

<http://journal.rmutp.ac.th/>

## การจำลองโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงขนาด 500 กิโลวัตต์ ที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม

บัณฑิต จันทร์สว่าง\* และ อาทิตย์ คุณศรีสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 7 มกราคม 2563 แก้ไขบทความ 30 เมษายน 2563 ตอรับบทความ 5 พฤษภาคม 2563

### บทคัดย่อ

โรงไฟฟ้าปล่องลมแดด (Solar Chimney Power Plant, SCPP) ถูกนำเสนอให้เป็นโรงไฟฟ้าทางเลือกใหม่ ซึ่งงานวิจัยโดยทั่วไปนำเสนอว่าในเชิงพาณิชย์ถ้าต้องการสร้างควรจะมีค่าสูงปล่องประมาณ 1 กิโลเมตร ทำให้ก่อสร้างได้ยากและมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูง โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียง (Sloped Solar Chimney Power Plant, SSCPP) มีลักษณะเด่นคือ หลังคาปล่องที่มีความเอียงจะส่งผลให้ระบบสามารถใช้ปล่องที่สั้นกว่า SCPP ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำเมื่อเทียบกับ SCPP นอกจากนี้ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรมในประเทศไทยยังมีศักยภาพพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อออกแบบโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม (Sloped Solar Chimney Power Plant Powered by Industrial Waste Heat, SSCPP-WH) โดยแบบจำลองถูกทำ validation เทียบกับข้อมูลการทดลอง จากนั้นหาขนาดของโรงไฟฟ้าที่ทำให้ LCOE (Levelized Cost of Electricity) มีค่าต่ำที่สุด พบว่า LCOE ต่ำสุดประมาณ 0.14 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง มีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 11 ปี ประสิทธิภาพของระบบประมาณร้อยละ 1.3 และประสิทธิภาพของหลังคาปล่องร้อยละ 36 โดยที่ SSCPP-WH มีพื้นที่หลังคาปล่อง 49,000 ตารางเมตร ความสูงปล่อง 45 เมตร อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดการไหลที่ทางเข้าหลังคาปล่องต่อทางออกหลังคาปล่อง (AR12) เท่ากับ 14 และความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับเท่ากับ 10 เมกกะวัตต์ นอกจากนี้ยังพบว่า ระยะเวลาคืนทุนของ SSCPP ต่ำกว่า SSCPP-WH ในบางกรณี เพื่อให้แน่ใจว่า SSCPP-WH มีระยะเวลาคืนทุนต่ำกว่า SSCPP ความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับต่อความร้อนที่ระบบได้รับจากแสงอาทิตย์ต้องมีค่ามากกว่า 0.34

**คำสำคัญ :** โรงไฟฟ้าปล่องลมแดด; หลังคาปล่องเอียง; พลังงานแสงอาทิตย์; การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 8584 0996, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: chansawang@hotmail.co.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

## Simulation of a 500 kW Sloped Solar Chimney Power Plant Powered by Industrial Waste Heat

Bandit Chansawang\* and Atit Koonsrisuk

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology  
111 University Avenue, Suranaree, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

---

*Received 7 January 2020; Revised 30 April 2020; Accepted 5 May 2020*

### Abstract

The solar chimney power plant (SCPP) has been proposed as a promising alternative power plant. According to the literature, the chimney for commercial-scale SCPPs should be about 1 km high. The construction of these tall chimneys is very challenging and the construction cost is enormous. The sloped solar chimney power plant (SSCPP) is a variation of the SCPP. One of the SSCPP's prominent feature is that its collector is sloped, and then its chimney can be shorter than that of the SCPP. This leads to a lower investment cost of SSCPPs compared with that of SCPPs. Also, previous studies show that the industrial waste heat potential of Thailand is considerable and should be investigated. As a result, this study developed a mathematical model for designing a sloped solar chimney power plant powered by industrial waste heat (SSCPP-WH). The model was justified by validation using experimental data. Then several SSCPPs with different geometrical dimensions were simulated to determine a proper dimension that has the lowest levelized cost of electricity (LCOE). It was found that the LCOE is about 0.14 USD/kWh, the payback period is about 11 years, system efficiency of 1.3% and collector efficiency of 36%. for an SSCPP-WH with a collector area of 49,000 m<sup>2</sup>, chimney height of 45m, flow area ratio between solar collector inlet and solar collector outlet (AR<sub>12</sub>) of 14 and waste heat of 10 MW. It was also found that the payback period of SSCPP with no supplied waste heat is lower than that of some SSCPP-WHs. To make sure that the payback period for the SSCPP-WH is faster than that of SSCPP with no waste heat, a ratio of the supplied waste heat to the absorbed solar energy of the SSCPP-WH must be greater than 0.34.

**Keywords :** Solar Chimney Power Plant; Sloped Collector; Solar Energy; Waste Heat Recovery

---

\* Corresponding Author. Tel.: +669 8584 0996, E-mail Address: [chansawang@hotmail.co.th](mailto:chansawang@hotmail.co.th)

## 1. บทนำ

โรงไฟฟ้าปล่องลมแดด มีส่วนประกอบหลักอยู่ 3 ส่วนคือ หลังคารับแดด ปล่อง และกังหันลม แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีหลักการทำงานคือ หลังคารับแดด (Collector) มีหน้าที่รับรังสีจากดวงอาทิตย์ ส่งผลให้ใต้หลังคารับแดดเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ทำให้อากาศภายใต้หลังคารับแดดมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นอากาศจึงลดลง อากาศจึงลอยตัวสูงขึ้นและไหลออกทางปล่อง (Chimney) เกิดลมภายในระบบหมุนกังหันลม (Turbine) ที่ต่อเข้ากับเจนเนอเรเตอร์ ได้พลังงานไฟฟ้าออกมา โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดเป็นโรงไฟฟ้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และง่ายต่อการจัดการเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าถ่านหิน อย่างไรก็ตาม โรงไฟฟ้าชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำ และปล่องต้องสูงมากหากต้องการผลิตไฟฟ้าในระดับเมกะวัตต์ [1]

โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดถูกนำเสนอโดย Schlaich ในปี ค.ศ. 1968 จากนั้นในปี 1980 ได้มีการสร้างโรงไฟฟ้าขึ้นที่ประเทศสเปน โดยมีความสูงปล่อง 194.6 เมตร รัศมีปล่อง 5.08 เมตร รัศมีหลังคารับแดด 122 เมตร และความสูงเฉลี่ยของหลังคารับแดด 1.85 เมตร ซึ่งสามารถสร้างกำลังไฟฟ้าได้ 50 กิโลวัตต์ [2]

ลักษณะโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดที่อธิบายข้างต้น อาจเรียกว่า โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดที่มีรูปทรงแบบทั่วไป (Conventional Solar Chimney Power Plant, CSCPP) และเนื่องจาก CSCPP มีประสิทธิภาพต่ำจึงมีงานวิจัยเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตของ CSCPP เช่น A. Zandian และ M. Ashjaee [3] ได้นำเสนอการออกแบบและจำลองสำหรับ CSCPP ที่ทำหน้าที่เป็นหอคอยเย็นแบบธรรมชาติ (Hybrid Cooling Tower Solar Chimney, HCTSC) สำหรับโรงไฟฟ้าขนาด 250 เมกะวัตต์ พบว่าเมื่อติดตั้ง HCTSC จะทำให้โรงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.37 สำหรับ Z. Zou และ S. He [4] ได้จำลอง HCTSC พบว่า เมื่อระบบรับความร้อนทั้งจาก Condenser ของโรงไฟฟ้า จะทำให้กังหันลมผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า

กรณีที่ระบบไม่ได้รับความร้อนทั้งประมาณ 20 เท่า และยิ่งพบอีกว่าความร้อนจากแสงอาทิตย์มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบน้อยเมื่อเทียบกับความร้อนที่ได้จาก Condenser ของโรงไฟฟ้า

CSCPP มีข้อจำกัด คือ ต้องสร้างปล่องสูงทำให้มีอุปสรรคในการก่อสร้าง นอกจากนี้ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างปล่องคิดเป็นร้อยละ 25 ของค่าใช้จ่ายในการสร้างทั้งระบบ [5] จึงมีงานวิจัยโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดเพื่อลดความสูงปล่อง ดังนี้ E. Bilgen และ J. Rheault [6] ได้ออกแบบปล่องลมแดดสำหรับภูมิประเทศที่มีละติจูดสูง โดยมีรูปทรงดังรูปที่ 2 หรืออาจเรียกว่า โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคารับแดดเอียง (Sloped Solar Chimney Power Plant, SSCPP) โดยพื้นที่หลังคาเท่ากับ 950,000 ตารางเมตร กำลังไฟฟ้า 5 เมกะวัตต์ พบว่ากรณีที่มีการเอียง Collector สำหรับการติดตั้งบนเนินเขา สามารถทำให้ปล่องมีขนาดสั้นลงได้เมื่อเทียบกับ CSCPP และประสิทธิภาพระบบน้อยกว่าร้อยละ 0.5 และ F. Cao et al. [7] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และออกแบบ SSCPP ที่มีขนาดเพียงพอสำหรับผลิตไฟฟ้า 5 เมกะวัตต์ โดยจำลองภายใต้สภาพอากาศเมืองหลานโจว ประเทศจีน พบว่าตัวแปรที่สำคัญของ SSCPP มีแนวโน้มที่คล้ายกัน และค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งปี A. Koonsrisuk [8] ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประเมินสมรรถนะของ SSCPP ในส่วนของการทดลองสำหรับ SSCPP S. Kalash et al. [9] ทำการทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะของ SSCPP ตลอดทั้งปี พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิบรรยากาศ ส่งอิทธิพลโดยตรงต่อผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหลังคารับแดดกับอุณหภูมิบรรยากาศ

SSCPP มีข้อดีหลายประการจึงมีงานวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบระหว่าง CSCPP กับ SSCPP A. Koonsrisuk [10] ได้เปรียบเทียบสมรรถนะทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่าง CSCPP กับ SSCPP พบว่าสมรรถนะ

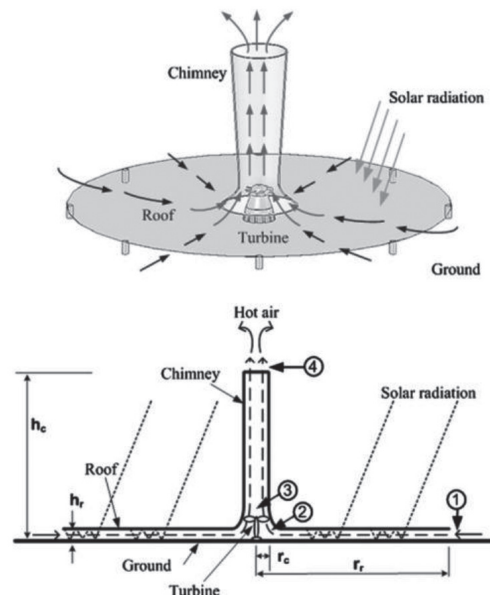
ของ SSCPP ดีกว่า CSCPP พร้อมทั้งแสดงขนาดพื้นที่ของหลังคาปรับแดดที่ดีที่สุด และระบุว่าประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อความสูงของระบบสูงขึ้นทั้ง CSCPP และ SSCPP F. Cao et al. [11] เปรียบเทียบและวิเคราะห์สมรรถนะของ CSCPP และ SSCPP ภายใต้อุณหภูมิประเทศของเมืองหลานโจว ประเทศจีน พบว่า SSCPP ที่มีมุมเอียงของหลังคาปรับแดด 60 องศา พื้นที่หลังคาปรับแดด 950,000 ตารางเมตร จะได้กำลังจากกังหันลมสูงที่สุดและสูงกว่า CSCPP ทั้งนี้ประสิทธิภาพของระบบประมาณร้อยละ 0.8 ด้านค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง X. Zhou et al. [12] ระบุว่า SSCPP จะมีค่าใช้จ่ายในการสร้างปล่องประหยัดกว่า CSCPP แต่จะมีค่าใช้จ่ายในการสร้าง Collector เยี่ยงสูงกว่า CSCPP รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการปรับระดับพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอของภูเขาในกรณีสร้างด้านข้างภูเขา T. P. Fluri et al. [13] วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับ CSCPP ที่มีกำลังการผลิต 100 เมกะวัตต์ และมีขนาดตาม J. Schlaich et al. [14] จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับปล่องประกอบด้วยค่าใช้จ่ายในการสร้างผนังปล่องร้อยละ 80 ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับรากฐานร้อยละ 14 และค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับ Stiffener ร้อยละ 6 และยังระบุว่า LCOE ของระบบเท่ากับ 0.27 ยูโรต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง

ในส่วนมุมเอียงของหลังคาปรับแดดที่เหมาะสมสำหรับ SSCPP E. Bilgen และ J. Rheault [6] แนะนำว่า หากพิจารณารังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบหลังคาปรับแดดที่มากที่สุด มุมเอียงควรจะมีค่าน้อยกว่าละติจูดของภูมิภาคประมาณ 5–7 องศา E. P. Sakonidou et al. [15] ระบุว่าหากพิจารณาอัตราการไหลของอากาศในระบบที่มีค่าสูงสุด มุมเอียงของหลังคาปรับแดดควรจะมีค่ามากกว่าละติจูดของภูมิภาคประมาณ 20–25 องศา ซึ่งข้อมูลของสองงานวิจัยข้างต้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยของ F. Cao et al. [11] ที่พบว่า หากพิจารณาการได้รับรังสีดวงอาทิตย์ของหลังคาปรับแดดมากที่สุดมุมเอียงควรจะมีค่าน้อยกว่าละติจูดของภูมิภาคประมาณ 2–8 องศา และ

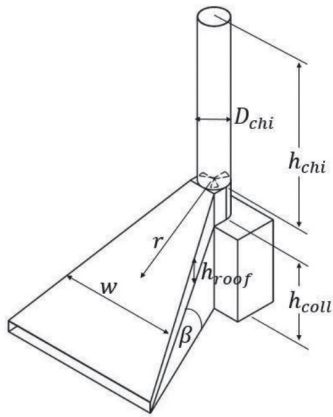
ถ้าพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากที่สุด มุมเอียงของหลังคาปรับแดดควรมีค่ามากกว่าละติจูดของภูมิภาคประมาณ 25–38 องศา

จากข้อมูลข้างต้น พบว่า SSCPP มีข้อที่สำคัญคือ ความสูงปล่องต่ำมากเมื่อเทียบกับ CSCPP และ SCPP จะมีสมรรถนะดีขึ้นถ้ามีการนำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ อีกทั้งระบบมีขั้นตอนการผลิตกระแสไฟฟ้าไม่ซับซ้อน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้อุตสาหกรรมในประเทศไทยยังมีความร้อนทิ้งที่มีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ [16]

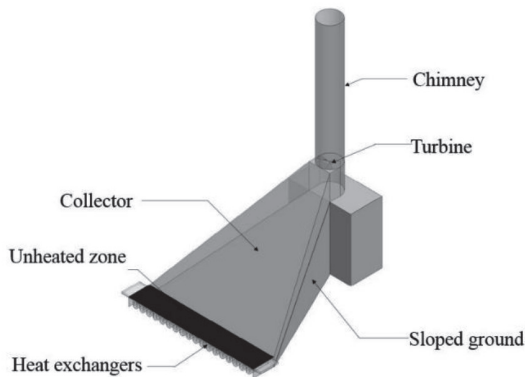
งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงขนาด 500 กิโลวัตต์ ที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรมร่วมกับความร้อนที่ได้รับจากแสงแดด แสดงตั้งรูปที่ 3 โดยมีแนวคิดที่จะลดความสูงปล่อง พร้อมทั้งวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์เพื่อหา Dimension ที่เหมาะสม ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ มีเทคโนโลยีทางเลือกในการสร้างโรงผลิตไฟฟ้าขนาด 500 กิโลวัตต์



รูปที่ 1 แผนภาพโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบทั่วไป (CSCPP) [8]



รูปที่ 2 แผนภาพโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียง (SSCPP)



รูปที่ 3 แผนภาพโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม (SSCPP-WH)

โดยที่  $Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสู่อากาศที่ไหลผ่าน และกำหนดให้ตำแหน่งทางเข้าหลังคารับแดด (ทางออกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน) ทางออกหลังคารับแดด ทางออกของกังหันลม และ ทางออกปล่อง คือ Subscripts ‘1’, ‘2’, ‘3’ และ ‘4’ ตามลำดับ หรือสามารถดูจากรูปที่ 1

เมื่ออากาศไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดการสูญเสียความดัน ดังนั้นความดันของอากาศตำแหน่งที่ 1 สามารถคำนวณได้ดังนี้ [4]

$$p_1 = p_a - K \frac{1}{2} \rho_a V_a^2 \quad (2)$$

โดยที่  $K$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยอ้างอิงมาจาก Z. Zou และ S. He [4] ซึ่งเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Fin Tube

## 2.2 รังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนผิวเอียง

ข้อมูลเกี่ยวกับค่ารังสีดวงอาทิตย์ของภูมิภาคประเทศเป็นค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนผิวยาว แต่งานวิจัยนี้มีการเอียงหลังคารับแดด จึงต้องมีแบบจำลองที่ใช้ปรับค่ารังสีที่แผ่ลงบนผิวยาวเป็นค่ารังสีที่แผ่ลงบนผิวเอียง ดังนี้ [17]

รังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนผิวยาวประกอบไปด้วย Beam Radiation และ Diffuse Radiation ดังนี้

$$I_{hor} = I_b + I_d \quad (3)$$

ในส่วนของรังสีที่แผ่ลงบนผิวเอียงประกอบไปด้วย Beam Radiation, Diffuse Radiation และ Reflect Radiation ดังนี้

$$I_t = I_{t,b} + I_{t,d} + I_{t,r} \quad (4)$$

เมื่อ  $I_{t,b}$ ,  $I_{t,d}$  และ  $I_{t,r}$  สามารถคำนวณได้จาก

## 2. แบบจำลองคณิตศาสตร์

### 2.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อพิจารณารูปที่ 3 อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$T_1 = T_a + \frac{Q}{\dot{m}c_p} \quad (1)$$

$$I_{t,b} = I_b R_b \quad (5)$$

$$I_{t,d} = I_d R_d \quad (6)$$

$$I_{t,r} = \rho_g I_{hor} R_r \quad (7)$$

ซึ่งรายละเอียดของการคำนวณหา  $I_b$  และ  $I_d$  สามารถพบได้ใน [17] และค่า  $R_b$ ,  $R_d$  และ  $R_r$  คือ อัตราส่วนระหว่างรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนพื้นเอียงต่อรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนพื้นราบ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (8)$$

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (9)$$

$$R_r = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (10)$$

โดยที่  $\beta$  คือ มุมเอียงของพื้นดินดังรูปที่ 2  $\delta$ ,  $\varphi$  และ  $\omega$  คือ Declination Angle ละติจูดของภูมิประเทศ และ Hour Angle ตามลำดับ

เมื่อแทนสมการที่ (5) – (7) ลงในสมการที่ (4) จะได้สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่ารังสีที่แผ่ลงบนผิวเอียงดังนี้

$$I_t = (I_{hor} - I_d) R_b + I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho_g I_{hor} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (11)$$

### 2.3 หลังคาปรับแดด

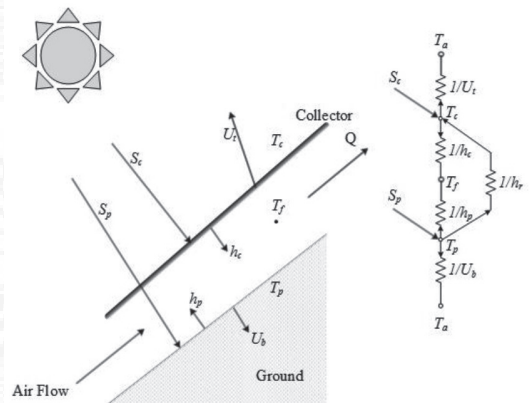
งานวิจัยที่สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เกี่ยวกับโรงไฟฟ้าปล่องลมแดด ส่วนใหญ่จะกำหนดให้ประสิทธิภาพหลังคาปรับแดดเป็นค่าคงที่ แต่งานวิจัยนี้ต้องการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพหลังคาปรับแดด ซึ่งจะทำให้แบบจำลองมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น การสร้างแบบจำลองจะพิจารณาความร้อนที่หลังคาปรับแดดได้รับจากดวงอาทิตย์ และความร้อนที่หลังคาปรับแดดสูญเสีย

ความร้อนที่หลังคาได้รับจากดวงอาทิตย์ก็คือค่ารังสีที่แผ่ลงบนพื้นเอียงในหัวข้อที่ 2.2 จากนั้นจำลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนสำหรับหลังคาปรับแดดและพื้นดิน ซึ่งค่ารังสีที่ถูกดูดซับโดยพื้นผิวหลังคาปรับแดดและพื้นผิวดินคำนวณโดยใช้แบบจำลองอย่างง่ายดังนี้ [18]

$$S_c = \alpha_c I_t \quad (12)$$

$$S_p = (\tau_c \alpha_p) I_t \quad (13)$$

โดยที่  $S_c$  และ  $S_p$  คือ รังสีที่ถูกดูดซับโดยหลังคาและพื้นดิน ตามลำดับ



รูปที่ 4 แผนภาพสมดุลความร้อนของหลังคาปรับแดด

รูปที่ 4 คือแผนภาพและการสมดุลความร้อนของหลังคาปรับแดด เมื่อพิจารณาจะได้สมการสมดุลความร้อนสำหรับหลังคา คือ

$$S_c + U_i(T_a - T_c) + h_r(T_p - T_c) + h_c(T_f - T_c) = 0 \quad (14)$$

สมการสมดุลความร้อนสำหรับพื้นดิน คือ

$$S_p + U_b(T_a - T_p) + h_r(T_c - T_p) + h_p(T_f - T_p) = 0 \quad (15)$$

และความร้อนที่ระบบสามารถใช้ได้คำนวณได้ดังนี้

$$h_c(T_c - T_f) + h_p(T_p - T_f) = q'' \quad (16)$$

โดยที่

โดยที่

$$Nu_p = 0.15(Ra_p)^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

$$T_f = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (17)$$

และ

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเหนือหลังคา  
รับแดดสามารถคำนวณได้ดังนี้ [19]

$$Ra_p = \frac{g\beta(T_f - T_p)L^3}{\nu\alpha} \quad (25)$$

$$U_t = 2.8 + 3V \quad (18)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากพื้นดิน  
ใต้หลังคาลงสู่ดิน [20] คือ

โดยที่  $V$  คือ ความเร็วลมของภูมิภาค

$$U_b = \frac{2b}{\sqrt{\pi t}} \quad (26)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างหลังคา  
กับพื้นดิน คำนวณได้จาก [19]

โดยที่  $b = \sqrt{k\rho c_p}$  และ  $t$  คือเวลาในรอบวัน

$$h_r = \frac{\sigma(T_c^2 + T_p^2)(T_c + T_p)}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (19)$$

สำหรับการจำลองเกี่ยวกับปล่องลมแตกแบบ  
หลังคาเอียงจะใช้แบบจำลองของ A. Koonsrisuk  
[10] ซึ่งทำนายความดัน และอุณหภูมิ ตำแหน่งที่ 1  
และ 2 ดังนี้

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากหลังคา  
สู่อากาศใต้หลังคาคำนวณได้ดังนี้ [19]

$$p_2 = p_1 - \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)gh_{coll} - \frac{\dot{m}^2}{2\rho_1} \left( \frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) + \frac{\dot{m}q''}{\rho_1 c_p T_1} \int_1^2 \frac{dA_{coll}}{A^2} \quad (27)$$

$$h_c = \frac{Nu_c k_f}{L} \quad (20)$$

โดยที่

$$Nu_c = 0.14(Ra_c)^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

$$T_2 = T_1 - \frac{\dot{m}^2}{2c_p \rho_1^2} \left( \frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) - \frac{gh_{coll}}{c_p} + \frac{q'' A_{coll}}{\dot{m} c_p} \quad (28)$$

และ

$$Ra_c = \frac{g\beta(T_f - T_c)L^3}{\nu\alpha} \quad (22)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากพื้นดิน  
ใต้หลังคาสู่อากาศใต้หลังคาคำนวณได้ดังนี้ [19]

$$h_p = \frac{Nu_p k_f}{L} \quad (23)$$

## 2.4 Junction Box

ในกรณีของการทำ Validation ข้อมูลสำหรับ  
การทำ Validation มาจากผลการทดลองสำหรับ  
SSCPP ที่ไม่มีการติดตั้งกังหันเพื่อกำเนิดกระแสไฟฟ้า  
[9] ดังนั้นความดันตำแหน่งที่ 3 จึงใช้ Bernoulli's  
Equation ในการทำนาย ซึ่งจัดรูปได้ดังนี้

$$p_3 = p_2 - \frac{1}{2}(\rho_2 + \rho_3)gh_{23} - \left( \frac{\dot{m}^2}{2\rho_3 A_3^2} - \frac{\dot{m}^2}{2\rho_2 A_2^2} \right) \quad (29)$$

และอุณหภูมิของอากาศตำแหน่งที่ 3 คำนวณโดยใช้สมการสมดุลพลังงานสามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$\dot{m}c_p(T_2 - T_3) = U_j A_j \left( \frac{T_2 + T_3}{2} - T_a \right) \quad (30)$$

โดยที่  $U_j = U_i$  และกำหนดให้  $(T_2 + T_3)/2$  คือ อุณหภูมิที่ผิวของ Junction Box

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ จำลองเกี่ยวกับ SSCPP ที่มีกำลังการผลิตขนาด 500 กิโลวัตต์ การทำนายความดันและอุณหภูมิตำแหน่งที่ 3 จึงใช้สมการที่ผ่านการทำ Validation มาแล้วในงานวิจัยของ A. Koonsrisuk [10] ดังนี้

$$\dot{W}_{ext} = \frac{\dot{m}}{(\rho_2 + \rho_3)/2} (p_2 - p_3) \quad (31)$$

$$T_3 = T_2 \left( \frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (32)$$

### 2.5 ปล่อง

ผลต่างความดันและอุณหภูมิ ระหว่างตำแหน่งทางเข้ากับทางออกปล่องสามารถคำนวณได้ดังนี้ [21]

$$p_3 = p_4 + \frac{1}{2}(\rho_3 + \rho_4)gh_{chi} + \left( \frac{\dot{m}}{2\rho_3} \right)^2 \left( \frac{1}{A_4^2} - \frac{1}{A_3^2} \right) \quad (33)$$

โดยที่

$$p_4 = p_a \left( 1 - \frac{g}{c_p T_a} (h_{chi} + h_{roof,2} + h_{coll}) \right)^{\frac{c_p}{R}} \quad (34)$$

$$T_4 = T_3 - \frac{\dot{m}^2}{2c_p \rho_3^2} \left( \frac{1}{A_4^2} - \frac{1}{A_3^2} \right) - \frac{g}{c_p} h_{chi} \quad (35)$$

โดยความหนาแน่นตำแหน่งต่าง ๆ สามารถหาได้จากกฎของก๊าซอุดมคติ

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} \quad (36)$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2} \quad (37)$$

$$\rho_3 = \frac{p_3}{RT_3} \quad (38)$$

$$\rho_4 = \frac{p_4}{RT_4} \quad (39)$$

### 2.6 ประสิทธิภาพหลังคาร์บแดด

ประสิทธิภาพหลังคาร์บแดดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{coll} = \frac{q''}{I_t} \quad (40)$$

### 2.7 ประสิทธิภาพระบบ

ประสิทธิภาพระบบสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{system} = \frac{W_{ext}}{I_t A_{coll} + Q} \quad (41)$$

## 3. วิธีการจำลอง

ในการศึกษาจะเป็นการจำลองเพื่อหาแนวทางในการลดความสูงปล่อง พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ส่วนแรกของการจำลองเป็นการหาค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนพื้นเอียงโดยใช้สมการที่ (3) - (11) และหาค่าพลังงานที่หลังคาและพื้นดิน



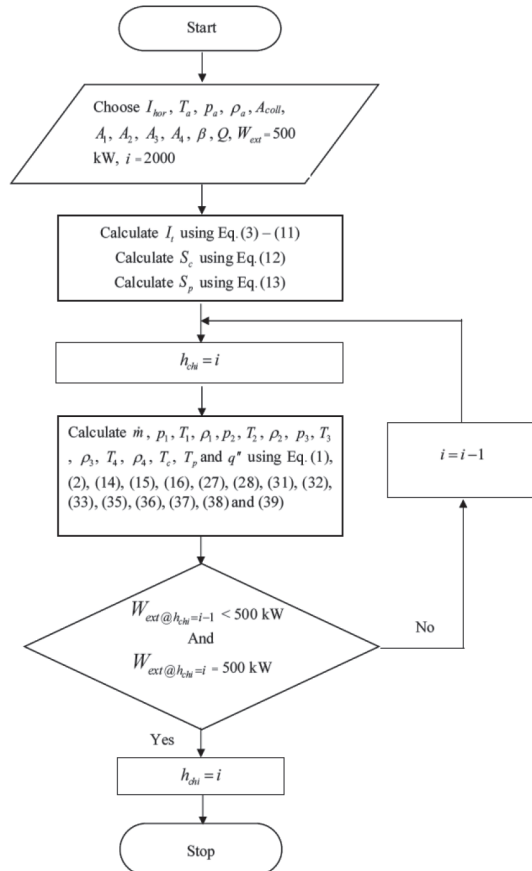
ได้รับจากรังสีดวงอาทิตย์โดยใช้สมการที่ (12) และ (13) ตามลำดับ ถัดจากนั้นแก้สมการที่ (1), (2), (14), (15), (16), (27), (28), (31), (32), (33), (35), (36), (37), (38) และ (39) โดยใช้วิธี Newton – Raphson Method ซึ่งมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ  $p_1, T_1, p_1, p_2, T_2, p_2, p_3, T_3, p_3, T_4, p_4, T_c, T_p, m$  และ  $q''$  เมื่อกำหนดให้  $\dot{W}_{ext} = 500$  กิโลวัตต์ โดย Flowchart ของกระบวนการจำลองแสดงดังรูปที่ 5 และจำลองภายใต้เงื่อนไขสภาพอากาศของอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ที่มีค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีเท่ากับ 622.92 วัตต์ต่อตารางเมตร [22] และอุณหภูมิบรรยากาศ 28 องศาเซลเซียส [23] นอกจากนี้ ในการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อความสูงปล่องสำหรับสร้างกำลังไฟฟ้า 500 กิโลวัตต์ ได้กำหนดให้ Geometry Baseline มีพื้นที่รับแดดเท่ากับ 40,000 ตารางเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง 20 เมตร และมุมเอียงพื้นดิน 45 องศา

#### 4. ผลการจำลองและการอภิปราย

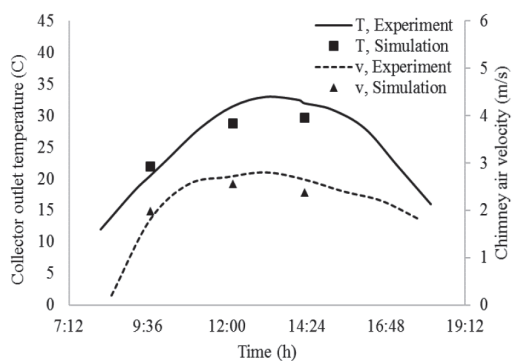
##### 4.1 Model Validation

ในหัวข้อนี้เป็นการทำ Validation เทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ S. Kalash et al [9] ซึ่งทำการทดลองที่เมือง Damascus ประเทศ Syria ณ วันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2555 ซึ่งเป็นฤดูหนาวของภูมิภาค โดยตัวแปรที่ทำการเปรียบเทียบก็คืออุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหลังคารับแดด และความเร็วของอากาศทางเข้าปล่อง ผลการทำ Validation พบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองประมาณร้อยละ 10 แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากในการจำลองใช้ความเร็วลมเฉลี่ยตลอดทั้งเดือน ของเมือง Damascus ทำให้ผลลัพธ์คลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง ขณะที่ผลการทดลองเป็นข้อมูลที่วัดจริง ณ เวลาที่ทำการทดลอง ดังนั้นหากต้องการให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลองมากยิ่งขึ้น ควรมีข้อมูลความเร็วลม

ณ เวลาที่เก็บข้อมูลการทดลองของเมือง Damascus ซึ่งในวารสารที่ใช้อ้างอิงไม่ได้ระบุ



รูปที่ 5 แผนภาพขั้นตอนการจำลอง

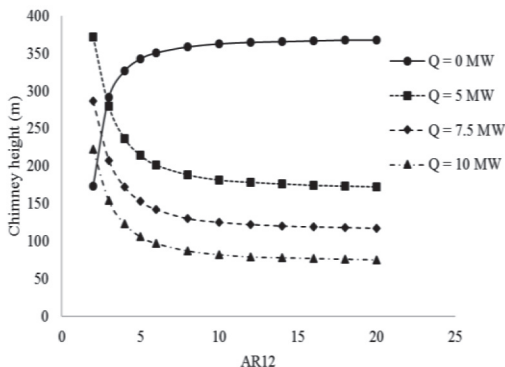


รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ออกจากหลังคารับแดดและความเร็วลมที่ฐานปล่องระหว่างผลการจำลองกับข้อมูลจากการทดลอง

4.2 สมรรถนะของ SSCPP และ SSCPP-WH

4.2.1 อิทธิพลของ AR12

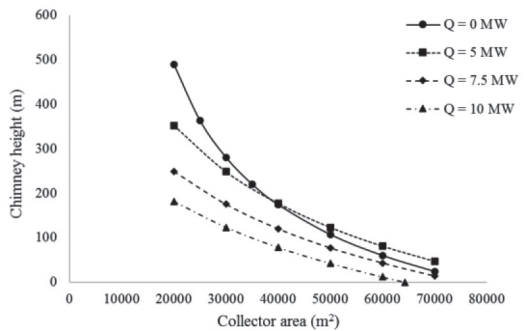
ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดการไหลที่ทางเข้าหลังคารับแดดต่อทางออกหลังคารับแดด (AR12) แสดงดังรูปที่ 7 โดยกำหนดให้มุมเอียงของพื้นเส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง และพื้นที่ที่หลังคารับแดดมีค่าเท่ากับ 45 องศา 20 เมตร และ 40,000 ตารางเมตร ตามลำดับ พบว่า เมื่อ AR12 มีค่าเพิ่มขึ้น SSCPP ( $Q = 0$  เมกกะวัตต์) จะใช้ปล่องที่มีความสูงเพิ่มขึ้น และเมื่อ AR12 เท่ากับ 2 ระบบจะใช้ปล่องสั้นที่สุด เกิดจากการสูญเสียความดันอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดการไหลดังพจน์ที่ 3 ผังขวาของสมการที่ (27) อย่างไรก็ตาม สำหรับ SSCPP ไม่สามารถใช้ค่า  $AR12 = 1$  ได้ เนื่องจากจากการกำหนดค่าดังกล่าวจะส่งผลให้  $m$  มีค่าสูงมาก ทำให้  $T_2 - T_1$  มีค่าติดลบ [8] ในส่วนของ SSCPP-WH ( $Q = 5, 7.5$  และ  $10$  เมกกะวัตต์) จะใช้ปล่องที่มีความสูงลดลง เนื่องจากทางเข้ามีพื้นที่หน้าตัดกว้างขึ้นทำให้ความเร็วของอากาศลดลง ความดันสูญเสียที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีค่าลดลง แต่ทั้งสองกรณีระบบจะใช้ความสูงปล่องค่อนข้างคงที่เมื่อ AR12 มีค่าตั้งแต่ 14 ขึ้นไป ดังนั้น ในหัวข้อถัดไป SSCPP และ SSCPP-WH จึงใช้ค่า AR12 เท่ากับ 2 และ 14 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปล่องกับ AR12 สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนที่ค่าต่าง ๆ

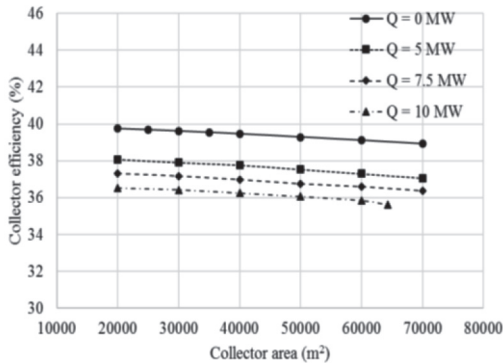
4.2.2 อิทธิพลของ  $A_{coll}$

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของพื้นที่หลังคารับแดด แสดงดังรูปที่ 8 กำหนดให้มุมเอียงของพื้นและเส้นผ่านศูนย์กลางปล่องมีค่าเท่ากับ 45 องศา และ 20 เมตร ตามลำดับ และ AR12 ของ SSCPP และ SSCPP-WH มีค่าเท่ากับ 2 และ 14 ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่า เมื่อเพิ่มพื้นที่หลังคารับแดดส่งผลให้ระบบสามารถใช้ปล่องที่มีความสูงลดลง เนื่องมาจากระบบได้รับพลังงานจากแสงแดดมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ระบบมากขึ้น ระบบสามารถใช้ปล่องที่มีความสูงลดลงได้เช่นกัน นอกจากนี้จะเห็นว่าบางเงื่อนไขไม่จำเป็นต้องใช้ปล่อง และหากเพิ่มพื้นที่หลังคารับแดดมากขึ้นจะสามารถลดการจ่ายความร้อนทิ้ง และลดความเอียงของพื้นได้



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปล่องกับพื้นที่หลังคารับแดด สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนที่ค่าต่าง ๆ

จากขนาดของระบบในรูปที่ 8 เมื่อนำมาหาประสิทธิภาพหลังคารับแดดจะได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพหลังคาร์บแดด

จากรูปที่ 9 พบว่าประสิทธิภาพหลังคาร์บแดดลดลงเมื่อเพิ่มพื้นที่หลังคาร์บแดด เนื่องจากพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นระบบจึงมีโอกาสสูญเสียความร้อนมากขึ้น นอกจากนี้จะเห็นว่า ประสิทธิภาพหลังคาร์บแดดลดลงเมื่อความร้อนที่ระบบได้รับเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากการแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก่อนแล้ว อากาศจึงรับความร้อนจากแสงแดดได้ลดลง ประสิทธิภาพของหลังคาร์บแดดสำหรับระบบที่ไม่นำความร้อนทิ้งมาใช้งานมีค่าประมาณร้อยละ 40 ซึ่งมีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ E. Bilgen และ J. Rheault [6], A. Koonsrisuk [8] และ X. Zhou et al. [12] ที่กำหนดประสิทธิภาพหลังคาร์บแดดเท่ากับร้อยละ 56

#### 4.3 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

การหาค่าใช้จ่ายในการลงทุน จะพิจารณาโดยใช้ขนาดของโรงไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิต 500 กิโลวัตต์ ในรูปที่ 8 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นส่วนหลัก (ความสูงปล่อง และ พื้นที่หลังคาร์บแดด) โดยปริมาณวัสดุและสามารถประเมินได้ดังนี้

ปริมาณเหล็กที่ใช้ก่อสร้างหลังคาร์บแดดต่อพื้นที่หลังคาคิดเป็น 18.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตร [24]

ปริมาณคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับสร้างผนังด้านข้างหลังคาร์บแดด ประเมินโดยกำหนดให้ผนังมีความหนา 0.3 เมตร

ปริมาณคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้สร้างปล่อง ประเมินจากความหนาผนังปล่องโดยให้มีค่าเท่ากับ 0.3 เมตร ในกรณีปล่องสูงไม่เกิน 450 เมตร สำหรับปล่องที่สูงเกิน 450 เมตร ความยาว 450 เมตร นับจากปลายปล่องคิดความหนาผนังปล่องเป็น 0.3 เมตร ส่วนเกินให้เพิ่มความหนาเป็นแบบเชิงเส้นโดยที่ทุก ๆ 1 เมตร ความหนาต้องเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.2545 มิลลิเมตร จนถึงฐานปล่อง [14]

ตารางที่ 1 แสดงราคาต่อหน่วยของวัสดุและอุปกรณ์แต่ละชนิด ในส่วนของค่าขนส่งและรายละเอียดอื่น ๆ สามารถประเมินได้ดังนี้

ค่าก่อสร้างปล่องหลังคาร์บแดดและค่าขนส่งคิดเป็นร้อยละ 100, 25 และ 5 ของราคาวัสดุทั้งหมดตามลำดับ

ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับฐานรากปล่องและ Circumferential Stiffener คิดเป็นร้อยละ 17.5 และ 7.5 ของราคาวัสดุที่ใช้สร้างปล่อง [13]

ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับ PCU (Power Conversion Unit) กำหนดให้มีค่าประมาณ 600 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์

จากข้อมูลข้างต้นสามารถนำมาสร้างเป็นสมการเพื่อหาค่าใช้จ่ายการลงทุนของแต่ละส่วนดังนี้

ค่าใช้จ่ายสำหรับหลังคาร์บแดด คือ

$$C_{coll} = 1.3(A_{coll}C_{glass} + 18.1A_{coll}C_{steel} + V_{wall,coll}C_{RCC}) \quad (42)$$

เมื่อ  $V_{wall}$  คือ ปริมาตรของผนังคอนกรีต

ค่าใช้จ่ายสำหรับปล่อง คือ

$$C_{chi} = 2.3V_{wall,chi}C_{RCC} \quad (43)$$

เมื่อ  $V_{chi}$  คือ ปริมาตรผนังปล่องคอนกรีต และค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบคำนวณได้ดังนี้

$$C_{total} = 1.3(A_{coll}C_{glass} + 18.1A_{coll}C_{steel} + V_{wall,coll}C_{RCC}) + 2.3V_{wall,chi}C_{RCC} + \frac{W_{ext}C_{PCU}}{1000} + 0.03811Q \quad (44)$$

ตารางที่ 1 ราคาวัสดุและอุปกรณ์

Subject/Component	Prices	Unit
Glass	0.482	USD/m <sup>2</sup>
Steel	0.558	USD/kg
Reinforced concrete	133	USD/m <sup>3</sup>
PCU	600	USD/kW
Heat exchanger	38.11	USD/kW

ถัดจากนั้น เมื่อทราบค่าใช้จ่ายทั้งหมดแล้วก็สามารถคำนวณหาค่า Levelized Cost of Electricity (LCOE) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการแบบรายปี กับ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปีของโรงไฟฟ้า โดยค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับค่าดำเนินการและค่าซ่อมบำรุงตลอดอายุโครงการ 25 ปี คำนวณได้ดังนี้ [13]

$$P_{OM} = \frac{A_1}{f-i} \left[ \left( \frac{1+f}{1+i} \right)^N - 1 \right] \quad (45)$$

โดยที่  $A_1$  คือ ค่าดำเนินการและค่าซ่อมบำรุงในปีแรก

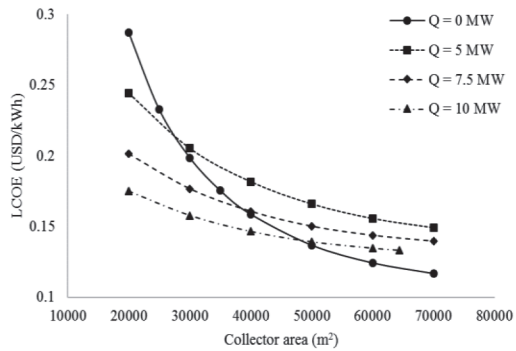
ถัดจากนั้น คำนวณหาเงินลงทุนรายปีของค่าซ่อมบำรุงรวมกับค่าใช้จ่ายในการลงทุน ดังนี้

$$A = (C_{total} + P_{OM}) \left[ \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right] \quad (46)$$

และกำหนดให้ระยะเวลาการทำงานของโรงไฟฟ้าเท่ากับ 2,920 ชั่วโมงต่อปี (8 ชั่วโมงต่อวัน) จะได้

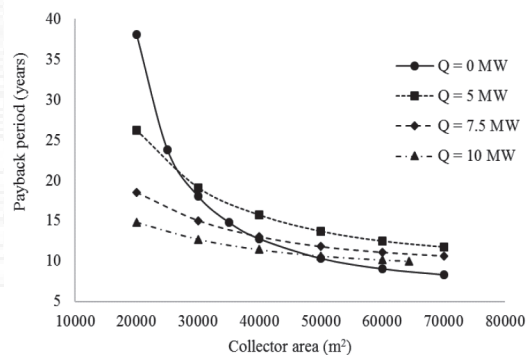
$$LCOE = \frac{A}{APO} \quad (47)$$

โดยที่ APO คือ หน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละปี



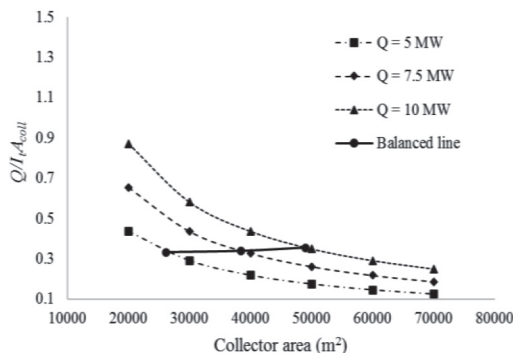
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง LCOE กับพื้นที่หลังคารับแดด สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนที่ค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 10 พบว่า LCOE มีค่าลดลงเมื่อพื้นที่หลังคารับแดดและความร้อนที่ระบบได้รับมีค่ามากขึ้น และเมื่อนำไปหารระยะเวลาคืนทุนโดยกำหนดราคาขายไฟฟ้าต่อหน่วยเท่ากับ 0.189 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าไฟฟ้าที่รัฐรับซื้อจากผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแหล่งผลิตในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ จะได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาคืนทุนกับพื้นที่หลังคารับแดด สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนที่ค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 11 พบว่าระยะเวลาคืนทุนลดลงเมื่อพื้นที่หลังคารับแดดมากขึ้น นอกจากนี้ เมื่อนำข้อมูลในรูปที่ 11 มาหาค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนที่รับต่อปริมาณความร้อนจากดวงอาทิตย์จะได้ดังรูปที่ 12 ซึ่งเมื่อพิจารณาจุดตัดกันของเส้นกราฟระหว่างเส้นของ  $Q = 0$  เมกกะวัตต์ กับเส้นอื่น ๆ ในรูปที่ 11 พบว่าจุดดังกล่าวจะมีอัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนที่รับต่อปริมาณความร้อนจากดวงอาทิตย์ใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่า ถ้าต้องการใช้ SSCPP ที่มีการนำความร้อนทิ้งมาใช้งาน ระบบต้องมีความร้อนทิ้งมากกว่า 0.34 เท่าของปริมาณความร้อนจากดวงอาทิตย์ จึงจะมีระยะเวลาคืนทุนที่ต่ำกว่าระบบที่ไม่นำความร้อนทิ้งมาใช้



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Q/A_{coll}$  กับพื้นที่หลังคารับแดด สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนทิ้งค่าต่างๆ

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบโรงไฟฟ้าปล่องลมแบบหลังคารับแดดเอียงขนาด 500 กิโลวัตต์ ที่ใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้ง โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ในการจำลอง จากผลการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

การศึกษาอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง พื้นที่หน้าตัดการไหลที่ทางเข้าหลังคารับแดดต่อ ทางออกหลังคารับแดด (AR12) พบว่า โรงไฟฟ้าปล่องลมแบบหลังคาเอียงกรณีที่ไม่มีการนำความร้อนทิ้งมาใช้งานและมีการนำความร้อนทิ้งมาใช้งาน ควรจะมีค่า AR12 เท่ากับ 2 และ 14 ตามลำดับ การศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หลังคารับแดดพบว่า ความสูงปล่องสามารถลดลงได้ เมื่อพื้นที่หลังคารับแดดและความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ประสิทธิภาพของหลังคารับแดดสำหรับระบบที่นำความร้อนทิ้งมาใช้งานมีค่าประมาณร้อยละ 36 -38 และประสิทธิภาพหลังคารับแดดจะมีค่าลดลง เมื่อพื้นที่หลังคารับแดดและปริมาณความร้อนทิ้งที่ได้รับเพิ่มขึ้น

โรงไฟฟ้าปล่องลมแบบหลังคาเอียงที่นำความร้อนทิ้งมาใช้งาน ควรจะมีอัตราส่วนระหว่างความร้อนทิ้งที่รับต่อความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์มากกว่า 0.34 จึงจะมีระยะเวลาคืนทุนมากกว่าระบบที่ไม่นำความร้อนทิ้งมาใช้งาน

ระบบที่ได้รับความร้อนทิ้ง 10 เมกกะวัตต์ มีพื้นที่หลังคารับแดดเท่ากับ 49,000 ตารางเมตร ความสูงปล่องเท่ากับ 45 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางปล่องที่ฐาน 20 เมตร มุมเอียงพื้นดิน 45 องศา AR12 เท่ากับ 14 ระบบจะมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 1.3 และค่า LCOE ประมาณ 0.14 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเทียบกับอัตราค่ารับซื้อไฟฟ้าของรัฐสำหรับแหล่งผลิตที่ถูกติดตั้งในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ เท่ากับ 0.189 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง พบว่า ระบบสามารถสร้างกำไรได้ โดยมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 11 ปี

Nomenclature	
$A$	flow area (m <sup>2</sup> )
$A_{coll}$	roof area (m <sup>2</sup> )
$C$	cost (USD), cost per unit (USD/unit)
$c_p$	specific heat capacity at constant pressure (J/kg K)
$D$	diameter (m)
$g$	gravitational acceleration (m/s <sup>2</sup> )
$h$	heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> K), height (m)
$I$	solar irradiation (W/m <sup>2</sup> )
$k$	thermal conductivity (W/mK)
$L$	collector length (m)
$\dot{m}$	mass flow rate, kg/s
$Nu$	Nusselt number
$p$	pressure (Pa)
$q''$	available heat (W/m <sup>2</sup> )
$Q$	industrial waste heat (MW)
$R$	ideal gas constant (J/kg K)
$Ra$	Rayleigh number
$r$	radius (m), collector length (m)
$S$	absorbed solar radiation (W/m <sup>2</sup> )
$T$	absolute temperature (K)
$t$	thickness (m)
$U$	heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> K)
$V$	velocity (m/s)
$\dot{W}_{ext}$	power extracted by turbine (W)
Greek symbols	
$\alpha$	absorptivity, thermal diffusivity
$\beta$	sloped angle, expansion coefficient (1/K)
$\varepsilon$	emittance
$\delta$	declination angle
$\eta$	efficiency

$\varphi$	latitude
$\rho$	density (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_g$	ground reflectance
$\tau$	transmissivity
$\nu$	kinematic viscosity (m <sup>2</sup> /s)
$\omega$	sunset angle
$\gamma$	specific heat ratio
Subscripts	
1	position at collector inlet
2	position at collector outlet
3	position at chimney inlet
4	position at chimney outlet
$b$	bottom, beam radiation
$chi$	chimney
$coll$	collector
$d$	diffuse radiation
$f$	fluid
$c$	collector cover
$hor$	horizontal
$j$	Junction box
$p$	heat shortage layer
$r$	reflect radiation, reduction
$t$	title, top

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] EnviroMission Limited. (2017, December 6). Solar Chimney Power Plant. [Online]. Available: <http://www.enviromission.com.au>
- [2] W. Haaf, "Solar Chimneys: Part II: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant," *International Journal of Solar Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 141-161, Jan. 1984.
- [3] A. Zandian and M. Ashjaee, "The thermal efficiency improvement of a steam Rankine cycle by innovative design of a hybrid cooling tower and a solar chimney concept," *Renewable Energy*, vol. 51, pp. 465-473, Mar. 2013.
- [4] Z. Zou and S. He, "Modeling and characteristics analysis of hybrid cooling-tower-solar-chimney system," *Energy Conversion and Management*, vol. 95, pp. 59-68, May 2015.
- [5] A. Mourtada, A.N. Arkahdan and Y.M. Karout, "Solar chimney electricity from the sun," in *2012 International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*, Beirut, Lebanon, Nov. 2012, pp. 1-8.
- [6] E. Bilgen and J. Rheault, "Solar chimney power plants for high latitudes," *Solar Energy*, vol. 79, no. 5, pp. 449-458, Nov. 2005.
- [7] F. Cao, L. Zhao and L. Guo, "Simulation of a sloped solar chimney power plant in Lanzhou," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 6, pp. 2360-2366, Jun. 2011.
- [8] Koonsrisuk A, "Mathematical modeling of sloped solar chimney power plants," *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 582-589, Nov. 2012.
- [9] S. Kalash, W. Naimeh and S. Ajib, "Experimental investigation of the solar collector temperature field of a sloped solar updraft power plant prototype," *Solar Energy*, vol. 98, pp. 70-77, Dec. 2013.
- [10] A. Koonsrisuk, "Comparison of conventional solar chimney power plants and sloped solar chimney power plants using second law analysis," *Solar Energy*, vol. 98, pp. 78-84, Dec. 2013.
- [11] F. Cao, L. Zhao, H. Li and L. Guo, "Performance analysis of conventional and sloped solar chimney power plants in China," *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, no. 1, pp. 582-592, Jan. 2013.
- [12] X. Zhou, S. Yuan and M.A. dos S. Bernardes, "Sloped-collector solar updraft tower power plant performance," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 66, pp. 798-807, Nov. 2013.
- [13] T. P. Fluri, J. P. Pretorius, C. V. Dyk, T. V. Backström D. G. Kröger and G. P. A. G. V. Zijl, "Cost analysis of solar chimney power plants," *Solar Energy*, vol. 83, no. 2, pp. 246-256, Feb. 2009.
- [14] J. Schlaich, R. Bergemann, W. Schiel and G. Weinrebe, "Sustainable Electricity Generation with Solar Updraft Towers," *Structural Engineering International*,

- vol. 14, no. 3, pp. 225–229, Aug. 2004.
- [15] E. P. Sakonidou, T. D. Karapantsios, A. I. Balouktsis and D. Chassapis, “Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow,” *Solar Energy*, vol. 82, no. 1, pp. 80–94, Jan. 2008.
- [16] *Waste Heat Recovery Guide*, EnConLab. EnConLab, Bangkok, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2017.
- [17] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, Hoboken: John Wiley, 2013.
- [18] M. -H. Huang, L. Chen, Y. -L. He, J. -J. Cao and W. -Q. Tao, “A two-dimensional simulation method of the solar chimney power plant with a new radiation model for the collector,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 85, pp. 100-106, Jul. 2017.
- [19] N.Pasumarthi and S.A.Sherif, “Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model- Part I: Mathematical model development,” *International Journal of Energy Research*, vol. 22, no. 3, pp. 277–288, 1998.
- [20] M. A. dos S. Bernardes, A. Voß and G. Weinrebe, “Thermal and technical analyses of solar chimneys,” *Solar Energy*, vol. 75, no. 6, pp. 511–524, Dec. 2003.
- [21] A. Koonsrisuk and T. Chitsomboon, “Effects of flow area changes on the potential of solar chimney power plants,” *Energy*, vol. 51, pp. 400–406, Mar. 2013.
- [22] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Total radiation potential (Solar power from measurements), 2017.
- [23] The average temperature in each month of each province. (2017, December 7). [Online]. Available: <http://www.e-report.energy.go.th/weather.html>
- [24] F. Cao, H. Li, L. Zhao and L. Guo, “Economic analysis of solar chimney power plants in Northwest China,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, p. 021406, Mar. 2013.