป็นแก๊สอุดมคติ จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ทางอุณหพลศาสตร์ได้ดังนี้

$$dU = TdS - PdV \quad (3.8)$$

$$H = U + PV \quad (3.9)$$

หาค่าอนุพันธ์ของ H ได้

$$\begin{aligned}
 dH &= dU + PdV + VdP \\
 &= TdS - PdV + PdV + VdP \\
 &= TdS + VdP
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

$$VdP = dH - Tds = dG \tag{3.11}$$

หากพิจารณาสารตั้งต้น 1 mol จะได้ว่า

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

พิจารณาเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะคงที่ จะได้ว่า T เป็นค่าคงที่

$$\int_{G_0}^G dG = \int_{P_0}^P \frac{R_u T}{P} dP \tag{3.12}$$

$$G - G_0 = R_u T \ln \frac{P}{P_0} \tag{3.13}$$

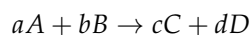
โดยกำหนดให้ G_0 คือพลังงานอิสระของกิบส์อ้างอิงที่อุณหภูมิ 25 C และความดัน 1 บรรยากาศ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการพลังงานอิสระของกิบส์เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันได้โดย

$$G = G_0 + R_u T \ln P \tag{3.14}$$

ซึ่งพลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนไปในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถอ้างอิงค่า H_0 และ G_0 ได้จากตาราง 3.1

3.3.2 พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี

ในปฏิกิริยาเคมี พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนไปเท่ากับส่วนต่างระหว่างพลังงานของผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้น ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของปฏิกิริยา



พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนไปเท่ากับ

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

$$\Delta G = \Delta G_0 + R_u T \ln \frac{P_C^c P_D^d}{P_A^a P_B^b} \quad (3.15)$$

Compound or ion	$H_0 (\times 10^3 \text{ J/mol})$	$G_0 (\times 10^3 \text{ J/mol})$
CO	-110	-137.5
CO ₂	-394	-395
CH ₄	-74.9	-50.8
Water	-286	-237
Steam	-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 (gas)	-201	-162.6

ตารางที่ 3.1: ตารางแสดงค่าเอนทัลปีและพลังงานอิสระของกิบส์ที่สถานะอ้างอิง (1 บรรยากาศ 298 K)

ถ้าหากพลังงานเคมีทั้งหมดสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และมีอิเล็กตรอน n ตัวถูกปล่อยออกมาต่อ 1 โมเลกุลของสารตั้งต้น เราจะสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$W_e = \Delta G = qE_g \quad (3.16)$$

โดยที่ W_e คือพลังงานไฟฟ้า q คือประจุไฟฟ้าที่มีการแลกเปลี่ยน และ E_g คือศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

3.3.3 ศักย์ไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

จากสมการ 3.16 ศักย์ไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถสร้างได้เท่ากับพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปหารด้วยประจุที่มีการแลกเปลี่ยน ดังนั้นหากทุกๆโมเลกุลของสารตั้งต้นมีการแลกอิเล็กตรอน n ตัว สมการแสดงศักย์ไฟฟ้าต่อ 1 mol ของสารตั้งต้นจะเป็น

$$E_g = \frac{W_e}{-nF} = E_g^0 + \frac{R_u T}{nF} \ln \frac{P_A^a P_B^b}{P_C^c P_D^d} \quad (3.17)$$

โดยที่ F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ซึ่งมีค่าเท่ากับประจุของอิเล็กตรอนจำนวน 1 mol $= 6.02 \times 10^{23} \times 1.6 \times 10^{-19} = 9.65 \times 10^4 \text{ C}$ สมการ 3.17 นี้ถูกตั้งชื่อตามผู้ค้นพบว่าสมการของเนิร์นสต์ (Nernst Equation)

3.3.4 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ในทางทฤษฎี หากพลังงานอิสระของกิบส์จากปฏิกิริยาทั้งหมดถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าสูงที่สุด

$$\eta_{\max} = \frac{W_{e,\max}}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (3.18)$$

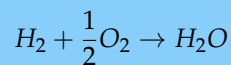
ในทางปฏิบัติแล้ว ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในเซลล์เชื้อเพลิงมักจะมีการสูญเสียความร้อนและพลังงานอื่นๆ ทำให้ศักย์ไฟฟ้าไม่สูงถึง E_g ที่คำนวณได้ด้วยสมการของเนิร์นสต์ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะเหลือ

$$\eta = \frac{W_e}{\Delta H} = \frac{nFV_L}{\Delta H} \quad (3.19)$$

ตัวอย่าง 3.1 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

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

เฉลย 3.1 จากสมการการสันดาปไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิง



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

จากสมการ 3.17 เราสามารถแทนค่าเพื่อหาศักย์ไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E_g = \frac{W_e}{-nF} = -\frac{\Delta G_0}{nF} + \frac{R_u T}{nF} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}$$

จะสามารถแทนค่าได้โดยอ้างอิงปริมาณต่อ 1 mol H_2O ว่า

$$\begin{aligned}
 E_g &= -\frac{-241(10^3) - 0 - (0.5)0}{2 \times 9.65 \times 10^4} + \frac{8.314(473)}{2 \times 9.65 \times 10^4} \ln \frac{5^1 0.21^{0.5}}{1^1} \\
 &= \frac{231 \times 10^3}{2 \times 9.65 \times 10^4} \\
 &= 1.197 \text{ V}
 \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการ 3.18 ว่า

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\Delta G}{\Delta H} \\
 &= \frac{-231 \times 10^3}{-286 \times 10^3} \\
 &= 80.8\%
 \end{aligned}$$

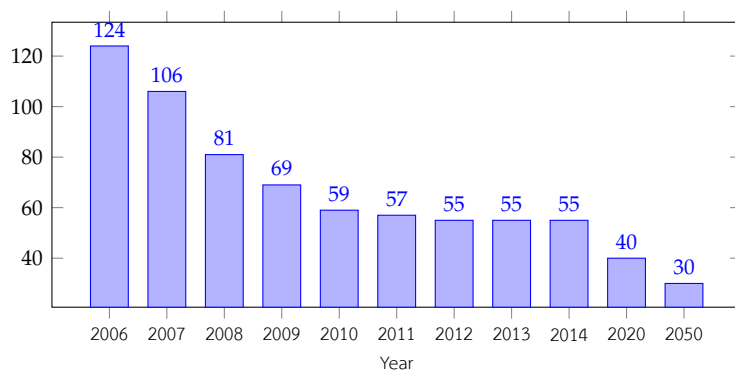
3.4 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

3.4.1 Proton Exchange Membrane (PEM)

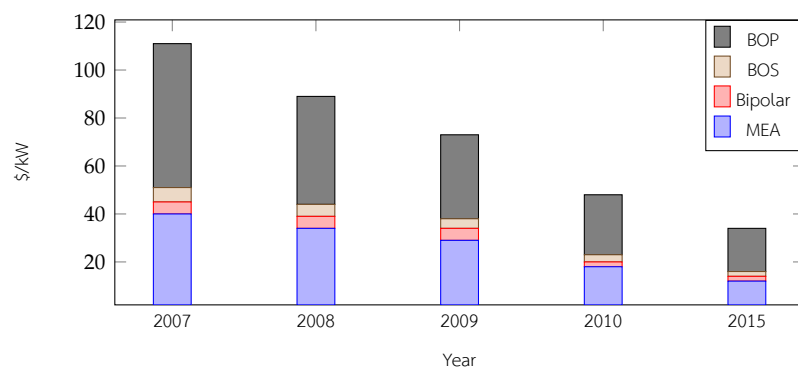
3.4.2 Direct Methanol

3.4.3 Solid Oxide

3.5 การวิเคราะห์ต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 3.1: Historical and projected transportation fuel cell system cost



รูปที่ 3.2: Historical and projected transportation fuel cell system cost

4 พลังงานลม

พลังงานลมนับเป็นอีกพลังงานหนึ่งที่เกิดจากการไหลของอากาศ ดังนั้นการแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าจึงเป็นการแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้เราจะกล่าวถึงหลักการ วิธี และประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานลมด้วยเทคโนโลยีปัจจุบัน รวมถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ในการผลิตไฟฟ้าจากระดับเล็กไปจนถึงระดับใหญ่

4.1 หลักการแปลงพลังงานลม

พลังงานลม เป็นพลังงานจลน์ที่มีส่วนประกอบมาจากมวลของอากาศและความเร็วลม ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว คำจำกัดความของพลังงานจลน์คือ

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

แต่เนื่องจากลมมีการเคลื่อนที่ต่อเนื่อง จึงสะดวกกว่าที่จะอธิบายถึงพลังงานลมในรูปของกำลังลมแทนโดยใช้อัตราการไหลของมวลแทน

$$\frac{dE}{dt} = P_w = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.1)$$

หากเราสมมติว่าลมมีความเร็วคงที่ จะสามารถคำนวณอัตราการไหลของมวลได้ว่า

$$\dot{m} = \rho Av \quad (4.2)$$

เมื่อแทนสมการ 4.2 ลงในสมการ 4.1 จะได้สมการแสดงกำลังของลมที่ความเร็ว v

$$P_w = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (4.3)$$

ถ้ามีการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อดักและแปลงกำลังลมนี้เป็นกำลังไฟฟ้า ความเร็วลมขาออก v_o ต้องน้อยกว่าความเร็วลมขาเข้า v_i ดังนั้นความเร็วลมและอัตราการไหลของมวลผ่านอุปกรณ์เฉลี่ยคือ

$$v_{avg} = \frac{v_i + v_o}{2} \quad (4.4)$$

$$\dot{m} = \frac{\rho A}{2} (v_i + v_o) \quad (4.5)$$

ดังนั้น ในทางทฤษฎีแล้วกำลังที่อุปกรณ์ดึงมาจากลมได้เท่ากับผลต่างของกำลังลมขาเข้ากับขาออก

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

ซึ่งเราสามารถใช้แคลคูลัสหาความเร็วลมขาออกซึ่งทำให้อุปกรณ์สามารถผลิตกำลังได้สูงสุด โดยการหาอนุพันธ์ของสมการกำลังแล้วตั้งให้เท่ากับศูนย์เพื่อแก้สมการ

$$\begin{aligned} \frac{dP_{turbine}}{dk} &= 0 = \frac{d}{dk} \left[\frac{\rho A v_i^3}{4} (1+k) (1-k^2) \right] \\ 0 &= \frac{d}{dk} [1+k-k^2-k^3] \\ 0 &= 1-2k-3k^2 \\ k &= \frac{1}{3}, -1 \end{aligned} \quad (4.6)$$

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 จำกัดของเบ็ตซ์ (Betz limit) อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์แบบนี้ไม่ได้มีการคำนึงถึงลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของอุปกรณ์ว่ามีผลต่อการไหลของอากาศอย่างไร

4.2 อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม

อันที่จริงแล้ว การจะวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของกังหันนั้น จำเป็นจะต้องพิจารณาการไหลของอากาศในขณะที่กังหันหมุนเพื่อพิจารณาแรงที่อากาศกระทำและกำลังที่เกิดขึ้น ซึ่งเราจะใช้หลักการอากาศพลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลม

หากพิจารณาหลักการทางอากาศพลศาสตร์ กังหันลมที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทขึ้นอยู่กับแรงซึ่งขับเคลื่อนใบพัดในกังหัน

1. กังหันลมแรงต้าน
2. กังหันลมแรงยก

ย้อนหลังไปถึงหลักอากาศพลศาสตร์ วัตถุใดๆที่ถูกลมกระทบจะเกิดแรงต้านและแรงยกขึ้น ซึ่งแรงทั้งสองสามารถเขียนเป็นสมการได้โดย

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho A v^2 \quad (4.7)$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho A v^2 \quad (4.8)$$

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

$$P_{turbine} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{u} \quad (4.9)$$

ในกรณีของกังหันแบบแรงต้าน ทิศทางการไหลของลมจะไปในทิศทางเดียวกับแรงต้านเสมอ ดังนั้นสมการกำลังที่ผลิตได้จะมาจาก

$$\begin{aligned} P &= \mathbf{D} \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{2} \rho A (v - u)^2 u \\ P &= \frac{1}{2} \rho A C_D (uv^2 - 2vu^2 + u^3) \\ C_P &= C_D (\lambda - 2\lambda^2 + \lambda^3) \end{aligned} \quad (4.10)$$

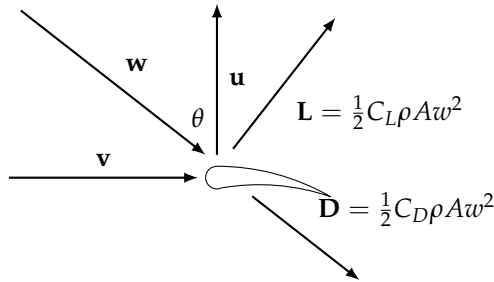
โดยที่ $\lambda = v/u$ เป็นอัตราส่วนของความเร็วลมต่อความเร็วกังหัน จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ผลิตได้ C_P มีค่ามากที่สุดเมื่อ $\lambda = 1/3$ เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้ว่า

$$C_{P\max} = \frac{4}{27} C_D \quad (4.11)$$

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

ในกรณีของกังหันลมแรงยก ทิศทางการไหลของลมนั้นจะตั้งฉากกับความเร็วของใบพัดเสมอ ซึ่ง

ทำให้ไม่มีข้อจำกัดเรื่องความเร็วกังหันที่เร็วกว่าลม โดยที่รูปแสดงทิศทางของความเร็วและแรงที่เกิดขึ้นบนกังหันลมแรงยกสามารถแสดงได้ดังรูป

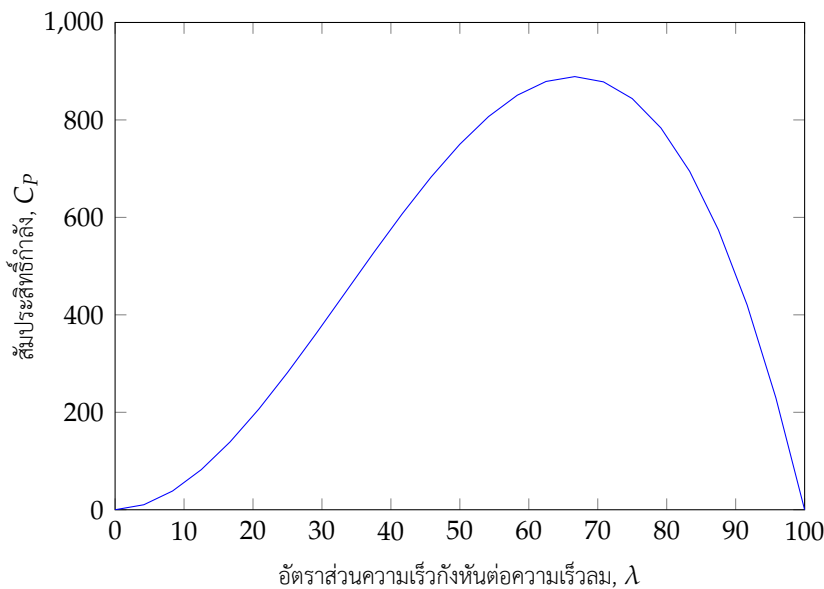


รูปที่ 4.1: ทิศทางของความเร็วและแรงที่เกิดขึ้นบนกังหันลมแรงยก จะสังเกตได้ว่าในกรณีนี้ ความเร็วสัมพัทธ์ของลมเมื่อเทียบกับกังหันมีค่าเท่ากับ $w = \sqrt{u^2 + v^2}$

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

$$\begin{aligned}
 P &= (\mathbf{L} + \mathbf{D}) \cdot \mathbf{u} \\
 P &= \frac{1}{2} \rho A w^2 \left(C_L \frac{v}{w} u - C_D \frac{u}{w} u \right) \\
 P &= \frac{1}{2} \rho A \sqrt{u^2 + v^2} \left(C_L u v - C_D u^2 \right) \\
 C_P &= C_L \sqrt{1 + \lambda^2} \left(\lambda - \gamma \lambda^2 \right)
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

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



รูปที่ 4.2: ประสิทธิภาพของกังหันลมแรงยกที่อัตราส่วนความเร็วต่างๆ จะเห็นได้ว่าค่า λ ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ราว 67 ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่สูงถึง 889!

จะเห็นว่ากังหันลมแบบแรงยกนั้นมีประสิทธิภาพต่อพื้นที่ใบพัดสูงกว่ากังหันแบบแรงดันหลายเท่าตัว จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าพลังงานลมอย่างแพร่หลาย

4.3 การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

นอกจากเรื่องของ การเลือกกังหันตามหลักการทำงานแล้ว ยังมีคุณลักษณะอื่นๆที่ผู้ใช้สามารถเลือกออกแบบกังหันลมได้ เช่น

4.3.1 แนวแกนกังหัน

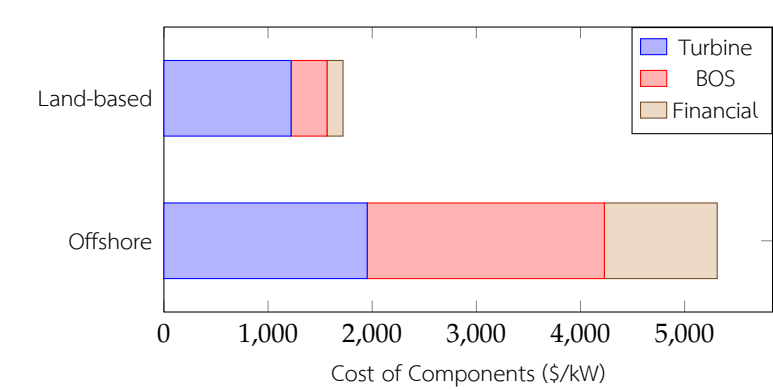
กังหันลมผลิตไฟฟ้ามีทั้งแบบที่มีแกนหมุนตามแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งแต่ละแบบมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบอยู่ดังนี้

- 1. ค่าติดตั้งและซ่อมแซม กังหันแบบตั้งสามารถรับลมได้จากทุกทิศทาง และสามารถติดตั้งอุปกรณ์ปั่นไฟฟ้าไว้ใกล้กับพื้นได้ จึงสะดวกต่อการติดตั้งและซ่อมแซม ในขณะที่กังหันแบบแกนแนวนอนจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ทุกอย่างในแนวนอนเดียวกับกังหัน จึงมีค่าใช้จ่ายส่วนนี้ที่สูงกว่า
- 2. ประสิทธิภาพ เมื่อติดตั้งที่ความสูงที่สมควรและหันหน้าเข้าหาทิศทางลมแล้ว กังหันแบบแนวนอนจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า

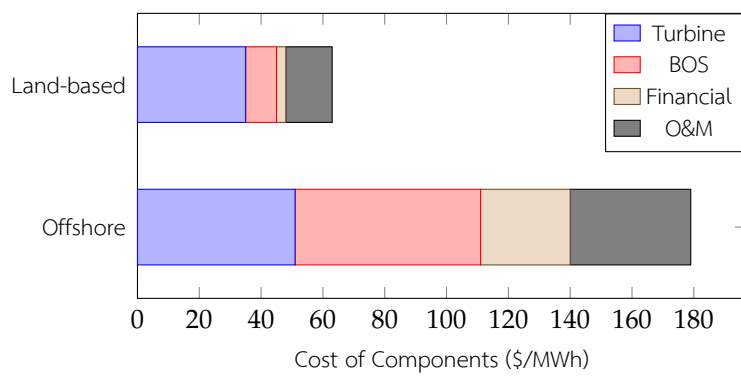
4.3.2 วัสดุผลิตกังหัน

เนื่องจากกังหันต้องได้มีการหมุนอยู่ตลอดเวลา ภาระที่สำคัญที่ใบพัดจะได้รับคือแรงสู่ศูนย์กลาง ซึ่งขึ้นอยู่กับมวล ดังนั้นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับวัสดุที่จะนำมาใช้ออกแบบกังหันคือจะต้องมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อมวลสูง (high strength-to-mass ratio) ในอดีตวัสดุที่ใช้ในการผลิตกังหันลมได้แก่ ไม้เนื้อแข็ง (แข็งแรง น้ำหนักเบา แต่ไม่ทนทานต่อความชื้น)และโลหะเบาอย่างอลูมิเนียม (แข็งแรง เบา ขึ้นรูปง่าย แต่ไม่ทนทานต่อการล้า) ในปัจจุบันวัสดุที่ตอบโจทย์นี้ได้เป็นอย่างดีคือคาร์บอนไฟเบอร์เคลือบโพลีเมอร์ (CFRP) ซึ่งมีน้ำหนักเบาและความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปเป็นรูปทรงที่ซับซ้อนได้ง่ายและมีความทนทานต่อการล้าได้ดี

4.4 ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าพลังงานลม



รูปที่ 4.3: Historical and projected transportation fuel cell system cost



รูปที่ 4.4: แผนภูมิเปรียบเทียบต้นทุนตลอดการใช้งานของโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานลมแบบบนพื้นดินกับแบบนอกชายฝั่ง

5 พลังงานชีวภาพ

5.1 วัตถุดิบ (Feedstock)

5.2 เอทานอล

5.3 ไบโอดีเซล

5.4 แก๊สชีวภาพ

6 การกักเก็บพลังงาน (Energy Storage)

ปัญหาหนึ่งของพลังงานแสงอาทิตย์ และ พลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม หรือ พลังงานคลื่น คือ ความไม่แน่นอนและไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งเป็นเกณฑ์วัดสำคัญของการสามารถพึ่งพาแหล่งพลังงานชนิดหนึ่งๆได้ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของโรงไฟฟ้าพลังน้ำแก๊สธรรมชาติ สามารถเปิด-ปิดเมื่อใดก็ได้ และสามารถเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตได้ตามอุปสงค์อย่างไม่มีข้อยกเว้นนัก ในทางตรงกันข้าม พลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตต่อเนื่องตลอดเวลาได้เนื่องจากช่วงเวลา กลางวันและกลางคืน นอกจากนี้ยังมีเรื่องของเมฆ ความชื้นในอากาศ ดังนั้น หากต้องการจะสร้าง โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (ไม่ว่าจะเป็นแบบ photovoltaics หรือ solar thermal หรือ แบบ อื่นๆ) จำเป็นจะต้องสร้างเพื่อความไม่แน่นอนเหล่านี้ เช่นถ้ามีความต้องการพลังงานไฟฟ้า 10 MW อาจจะต้องสร้างโรงไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ 20 MW แล้วมีการกักเก็บส่วนที่เกินความต้องการไว้ใช้ในยามที่ไม่มีแสงอาทิตย์หรือพลังงานไม่เพียงพอต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิต

ดังนั้น การจะลดผลกระทบจากความผันผวนและเพิ่มความสามารถในการควบคุมแหล่งพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งพลังงานทดแทนเช่นพลังงานแสงอาทิตย์ จำเป็นที่จะต้องมีการมีอุปกรณ์กับเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพเพื่อเก็บพลังงานส่วนเกินไว้ แล้วสามารถดึงพลังงานที่เก็บไว้มาใช้ในช่วงที่มีความต้องการได้โดยไม่ต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานโดยตรง

วิธีการกับเก็บพลังงานจากแสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทก็มีจุดเด่นและจุดด้อยต่างกันไป พลังงานที่ไร้สมอว่าไม่มีเทคโนโลยีใดที่จะเหมาะสมและดีกว่าเทคโนโลยีอื่นในทุกสถานการณ์ เราจึงควรทำความเข้าใจประเด็นต่างๆที่สำคัญเหล่านี้ไว้ เพื่อจะได้นำเทคโนโลยีเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์ต่างๆได้อย่างเหมาะสม

6.1 บ่อกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Ponds)

ปอกก็เก็บพลังงานแสงอาทิตย์ในที่นี้หมายถึงปอกกับเก็บของเหลวซึ่งสามารถกับเก็บความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ ในปัจจุบันปอกก็เก็บพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนมากใช้สารละลายเกลือคลอไรด์หรือซัลเฟตในน้ำ หลักการทำงานของปอดดังกล่าวคือการแบ่งชั้นของสารละลายตามความความเข้มข้น โดยสารละลายที่มีความเข้มข้นมากจะตกอยู่ที่ชั้นล่างเนื่องจากมีความหนาแน่นสูง และสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยจะลอยอยู่ด้านบนเนื่องจากมีความหนาแน่นน้อย ซึ่งการแบ่งชั้นนี้จะป้องกันการหมุนเวียนของสารละลายเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งในปอน้ำปกติเมื่อได้รับความร้อน จะมีการหมุนเวียนขึ้นเนื่องจากน้ำที่ร้อนกว่าจะมีการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นลดลงและลอยขึ้นสู่ด้านบน แต่ในปอน้ำที่มีการแบ่งชั้นของสารละลายนี้ จะไม่มีการหมุนเวียนของสารละลาย ทำให้สามารถกักเก็บความร้อนไว้ได้

กระบวนการสร้างบ่อกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์มีอยู่ 2 วิธี

6.1.1 บ่อกักเก็บแบบประดิษฐ์

บ่อกักเก็บพลังงานแบบนี้สร้างโดยการเติมสารละลายที่มีความเข้มข้นจากสูงลงไปสู่ชั้นล่างแล้วลดลงต่ำลงเมื่อเพิ่มระดับน้ำขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อเต็มเสร็จ บ่อก็จะสามารถกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ไว้ได้

6.1.2 บ่อกักเก็บแบบเกิดเอง

บ่อประเภทนี้อาศัยหลักการของการละลายอิมตัวของเกลือในน้ำที่อุณหภูมิต่างกัน โดยที่ความสามารถในการละลายแปรผันตรงกับอุณหภูมิของตัวทำละลาย ซึ่งเกลือที่จะนำมาใช้ในบ่อประเภทนี้ จำเป็นจะต้องมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายต่ออุณหภูมิสูง เพื่อที่จะได้สามารถสร้าง gradient ของความเค็มต่อความลึกได้สูง และมีความสามารถในการเก็บความร้อนได้ดี

6.2 แบตเตอรี่

6.3 ล้อตุนกำลัง (Flywheel)

ภาค II

เศรษฐศาสตร์พลังงาน

7 การวิเคราะห์ต้นทุน

เคยสงสัยกันบ้างไหมว่า เวลาที่การไฟฟ้าเก็บค่าไฟเราหน่วยละ 3 บาทกว่าๆนั้น เขาคิดคำนวณกันมาอย่างไร มีหลักฐานอ้างอิงหรือข้อมูลอะไรมาช่วยสนับสนุนนี้ไหม หรือว่าแค่นั่งเทียนกำหนดเลขกลมๆขึ้นมา จริงๆแล้วก็คงไม่ใช่อย่างนั้น และแน่นอนว่าค่าไฟที่เก็บนั้นก็คงไม่ได้เท่าทุนพอดี คงจะต้องมีส่วนบวกเพื่อให้เป็นกำไรไว้ไม่มากก็น้อยเป็นแน่

ในบทนี้ เราจะมาพูดถึงการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลังงานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างการผลิตไฟฟ้าปัจจุบัน (พ.ศ. 2560) โดยส่วนมากยังพึ่งพาเชื้อเพลิงปิโตรเลียมอยู่กับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนซึ่งเราได้กล่าวถึงเทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่ต้องใช้ไปในส่วนที่ 1

หลายครั้งที่วิศวกรโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานศึกษา (ตัวผมเองก็ด้วย) คิดวิเคราะห์ปัญหาทางพลังงานที่มีอยู่ในปัจจุบันโดยยังไม่ได้พิจารณาเรื่องของความเหมาะสมของเทคโนโลยีทางเศรษฐศาสตร์ หรือที่เรียกว่า เทคโนโลยีนั้นมันแพงเกินไปหรือเปล่า การจะพิจารณาความเป็นไปได้ที่จะนำเทคโนโลยีพลังงานหนึ่งๆมาใช้ แม้ว่าจะมีความล้าสมัย สะอาด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพียงใด หากมีราคาแพงกว่าของเดิมที่ใช้อยู่ปัจจุบัน ก็คงยากที่จะโน้มน้าวให้ประชาชนส่วนมากเห็นดีเห็นงามไปด้วย ไม่ใช่ว่าพวกเขาไม่ได้รับรักโลก หรือไม่ห่วงเรื่องสิ่งแวดล้อม แต่ว่าการจะบอกว่าได้โปรดใช้ของที่แพงขึ้นหน่อยเพื่อให้โลกสะอาดขึ้นก็ฟังดูเป็นข้ออ้างที่อาจจะดูหลกลอยไปสักหน่อย วิธีง่ายที่สุดที่จะชวนให้ประชาชนทั่วไปหันมาสนใจการใช้พลังงานทดแทนอย่างจริงจังก็คือต้องบอกว่าของใหม่นั้นถูกกว่า

ดังนั้น เพื่อจะแน่ใจว่าเทคโนโลยีพลังงานทดแทนของเรานั้นถูกกว่าไฟฟ้าที่ผลิตอยู่ปัจจุบัน เราจำเป็นต้องทำความเข้าใจกันว่าโครงสร้างต้นทุนการผลิตไฟฟ้า หรือพลังงานอื่นๆที่ใช้ในครัวเรือนปัจจุบันนั้นเป็นอย่างไร

7.1 โครงสร้างต้นทุน

ศาสตร์เรื่องการวิเคราะห์โครงสร้างต้นทุนนั้นมีมานานโขอยู่ เริ่มจากปี ... ซึ่งพลังงานก็นับเป็นผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งซึ่งใช้สามารถจะวิเคราะห์ต้นทุนได้ การแบ่งประเภทต้นทุนนั้นสามารถทำได้อยู่หลายวิธี แล้วแต่จุดประสงค์และการนำไปใช้ประโยชน์ อย่างไรก็ตามในหนังสือเล่มนี้เราต้องการศึกษาประเภทของต้นทุนเพื่อทำความเข้าใจแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆที่เปลี่ยนไป จึงได้เลือกใช้วิธีการจำแนกต้นทุนตามความสัมพันธ์กับระดับของกิจกรรม ซึ่งสามารถสะท้อนความเปลี่ยนแปลงอันขึ้นอยู่กับการผลิต โดยโครงสร้างต้นทุนแบบนี้สามารถแบ่งออกเป็นประเภทดังนี้

1. ต้นทุนคงที่ (Fixed Costs)

เป็นต้นทุนส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงระดับการผลิตหนึ่ง ซึ่งทำให้ต้นทุนต่อหน่วยลด

ลงเมื่อเพิ่มปริมาณการผลิตมากขึ้น

2. ต้นทุนผันแปร (Variable Costs)

เป็นต้นทุนส่วนที่ต้นทุนรวมมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับปริมาณการผลิต ในขณะที่ต้นทุนต่อหน่วยยังคงที่

3. ต้นทุนผสม (Mixed Costs)

เป็นต้นทุนที่มีลักษณะของทั้งต้นทุนคงที่และผันแปรผสมกัน สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท

- ต้นทุนกึ่งผันแปร (semi variable cost) เป็นต้นทุนที่จะมีส่วนหนึ่งคงที่ทุกระดับกิจกรรม และมีส่วนที่ผันแปรไปกับระดับกิจกรรม เช่น ค่าโทรศัพท์ เป็นต้น บางครั้งก็เป็นการยากที่จะประเมินส่วนที่คงที่หรือแปรผันของส่วนนี้
- ต้นทุนเชิงขั้น (step cost) หรือต้นทุนกึ่งคงที่ (semi fixed cost) หมายถึงต้นทุนที่คงที่ในช่วงระดับกิจกรรมหนึ่ง และเปลี่ยนไปคงที่ในอีกระดับกิจกรรมหนึ่ง เช่น ค่าผู้ควบคุมงานเงินเดือน

7.2 มูลค่าเงินตามเวลา (Time Value of Money)

แนวคิดเรื่องมูลค่าเงินตามเวลานั้นว่าด้วยมูลค่าของเงินที่เปลี่ยนแปลงไป ขึ้นอยู่กับเวลาที่เรารับหรือจ่ายเงินนั้นออกไป ฟังดูอาจจะแปลกๆอยู่สักหน่อย 100 บาทวันนี้ พรุ่งนี้ก็อีก 100 บาท อยู่มิใช่หรือ แต่หากเริ่มเพิ่มเวลาเข้าไปเป็น 1 เดือน 1 ปี 10 ปี เงินนี้ก็อาจจะไม่เหมือนเดิมแล้ว พิจารณาได้อย่างง่ายด้วยคำถามนี้ หากมีคนสัญญาว่าจะให้เงินเรา 100 บาทตอนนี้เลยหรือ 100 บาทในอีก 10 ปีข้างหน้า ทุกคนคงตอบพร้อมเป็นเสียงเดียวกันว่า ขอเงิน 100 บาทตอนนี้เลยก็แล้วกัน นั่นเป็นเพราะว่าเงิน 100 บาทตอนนี้มีมูลค่ามากกว่าเงิน 100 บาทในอีก 10 ปีข้างหน้า

7.3 ต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (Levelized Cost of Energy - LCOE)

ในมุมมองของหน่วยงานควบคุมราคาหรือผู้บริโภค ความสามารถในการทำกำไรหรืออัตราผลตอบแทนของโครงการโรงงานผลิตไฟฟ้าหนึ่งมักจะไม่ใช่สิ่งแรกที่น่าสนใจ ราคาต่อหน่วยพลังงานที่ผู้บริโภคจะต้องจ่ายเป็นตัววัดที่สามารถนำมาช่วยพิจารณาความเหมาะสมของการเลือกใช้พลังงานทางเลือกเพื่อผลิตไฟฟ้า

$$LCOE = \frac{\text{ผลรวมของต้นทุนที่พิจารณามูลค่าเงินตามเวลา}}{\text{ผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้}} \quad (7.1)$$

$$= \frac{\sum \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum E_t} \quad (7.2)$$

$$= \frac{\text{มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุน}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมด}} \quad (7.3)$$

7.4 อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return - IRR)

7.5 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value - NPV)

ภาค III

ศักยภาพของพลังงานทดแทนใน
ประเทศไทย

8 การพัฒนาอย่างยั่งยืน