

# พลังงานทดแทนในประเทศไทย

สัปปินันท์ เอกอำพน

2018-07-16

## สารบัญ

1	คำนำ	3
2	พลังงานแสงอาทิตย์	4
2.1	การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)	4
2.2	ทิศทางของแสงอาทิตย์	4
2.2.1	การติดตามแบบใช้พลังงาน	4
2.2.2	การติดตามแบบไม่ใช้พลังงาน	5
3	เซลล์แสงอาทิตย์	5
3.1	หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	5
3.2	พลังงานความร้อนแสงอาทิตย์	8
3.2.1	การรับความร้อนโดยตรง	8
3.2.2	การรับความร้อนแบบรวมแสง	8
3.3	คุณสมบัติของตัวรับแสง	8
3.4	เทคโนโลยีนำความร้อนไปใช้ต่อ	8
4	เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectricity)	8
4.1	ปรากฏการณ์ซีเบ็ก (Seebeck Effect)	8
4.2	ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)	11
4.3	ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)	12
4.4	หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก	13

4.5	ตัวอย่าง . . . . .	14
4.6	ต้นทุนของพลังงานจากเทอร์โมอิเล็กทริก . . . . .	15
4.7	ตัวอย่าง . . . . .	16
<b>5</b>	<b>เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells)</b>	<b>18</b>
5.1	ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง . . . . .	18
5.2	ปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง . . . . .	18
5.3	พลังงานที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง . . . . .	19
5.3.1	พลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs Free Energy) . . . . .	20
5.3.2	พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี . . . . .	22
5.3.3	ศักย์ไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง . . . . .	22
5.3.4	ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง . . . . .	23
5.4	ตัวอย่าง: ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน . . . . .	24
5.5	ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง . . . . .	25
5.5.1	Proton Exchange Membrane (PEM) . . . . .	25
5.5.2	Direct Methanol . . . . .	25
5.5.3	Solid Oxide . . . . .	25
5.6	การวิเคราะห์ต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิง . . . . .	25
<b>6</b>	<b>พลังงานลม (Wind Power)</b>	<b>25</b>
6.1	หลักการแปลงพลังงานลม . . . . .	26
6.2	อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม . . . . .	28
6.3	การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า . . . . .	30
6.3.1	แนวแกนกังหัน} . . . . .	30
6.3.2	วัสดุผลิตกังหัน} . . . . .	31
6.4	ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าพลังงานลม . . . . .	31
<b>7</b>	<b>พลังงานชีวภาพ (Biofuel)</b>	<b>32</b>
7.1	วัตถุดิบ (Feedstock) . . . . .	32
7.2	เอทานอล . . . . .	32
7.3	ไบโอดีเซล . . . . .	32
7.4	แก๊สชีวภาพ . . . . .	32
<b>8</b>	<b>การกักเก็บพลังงาน (Energy Storage)</b>	<b>32</b>

8.1	บ่อกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Ponds) . . . . .	33
8.1.1	บ่อกักเก็บแบบประดิษฐ์ . . . . .	33
8.1.2	บ่อกักเก็บแบบเกิดเอง . . . . .	33
8.2	แบตเตอรี่ . . . . .	34
8.3	ล้อตุ่นกำลัง (Flywheel) . . . . .	34
<b>9</b>	<b>การวิเคราะห์ต้นทุน</b>	<b>34</b>
9.1	โครงสร้างต้นทุน} . . . . .	34
9.2	มูลค่าเงินตามเวลา (Time Value of Money)} . . . . .	35
9.3	ต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (Levelized Cost of Energy - LCOE)} . . . . .	35
9.4	อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return - IRR)} . . . . .	36
9.5	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value - NPV) . . . . .	36
<b>10</b>	<b>การพัฒนาอย่างยั่งยืน</b>	<b>36</b>

## 1 คำนำ

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

ผู้เขียนหวังว่าข้อมูลที่ได้รับการรวบรวมไว้ในตำราเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านในวงกว้าง มีใจเฉพาะระดับนักศึกษาหรือนักวิชาการเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถ้าหากผู้อ่านมีความรู้พื้นฐานทางด้านฟิสิกส์พื้นฐาน จะทำให้สามารถเข้าใจเนื้อหาและบทวิเคราะห์ได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงสามารถนำความรู้ที่ได้รับนำไปวิเคราะห์ข้อมูลอื่นๆได้ด้วยตนเอง

## 2 พลังงานแสงอาทิตย์

เวลาพูดถึงพลังงานแสงอาทิตย์นั้น หลายคนอาจจะนึกถึงแดดร้อนๆในช่วงเดือนมีนาคมหรือเมษายน แต่จริงๆแล้วจะรู้ไหมว่าพลังงานที่มีอยู่ในแสงอาทิตย์นั้นประกอบด้วยหลายส่วน การจะดักดวงพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้ได้เต็มทีนั้น จำเป็นที่เราจะต้องมีความเข้าใจถึงส่วนประกอบเหล่านี้

เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นมาจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ออกมาในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นต่างๆ ดังนั้นเราควรจะเริ่มทำความเข้าใจกับการแผ่รังสีของวัตถุมาก่อน

### 2.1 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)

การแผ่รังสีของวัตถุดำเกิดจากการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากความร้อนของวัตถุซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์กับสิ่งแวดล้อม ซึ่งช่วงความถี่และความเข้มของคลื่นต่างๆนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงแล้วไม่มีวัตถุใดที่มีการแผ่รังสีเหมือนวัตถุดำแท้จริง โดนเฉพาะอย่างยิ่งดาวฤกษ์อย่างพระอาทิตย์นั้นก็ได้อยู่ในสภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อม แต่ความเข้าใจเรื่องของการแผ่รังสีนี้ก็สามารถนำมาใช้ทำความเข้าใจส่วนประกอบของแสงอาทิตย์ได้

ยกตัวอย่างเช่น ในวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำนั้น ในห้องมืดจะมองเห็นเป็นสีดำเนื่องจากช่วงคลื่นที่แผ่ออกมาเป็นช่วงอินฟราเรดซึ่งมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงราว  $500^{\circ}\text{C}$  การแผ่รังสีเริ่มเข้าอยู่ในช่วงความถี่ที่ตามองเห็น (visible spectrum) และจะเริ่มมีสีแดง เมื่ออุณหภูมิสูงมากจะออกเป็นสีฟ้าขาว เมื่อวัตถุมีการแผ่รังสีเป็นสีขาว แสดงว่ามีการแผ่รังสีบางส่วนออกมาเป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ดวงอาทิตย์ซึ่งมีอุณหภูมิที่ผิวประมาณ  $5800\text{ K}$  นั้น มีการแผ่รังสีออกมามากที่สุดในช่วงคลื่นแสงและอินฟราเรด และมีจำนวนอีกเล็กน้อยในช่วงอัลตราไวโอเล็ต

### 2.2 ทิศทางของแสงอาทิตย์

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

#### 2.2.1 การติดตามแบบใช้พลังงาน

การติดตามดวงอาทิตย์แบบใช้พลังงานหรือที่เรียกว่า Active Tracking นั้นเป็นการใช้ระบบ Feedback Loop โดยใช้ตัวรับแสงเพื่อช่วยในการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ประเมิณผล แล้วส่งสัญญาณให้กับ

ระบบควบคุมให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

### 2.2.2 การติดตามแบบไม่ใช้พลังงาน

## 3 เซลล์แสงอาทิตย์

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

จริงๆแล้วปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุอื่นๆนอกจากเซลล์สุริยะด้วย แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ไม่มีทิศทางหรือแนวโน้มใดๆ จึงทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น จำเป็นจะต้องมีวิธีบังคับการไหลของอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดกระแสได้ นั่นเป็นสาเหตุที่เซลล์สุริยะจำเป็นจะต้องมีการออกแบบวงจรพิเศษ

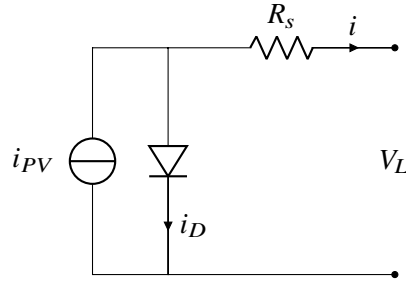
### 3.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

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

ปริมาณกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์สร้างขึ้นได้นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพของ P-N junction ในการป้องกันกระแสนอนกลับ และประสิทธิภาพของวัสดุเซลล์ในการสร้างอิเล็กตรอนเมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ ซึ่งระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรเทียบเท่าได้โดยไดโอดและความต้านทานภายในดังรูป 1

จากวงจรเทียบเท่าดังกล่าว สามารถเขียนสมการแสดงปริมาณกระแสที่เซลล์สุริยะได้ว่า กระแสที่ไหลผ่านไปที่โหลดภายนอกเท่ากับกระแสที่เซลล์สุริยะสร้างได้ลบด้วยกระแสที่ไหลย้อนผ่าน P-N junction

$$i = i_{PV} - i_D$$



รูปที่ 1: วงจรเทียบเท่าของเซลล์แสงอาทิตย์

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

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

เมื่อแทนสมการ 1 ลงในสมการ ?? จะได้สมการ

$$i = i_{PV} - i_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

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

เซลล์สุริยะสามารถผลิตกำลังได้สูงสุดเมื่อ

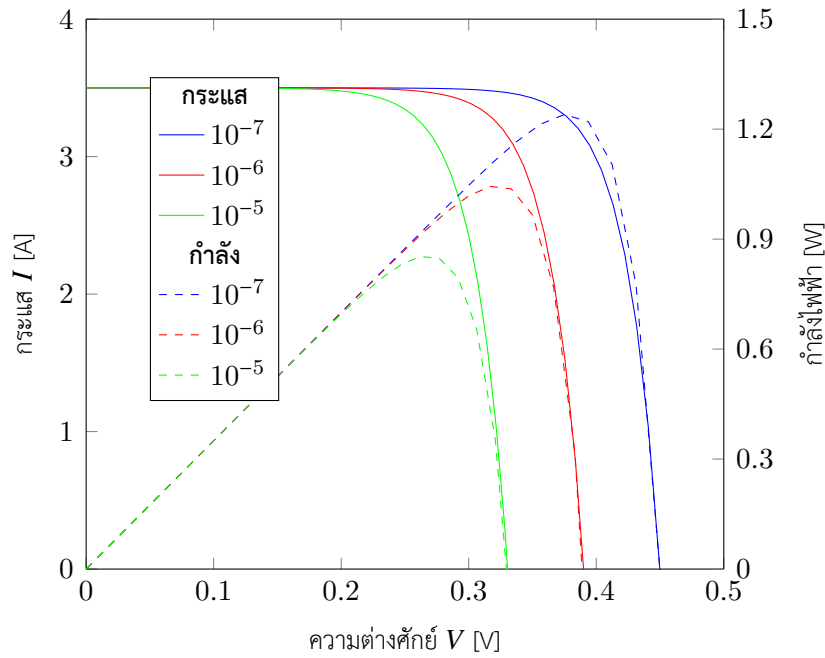
$$\begin{aligned} P_{out} &= iV \\ \frac{dP_{out}}{dV} &= 0 \\ \exp\left(\frac{eV_{\max P}}{kT}\right) &= \frac{1 + \frac{i_{PV}}{i_0}}{1 + \frac{eV_{\max P}}{kT}} \end{aligned} \quad (3)$$

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

ประสิทธิภาพสูงสุดของแผงเซลล์สุริยะเกิดในตอนที่มีแผงผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$P_{\max} = \frac{V_{\max} P(i_0 + i_{PV})}{1 + \frac{kT}{eV_{\max} P}} \quad (4)$$

$$\eta_{\max} = \eta_{\max P} = \frac{P_{\max}}{I_{in}} = \frac{V_{\max} P(i_0 + i_{PV})}{I_{in} \left(1 + \frac{kT}{eV_{\max} P}\right)} \quad (5)$$



รูปที่ 2: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากในเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 25°C

### 3.2 พลังงานความร้อนแสงอาทิตย์}

#### 3.2.1 การรับความร้อนโดยตรง}

#### 3.2.2 การรับความร้อนแบบรวมแสง}

### 3.3 คุณสมบัติของตัวรับแสง}

### 3.4 เทคโนโลยีนำความร้อนไปใช้ต่อ}

## 4 เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectricity)

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

### 4.1 ปรากฏการณ์ซีเบ็ก (Seebeck Effect)

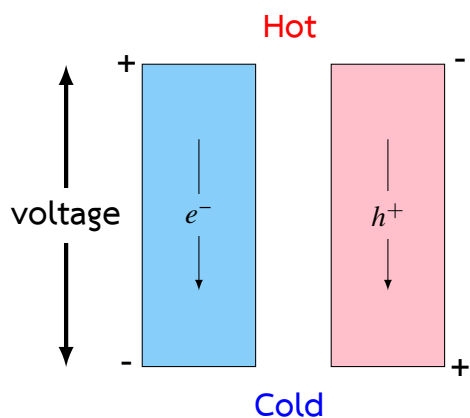
เทอร์โมอิเล็กทริกคือการเกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นบนตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โดยหลักการมาจากการแพร่ (diffusion) ของพาหะของประจุ (charge carrier) ในสารเมื่อได้รับความร้อน โดยในสารตัวนำและกึ่งตัวนำทั่วไปจะมีทั้งอิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) ซึ่งมีประจุลบและหลุม (holes) ซึ่งมีประจุบวก เมื่อวัสดุได้รับความร้อน พาหะในสารจะแพร่ตัวออกไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การสะสมของพาหะเหล่านี้ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้น

เมื่อนำไปต่อกับภาระภายนอกจะทำให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นได้

สารทุกชนิดมีความสามารถในการสร้างศักย์ไฟฟ้าจากการแพร่ของพาหะประจุที่ต่างกัน โดยค่าความสามารถนี้เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ก (Seebeck Coefficient) ซึ่งอธิบายความสามารถศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากอุณหภูมิที่แตกต่างได้ดังนี้

$$V = \int_{T_L}^{T_H} (S_p - S_n) dT = \int_{T_L}^{T_H} S_{pn} dT \quad (6)$$





รูปที่ 3: หลักการของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ซึ่งหากเราสมมติว่าค่าสัมประสิทธิ์นี้เป็นอิสระจากอุณหภูมิ จะสามารถเขียนสมการ 6 ใหม่ได้ว่า

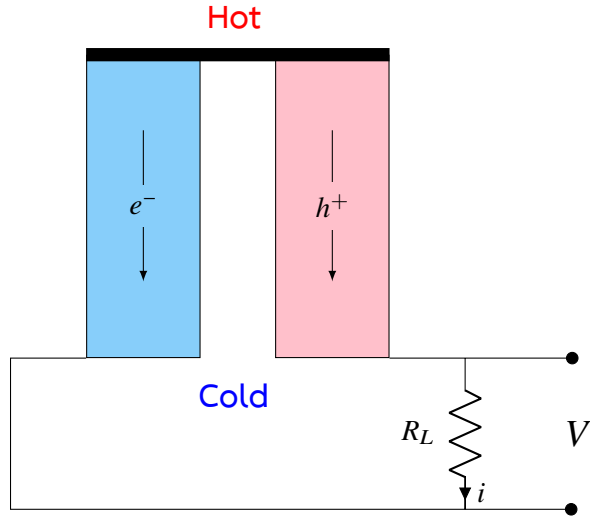
$$V = S_{pn}\Delta T = S_{pn} (T_H - T_L) \quad (7)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์สำหรับวัสดุทั่วไปที่มีสมบัติเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้มีดังนี้

ตารางที่ 1: ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กของวัสดุต่างๆที่ 25 C

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

อย่างไรก็ดี ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกจากวัสดุหนึ่งๆนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กเพียงอย่างเดียว เนื่องจากลักษณะการทำงานและการต่อเชื่อมของเทอร์โมอิเล็กทริกกับวงจรไฟฟ้านั้นเป็นเหมือนแบตเตอรี่ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนอธิบายเป็นวงจรได้ดังนี้



รูปที่ 4: การเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเหมือนแหล่งศักย์ไฟฟ้า ( $V$ ) และมีความต้านทานภายใน ( $R_{TEG}$ )

$$V_L = S_{pn}\Delta T - iR_{int} \quad (8)$$

$$R_{int} = R_p + R_n \quad (9)$$

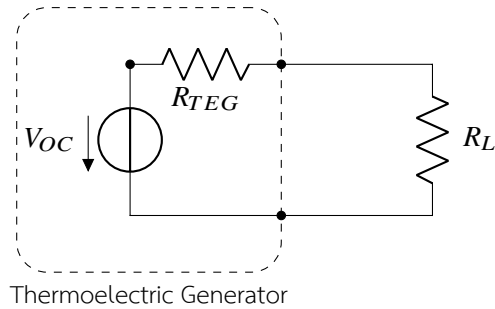
นอกจากนี้ อีกวิธีที่จะเพิ่มปริมาณไฟฟ้าก็คือการต่อคู่เทอร์โมอิเล็กทริกแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า เหมือนอย่างเวลาต่อแบตเตอรี่ AA หรือ AAA หลายก้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบพกพาทั้งหลาย ถ้าสมมุติว่า ต่อเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งหมด  $m$  คู่ จะได้สมการไฟฟ้าว่า

$$V = mS_{pn}\Delta T \quad (10)$$

$$R_{teg} = mR_{int} \quad (11)$$

$$V_L = mS_{pn}\Delta T - imR_{int} \quad (12)$$

การที่จะสามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ให้ได้มากที่สุดจึงจำเป็นต้องมีการปรับความต้านทานภาระ (Load resistance,  $R_L$ ) ให้เหมาะสม เพื่อให้มีการสูญเสียไปกับความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกให้น้อยที่สุด ซึ่งความต้านทานภาระที่เหมาะสมนี้สามารถหาได้จากสมการดังนี้



รูปที่ 5: ภาพวงจรแสดงคุณสมบัติของเครื่องผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

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

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

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

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

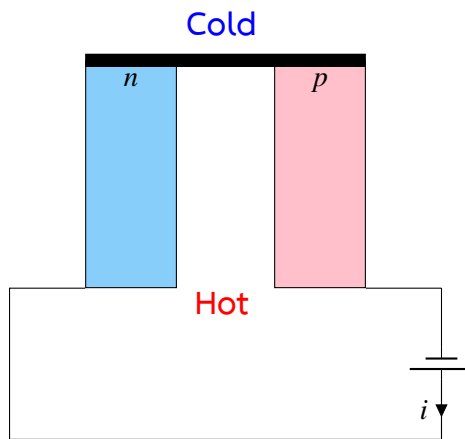
$$R_L = mR_{int}$$

หมายความว่า ความต้านทานภาระควรจะเท่ากับความต้านทานภายใน ซึ่งนี้เรียกว่า load matching ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ได้กับการผลิตไฟฟ้าด้วยกระบวนการอื่นๆได้เช่นกัน

## 4.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่ "ตรงกันข้าม" กับปรากฏการณ์ซีเบ็ค ในกรณีของปรากฏการณ์ซีเบ็คนั้น ผลต่างของอุณหภูมิสร้างให้เกิดความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า ส่วนปรากฏการณ์เพลเทียร์เป็นการสร้างผลต่างของอุณหภูมิเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เปรียบเทียบได้กับกรณีของปรากฏการณ์แม่เหล็กไฟฟ้าในมอเตอร์ ซึ่งเมื่อใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวนำซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการหมุน ในทางตรงกันข้าม ถ้านำตัวนำไปหมุนภายในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นเช่นกัน

ประโยชน์ของปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำความเย็น โดยตัวทำความเย็นที่อาศัยหลักการนี้เรียกว่าตัวทำความเย็นเพลเทียร์ (Peltier cooler) โดยอัตราการกำจัดความร้อนสามารถคำนวณได้จาก



รูปที่ 6: วงจรแสดงการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์

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

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

### 4.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson Effect)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของการปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กของแต่ละวัสดุนั้นมักจะแปรผันกับอุณหภูมิ ดังนั้นในกรณีที่วัสดุมีอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กก็อาจจะไม่สม่ำเสมอได้เช่นกัน และเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุนี้ก็จะทำให้เกิดการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์เกิดขึ้นได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า 'ปรากฏการณ์ทอมสัน' ตั้งตามชื่อของลอร์ดเคลวิน (ชื่อจริง William Thomson) ซึ่งได้ทำนายการเกิดปรากฏการณ์นี้ในตัวนำที่มีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของการปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กของแต่ละวัสดุนั้นมักจะแปรผันกับอุณหภูมิ ดังนั้นในกรณีที่วัสดุมีอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็กก็อาจจะไม่สม่ำเสมอได้เช่นกัน และเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุนี้ก็จะทำให้เกิดการเกิดปรากฏการณ์เพลเทียร์เกิดขึ้นได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า 'ปรากฏการณ์ทอมสัน' ตั้งตามชื่อของลอร์ดเคลวิน (ชื่อจริง William Thomson) ซึ่งได้ทำนายการเกิด

ปรากฏการณ์นี้ในตัวนำที่มีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอและทำการทดลองจนสามารถพิสูจน์ได้จริง

ในกรณีที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $J$  ไหลผ่านตัวนำที่มีค่าสัมประสิทธิ์ทอมสัน  $K$  อัตราการเกิดความร้อนจะมีค่าเท่ากับ

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

สังเกตว่าในสมการนี้ กำลังความร้อนที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น  $W/m^3$  เนื่องจากคุณสมบัติของตัวนำไม่สม่ำเสมอ กำลังความร้อนจึงไม่คงที่และต้องอาศัยการอินทิเกรตเพื่อหาค่าบนพื้นที่หรือปริมาตร

#### 4.4 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก

ในระหว่างการทำงานจริงมักมีปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสองอย่างขึ้นไปเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ต่างๆ และผลที่เกิดขึ้นกับเทอร์โมอิเล็กทริก อย่างไรก็ตาม สำหรับในตำราเล่มนี้ จะกล่าวถึงความสัมพันธ์เมื่อเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานที่สถานะคงที่ (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

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

$$\begin{aligned}
Q_{in} &= Q_{cold} + Q_{peltier} - Q_{joule} \\
&= mS_{pn}T_H i + K\Delta T - \frac{i^2 R_{teg}}{2}
\end{aligned} \tag{13}$$

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ผ่านตัวต้านทานเท่ากับ

$$P_{out} = i^2 R_L \tag{14}$$

ซึ่งเราสามารถเอามาเขียนเป็นสมการประสิทธิภาพความร้อนของ TEG เท่ากับ

$$\begin{aligned}
\eta &= \frac{P_{out}}{Q_{in}} \\
&= \frac{i^2 R_L}{mS_{pn}T_H i + K\Delta T - \frac{i^2 R_{teg}}{2}}
\end{aligned} \tag{15}$$

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

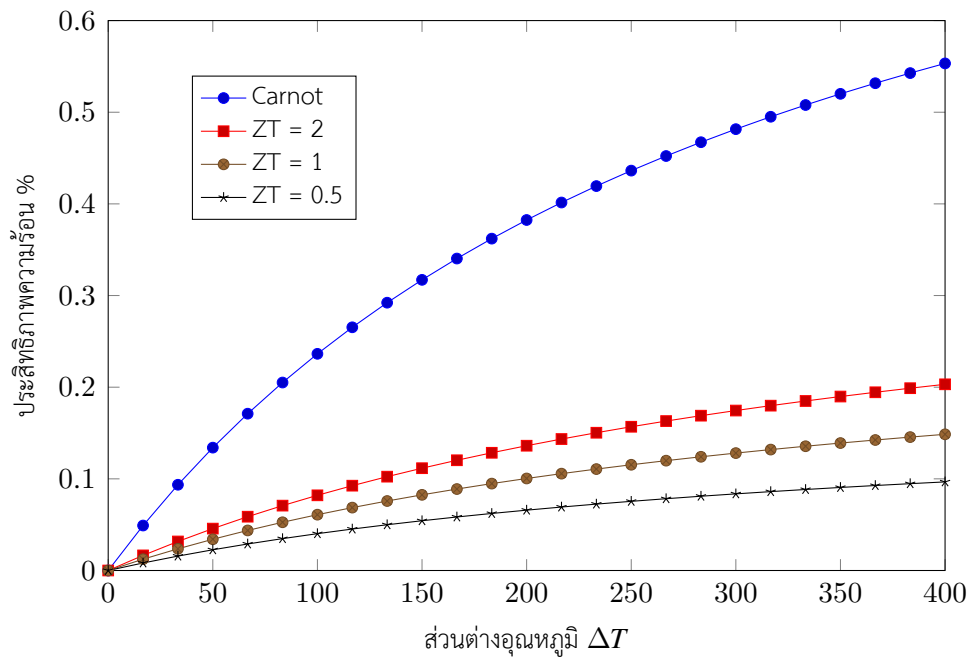
$$\eta = \frac{\Delta T}{2T_H + \frac{2}{Z} - \frac{\Delta T}{2}} \tag{16}$$

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

ประสิทธิภาพของเครื่องย่นความร้อนส่วนใหญ่ (นอกจากเครื่องย่นต้นดาปภายใน) มักจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพเป็นสัดส่วนเทียบกับประสิทธิภาพคาร์โนต์ซึ่งเป็นประสิทธิภาพสูงสุดในทางทฤษฎีของเครื่องย่นความร้อนใดๆ

#### 4.5 ตัวอย่าง

เทอร์โมอิเล็กทริกทำมาจาก  $\text{PbTe-Bi}_2\text{Te}_3$  ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้



รูปที่ 7: ประสิทธิภาพความร้อนของ TEG เทียบกับประสิทธิภาพคาร์โนต์

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

ขาจากวัสดุทั้งสองชนิดมีพื้นที่หน้าตัด ( $16 \text{ mm}^2$ ) และความยาว (4 mm) เท่ากัน ที่สภาวะคงที่อุณหภูมิ ด้านร้อนเท่ากับ 200 C และด้านเย็นเท่ากับ 50 C จงคำนวณหา

1. ค่า  $Z$  ของเทอร์โมอิเล็กทริกนี้
2. กำลังสูงสุดที่เทอร์โมอิเล็กทริกนี้ผลิตได้
3. ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกนี้

#### 4.6 ต้นทุนของพลังงานจากเทอร์โมอิเล็กทริก

ต้นทุนวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิเล็กทริกในปัจจุบัน

ตารางที่ 2: ค่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

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

#### 4.7 ตัวอย่าง

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 ค่าเทอร์โมอิเล็กทริกอุณหภูมิกกลาง 525 บาทต่อวัตต์
5. ค่าติดตั้ง 10% ของค่าอุปกรณ์ (TEG + Inverter)
6. ค่าซ่อมแซม 1% ของค่าอุปกรณ์ต่อปี

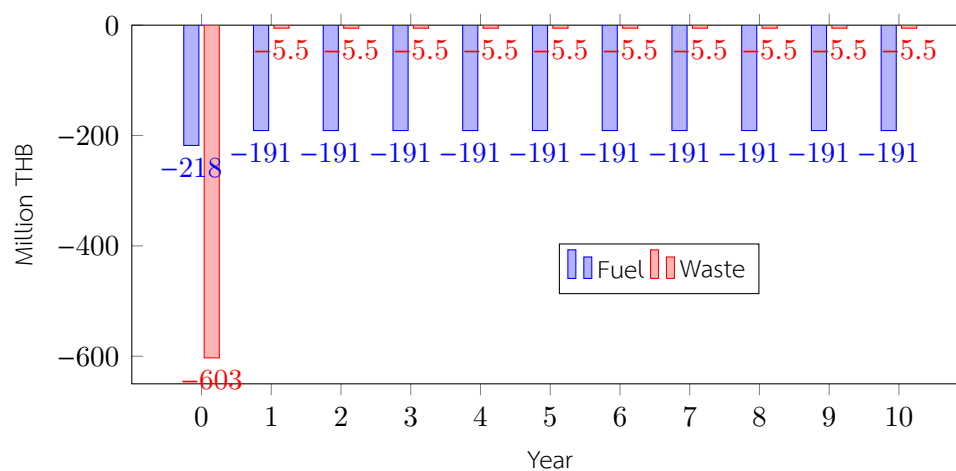
ก่อนอื่น เราสามารถคำนวณค่าอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการแปลงไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยค่า TEG และ inverter

เปรียบเทียบต้นทุนระหว่างกรณีที่ 1, 2, และ 3 ได้เป็นตารางดังนี้



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

และยังสามารถแสดงกระแสเงินสดเปรียบเทียบระหว่างกรณีได้ดังนี้



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

## 5 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells)

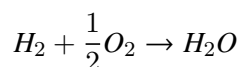
เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งแตกต่างจากการใช้เครื่องยนต์ในการปั่นไฟซึ่งเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกลแล้วจึงเป็นพลังงานไฟฟ้าในที่สุด เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเพียงขั้นตอนเดียว และยังมีขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน จึงทำให้สามารถทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีในรูปแบบอื่น

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

### 5.1 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง

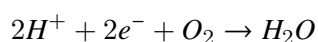
### 5.2 ปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง

อันที่จริงแล้ว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงก็คือปฏิกิริยาการสันดาป แต่เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์เคมีไฟฟ้า เราจึงควรทำความเข้าใจกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่มีการแลกเปลี่ยนระหว่างการเกิดปฏิกิริยาขึ้น ยกตัวอย่างเช่น



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

ปฏิกิริยารีดักชัน



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



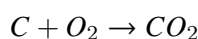
ในปฏิกิริยารีดักชัน สารจะมีการรับอิเล็กตรอน (จาก  $H^+$  ซึ่งมีเลขประจุเป็น +1 ไปเป็น  $H_2O$  ซึ่งไฮโดรเจนมีประจุเป็น 0) ส่วนในปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารจะมีการปล่อยอิเล็กตรอน (จาก  $H_2$  ซึ่งมีประจุเป็น 0 เป็น  $H^+$  ซึ่งมีประจุเป็น +1)

### 5.3 พลังงานที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง

พลังงานตั้งต้นของเซลล์เชื้อเพลิงมาจากพลังงานเคมีของสารตั้งต้น แล้วพลังงานเคมีคืออะไร พลังงานเคมีคือพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในพันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลใดๆ และจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดปฏิกิริยาสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ขึ้น ซึ่งพลังงานในพันธะเคมีเหล่านี้สามารถวัดได้โดยใช้ enthalpy of formation ( $\Delta H_f$ ) ซึ่งพลังงานงานที่สามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มาจากพลังงานเคมีที่ได้รับการปลดปล่อยจากปฏิกิริยารีดอกซ์ ( $\Delta H$ )

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

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 เรียกได้อีกอย่างว่าปฏิกิริยาคายพลังงาน (exothermic reaction)

แต่พลังงานที่คายออกมาไม่สามารถถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมด จะต้องมีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ในกรณีที่ปฏิกิริยาเป็นแบบย้อนกลับได้ การสูญเสียพลังงานความร้อนเท่ากับ

$$\text{Heat Loss} = \int T dS \quad (17)$$

ที่สภาวะคงที่ การสูญเสียความร้อนจะกลายเป็น

$$\text{Heat Loss} = T \Delta S \quad (18)$$

หากเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพ 100% พลังงานเคมีที่เหลือจะสามารถแปลงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมด

$$W_e = \Delta H - T \Delta S \quad (19)$$

แต่หากปฏิกิริยาไม่ได้เกิดแบบย้อนกลับได้ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จะน้อยกว่านี้

### 5.3.1 พลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs Free Energy)

พลังงานอิสระของกิบส์ (GFE) เป็นฟังก์ชันสภาวะ (state function) ค่าสัมบูรณ์ของพลังงานอิสระของกิบส์หาได้ยากและไม่ได้มีประโยชน์นัก ส่วนที่มีประโยชน์จริงๆคือผลต่างหรือพลังงานที่เปลี่ยนไประหว่างสารตั้งต้นกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งใช้อธิบายว่าปฏิกิริยาหนึ่งๆสามารถเกิดขึ้นเองได้หรือไม่ หาได้จาก

$$G = H - TS \quad (20)$$

เมื่อทำการหาอนุพันธ์ของ GFE ในกระบวนการที่มีอุณหภูมิคงที่ (isothermal process)

$$dG = dH - T dS \quad (21)$$

สำหรับความเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของเอนทัลปีและเอนโทรปี

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (22)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตได้ในสมการ 19 ซึ่งพลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาใดๆสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta G = \sum \Delta G_{products} - \sum \Delta G_{reactants} \quad (23)$$

จากสมการ 23 หากพิจารณาปฏิกิริยาของสารที่เป็นแก๊สอุดมคติ จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ทางอุณหพลศาสตร์ได้ดังนี้

$$dU = TdS - PdV \quad (24)$$

$$H = U + PV \quad (25)$$

หาค่าอนุพันธ์ของ  $H$  ได้

$$\begin{aligned} dH &= dU + PdV + VdP \\ &= TdS - PdV + PdV + VdP \\ &= TdS + VdP \end{aligned} \quad (26)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

$$VdP = dH - Tds = dG \quad (27)$$

หากพิจารณาสารตั้งต้น 1 mol จะได้ว่า

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

พิจารณาเซลล์เชื้อเพลิงที่สภาวะคงที่ จะได้ว่า  $T$  เป็นค่าคงที่

$$\int_{G_0}^G dG = \int_{P_0}^P \frac{R_u T}{P} dP \quad (28)$$

$$G - G_0 = R_u T \ln \frac{P}{P_0} \quad (29)$$

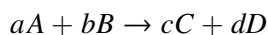
โดยกำหนดให้  $G_0$  คือพลังงานอิสระของกิบส์อ้างอิงที่อุณหภูมิ 25 C และความดัน 1 บรรยากาศ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการพลังงานอิสระของกิบส์เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดันได้โดย

$$G = G_0 + R_u T \ln P \quad (30)$$

ซึ่งพลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนไปในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถอ้างอิงค่า  $H_0$  และ  $G_0$  ได้จากตาราง ??

### 5.3.2 พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี

ในปฏิกิริยาเคมี พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนไปเท่ากับส่วนต่างระหว่างพลังงานของผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้น ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของปฏิกิริยา



พลังงานอิสระของกิบส์ที่เปลี่ยนไปเท่ากับ

$$\begin{aligned} \Delta G &= G_{0C} + G_{0D} - G_{0A} - G_{0B} - R_u T \left( \ln P_C^c + \ln P_D^d - \ln P_A^a - \ln P_B^b \right) \\ \Delta G &= \Delta G_0 + R_u T \ln \frac{P_C^c P_D^d}{P_A^a P_B^b} \end{aligned} \quad (31)$$

ถ้าหากพลังงานเคมีทั้งหมดสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และมีอิเล็กตรอน  $n$  ตัวถูกปล่อยออกมาต่อ 1 โมเลกุลของสารตั้งต้น เราจะสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$W_e = \Delta G = qE_g \quad (32)$$

โดยที่  $W_e$  คือพลังงานไฟฟ้า  $q$  คือประจุไฟฟ้าที่มีการแลกเปลี่ยน และ  $E_g$  คือศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

### 5.3.3 ศักย์ไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

จากสมการ 32 ศักย์ไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถสร้างได้เท่ากับพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปหารด้วยประจุที่มีการแลกเปลี่ยน ดังนั้นหากทุกๆโมเลกุลของสารตั้งต้นมีการแลกอิเล็กตรอน  $n$  ตัว สมการแสดงศักย์ไฟฟ้าต่อ 1 molของสารตั้งต้นจะเป็น

$$E_g = \frac{W_e}{-nF} = E_g^0 + \frac{R_u T}{nF} \ln \frac{P_A^a P_B^b}{P_C^c P_D^d} \quad (33)$$

ตารางที่ 3: ตารางแสดงค่าเอนทัลปีและพลังงานอิสระของกิบส์ที่สถานะอ้างอิง (1 บรรยากาศ 298 K)

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

โดยที่  $F$  คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ซึ่งมีค่าเท่ากับประจุของอิเล็กตรอนจำนวน 1 mol =  $6.02 \times 10^{23} \times 1.6 \times 10^{-19} = 9.65 \times 10^4$  C สมการ 33 นี้ถูกตั้งชื่อตามผู้ค้นพบว่า **สมการของเนิร์นสต์ (Nernst Equation)**

### 5.3.4 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ในทางทฤษฎี หากพลังงานอิสระของกิบส์จากปฏิกิริยาทั้งหมดถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าสูงสุด

$$\eta_{\max} = \frac{W_{e,\max}}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (34)$$

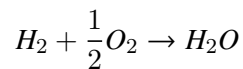
ในทางปฏิบัติแล้ว ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในเซลล์เชื้อเพลิงมักจะมีการสูญเสียความร้อนและพลังงานอื่นๆ ทำให้ศักย์ไฟฟ้าไม่สูงถึง  $E_g$  ที่คำนวณได้ด้วยสมการของเนิร์นสต์ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะเหลือ

$$\eta = \frac{W_e}{\Delta H} = \frac{nFV_L}{\Delta H} \quad (35)$$

#### 5.4 ตัวอย่าง: ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

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

จากสมการการสันดาปไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิง



- อุณหภูมิที่เซลล์ทำงาน = 200°C = 200 + 273 = 473 K
- เนื่องจากอากาศมีออกซิเจนอยู่ประมาณ 21%
- มีการปล่อยและรับอิเล็กตรอน 2 ตัวต่อ 1 โมเลกุลของน้ำ ( $n = 2$ )

จากสมการที่ 33 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  $H_2O$

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

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการ 34

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



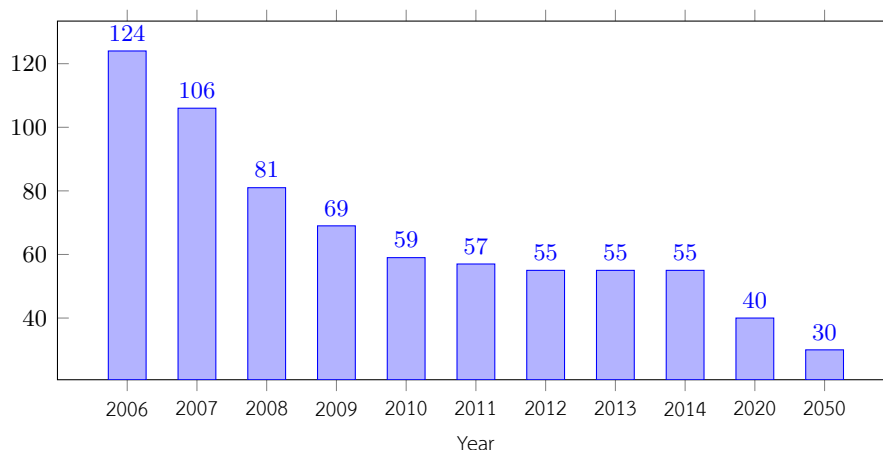
## 5.5 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

### 5.5.1 Proton Exchange Membrane (PEM)

### 5.5.2 Direct Methanol

### 5.5.3 Solid Oxide

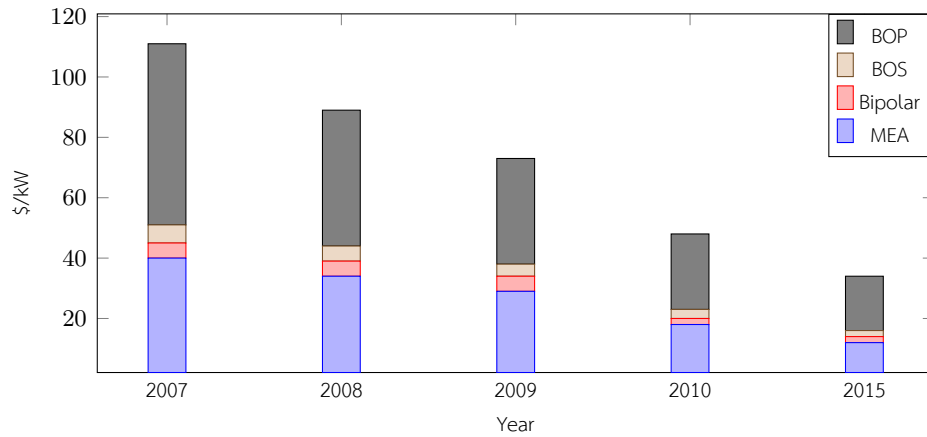
## 5.6 การวิเคราะห์ต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 8: Historical and projected transportation fuel cell system cost

## 6 พลังงานลม (Wind Power)

พลังงานลมนับเป็นอีกพลังงานหนึ่งที่เกิดจากการไหลของอากาศ ดังนั้นการแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าจึงเป็นการแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้เราจะกล่าวถึงหลักการ วิธี และประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานลมด้วยเทคโนโลยีปัจจุบัน รวมถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ในการผลิตไฟฟ้าจากระดับเล็กไปจนถึงระดับใหญ่



รูปที่ 9: Historical and projected transportation fuel cell system cost

## 6.1 หลักการแปลงพลังงานลม

พลังงานลมเป็นพลังงานจลน์ที่มีส่วนประกอบมาจากมวลของอากาศและความเร็วลม ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว คำจำกัดความของพลังงานจลน์คือ

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

แต่เนื่องจากลมมีการเคลื่อนที่ต่อเนื่อง จึงสะดวกกว่าที่จะอธิบายถึงพลังงานลมในรูปของกำลังลมแทน โดยใช้อัตราการไหลของมวลแทน

$$\frac{dE}{dt} = P_w = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \quad (36)$$

หากเราสมมติว่าลมมีความเร็วคงที่ จะสามารถคำนวณอัตราการไหลของมวลได้ว่า

$$\dot{m} = \rho Av \quad (37)$$

เมื่อแทนสมการ 37 ลงในสมการ 36 จะได้สมการแสดงกำลังของลมที่ความเร็ว  $v$

$$P_w = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (38)$$

ถ้ามีการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อดักและแปลงกำลังลมนี้เป็นกำลังไฟฟ้า ความเร็วลมขาออก  $v_o$  ต้องน้อยกว่าความเร็วลมขาเข้า  $v_i$  ดังนั้นความเร็วลมและอัตราการไหลของมวลผ่านอุปกรณ์เฉลี่ยคือ

$$v_{avg} = \frac{v_i + v_o}{2} \quad (39)$$

$$\dot{m} = \frac{\rho A}{2} (v_i + v_o) \quad (40)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{dP_{turbine}}{dk} &= 0 = \frac{d}{dk} \left[ \frac{\rho A v_i^3}{4} (1+k) (1-k^2) \right] \\ 0 &= \frac{d}{dk} [1+k-k^2-k^3] \\ 0 &= 1-2k-3k^2 \\ k &= \frac{1}{3}, -1 \end{aligned} \quad (41)$$

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 การวิเคราะห์แบบนี้ได้มีการคำนึงถึงลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของอุปกรณ์ว่ามีผลต่อการไหลของอากาศอย่างไร

## 6.2 อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม

อันที่จริงแล้ว การจะวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของกังหันนั้นจำเป็นต้องพิจารณาการไหลของอากาศในขณะที่กังหันหมุนเพื่อพิจารณาแรงที่อากาศกระทำและกำลังที่เกิดขึ้น ซึ่งเราจะใช้หลักการอากาศพลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลม

หากพิจารณาหลักการทางอากาศพลศาสตร์ กังหันลมที่มีอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทขึ้นอยู่กับแรงซึ่งขับเคลื่อนใบพัดในกังหัน

1. กังหันลมแรงต้าน
2. กังหันลมแรงยก

ย้อนหลังไปถึงหลักอากาศพลศาสตร์ วัตถุใดๆที่ถูกลมกระทบจะเกิดแรงต้านและแรงยกขึ้น ซึ่งแรงทั้งสองสามารถเขียนเป็นสมการได้โดย

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho A v^2 \quad (42)$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho A v^2 \quad (43)$$

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

$$P_{turbine} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{u} \quad (44)$$

ในกรณีของกังหันแบบแรงต้าน ทิศทางการไหลของลมจะไปในทิศทางเดียวกับแรงต้านเสมอ ดังนั้น สมการกำลังที่ผลิตได้จะมาจาก

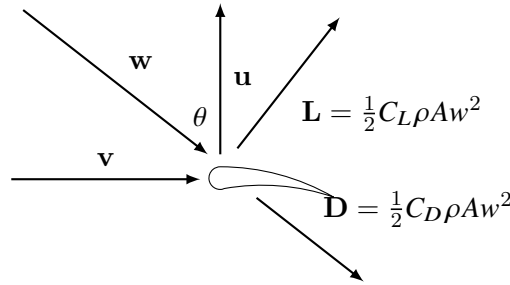
$$\begin{aligned} P &= \mathbf{D} \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{2} \rho A (v - u)^2 u \\ P &= \frac{1}{2} \rho A C_D (uv^2 - 2vu^2 + u^3) \\ C_P &= C_D (\lambda - 2\lambda^2 + \lambda^3) \end{aligned} \quad (45)$$

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

$$C_{P\max} = \frac{4}{27}C_D \quad (46)$$

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

ในกรณีของกังหันลมแรงยก ทิศทางการไหลของลมนั้นจะตั้งฉากกับความเร็วของใบพัดเสมอ ซึ่งทำให้ไม่มีข้อจำกัดเรื่องความเร็วกังหันที่เร็วกว่าลม โดยที่รูปแสดงทิศทางของความเร็วและแรงที่เกิดขึ้นบนกังหันลมแรงยกสามารถแสดงได้ดังรูป



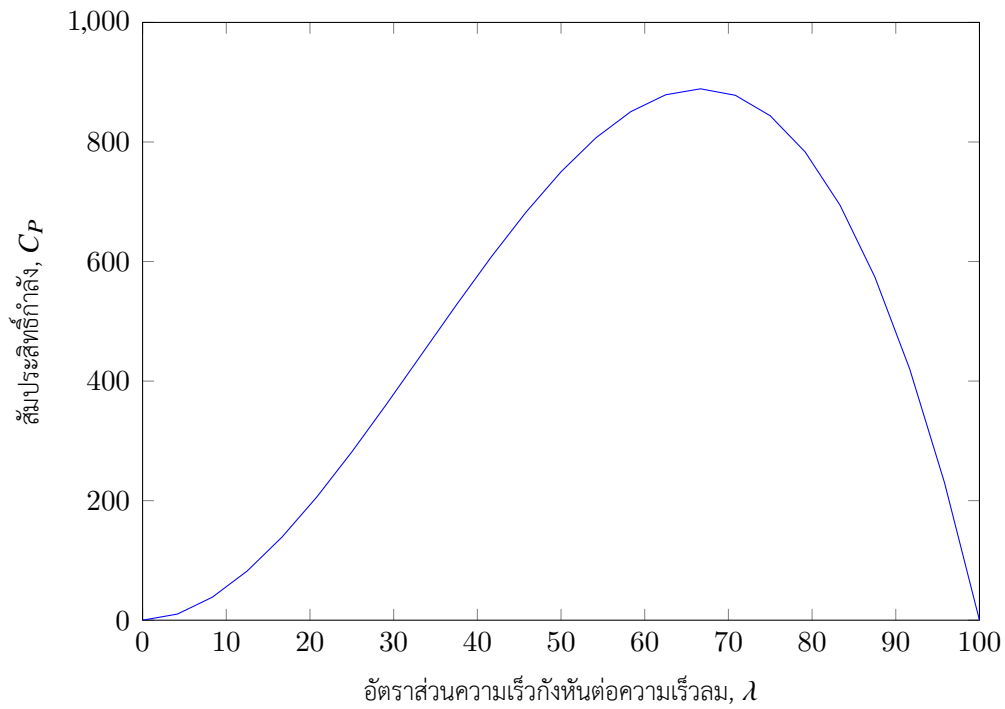
รูปที่ 10: ทิศทางของความเร็วและแรงที่เกิดขึ้นบนกังหันลมแรงยก จะสังเกตได้ว่าในกรณีนี้ ความเร็วสัมพัทธ์ของลมเมื่อเทียบกับกังหันมีค่าเท่ากับ  $w = \sqrt{u^2 + v^2}$

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

$$\begin{aligned} P &= (\mathbf{L} + \mathbf{D}) \cdot \mathbf{u} \\ P &= \frac{1}{2} \rho A w^2 \left( C_L \frac{v}{w} u - C_D \frac{u}{w} u \right) \\ P &= \frac{1}{2} \rho A \sqrt{u^2 + v^2} \left( C_L u v - C_D u^2 \right) \\ C_P &= C_L \sqrt{1 + \lambda^2} \left( \lambda - \gamma \lambda^2 \right) \end{aligned} \quad (47)$$

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

จะเห็นได้ว่ากังหันลมแบบแรงยกนั้นมีประสิทธิภาพต่อพื้นที่ใบพัดสูงกว่ากังหันแบบแรงต้านหลายเท่าตัว จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าพลังงานลมอย่างแพร่หลาย



### 6.3 การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

นอกจากเรื่องของการเลือกกังหันตามหลักการทำงานแล้ว ยังมีคุณลักษณะอื่นๆที่ผู้ใช้สามารถเลือกออกแบบกังหันลมได้ เช่น

#### 6.3.1 แนวแกนกังหัน

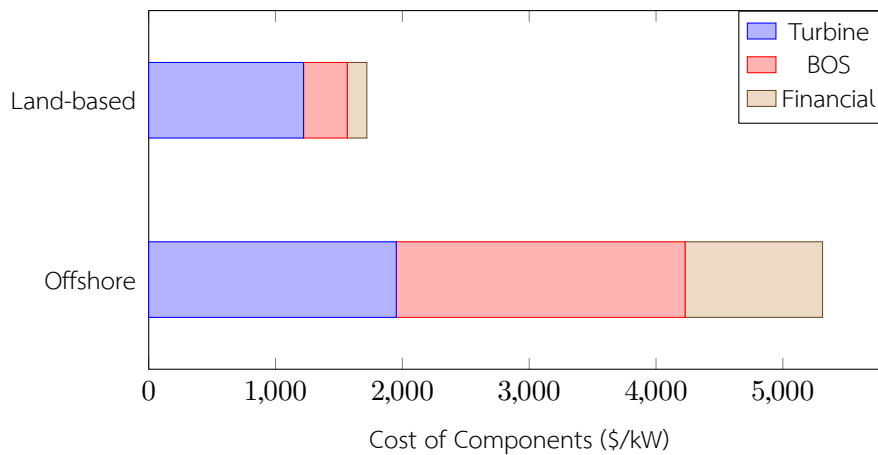
กังหันลมผลิตไฟฟ้ามีทั้งแบบที่มีแกนหมุนตามแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งแต่ละแบบมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบอยู่ดังนี้

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

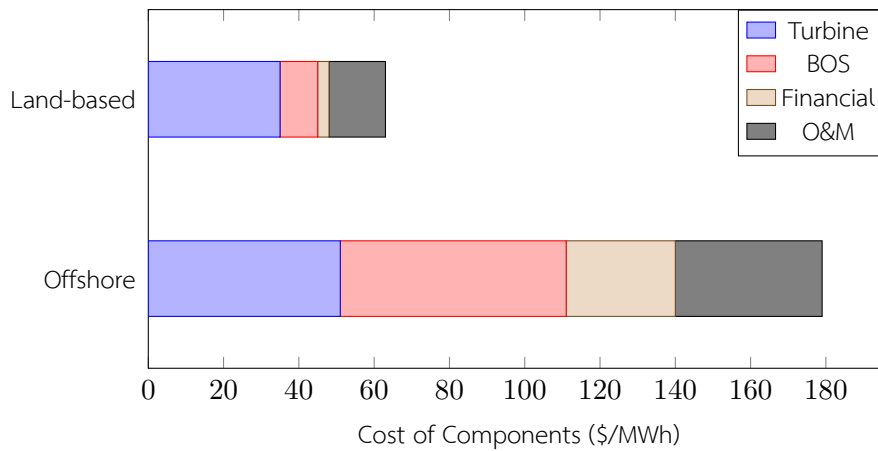
### 6.3.2 วัสดุผลิตกังหัน

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

### 6.4 ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าพลังงานลม



รูปที่ 11: แผนภูมิเปรียบเทียบต้นทุนไฟฟ้าพลังงานลมจากกังหันบนบกและกังหันกลางทะเล



รูปที่ 12: แผนภูมิเปรียบเทียบต้นทุนตลอดการใช้งานของโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานลมแบบบนพื้นดินกับแบบนอกชายฝั่ง

## 7 พลังงานชีวภาพ (Biofuel)

### 7.1 วัตถุดิบ (Feedstock)

### 7.2 เอทานอล

### 7.3 ไบโอดีเซล

### 7.4 แก๊สชีวภาพ

## 8 การกักเก็บพลังงาน (Energy Storage)

ปัญหาหนึ่งของพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานทดแทนเช่นพลังงานลมหรือพลังงานคลื่นคือความไม่แน่นอนและไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งเป็นเกณฑ์วัดสำคัญของการสามารถพึ่งพาแหล่งพลังงานชนิดหนึ่งๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของโรงไฟฟ้าพลังงานแก๊สธรรมชาติ สามารถเปิดต่อเนื่องตลอดเวลาได้และสามารถเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตได้ตามอุปสงค์อย่างไม่ยากเย็นนัก ในทางตรงกันข้าม พลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตต่อเนื่องตลอดเวลาได้เนื่องจากช่วงเลากลางวันและกลางคืน นอกจากนี้ยังมีเรื่องของเมฆ ความชื้นในอากาศ ดังนั้น หากต้องการจะสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (ไม่ว่าจะเป็นแบบ photovoltaics หรือ solar thermal หรือ แบบอื่นๆ) จำเป็นจะต้องสร้างเพื่อความไม่แน่นอนเหล่านี้ เช่นถ้ามีความต้องการพลังงานไฟฟ้า 10 MW อาจจะต้องสร้างโรงไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ 20 MW แล้ว



มีการกักเก็บส่วนที่เกินความต้องการไว้ใช้ในยามที่ไม่มีแสงอาทิตย์หรือพลังงานไม่เพียงพอต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิตต่อความต้องการผลิต

ดังนั้น การจะลดผลกระทบจากความผันผวนและเพิ่มความสามารถในการควบคุมแหล่งพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งพลังงานทดแทนเช่นพลังงานแสงอาทิตย์ จำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์กักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพเพื่อเก็บพลังงานส่วนเกินไว้ แล้วสามารถดึงพลังงานที่กักเก็บไว้มาใช้ในช่วงที่มีความต้องการได้โดยไม่ต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานโดยตรง

วิธีการกักเก็บพลังงานจากแสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทก็มีจุดเด่นและจุดด้อยต่างกันไป พึ่งพิงว่าไม่มีเทคโนโลยีใดที่จะเหมาะสมและดีกว่าเทคโนโลยีอื่นในทุกสถานการณ์ เราจึงควรทำความเข้าใจประเด็นต่างๆ ที่สำคัญเหล่านี้ไว้ เพื่อจะได้นำเทคโนโลยีเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

## 8.1 บ่อกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Ponds)

บ่อกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ในที่นี้หมายถึงบ่อกักเก็บของเหลวซึ่งสามารถกักเก็บความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ ในปัจจุบันบ่อกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนมากใช้สารละลายเกลือคลอไรด์หรือซัลเฟตในน้ำ หลักการทำงานของบ่อดังกล่าวคือการแบ่งชั้นของสารละลายตามความเข้มข้น โดยสารละลายที่มีความเข้มข้นมากจะตกอยู่ที่ชั้นล่างเนื่องจากมีความหนาแน่นสูง และสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยจะลอยอยู่ด้านบนเนื่องจากมีความหนาแน่นน้อย ซึ่งการแบ่งชั้นนี้จะป้องกันการหมุนเวียนของสารละลายเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งในบ่อน้ำปกติเมื่อได้รับความร้อน จะมีการหมุนเวียนขึ้นเนื่องจากน้ำที่ร้อนกว่าจะมีการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นลดลงและลอยขึ้นสู่ด้านบน แต่ในบ่อน้ำที่มีการแบ่งชั้นของสารละลายนี้จะไม่มีการหมุนเวียนของสารละลาย ทำให้สามารถกักเก็บความร้อนไว้ได้

กระบวนการสร้างบ่อกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์มีอยู่ 2 วิธี

### 8.1.1 บ่อกักเก็บแบบประดิษฐ์

บ่อกักเก็บพลังงานแบบนี้สร้างโดยการเติมสารละลายที่มีความเข้มข้นจากสูงลงไปสู่ชั้นล่างแล้วลดลงต่ำลงเมื่อเพิ่มระดับน้ำขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อเต็มเสร็จ บ่อก็จะสามารถกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ไว้ได้

### 8.1.2 บ่อกักเก็บแบบเกิดเอง

บ่อประเภทนี้อาศัยหลักการของการละลายอิมตัวของเกลือในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยที่ความสามารถในการละลายแปรผันตรงกับอุณหภูมิของตัวทำละลาย ซึ่งเกลือที่จะนำมาใช้ในบ่อประเภทนี้ จำเป็น

จะต้องมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการละลายต่ออุณหภูมิสูง เพื่อที่จะได้สามารถสร้าง gradient ของความเค็มต่อความลึกได้สูง และมีความสามารถในการเก็บความร้อนได้ดี

## 8.2 แบตเตอรี่

## 8.3 ล้อตุนกำลัง (Flywheel)

# 9 การวิเคราะห์ต้นทุน

เคยสงสัยกันบ้างไหมว่า เวลาที่การไฟฟ้าเก็บค่าไฟเราหน่วยละ 3 บาทกว่าๆนั้น เขาคิดคำนวณกันมาอย่างไร มีหลักฐานอ้างอิงหรือข้อมูลอะไรมาช่วยสนับสนุนนี้ไหม หรือว่าแค่นั่งเทียนกำหนดเลขกลมๆขึ้นมาจริงๆแล้วก็ไม่ใช่ออย่างนั้น และแน่นอนว่าค่าไฟที่เก็บนั้นก็คงไม่ได้เท่าทุนพอดี คงจะต้องมีส่วนบวกเพื่อให้เป็นกำไรไว้ไม่มากนักน้อยเป็นแน่

ในบทนี้ เราจะมาพูดถึงการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลังงานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างการผลิตไฟฟ้าปัจจุบัน (พ.ศ. 2560) โดยส่วนมากยังพึ่งพาเชื้อเพลิงปิโตรเลียมอยู่กับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนซึ่งเราได้กล่าวถึงเทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่ต้องใช้ไปในส่วนที่ 1

หลายครั้งที่วิศวกรโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานศึกษา (ตัวผมเองก็ด้วย) คิดวิเคราะห์ปัญหาทางพลังงานที่มีอยู่ในปัจจุบันโดยยังไม่ได้พิจารณาเรื่องของความเหมาะสมของเทคโนโลยีทางเศรษฐศาสตร์ หรือที่เรียกว่า เทคโนโลยีนั้นมันแพงเกินไปหรือเปล่า การจะพิจารณาความเป็นไปได้ที่จะนำเทคโนโลยีพลังงานหนึ่งๆมาใช้ แม้ว่าจะมีความล้ำสมัย สะอาด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพียงใด หากมีราคาแพงกว่าของเดิมที่ใช้อยู่ปัจจุบัน ก็คงยากที่จะโน้มน้าวให้ประชาชนส่วนมากเห็นดีเห็นงามไปด้วย ไม่ใช่ว่าพวกเขาไม่ได้รักโลก หรือไม่ห่วงเรื่องสิ่งแวดล้อม แต่ว่าการจะบอกว่าได้โปรดใช้ของที่แพงขึ้นหน่อยเพื่อให้โลกสะอาดขึ้นก็ฟังดูเป็นข้ออ้างที่อาจจะดูหลักลอยไปสักหน่อย วิธีง่ายที่สุดที่จะชวนให้ประชาชนทั่วไปหันมาสนใจการใช้พลังงานทดแทนอย่างจริงจังก็ต้องบอกว่าของใหม่นั้นถูกกว่า

ดังนั้น เพื่อจะแน่ใจว่าเทคโนโลยีพลังงานทดแทนของเรานั้นถูกกว่าไฟฟ้าที่ผลิตอยู่ปัจจุบัน เราจำเป็นจะต้องทำความเข้าใจก่อนว่าโครงสร้างต้นทุนการผลิตไฟฟ้า หรือพลังงานอื่นๆที่ใช้ในครัวเรือนปัจจุบันนั้นเป็นอย่างไร

## 9.1 โครงสร้างต้นทุน

ศาสตร์เรื่องการวิเคราะห์โครงสร้างต้นทุนนั้นมีมานานโขอยู่ เริ่มจากปี ... ซึ่งพลังงานก็นับเป็นผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งซึ่งใช้สามารถจะวิเคราะห์ต้นทุนได้ การแบ่งประเภทต้นทุนนั้นสามารถทำได้อยู่หลายวิธี แล้วแต่จุดประสงค์และการนำไปใช้ประโยชน์ อย่างไรก็ตาม ในหนังสือเล่มนี้เราต้องการศึกษาประเภทของต้นทุน

เพื่อทำความเข้าใจแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆที่เปลี่ยนไป จึงได้เลือกใช้วิธีการจำแนกต้นทุนตามความสัมพันธ์กับระดับของกิจกรรม ซึ่งสามารถสะท้อนความเปลี่ยนแปลงอันขึ้นอยู่กับระดับการผลิต โดยโครงสร้างต้นทุนแบบนี้สามารถแบ่งออกเป็นประเภทดังนี้

1. ต้นทุนคงที่ (Fixed Costs)

เป็นต้นทุนส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงระดับการผลิตหนึ่ง ซึ่งทำให้ต้นทุนต่อหน่วยลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการผลิตมากขึ้น

2. ต้นทุนผันแปร (Variable Costs)

เป็นต้นทุนส่วนที่ต้นทุนรวมมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับการปริมาณการผลิต ในขณะที่ต้นทุนต่อหน่วยยังคงที่

3. ต้นทุนผสม (Mixed Costs)

เป็นต้นทุนที่มีลักษณะของทั้งต้นทุนคงที่และผันแปรผสมกัน สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท

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

## 9.2 มูลค่าเงินตามเวลา (Time Value of Money)}

แนวคิดเรื่องมูลค่าเงินตามเวลานั้นว่าด้วยมูลค่าของเงินที่เปลี่ยนแปลงไป ขึ้นอยู่กับเวลาที่เรารับหรือจ่ายเงินนั้นออกไป ฟังดูอาจจะแปลกๆอยู่สักหน่อย 100 บาทวันนี้ พรุ่งนี้ก็ยังมี 100 บาทอยู่มิใช่หรือ 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

## 9.3 ต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (Levelized Cost of Energy - LCOE)}

ในมุมมองของหน่วยงานควบคุมราคาหรือผู้บริโภค ความสามารถในการทำกำไรหรืออัตราผลตอบแทนของโครงการโรงงานผลิตไฟฟ้าหนึ่งมักจะไม่ใช่อะไรที่น่าสนใจ ราคาต่อหน่วยพลังงานที่ผู้

บริษัทจะต้องจ่ายเป็นต้นทุนที่สามารถนำมาช่วยพิจารณาความเหมาะสมของการเลือกใช้พลังงานทางเลือกเพื่อผลิตไฟฟ้า

$$LCOE = \frac{\text{ผลรวมของต้นทุนที่พิจารณามูลค่าเงินตามเวลา}}{\text{ผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้}} \quad (48)$$

$$= \frac{\sum \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum E_t} \quad (49)$$

$$= \frac{\text{มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุน}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมด}} \quad (50)$$

#### 9.4 อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return - IRR)}

#### 9.5 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value - NPV)

### 10 การพัฒนาอย่างยั่งยืน