



มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

พลังงานงานทดแทนในประเทศไทย

สัปปีนนท์ เอกอำพน

คำนำ

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

ผู้เขียนหวังว่าข้อมูลที่ได้รับการรวบรวมไว้ในตำราเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านในวงกว้าง มิใช่เฉพาะระดับนักศึกษาหรือนักวิชาการเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถ้าหากผู้อ่านมีความรู้พื้นฐานทางด้านฟิสิกส์พื้นฐาน จะทำให้สามารถเข้าใจเนื้อหาและบทวิเคราะห์ได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงสามารถนำความรู้ที่ได้รับนำไปวิเคราะห์ข้อมูลอื่นๆได้ด้วยตนเอง

สัปปินันท์ เอกอำพน

สารบัญ

สารบัญรูป

สารบัญตาราง

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 แต่ความเข้าใจเรื่องของการแผ่รังสีนี้ก็สมารถนำมาใช้ทำความเข้าใจส่วนประกอบของแสงอาทิตย์ได้

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

ดวงอาทิตย์ซึ่งมีอุณหภูมิที่ผิวประมาณ 5800 K นั้น มีการแผ่รังสีออกมาที่สุดในช่วงคลื่นแสงและอินฟราเรด 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

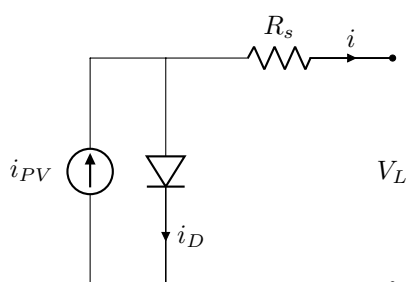
เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell หรือ Photovoltaic cell) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงโดยใช้ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นจากการเคลื่อนไหวของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้ดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

จริงๆแล้วปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุอื่นๆนอกจากเซลล์สุริยะด้วย แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ไม่มีทิศทางหรือแนวโน้มใดๆ จึงทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น จำเป็นจะต้องมีวิธีบังคับการไหลของอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดกระแสได้ นั่นเป็นสาเหตุที่เซลล์สุริยะจำเป็นต้องมีการออกแบบวงจรพิเศษ

1.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ในเซลล์สุริยะนั้น 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 ซึ่งระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรเทียบเท่าได้โดยไดโอดและความต้านทานภายในดังรูป ??



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 ?? ลงในสมการ ?? 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

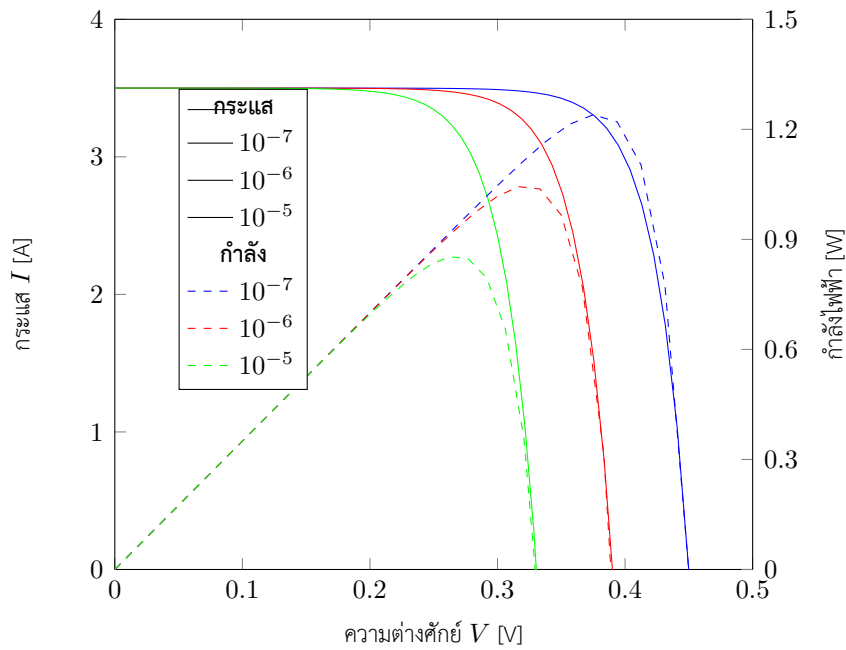
$$\begin{aligned} P_{out} &= iV \\ \frac{dP_{out}}{dV} &= 0 \\ \exp\left(\frac{eV_{\max P}}{kT}\right) &= \frac{1 + \frac{i_{PV}}{i_0}}{1 + \frac{eV_{\max P}}{kT}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

สังเกตว่าสมการนี้มีค่า $V_{\max P}$ อยู่ทั้งสองด้าน ไม่สามารถแก้สมการเชิงวิเคราะห์ได้ จำเป็นต้องแก้สมการเชิงตัวเลข

ประสิทธิภาพสูงสุดของแผงเซลล์สุริยะเกิดในตอนที่แผงผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

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

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



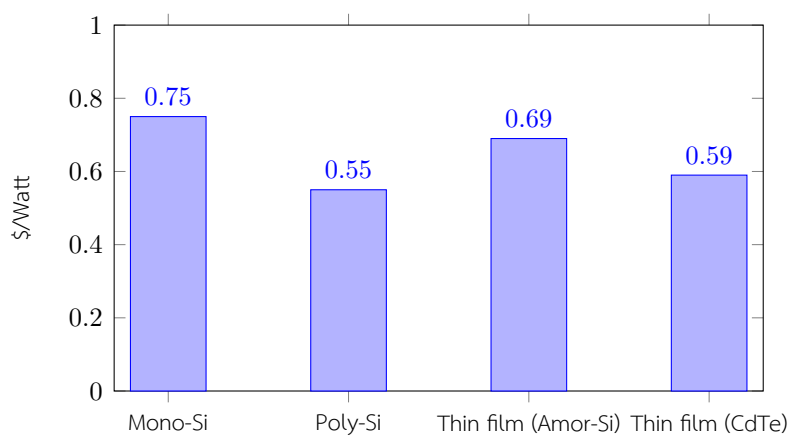
รูปที่ 1.2: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากในเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 25°C

ตัวอย่าง 1.1 คำนวณประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์นี้

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

เฉลย 1.1

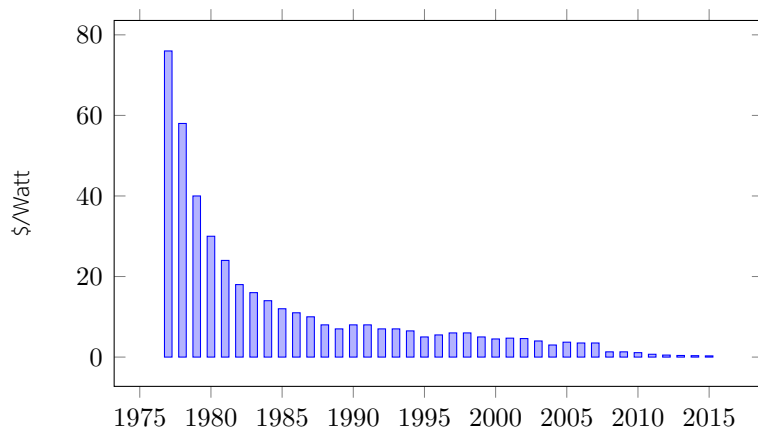
1.5 ต้นทุนของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์



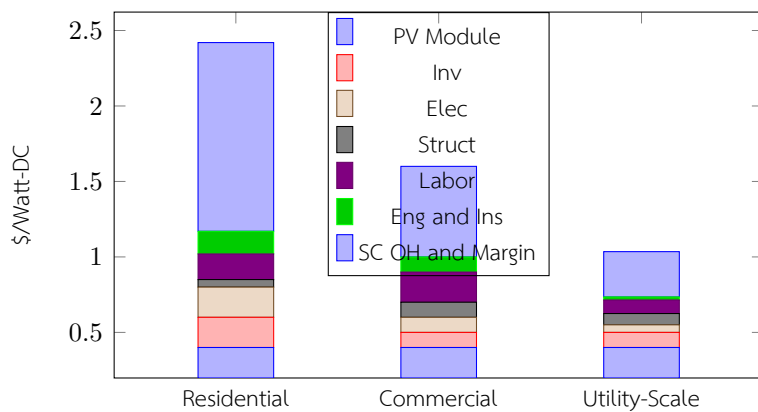
รูปที่ 1.3: เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภท

ตัวอย่าง 1.2 การคำนวณต้นทุนไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดอายุโครงการของการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบคงที่ แบบติดตาม 1 แกน และแบบติดตาม 2 แกน

พิจารณาค่า LCOE โดยมีข้อมูลดังนี้



รูปที่ 1.4: ประวัติต้นทุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อวัตต์จากปี 1975 - 2015



รูปที่ 1.5: แผนภูมิแจกแจงต้นทุนของการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในปี 2559

- 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

1.6 พลังงานความร้อนแสงอาทิตย์

1.6.1 การรับความร้อนโดยตรง

1.6.2 การรับความร้อนแบบรวมแสง

1.7 คุณสมบัติของตัวรับแสง

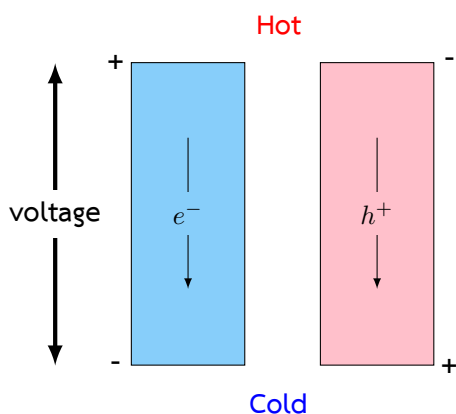
1.8 เทคโนโลยีนำความร้อนไปใช้ต่อ

2 เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectricity)

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

2.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

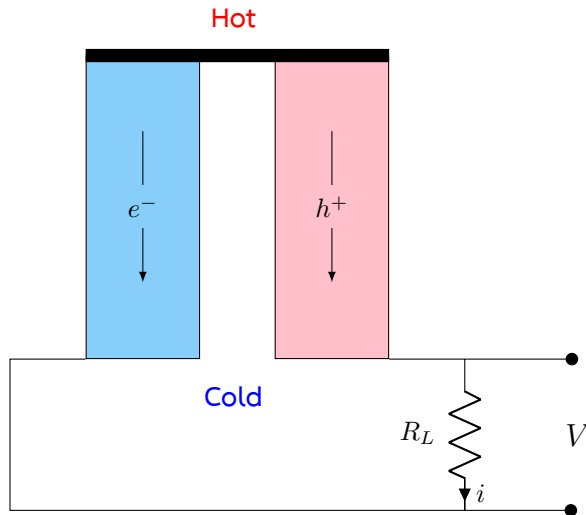
เทอร์โมอิเล็กทริกคือการเกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นบนตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนไป โดยมีหลักการมาจากการแพร่ (diffusion) ของพาหะของประจุ (charge carrier) ในสารเมื่อได้รับความร้อน โดยในสารตัวนำและกึ่งตัวนำทั่วไปจะมีทั้งอิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) ซึ่งมีประจุลบ และหลุม (holes) ซึ่งมีประจุบวก เมื่อวัสดุได้รับความร้อน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



รูปที่ 2.1: หลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

เมื่อนำไปต่อกับภาระภายนอกจะทำให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นได้

สารทุกชนิดมีความสามารถในการสร้างศักย์ไฟฟ้าจากการแพร่ของพาหะประจุที่ต่างกัน โดยค่าความสามารถนี้เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) ซึ่งอธิบายความสามารถ



รูปที่ 2.2: การเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากอุณหภูมิที่แตกต่างได้ดังนี้

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

ซึ่งหากเราสมมติว่าค่าสัมประสิทธิ์นี้เป็นอิสระจากอุณหภูมิ จะสามารถเขียนสมการ ?? ใหม่ได้ว่า

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

โดยค่าสัมประสิทธิ์สำหรับวัสดุทั่วไปที่มีสมบัติเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้มีดังนี้

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

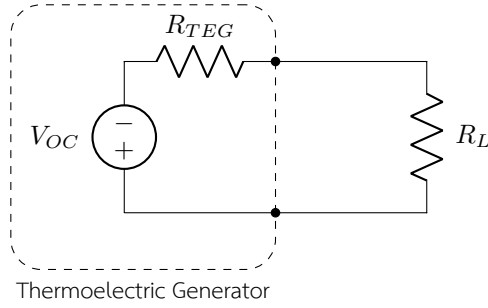
ตารางที่ 2.1: ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กของวัสดุต่างๆที่ 25 C

อย่างไรก็ดี ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกจากวัสดุหนึ่งๆนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กเพียงอย่างเดียว เนื่องจากลักษณะการทำงานและการต่อเชื่อมของเทอร์โมอิเล็กทริกกับวงจรไฟฟ้านั้นเป็นเหมือนแบตเตอรี่ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนอธิบายเป็นวงจรได้ดังนี้

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

$$V_L = S_{pn} \Delta T - i R_{int} \quad (2.3)$$

$$R_{int} = R_p + R_n \quad (2.4)$$



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 เพื่อให้มีการสูญเสียไปกับความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกให้น้อยที่สุด ซึ่งความต้านทานภาระที่เหมาะสมนี้สามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

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

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

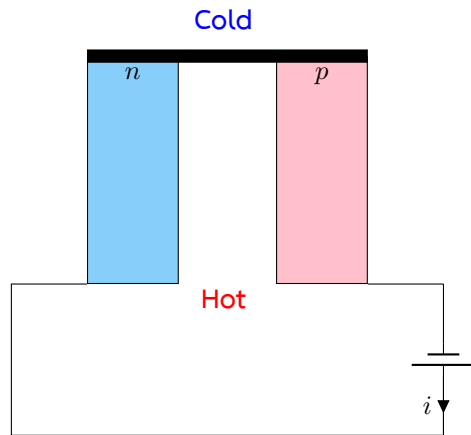
$$i = \frac{V}{R} = \frac{mS_{pn}\Delta T}{mR_{int} + R_L} \quad (2.11)$$

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

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 จึงทำให้มีอัตราการสึกหรอน้อยกว่าระบบทำความเย็นแบบใช้สารทำความเย็นทั่วไป 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

ในกรณีที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J ไหลผ่านตัวนำที่มีค่าสัมประสิทธิ์ทอมสัน K อัตราการเกิดความร้อนจะมีค่าเท่ากับ

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

สังเกตว่าในสมการนี้ กำลังความร้อนที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น W/m^3 เนื่องจากคุณสมบัติของตัวนำไม่สม่ำเสมอ กำลังความร้อนจึงไม่คงที่และต้องอาศัยการอินทิเกรตเพื่อหาค่าบนพื้นที่หรือปริมาตร

2.4 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก

ในระหว่างการทำงานจริงมักมีปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสองอย่างขึ้นไปเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ต่างๆและผลที่เกิดขึ้นกับเทอร์โมอิเล็กทริก อย่างไรก็ตามในตำราเล่มนี้ 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

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

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

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ผ่านตัวต้านทานเท่ากับ

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

ซึ่งเราสามารถเอามาเขียนเป็นสมการประสิทธิภาพความร้อนของ TEG เท่ากับ

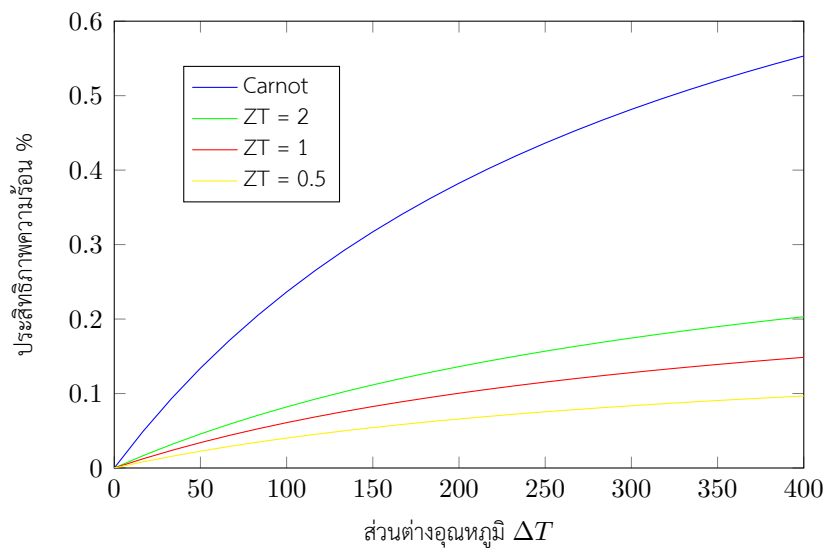
$$\eta = \frac{P_{out}}{Q_{in}} = \frac{i^2 R_L}{m S_{pn} T_H i + K \Delta T - \frac{i^2 R_{teg}}{2}} \quad (2.15)$$

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

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

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

2.5 ต้นทุนของพลังงานจากเทอร์โมอิเล็กทริก

ต้นทุนวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิเล็กทริกในปัจจุบัน

Material Family	Max ZT	Temp (°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 2.1 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยอุณหภูมิขนาดกลาง

กรณีเปรียบเทียบ 3 แบบ: น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม หรือ ชื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้า

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

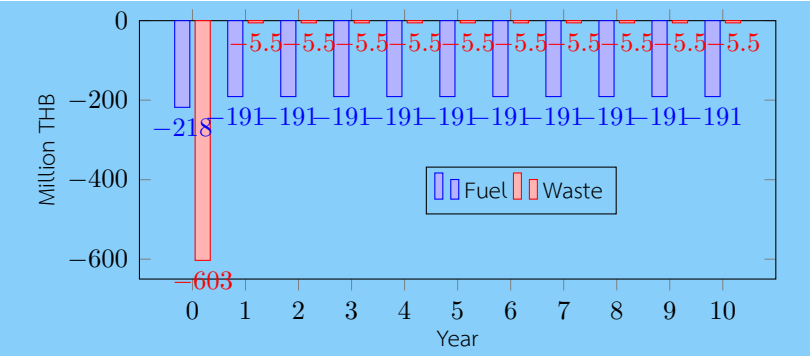
1. การผลิตไฟฟ้าขนาด 1 MW โดยสิ่งก่อสร้างและอุปกรณ์ทั้งหมดมีอายุการใช้งาน 10 ปี
2. ต้นทุนคงที่จากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก อินเวอร์เตอร์ ค่าที่ดิน และค่าติดตั้ง
3. ต้นทุนแปรผันนับจากค่าซ่อมแซมและค่าเชื้อเพลิง(ถ้ามี)
4. ค่าอินเวอร์เตอร์ 22 บาทต่อวัตต์ ค่าเทอร์โมอิเล็กทริกอุณหภูมิสูง 175 บาทต่อวัตต์ ค่าเทอร์โมอิเล็กทริกอุณหภูมิกกลาง 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 หมายความว่าโครงการทั้งสองยังมีผลตอบแทนที่ยังไม่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับใช้กระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้า

3 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells)

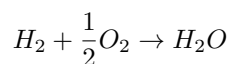
เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งแตกต่างจากการใช้เครื่องย่นไฟในการปั่นไฟซึ่งเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกลแล้วจึงเป็นพลังงานไฟฟ้าในที่สุด เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเพียงขั้นตอนเดียว และยังมีขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน จึงทำให้สามารถทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีในรูปแบบอื่น

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

3.1 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง

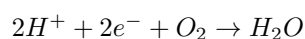
3.2 ปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง

อันที่จริงแล้ว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงก็คือปฏิกิริยาการสันดาป แต่เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์เคมีไฟฟ้า เราจึงควรทำความเข้าใจกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่มีการแลกเปลี่ยนระหว่างการเกิดปฏิกิริยาขึ้น ยกตัวอย่างเช่น

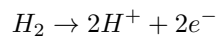


ในปฏิกิริยานี้ มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจน โดยที่ไฮโดรเจนเป็นผู้ให้ ส่วนออกซิเจนเป็นผู้รับ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน เรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ซึ่งมาจากการรวมกันของปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) และออกซิเดชัน (oxidation reaction) ซึ่งปฏิกิริยาข้างต้นสามารถแบ่งออกเป็นปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชั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

ปฏิกิริยารีดักชัน



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



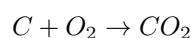
ในปฏิกิริยารีดักชัน สารจะมีการรับอิเล็กตรอน (จาก H^+ ซึ่งมีเลขประจุเป็น +1 ไปเป็น H_2O ซึ่งไฮโดรเจนมีประจุเป็น 0) ส่วนในปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารจะมีการปล่อยอิเล็กตรอน (จาก H_2 ซึ่งมีประจุเป็น 0 เป็น H^+ ซึ่งมีประจุเป็น +1)

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

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

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) เป็นฟังก์ชันสถานะ (state function) ค่าสัมบูรณ์ของพลังงานอิสระของกิบส์หาได้ยากและไม่ได้มีประโยชน์นัก ส่วนที่มีประโยชน์จริงๆ คือ ผลต่างหรือพลังงานที่เปลี่ยนไประหว่างสารตั้งต้นกับผลิตภัณฑ์ 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 ?? ซึ่งพลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาใดๆ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

จากสมการ ?? 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

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

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

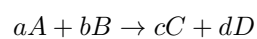
โดยกำหนดให้ G_0 คือพลังงานอิสระของกิบส์อ้างอิงที่อุณหภูมิ 25 C และความดัน 1 บรรยากาศ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการพลังงานอิสระของกิบส์เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันได้ โดย

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

ซึ่งพลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนไปในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถอ้างอิงค่า H_0 และ G_0 ได้จากตาราง ??

3.3.2 พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี

ในปฏิกิริยาเคมี พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนไปเท่ากับส่วนต่างระหว่างพลังงานของผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้น ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของปฏิกิริยา



พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนไปเท่ากับ

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

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

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: ตารางแสดงค่าเอนทาลปีและพลังงานอิสระของกิบส์ที่สถานะอ้างอิง (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 ?? 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 ?? 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

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

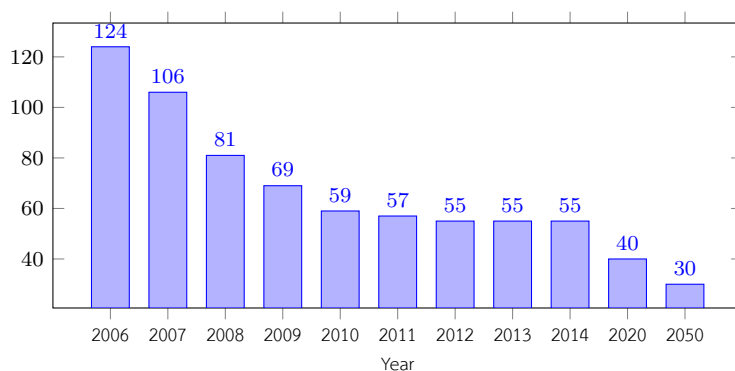
3.4 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

3.4.1 Proton Exchange Membrane (PEM)

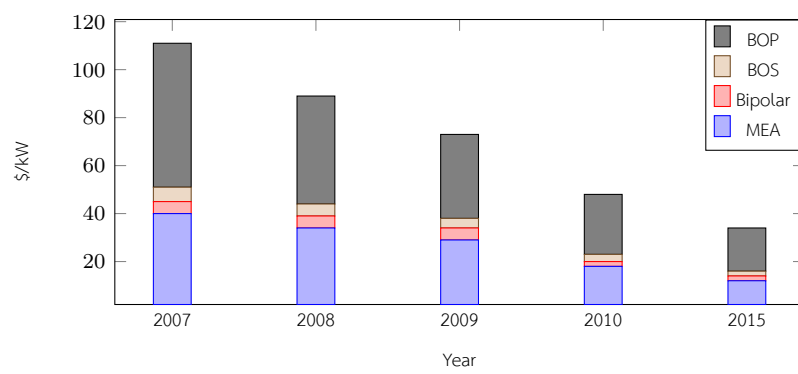
3.4.2 Direct Methanol

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

พลังงานลมเป็นพลังงานจลน์ที่มีส่วนประกอบมาจากมวลของอากาศและความเร็วลม ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว คำจำกัดความของพลังงานจลน์คือ

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

แต่เนื่องจากลมมีการเคลื่อนที่ต่อเนื่อง จึงสะดวกกว่าที่จะอธิบายถึงพลังงานลมในรูปของกำลังลมแทนโดยใช้อัตราการไหลของมวลแทน

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

หากเราสมมติว่าลมมีความเร็วคงที่ จะสามารถคำนวณอัตราการไหลของมวลได้ว่า

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

เมื่อแทนสมการ ?? ลงในสมการ ?? 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) อย่างไรก็ดี การวิเคราะห์แบบนี้ไม่ได้มีการคำนึงถึงลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของอุปกรณ์ว่ามีผลต่อการไหลของอากาศอย่างไร

4.2 อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม

อันที่จริงแล้ว การจะวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของกังหันนั้นจำเป็นจะต้องพิจารณาการไหลของอากาศในขณะที่กังหันหมุนเพื่อพิจารณาแรงที่อากาศกระทำและกำลังที่เกิด

ขึ้น ซึ่งเราจะใช้หลักการอากาศพลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลม

หากพิจารณาหลักการทางอากาศพลศาสตร์ กังหันลมที่มีอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทขึ้นอยู่กับแรงซึ่งขับเคลื่อนใบพัดในกังหัน

1. กังหันลมแรงดัน
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 ในการสร้างกังหันลม จึงสามารถใช้แรงหนึ่งหรือทั้งสองในการขับเคลื่อนและสร้างกำลัง โดยกำลังที่กังหันสามารถดึงออกมาได้ $P_{turbine}$ เท่ากับผลคูณภายในของแรง \vec{F} และความเร็วของใบพัด \vec{u}

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

ในกรณีของกังหันแบบแรงดัน ทิศทางการไหลของลมจะไปในทิศทางเดียวกับแรงต้านเสมอ ดังนั้นสมการกำลังที่ผลิตได้จะมาจาก

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

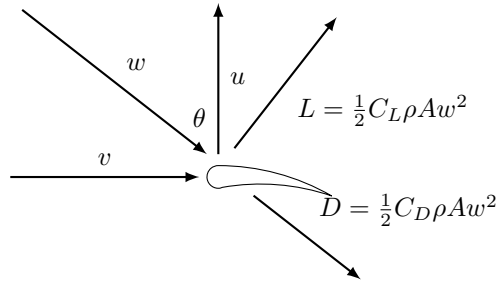
โดยที่ $\lambda = v/u$ เป็นอัตราส่วนของความเร็วลมต่อความเร็วกังหัน จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ผลิตได้ C_P มีค่ามากที่สุดเมื่อ $\lambda = 1/3$ เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้ว่า

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

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

ในกรณีของกังหันลมแรงยก ทิศทางการไหลของลมนั้นจะตั้งฉากกับความเร็วของใบพัดเสมอ ซึ่งทำให้ไม่มีข้อจำกัดเรื่องของความเร็วกังหันที่เร็วกว่าลม โดยที่รูปแสดงทิศทางของความเร็วและแรงที่เกิดขึ้นบนกังหันลมแรงยกสามารถแสดงได้ดังรูป

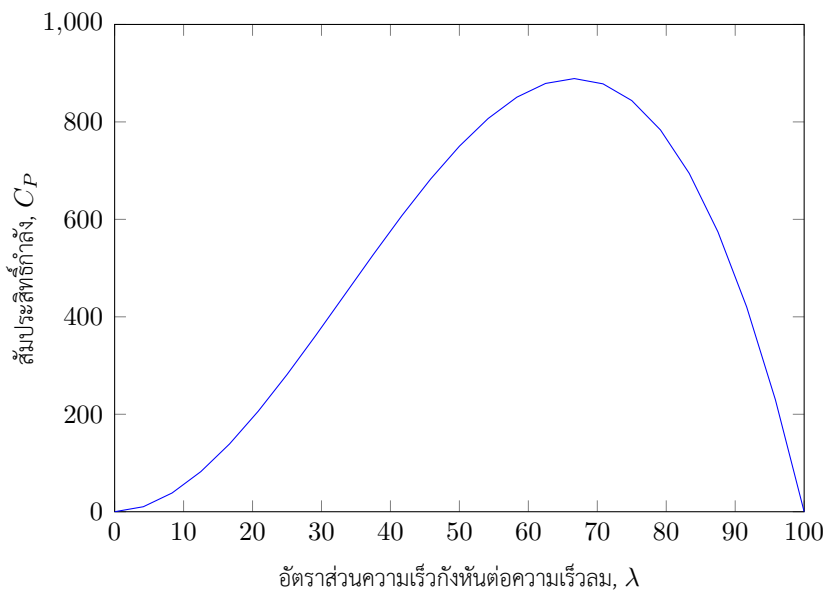
ถ้าเรากำหนดให้ $\gamma = \frac{C_D}{C_L}$ เป็นอัตราส่วนของแรงต้านต่อแรงยกที่เกิดขึ้น เราจะสามารถเขียนสมการแสดงกำลังที่กังหันลมแรงยกสร้างขึ้นได้ว่า



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

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

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



รูปที่ 4.2: ประสิทธิภาพของกังหันลมแรงยกที่อัตราส่วนความเร็วต่างๆ จะเห็นได้ว่าค่า λ ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ราว 67 ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่สูงถึง 889!

จะเห็นได้ว่ากังหันลมแบบแรงยกนั้นมีประสิทธิภาพต่อพื้นที่ใบพัดสูงกว่ากังหันแบบแรงดันหลายเท่าตัว จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าพลังงานลมอย่างแพร่หลาย

4.3 การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

นอกจากเรื่องของการเลือกกังหันตามหลักการทำงานแล้ว ยังมีคุณลักษณะอื่นๆ ที่ผู้ใช้สามารถเลือกออกแบบกังหันลมได้ เช่น

4.3.1 แนวแกนกังหัน

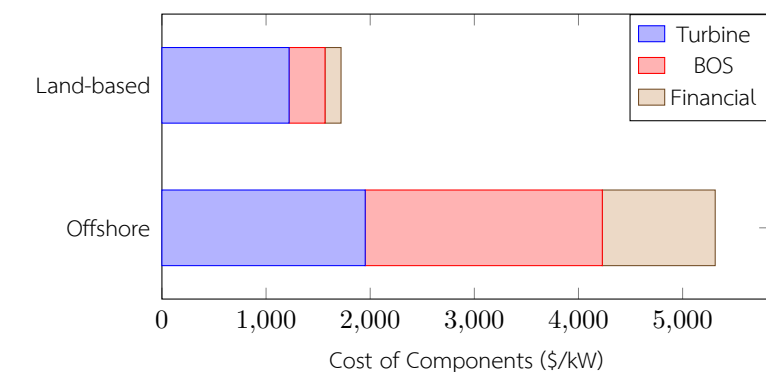
กังหันลมผลิตไฟฟ้ามีทั้งแบบที่มีแกนหมุนตามแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งแต่ละแบบมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบอยู่ดังนี้

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

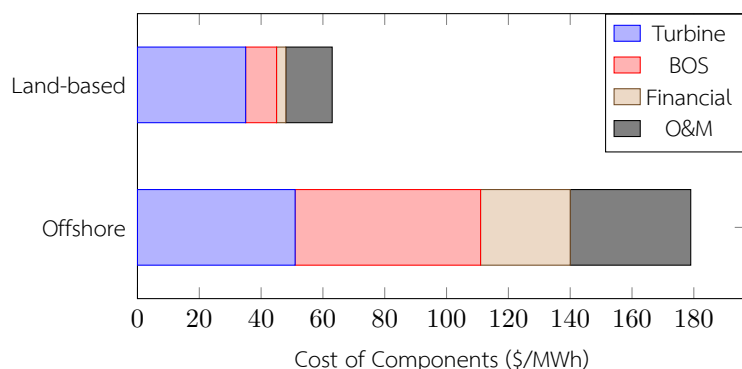
4.3.2 วัสดุผลิตกังหัน

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 พลังงานทดแทนเช่น พลังงานลม หรือ พลังงานคลื่นคือ ความไม่แน่นอนและไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งเป็นเกณฑ์วัดสำคัญของการสามารถพึ่งพาแหล่งพลังงานชนิดหนึ่งๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของโรงไฟฟ้าพลังน้ำแก่ธรรมชาติ สามารถเปิด-ปิดเพื่อตลอดเวลาได้ และสามารถเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตได้ตามอุปสงค์อย่างไม่ยากเย็นนัก ในทางตรงกันข้าม พลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตต่อเนื่องตลอดเวลาได้นี้เนื่องจากช่วงเวลา 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)

ในมุมมองของหน่วยงานควบคุมราคาหรือคุ้มครองผู้บริโภค ความสามารถในการทำกำไรหรืออัตราผลตอบแทนของโครงการโรงงานผลิตไฟฟ้าหนึ่งมักจะไม่ใช่อะไรที่น่าสนใจ ราคาต่อหน่วยพลังงานที่ผู้บริโภคจะต้องจ่ายเป็นค่าวัดที่สามารถนำมาช่วยพิจารณาความเหมาะสมของการเลือกใช้พลังงานทางเลือกเพื่อผลิตไฟฟ้า

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

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

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

7.4 อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return - IRR)

7.5 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value - NPV)

ภาค III

ศักยภาพของพลังงานทดแทนใน
ประเทศไทย

8 การพัฒนาอย่างยั่งยืน