

การออกแบบโรงไฟฟ้าพลังลมแดดแบบหลังคาเอียงที่ใช้ความร้อนทิ้งจาก
อุตสาหกรรม



นายบัณฑิต จันทรสว่าง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**DESIGN OF SLOPED SOLAR CHIMNEY POWER
PLANT POWERED BY INDUSTRIAL
WASTE HEAT**

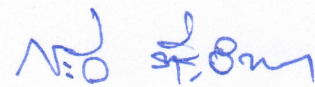


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Suranaree University of technology
Academic Year 2019**

การออกแบบโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม

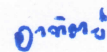
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



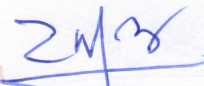
(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำรรค)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.อาทิตย์ คุณศิริสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



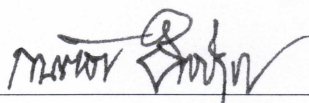
(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

กรรมการ



(ผศ. ดร.พรรษา ลิบลับ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนดัชร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

บัณฑิต จันทร์สว่าง : การออกแบบโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงที่ใช้ความร้อน
ทิ้งจากอุตสาหกรรม (DESIGN OF SLOPED SOLAR CHIMNEY POWER PLANT
POWERED BY INDUSTRIAL WASTE HEAT) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.อาทิตย์ ภูมศรีสุข, 54 หน้า.

โรงไฟฟ้าปล่องลมแดด (solar chimney power plant, SCPP) ผลิตไฟฟ้าโดยใช้ความร้อน
จากแสงอาทิตย์ ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์ถูกดูดซับโดยหลังคาเรียบแดด และเนื่องจาก buoyancy effect ก็
จะทำให้อากาศที่ได้รับความร้อนใต้หลังคาเรียบแดดไหลขึ้นสู่ปล่องที่ติดตั้งอยู่ตรงกลางหลังคาเรียบแดด
พลังงานจลน์จากการไหลของอากาศจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดย turbo-generator ที่ถูกติดตั้ง
ตรงฐานปล่อง โดยทั่วไปปล่องของ SCPP ถูกนำเสนอว่าควรมีความสูงประมาณ 1 km ซึ่งก่อสร้าง
ได้ยากและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างก็สูง โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียง (sloped solar
chimney power plant, SSCPP) มีลักษณะที่แปลกไปจาก SCPP โดยหนึ่งในลักษณะเด่นของ SSCPP
คือหลังคาเรียบแดดที่มีความเอียงจะส่งผลให้ระบบสามารถใช้ปล่องที่สูงกว่า SCPP ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่าย
ในการลงทุนต่ำเมื่อเทียบกับ SCPP นอกจากนี้ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าความร้อนทิ้งจาก
อุตสาหกรรมในประเทศไทยยังมีศักยภาพพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนา
แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อออกแบบโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงที่ใช้ความร้อน
ทิ้งจากอุตสาหกรรม (sloped solar chimney power plant powered by industrial waste heat, SSCPP-
WH) โดยแบบจำลองถูกทำ validation เทียบกับข้อมูลการทดลอง จากนั้นทำการหาขนาดของ
โรงไฟฟ้าที่ทำให้ LCOE (levelized cost of electricity) มีค่าต่ำที่สุด พบว่า LCOE ต่ำสุดประมาณ
0.075 USD/kWh และมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 5 ปี โดยที่ SSCPP-WH มีพื้นที่หลังคาเรียบแดด
49,000 m² ความสูงปล่อง 45 m AR43 เท่ากับ 3 AR12 เท่ากับ 14 และ ความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับ
เท่ากับ 10 MW นอกจากนี้ยังพบว่า ระยะเวลาคืนทุนของ SSCPP ต่ำกว่า SSCPP-WH ในบางกรณี
อันเนื่องมาจากมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและ SSCPP-WH ต้องมีขนาดใหญ่
กว่าเพื่อชดเชยการสูญเสียความดันของอากาศเมื่อไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้น
เพื่อให้แน่ใจว่า SSCPP-WH มีระยะเวลาคืนทุนต่ำกว่า SSCPP ความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับต่อความ
ร้อนที่ระบบได้รับจากแสงอาทิตย์ต้องมีค่ามากกว่า 0.34 ผลการวิจัยยืนยันว่า SSCPP-WH ที่ใช้ปล่อง
รูปทรงบานออก LCOE และระยะเวลาคืนทุนลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับปล่องตรง ซึ่งจาก
ผลการวิจัยพบว่า LCOE และระยะเวลาคืนทุนลดลงประมาณ 50% และ 60% ตามลำดับ เมื่อเทียบ

กับปล่องตรง นอกจากนี้ยังพบว่า มุมเอียงของพื้นดินที่เหมาะสมจะขึ้นกับปริมาณความร้อนที่
ระบบได้รับ



สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2562

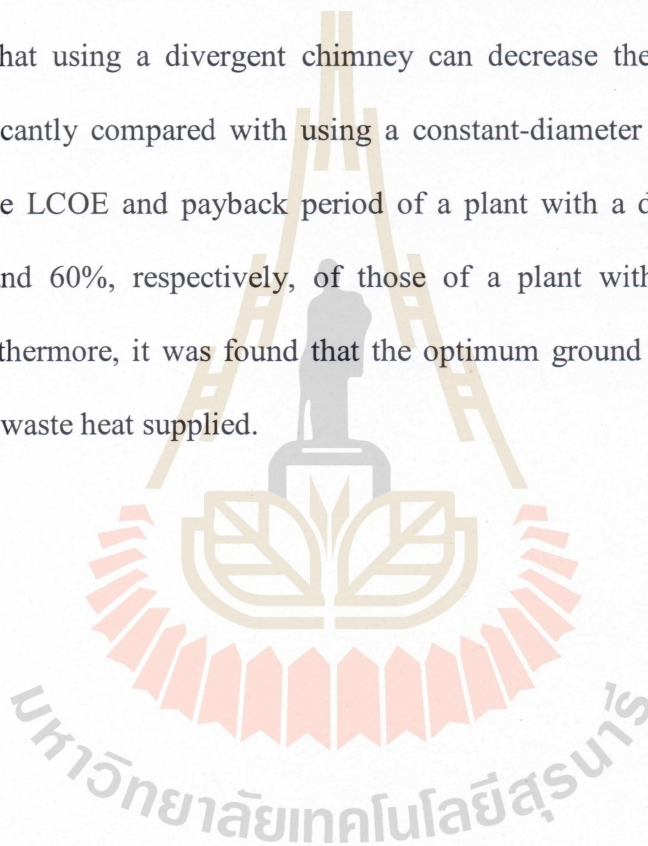
ลายมือชื่อนักศึกษา วัชรวิทย์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อ.ทศพร

BANDIT CHANSAWANG : DESIGN OF SLOPED SOLAR CHIMNEY
POWER PLANT POWERED BY INDUSTRIAL WASTE HEAT. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. ATIT KOONSRIK, Ph.D., 54 PP.

SOLAR CHIMNEY POWER PLANT/ SLOPED COLLECTOR/ SOLAR ENERGY/
WASTE HEAT RECOVERY/ DIVERGENT CHIMNEY

The solar chimney power plant (SCPP) generates electricity through the use of solar thermal power. Solar energy is trapped using a solar collector. Due to the buoyancy effect, the heated air flows up a chimney in the center of the solar collector. The kinetic energy in the flowing air is converted into electrical energy using a turbo-generator installed at the chimney base. Generally, the chimney of SCPPs proposed is 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 the geometrical dimensions of an SSCPP that has the lowest levelized cost of electricity (LCOE). It was found that the LCOE is about 0.075 USD/kWh and the payback period is about 5 years for an SSCPP-WH with a collector area of 49,000 m², chimney height of 45m, AR43 of 3, AR12 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. This is due to an additional investment cost for the heat exchanger installed and for relatively larger plant to compensate the pressure drop across the heat exchanger. 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. It should be emphasized that using a divergent chimney can decrease the LCOE and payback period significantly compared with using a constant-diameter chimney. The results reveal that the LCOE and payback period of a plant with a divergent chimney are about 50% and 60%, respectively, of those of a plant with a constant-diameter chimney. Furthermore, it was found that the optimum ground slope depends on the magnitude of waste heat supplied.



School of Mechanical Engineering

Academic year 2019

Student's Signature วิวัฒน์

Advisor's Signature วิวัฒน์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดจนควบคุม การศึกษาค้นคว้าจนประสบความสำเร็จด้วยดี ผู้ศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุลักษณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอานรรค ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปขันธ์ อาจารย์ ดร.ธีทัต คลวิชัย ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ตลอด ระยะเวลาในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา รวมทั้งบุคคลที่ปรากฏตามเอกสารอ้างอิงที่ผู้ศึกษาใช้อ้างอิง ทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณ เพื่อน พี่ น้องในกลุ่มวิจัย และเพื่อนบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการศึกษาวิจัยจนสำเร็จด้วยดี

ประ โยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ศึกษาวิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแก่ พ่อแม่ ไพร และแม่สมพิศ จันทร์สว่าง ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

บัณฑิต จันทร์สว่าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์ และ คำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิด.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
3 แบบจำลองคณิตศาสตร์และวิธีการจำลอง.....	11
3.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์	11
3.1.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	11
3.1.2 ริงส์ควงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนผิวเอียง	12
3.1.3 หลังคารับแดด	15
3.1.4 Junction box.....	19
3.1.5 ปล่อง.....	20
3.1.6 ประสิทธิภาพหลังคารับแดดและประสิทธิภาพของระบบ	20
3.2 วิธีการจำลอง	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 ผลและการอภิปราย	24
4.1 Model validation	24
4.2 Performance characteristic of SSCPP and SSCPP-WH	25
4.2.1 Effects of $AR12$	25
4.2.2 Effects of A_{coll}	26
4.2.3 Effects of D_{chi}	28
4.2.4 Effects of β	29
4.3 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์	30
4.4 Effect of AR43.....	38
4.5 Sensitivity analysis of discount rate and inflation rate	41
4.6 ระยะเวลาคืนทุนกรณีที่มีการคิดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการสร้างพื้นเอียง ร่วมด้วย	43
5 สรุป	45
รายการอ้างอิง	46
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การประเมินราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	50
ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	52
ประวัติผู้เขียน.....	54

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อมูลเชิงเทคนิคสำหรับ CSCPP โดย Zhou <i>et al.</i> (2007) และ Kasaeian <i>et al.</i> .2011(..... 6
2.2	การเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยของ A. Zandian <i>et al.</i> (2013) กับ Zheng Zou <i>et al.</i> .2015(..... 7
3.1	ข้อมูลสภาพอากาศและคุณสมบัติของวัสดุ 14
3.2	รูปทรงพื้นฐานสำหรับการศึกษานี้ 21
3.3	ค่าของตัวแปรสำหรับการจำลองแต่ละหัวข้อในบทที่ 4 23
4.1	ปริมาณวัสดุที่ต้องการสำหรับ 500 kW SSCPP เมื่อ $h_{chi} = 174$ m, $A_{coll} = 40,000$ m ² , $\beta = 45$ degree, $D_{chi} = 20$ m และ $Q = 0$ MW 32
4.2	ราคาวัสดุและอุปกรณ์ 33
4.3	ราคารวมสำหรับ 1MW SSCPP เมื่อ $h_{chi} = 174$ m, $A_{coll} = 40,000$ m ² , $\beta = 45$ degree, $D_{chi} = 20$ m, $Q = 0$ MW and AR12 =2 33
4.4	ขนาดและค่าใช้จ่ายทั้งหมดของ SSCPP-WH ที่ความร้อนทิ้งค่าต่างๆ ที่มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ SSCPP เมื่อ $D = 20$ m, $\beta = 45$ degree และ AR12 =14..... 37

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	โรงไฟฟ้าปล่องลมแควแบบหลังคาเอียงที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม..... 3
2.1	แผนภาพของ CSCPP 5
2.2	องค์ประกอบของระบบ hybrid solar-chimney-cooling-tower..... 7
2.3	แผนภาพของ SSCPP..... 8
3.1	รังสีที่ตกกระทบบนหลังคาที่มีมุมเอียงค่าต่าง ๆ (I_p) สำหรับจังหวัดนครราชสีมา..... 15
3.2	แผนภาพการสมดุลความร้อนของหลังคารับแคว 16
3.3	Flowchart ของขั้นตอนการจำลอง..... 22
4.1	การเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ออกจากหลังคารับแควและความเร็วลมที่ ฐานปล่องระหว่างผลการจำลองกับข้อมูลจากการทดลอง..... 24
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปล่อง กับ AR12 สำหรับระบบที่ได้รับ ความร้อนทิ้งค่าต่าง ๆ..... 25
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปล่อง กับ พื้นที่หลังคารับแคว สำหรับ ระบบที่ได้รับความร้อนทิ้งค่าต่าง ๆ..... 26
4.4	ประสิทธิภาพหลังคารับแคว 27
4.5	ประสิทธิภาพระบบ 28
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปล่อง กับ เส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง สำหรับ ระบบที่ได้รับความร้อนทิ้งค่าต่าง ๆ..... 29
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปล่อง กับ ความเอียงของพื้นดิน สำหรับ ระบบที่ได้รับความร้อนทิ้งค่าต่าง ๆ..... 30
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง LCOE กับ พื้นที่หลังคารับแคว สำหรับระบบ ที่ได้รับความร้อนทิ้งค่าต่าง ๆ..... 35
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำเนินทุน กับ พื้นที่หลังคารับแคว สำหรับ ระบบที่ได้รับความร้อนทิ้งค่าต่าง ๆ..... 36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Q/I_{r_{coll}}$ กับ พื้นที่หลังคาร์บอนสำหรับระบบ ที่ได้รับความร้อนทั้งค่าต่าง ๆ.....	37
4.11 จำนวนร้อยละของราคาส่วนประกอบหลักสำหรับ SSCPPs	38
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิต กับ ความร้อนทั้งที่ระบบได้รับ สำหรับ AR43 ค่าต่าง ๆ.....	39
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาคืนทุน กับ ความร้อนทั้งที่ระบบได้รับ สำหรับ AR43 ค่าต่าง ๆ	39
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง LCOE กับ ความร้อนทั้งที่ระบบได้รับ สำหรับ AR43 ค่าต่าง ๆ	40
4.15 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของ Discount rate.....	42
4.16 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของ Inflation rate	42
4.17 ระยะเวลาคืนทุนสำหรับกรณีที่มีการคิดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการสร้างพื้นเอียง	43
4.18 LCOE สำหรับกรณีที่มีการคิดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการสร้างพื้นเอียง	44
ก.1 ราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากการสำรวจ	51

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	annually, flow area (m^2)
A_{coll}	=	roof area (m^2)
$AR12$	=	ratio of the collector inlet area to the collector outlet area
$AR43$	=	ratio of the chimney outlet area to the chimney inlet area
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^2)
h	=	heat transfer coefficient (W/m^2K), height (m)
I	=	solar irradiation (W/m^2)
k	=	thermal conductivity (W/mK)
L	=	collector length (m)
\dot{m}	=	mass flow rate, kg/s
Nu	=	Nusselt number
p	=	pressure (Pa)
P	=	Present value
q''	=	available heat (W/m^2)
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^2)
T	=	absolute temperature (K)
t	=	thickness (m)
U	=	heat transfer coefficient (W/m^2K)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

V	=	velocity (m/s)
\dot{W}_{ext}	=	power extracted by turbine (W)

Greek symbols

α	=	absorptivity, thermal diffusivity
β	=	sloped angle, expansion coefficient (1/K)
ε	=	emittance
δ	=	declination angle
η	=	efficiency
φ	=	latitude
ρ	=	density (kg/m ³)
ρ_g	=	ground reflectance
τ	=	transmissivity
ν	=	kinematic viscosity (m ² /s)
ω	=	sunset angle
γ	=	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

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

<i>c</i>	=	collector cover
<i>hor</i>	=	horizontal
<i>j</i>	=	Junction box
<i>sys</i>	=	system
<i>p</i>	=	heat shortage layer
<i>r</i>	=	reflect radiation, reduction
<i>t</i>	=	title, top



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้น คุ้ได้จากข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2559) ดังนั้นเพื่อตอบสนองความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มกำลังการผลิตจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล หรือเพิ่มกำลังการผลิตโดยผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เช่น ผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มกำลังการผลิตสำหรับโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีข้อเสียคือเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป อีกทั้งกระบวนการเผาไหม้เป็นกระบวนการที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หากพิจารณาในส่วนของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม นั้นบางภูมิภาคที่ไม่มีลมที่มีศักยภาพพอที่จะผลิตกระแสไฟฟ้า และถ้าพิจารณาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานน้ำพบว่าผลิตได้เฉพาะภูมิภาคที่มีแหล่งน้ำเท่านั้น ส่วนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานทดแทนข้างต้นคือแสงอาทิตย์มีอยู่เกือบทุกภูมิภาคทั่วโลก อีกทั้งเป็นพลังงานสะอาดและมีวิธีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์หลากหลายวิธี หนึ่งในวิธีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ก็คือใช้ปล่องลมแคบซึ่งมีกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ไม่ซับซ้อน แต่ข้อเสียคือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ ทำให้ต้องสร้างขนาดใหญ่ และยังมีข้อจำกัดในด้านการสร้างปล่องสูง ๆ หนึ่งในวิธีที่สามารถลดขนาดของปล่องลงได้ก็คือสร้างหลังคาเรียบแคบให้มีลักษณะเอียง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพไม่สูงขึ้นจากเดิมมากนัก ดังนั้นเพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นในขณะที่ปล่องลมแคบแบบหลังคาเอียงยังมีขนาดเท่าเดิม ปล่องลมแคบแบบหลังคาเอียงจะต้องรับพลังงานความร้อนจากแหล่งอื่นร่วมด้วย จากการสำรวจการทิ้งความร้อนจากอุตสาหกรรม พบว่าความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเกณฑ์ (กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน, 2559) ซึ่งความร้อนที่ปล่อยออกมานั้นยังมีศักยภาพพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์

วิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจที่จะศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งโดยใช้ปล่องลมแคบแบบหลังคาเอียง ซึ่งสามารถนำความร้อนทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ อีกทั้งขั้นตอนการผลิตกระแสไฟฟ้าไม่ซับซ้อน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยในการศึกษาจะมีการ

วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วย ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบแนวทางในการเพิ่มแหล่งกำเนิด กระแสไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบ โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเรียบแคบที่ใช้ความร้อนทิ้งจาก อุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ใช้วิธีการศึกษาเชิงตัวเลข
2. ศึกษาความร้อนทิ้งจากไอเสียของโรงงานอุตสาหกรรม
3. การรับความร้อนจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่รับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ และส่วนที่รับความร้อนจาก heat exchanger
4. ประเภท heat exchanger ที่ใช้ในการจำลองคือ แบบ fin tube
5. ใช้สภาพอากาศของ อ. เมือง จ. นครราชสีมา ในการออกแบบ
6. สมมุติให้มีการก่อสร้าง โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเรียบบนพื้นเอียงข้างภูเขา จึง ไม่มีการคิดค่าใช้จ่ายในการสร้างพื้นเอียง
7. ออกแบบ โรงไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิต 500 kW

1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวคิด

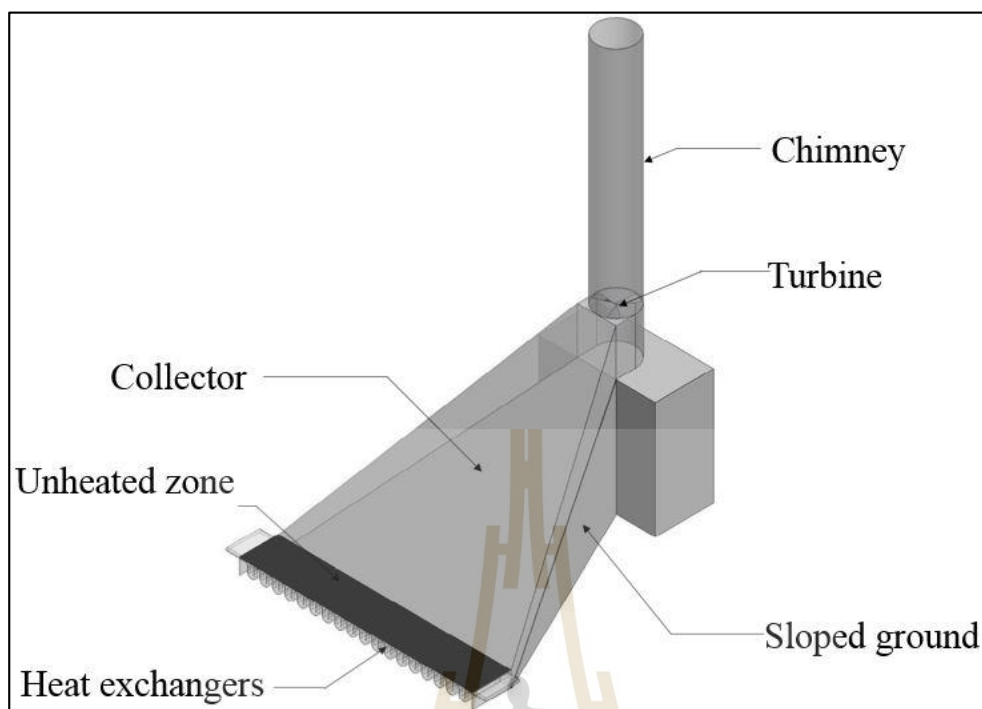
ปัญหาและความต้องการ

1. ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น
2. มีการทิ้งความร้อนที่ยังมีศักยภาพพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์

กรอบแนวคิด

1. เพิ่มแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า
2. มีการนำความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์

วิทยานิพนธ์นี้จึงทำการออกแบบปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงที่ใช้ความร้อนทิ้งจาก อุตสาหกรรม (Sloped solar chimney power plant powered by industrial waste heat, SSCPP-WH). โดยมีแผนภาพดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม

จากรูปที่ 1.1 โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงมีหลักการทำงานคือ รังสีจากดวงอาทิตย์จะแผ่ลงที่หลังคาเรียบแดด จากนั้นภายใต้หลังคาเรียบแดดจะเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ทำให้อากาศภายใต้หลังคาเรียบแดดมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นความหนาแน่นจะลดลงอากาศที่มีความหนาแน่นต่ำจะพยายามลอยตัวสูงขึ้นทำให้เกิดลมภายในระบบและไหลผ่านกังหันลมที่ต่อเข้ากับเจนเนอเรเตอร์เพื่อกำเนิดกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ อากาศที่เข้าสู่ระบบยังไหลผ่าน heat exchanger ช่วยให้อุณหภูมิอากาศภายใต้หลังคาสูงขึ้นจากเดิมซึ่งมีส่วนช่วยให้อากาศมีแรงลอยตัวเพิ่มขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย

- ทราบตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบปล่องลมแดด
- สามารถออกแบบ โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม
- มีแนวทางในการเพิ่มแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนทิ้ง

บทที่ 2

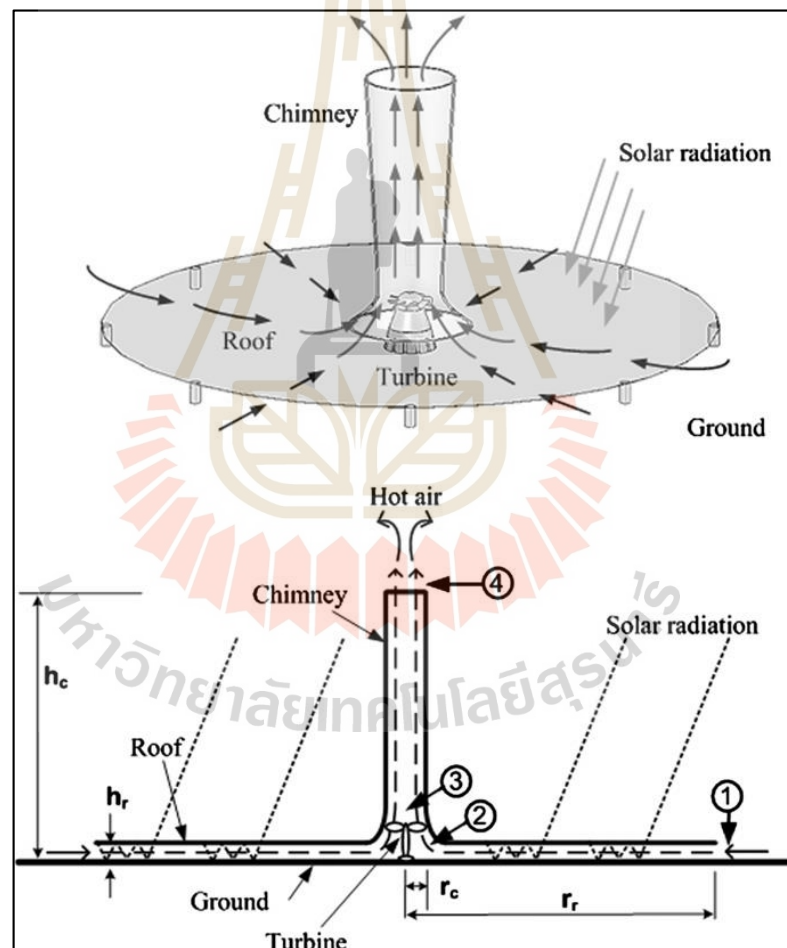
ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความร้อนทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นยังมีศักยภาพพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งมิจานวิจัยที่มีทั้งการนำความร้อนทิ้งมาใช้ในกระบวนการทำความเย็นสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Han *et al.*, 2013) หรือนำความร้อนทิ้งมาใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น H.C. Jung *et al.* (2014) ทำการจำลองเกี่ยวกับการใช้ความร้อนทิ้งจาก condenser ของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิและอัตราการไหล 105 – 140 °C และ 63 - 73.5 kg/s ตามลำดับ โดยนำความร้อนทิ้งมาใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ ORC พบว่าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 250 kW Le *et al.* (2014) ทำการจำลองเกี่ยวกับการใช้ความร้อนทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำร้อนเท่ากับ 150 °C และ 50 kg/s ตามลำดับ โดยนำความร้อนทิ้งมาใช้ใช้ในการบวนการผลิตไฟฟ้าโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ ORC พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่า 1671 kW Mirolli (2005) ได้ออกแบบเกี่ยวกับการใช้ความร้อนทิ้งจากไอเสียของอุตสาหกรรมผลิตปูนที่มีอุณหภูมิและอัตราการไหลเท่ากับ 393 °C และ 155.95 kg/s ตามลำดับ โดยนำความร้อนทิ้งมาใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Kalina Cycle พบว่าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 11,100 kW อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ ORC และ Kalina Cycle ยังคงอาศัยงานในการขับเคลื่อนสารทำงาน อีกทั้งสารทำงานสามารถสร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม

ปล่องลมแดดซึ่งเป็นระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ต้องการเพียงความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในระบบกับอุณหภูมิบรรยากาศ อีกทั้งกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าไม่ซับซ้อน ถูกนำเสนอโดย J. Schlaich ในปี 1968 ต่อมาในปี 1980 ได้มีการทดลองโดยถูกสร้างขึ้นที่ประเทศสเปน มีความสูงของปล่อง 194.6 m รัศมีปล่อง 5.08 m รัศมีหลังคารับแดด 122 m และความสูงเฉลี่ยของหลังคารับแดด 1.85 m ซึ่งสามารถสร้างกำลังไฟฟ้าได้ 50 kW (Haaf, 1984) จากนั้นจึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับปล่องลมแดดที่มีรูปทรงแบบทั่วไป (conventional solar chimney power plant, CSCPP) ลักษณะดังรูปที่ 2.1 โดย Zhou *et al.* (2007) และ Kasaeian *et al.* (2011) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับ CSCPP ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.1 Schlaich *et al.* (2004) และ Koonsrisuk and Chitsomboon (2013) สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับ CSCPP

Bernardes *et al.* (2003) จำลองเกี่ยวกับ CSCPP โดยใช้โปรแกรม TRNSYS พบว่าตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบ CSCPP คือ ความสูงของปล่อง พื้นที่ของหลังคารับแดด และคุณสมบัติของ

วัสดุที่ใช้ทำหลังคารับแดด Maia (2009) ทำการจำลองเกี่ยวกับ CSCPP ระบุว่า ความสูงของปล่องและเส้นผ่านศูนย์กลางปล่องมีความสำคัญมากสำหรับการออกแบบปล่องลมแดด Koonsrisuk and Chitsomboon (2013) ทำการจำลองเกี่ยวกับ CSCPP พบว่า ปล่องที่มีลักษณะบานออกสามารถสร้างกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าปล่องตรง Choi (2016) ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับ CSCPP พบว่า หากใช้น้ำเป็นแหล่งเก็บความร้อนใต้หลังคารับแดด ระบบจะสามารถสร้างกำลังไฟฟ้าได้ทั้งกลางวันและกลางคืน แต่ตอนกลางวันระบบจะสร้างกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่าแหล่งเก็บความร้อนที่เป็นดิน Li *et al.* (2012) ทำการจำลองเกี่ยวกับ CSCPP นำเสนอว่า เมื่อเพิ่มความสูงของปล่องจะทำให้ CSCPP สร้างกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การสร้างปล่องสูง ๆ ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยาก



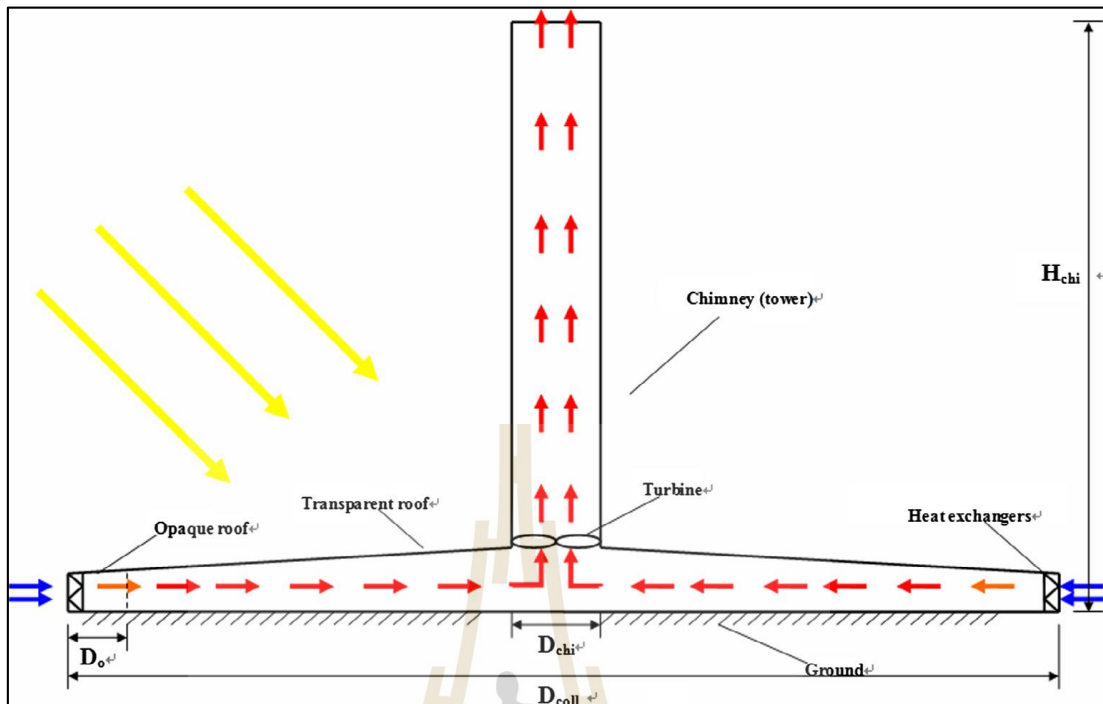
รูปที่ 2.1 แผนภาพของ CSCPP (Koonsrisuk and Chitsomboon, 2013)

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลเชิงเทคนิคสำหรับ CSCPP โดย Zhou *et al.* (2007) และ Kasaeian *et al.* (2011)

Parameter	Kasaeian <i>et al.</i> (2011)	Zhou <i>et al.</i> (2007)
Chimney height (m)	12	8
Chimney diameter (m)	0.25	0.3
Sunroof diameter (m)	10	10
Sunroof entrance height (m)	0.15	0.05
Height of collector (m)	1	0.8
Maximum temperature difference between the collector outlet and the ambient (°C)	26	24.1

เพื่อเพิ่มสมรรถนะของปล่องลมแดดจึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำความร้อนทิ้งจาก condenser ของโรงไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ในปล่องลมแดด Zandian *et al.* (2013) ได้นำเสนอการออกแบบและจำลองสำหรับ CSCPP ที่ทำหน้าที่เป็นหอคอยเย็นแบบธรรมชาติ (hybrid cooling tower solar chimney, HCTSC) สำหรับโรงไฟฟ้าขนาด 250 MW มีลักษณะดังรูปที่ 2.2 โดยมีขนาด HCTSC ดังตารางที่ 2.2 พบว่าเมื่อติดตั้ง HCTSC จะทำให้โรงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น 0.37% จากนั้น Ghorbani *et al.* (2015) ทำการปรับปรุง HCTSC สำหรับโรงไฟฟ้าขนาด 250 MW โดยการฉีดก๊าซร้อนที่ได้มาจากปล่องไอเสียเข้าไปที่ปล่องของ HCTSC พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.538%

Zou *et al.* (2015) ได้จำลอง HCTSC โดยมีขนาดดังตารางที่ 2.2 พบว่าเมื่อระบบรับความร้อนทิ้งจาก condenser ของโรงไฟฟ้า จะทำให้ระบบสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่ากรณีที่ระบบไม่ได้รับความร้อนทิ้งประมาณ 20 เท่า และยังพบอีกว่าความร้อนจากแสงอาทิตย์มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบน้อยเมื่อเทียบกับความร้อนที่ได้จาก condenser ของโรงไฟฟ้า Zou (2012) จำลองเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพที่ติดตั้งหอคอยเย็นแบบ HCTSC ที่ไม่มีการผลิตไฟฟ้า พบว่า HCTSC มีข้อได้เปรียบมากกว่าหอคอยเย็นแบบธรรมชาติสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ จากนั้น Zou (2013) จำลองเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพที่ติดตั้งหอคอยเย็นแบบ HCTSC ที่ไม่มีการผลิตไฟฟ้า โดยหลังการรับแดดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 595 เมตร พบว่าถ้าต้นทุนต่อหน่วยพื้นที่ collector ประมาณ 10, 15 และ 20 USD/m² จะมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 6, 11, และ 17 ปีตามลำดับ ที่ราคาขายไฟฟ้า 0.5 USD/kWh



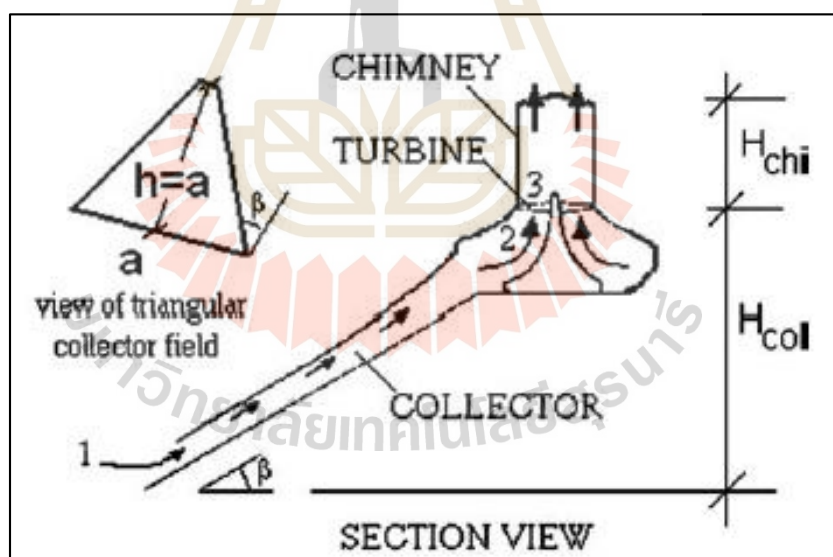
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของระบบ hybrid solar-chimney-cooling-tower (Zou *et al.*, 2015)

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยของ Zandian *et al.* (2013) กับ Zou *et al.* (2015)

Parameter	Zandian <i>et al.</i> (2013)	Zou <i>et al.</i> (2015)	
Ambient air temperature (°C)	22	25	30
Chimney height (m)	200	200	200
Chimney diameter (m)	50	50	50
Sunroof diameter (m)	240	240	240
Sunroof entrance height (m)	9.5	9.5	9.5
Distance between collector and radiator (m)	20	20	20
Turbine elevation above the ground (m)	15	15	15
Solar radiation (W/m ²)	600	600	600
Water inlet temperature(°C)	60-64	60	60
Turbine power output (MW)	3	1.1	0.9

จากตารางที่ 2.2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิบรรยากาศลดลง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองสำหรับ CSCPP ที่ประเทศสเปนซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกัน พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่ามากกว่า CSCPP ที่ประเทศสเปนประมาณ 20 – 60 เท่า นอกจากนี้ ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ เช่น ชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อัตราการไหลของน้ำร้อน เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของ CSCPP คือ ต้องสร้างปล่องสูงเพื่อให้สมรรถนะเพิ่มขึ้น Bilgen *et al.* (2005) จึงได้ออกแบบปล่องลมแคบสำหรับภูมิภาคที่มีละติจูดสูง โดยมีรูปทรงดังรูปที่ 2.3 พบว่ากรณีที่มีการเอียง collector สำหรับการติดตั้งบนเนินเขา สามารถทำให้ปล่องมีขนาดสั้นลงได้ เมื่อเทียบกับปล่องลมแคบแบบทั่วไป Cao *et al.* (2011) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และออกแบบปล่องลมแคบแบบหลังคารับแดดเอียง (sloped solar chimney power plant, SSCPP) ที่มีขนาดเพียงพอสำหรับผลิตไฟฟ้า 5 MW โดยจำลองภายใต้สภาพอากาศเมืองหลานโจว ประเทศจีน พบว่าตัวแปรที่สำคัญของ SSCPP มีแนวโน้มที่คล้ายกัน และค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งปี Koonsrisuk (2012) ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประเมินสมรรถนะของ SSCPP



รูปที่ 2.3 แผนภาพของ SSCPP (E. Bilgen *et al.*, 2005)

ในส่วนของการทดลองสำหรับ SSCPP Kalash *et al.* (2013) ทำการทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะของ SSCPP ตลอดทั้งปี พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิบรรยากาศ ส่งผลต่อผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหลังคารับแดด กับ

อุณหภูมิบรรยากาศ จากนั้น Kalash *et al.* (2014) พบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหลังคารับแดด กับ อุณหภูมิบรรยากาศ มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งปีซึ่งเป็นข้อดีของ SSCPP

SSCPP มีข้อดีหลายประการจึงมีงานวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบระหว่าง CSCPP กับ SSCPP Koonsrisuk (2013) ได้เปรียบเทียบสมรรถนะทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่าง CSCPP กับ SSCPP พบว่าสมรรถนะของ SSCPP ดีกว่า CSCPP พร้อมทั้งแสดงขนาดพื้นที่ของหลังคารับแดด ที่ดีที่สุดและระบุว่าประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อความสูงของระบบสูงขึ้นทั้ง CSCPP และ SSCPP Cao *et al.* (2013a) เปรียบเทียบและวิเคราะห์สมรรถนะของ CSCPP และ SSCPP ภายใต้ภูมิประเทศของเมืองหลานโจว ประเทศจีน พบว่า SSCPP ที่มีมุมเอียงของหลังคารับแดด 60° จะได้กำลังจากกังหันลมสูงที่สุดและสูงกว่า CSCPP นอกจากนี้ Cao *et al.* (2013b) พบว่า SSCPP มีประสิทธิภาพสูงกว่าและผลิตกำลังไฟฟ้าได้ราบรื่นกว่า CSCPP

ด้านเศรษฐศาสตร์ Zhou (2013) ระบุว่า SSCPP จะมีค่าใช้จ่ายในการสร้างปล่องประหยัดกว่า CSCPP แต่จะมีค่าใช้จ่ายการก่อสร้างหลังคาเอียงสูงกว่า CSCPP รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการปรับระดับพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอของภูเขาในกรณี สร้างด้านข้างภูเขา Fluri *et al.* (2009) วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับ CSCPP ที่มีกำลังการผลิต 100 MW และมีขนาดตาม Schlaich *et al.* (2004) จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับปล่องประกอบด้วยค่าใช้จ่ายในการสร้างผนังปล่อง 80% ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับรากฐาน 14% และ ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับ stiffener 6% และยังระบุว่า LCOE ของระบบเท่ากับ 0.27 EUR/kWh

Cao *et al.* (2013c) วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับ CSCPP และ SSCPP ที่มีกำลังการผลิต 5, 30 และ 100 MW โดยค่าก่อสร้างปล่องสำหรับ CSCPP และ SSCPP คิดเป็น 20% และ 25% ของราคาวัสดุที่ใช้สร้างปล่อง ตามลำดับ ค่าดำเนินการและค่าซ่อมบำรุงระบบคือ 162.4 yuan/kW ค่าใช้จ่ายสำหรับ PCU (Power conversion unit) คือ 4110.7 yuan/kW จากการวิเคราะห์พบว่า SSCPP มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่า CSCPP และค่าใช้จ่ายหลักของ SCPPs คือ ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับคอนกรีตและเหล็ก Guo *et al.* (2017) จำลองและวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับ CSCPP ที่มีกำลังการผลิต 10 MW พบว่าระบบมี LCOE เท่ากับ 0.0659 USD/kWh โดยค่าใช้จ่ายสำหรับปล่อง หลังคารับแดด และ PCU เท่ากับ 25.83%, 71.5% และ 2.67% ของค่าใช้จ่ายทั้งระบบ ตามลำดับ Ali (2017) เปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุนระหว่าง CSCPP, SSCPP ที่สร้างปล่องด้วยคอนกรีต และ CSCPP ที่สร้างปล่องด้วยผ้าใบ พบว่าเมื่อกำลังการผลิตเท่ากับ 100 MW และค่าไฟฟ้าเท่ากับ 0.1 USD/kWh ระยะเวลาคืนทุนของ CSCPP ที่สร้างปล่องด้วยผ้าใบ คือ 4.29 ปี CSCPP ที่สร้างปล่องด้วยคอนกรีต คือ 23.47 ปี และ SSCPP ที่สร้างปล่องด้วยคอนกรีต คือ 16.88 ปี

ในส่วนมุมมองของหลังคาปรับแดดที่เหมาะสมสำหรับ SSCPP Bilgen *et al.* (2005) แนะนำว่า หากพิจารณาการได้รับรังสีดวงอาทิตย์ของหลังคาปรับแดดมากที่สุด มุมเอียงควรมีค่าน้อยกว่าละติจูดของภูมิประเทศประมาณ $5^{\circ} - 7^{\circ}$ Sakonidou *et al.* (2008) ระบุว่าหากพิจารณาอัตราการไหลของอากาศในระบบที่มีค่าสูงสุด มุมเอียงของหลังคาปรับแดดควรมีค่ามากกว่าละติจูดของภูมิประเทศประมาณ $20^{\circ} - 25^{\circ}$ ซึ่งข้อมูลของสองงานวิจัยข้างต้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cao *et al.* (2013a) ที่พบว่า หากพิจารณาการได้รับรังสีดวงอาทิตย์ของหลังคาปรับแดดมากที่สุด มุมเอียงควรมีค่าน้อยกว่าละติจูดของภูมิประเทศประมาณ $2^{\circ} - 8^{\circ}$ และถ้าพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากที่สุด มุมเอียงของหลังคาปรับแดดควรมีค่ามากกว่าละติจูดของภูมิประเทศประมาณ $25^{\circ} - 38^{\circ}$

จากข้อมูลข้างต้น พบว่า SSCPP มีข้อดีที่สำคัญคือ ความสูงปล่องต่ำมากเมื่อเทียบกับ CSCPP และ SSCPP จะมีสมรรถนะดีขึ้นถ้ามีการนำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ อีกทั้งระบบมีขั้นตอนการผลิตกระแสไฟฟ้าไม่ซับซ้อน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ อุตสาหกรรมในประเทศไทยยังมีความร้อนทิ้งที่มีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (2559) ได้ระบุว่า ในอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย โรงไฟฟ้าประเภท Combined Cycle, Steam Turbine และ Gas Engine มีอุณหภูมิไอเสียหลังนำกลับมาใช้ใหม่ประมาณ 110 140 และ 180°C ตามลำดับ

วิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจที่จะศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงขนาด 500 kW ที่ใช้ความร้อนทั้งจากอุตสาหกรรมร่วมกับความร้อนที่ได้รับจากแสงแดด (Sloped solar chimney power plant powered by industrial waste heat, SSCPP-WH) แสดงดังรูปที่ 1.1 โดยมีแนวคิดที่จะลดความสูงปล่อง พร้อมทั้งวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์เพื่อหา dimension ที่เหมาะสม ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ มีเทคโนโลยีทางเลือกในการสร้างโรงผลิตไฟฟ้าขนาด 500 kW

บทที่ 3

แบบจำลองคณิตศาสตร์และวิธีการจำลอง

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองเพื่อออกแบบ โรงไฟฟ้าปล่องลมแคดแบบหลังคาเอียงที่ใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้ง (SSCPP-WH) ซึ่งการจำลองระบบจะใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อหาขนาดของโรงไฟฟ้าและปริมาณความร้อนทิ้งที่เหมาะสมสำหรับ SSCPP-WH ที่มีกำลังการผลิต 500 kW จากรูปที่ 1.1 เมื่อพิจารณาการไหลของอากาศภายในระบบจะสามารถสร้างสมการเพื่อทำนายคุณสมบัติของอากาศเมื่อไหลผ่านแต่ละส่วนของระบบและทำนายประสิทธิภาพของระบบได้ดังนี้

3.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์

3.1.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อพิจารณารูปที่ 1.1 อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$T_1 = T_a + \frac{Q}{mc_p} \quad (3.1)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสู่อากาศที่ไหลผ่าน และกำหนดให้ตำแหน่งทางเข้าหลังคารับแคด (ทางออกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน) ทางออกหลังคารับแคด ทางออกของกังหันลม และ ทางออกปล่อง คือ subscripts '1', '2', '3' และ '4' ตามลำดับ หรือสามารถดูจากรูปที่ 2.1

เมื่ออากาศไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดการสูญเสียความดัน ดังนั้นความดันของอากาศตำแหน่งที่ 1 สามารถคำนวณได้ดังนี้ (Zou and He, 2015)

$$p_1 = p_a - K \frac{1}{2} \rho_a V_a^2 \quad (3.2)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยอ้างอิงมาจาก Zou and He (2015) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ fin tube

3.1.2 รังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนผิวเอียง

ข้อมูลเกี่ยวกับค่ารังสีดวงอาทิตย์ของภูมิภาคประเทศเป็นค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนผิวราบ แต่งานวิจัยนี้มีการเอียงหลังคารับแดด จึงต้องมีแบบจำลองที่ใช้ปรับค่ารังสีที่แผ่ลงบนผิวราบเป็นค่ารังสีที่แผ่ลงบนผิวเอียง ดังนี้ (Duffie and Beckman, 2013)

รังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนผิวราบประกอบไปด้วย beam radiation และ diffuse radiation ดังนี้

$$I_{hor} = I_b + I_d \quad (3.3)$$

ในส่วนของรังสีที่แผ่ลงบนผิวเอียงประกอบไปด้วย beam radiation, diffuse radiation และ reflect radiation ดังนี้

$$I_t = I_{t,b} + I_{t,d} + I_{t,r} \quad (3.4)$$

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

$$I_{t,b} = I_b R_b \quad (3.5)$$

$$I_{t,d} = I_d R_d \quad (3.6)$$

$$I_{t,r} = \rho_g I_{hor} R_r \quad (3.7)$$

ซึ่งรายละเอียดของการคำนวณหา I_b และ I_d สามารถพบได้ใน Duffie and Beckman (2013) และค่า R_b , R_d และ R_r คือ อัตราส่วนระหว่างรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนพื้นเอียงต่อรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนพื้นราบ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (3.8)$$

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (3.9)$$

$$R_r = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3.10)$$

โดย β คือ มุมเอียงของพื้นดินดังรูปที่ 2.3 δ , φ และ ω คือ declination angle ละติจูดของภูมิภาค ประเทศ และ hour angle ตามลำดับ มีค่าดังตารางที่ 3.1

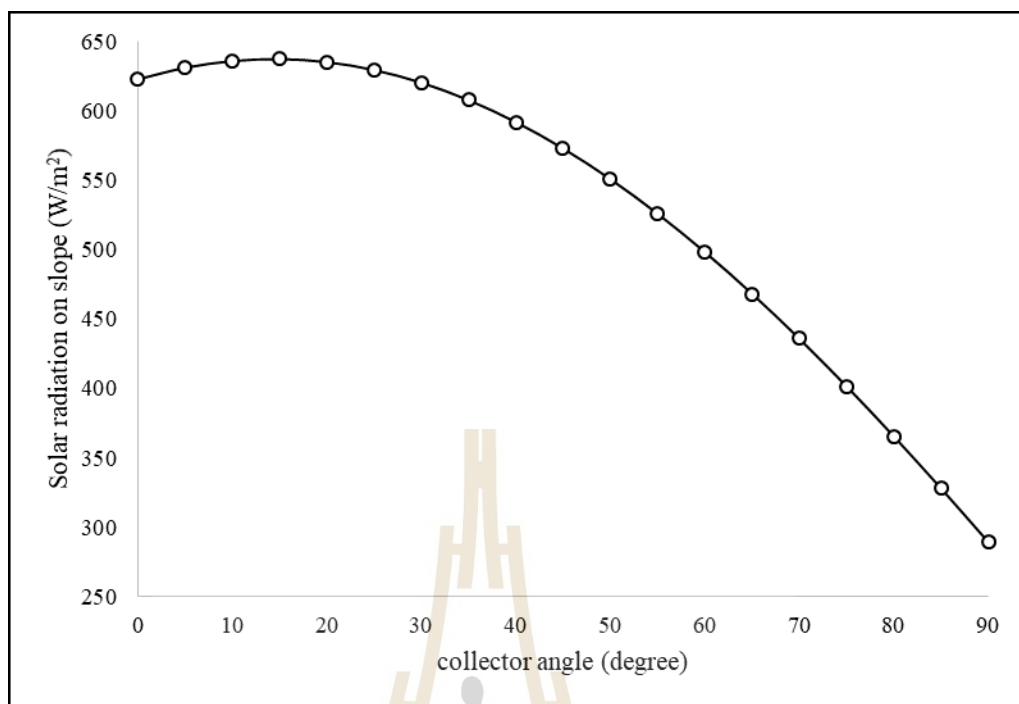
เมื่อแทนสมการที่ (3.5) – (3.7) ลงในสมการที่ (3.4) จะได้สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่ารังสีที่แผ่ลงบนผิวเอียงดังนี้

$$I_t = (I_{hor} - I_d)R_b + I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho_g I_{hor} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3.11)$$

จากชุดสมการข้างต้นเมื่อแทนค่าข้อมูลสภาพอากาศตามตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นการกำหนดให้ข้อมูลสภาพอากาศดังกล่าวเป็นตัวแทนในการทำนายรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนพื้นเอียงเฉลี่ยตลอดทั้งปี โดยค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนพื้นราบ (I_{hor}) คำนวณจากปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ตลอดทั้งปีของจังหวัดนครราชสีมา และทำการเฉลี่ยโดยกำหนดให้มีเวลาในการทำงาน 2920 ชั่วโมงต่อปี (8 ชั่วโมงต่อวัน) เมื่อแก้สมการที่ (3.3) – (3.11) จะได้ค่ารังสีที่ตกกระทบบนหลังคาที่มีมุมเอียงค่าต่างๆ (I_t) สำหรับจังหวัดนครราชสีมาดังรูปที่ 3.1 พบว่ารังสีดวงอาทิตย์มีค่ามากที่สุดเมื่อมุมของผิวเอียงมีค่าใกล้เคียงกับละติจูดของภูมิภาคประเทศ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสภาพอากาศ และคุณสมบัติของวัสดุ (Huang *et al.*, 2017)

Parameter	Value
Solar radiation on horizontal surface, I_{hor} (W/m ²) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)	622.92
Ambient temperature, T_a (K) (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2559)	301
Declination angle, δ (degree)	0
Latitude, φ (degree)	14.97
Hour angle, ω (degree)	-45
Ground reflectance, ρ_g	0.2
Absorptivity of glass, α_c	0.04
Transmissivity of glass, τ_c	0.92
Absorptivity of soil, α_p	0.8
Emittance of glass	0.9
Emittance of soil	0.8
Density of glass (kg/m ³)	2700
Density of soil (kg/m ³)	1900
Specific heat of glass (J/kgK)	840
Specific heat of soil (J/kgK)	2200
Thermal conductivity of glass (W/mK)	0.78
Thermal conductivity of soil (W/mK)	1.83



รูปที่ 3.1 รังสีที่ตกกระทบบนหลังคาที่มีมุมเอียงค่าต่างๆ (I_t) สำหรับจังหวัดนครราชสีมา

3.1.3 หลังคารับแดด

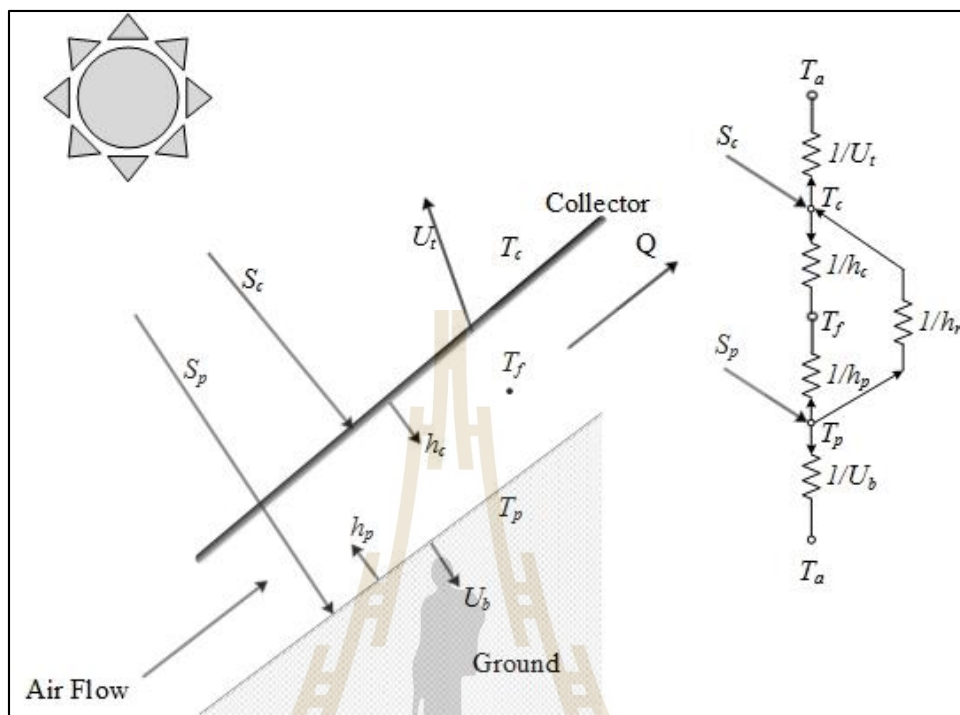
งานวิจัยที่สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เกี่ยวกับโรงไฟฟ้าปล่องลมแดด ส่วนใหญ่จะกำหนดให้ประสิทธิภาพหลังคารับแดดเป็นค่าคงที่ แต่งานวิจัยนี้ต้องการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพหลังคารับแดด ซึ่งจะทำให้แบบจำลองมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น การสร้างแบบจำลองจะพิจารณาความร้อนที่หลังคารับแดดได้รับจากดวงอาทิตย์ และความร้อนที่หลังคารับแดดสูญเสีย

ความร้อนที่หลังคาได้รับจากดวงอาทิตย์ก็คือค่ารังสีที่แผ่ลงบนพื้นเอียงดังรูปที่ 3.1 จากนั้นจำลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนสำหรับหลังคารับแดดและพื้นดิน ซึ่งค่ารังสีที่ถูกดูดซับโดยพื้นผิวหลังรับแดดและพื้นผิวดินคำนวณโดยใช้แบบจำลองอย่างง่ายดังนี้ (Huang, 2017)

$$S_c = \alpha_c I_t \quad (3.12)$$

$$S_p = (\tau_c \alpha_p) I_t \quad (3.13)$$

เมื่อ S_c and S_p คือ รังสีที่ถูกดูดซับโดยหลังคาและพื้นดิน ตามลำดับ ค่าการดูดซับรังสีดวงอาทิตย์และค่าการยอมให้รังสีดวงอาทิตย์ผ่านของหลังคาและพื้นดินแสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 แผนภาพการสมดุลความร้อนของหลังคาเรียบแดด

รูปที่ 3.2 คือแผนภาพและการสมดุลความร้อนของหลังคาเรียบแดด เมื่อพิจารณาจะได้สมการสมดุลความร้อนสำหรับหลังคา คือ

$$S_c + U_i(T_a - T_c) + h_r(T_p - T_c) + h_c(T_f - T_c) = 0 \quad (3.14)$$

สมการสมดุลความร้อนสำหรับพื้นดิน คือ

$$S_p + U_b(T_a - T_p) + h_r(T_c - T_p) + h_p(T_f - T_p) = 0 \quad (3.15)$$

และความร้อนที่ระบบสามารถใช้ได้คำนวณได้ดังนี้

$$h_c(T_c - T_f) + h_p(T_p - T_f) = q'' \quad (3.16)$$

เมื่อ

$$T_f = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (3.17)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเหนือหลังคาเรียบแดดสามารถคำนวณได้ดังนี้
(Pasumarthi and Sherif, 1998)

$$U_t = 2.8 + 3V \quad (3.18)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วลมของภูมิภาค

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างหลังคา กับพื้นดิน คำนวณได้จาก
(Pasumarthi and Sherif, 1998)

$$h_r = \frac{\sigma(T_c^2 + T_p^2)(T_c + T_p)}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (3.19)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากหลังคาสู่อากาศใต้หลังคา คำนวณได้ดังนี้
(Pasumarthi and Sherif, 1998)

$$h_c = \frac{Nu_c k_f}{L} \quad (3.20)$$

เมื่อ

$$Nu_c = 0.14(Ra_c)^{\frac{1}{3}} \quad (3.21)$$

และ

$$Ra_c = \frac{g\beta(T_f - T_c)L^3}{\nu\alpha} \quad (3.22)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากพื้นดินใต้หลังคาสู่อากาศใต้หลังคาคำนวณได้
ดังนี้ (Pasumarthi and Sherif, 1998)

$$h_p = \frac{Nu_p k_f}{L} \quad (3.23)$$

เมื่อ

$$Nu_p = 0.15(Ra_p)^{\frac{1}{3}} \quad (3.24)$$

และ

$$Ra_p = \frac{g\beta(T_f - T_p)L^3}{\nu\alpha} \quad (3.25)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากพื้นดินใต้หลังคาตงสู่ดิน (Bernardes *et al.*,
2003) คือ

$$U_b = \frac{2b}{\sqrt{\pi}} \quad (3.26)$$

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

สำหรับการจำลองเกี่ยวกับปล่องลมแคบแบบหลังคาเอียงจะใช้แบบจำลองของ
Koonsrisuk (2013) ซึ่งทำนายความดัน และอุณหภูมิ ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ดังนี้

$$p_2 = p_1 - \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)gh_{coll} - \frac{\dot{m}^2}{2\rho_1} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) + \frac{\dot{m}q''}{\rho_1 c_p T_1} \int_1^2 \frac{dA_{coll}}{A^2} \quad (3.27)$$

$$T_2 = T_1 - \frac{\dot{m}^2}{2c_p \rho_1^2} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) - \frac{gh_{coll}}{c_p} + \frac{q'' A_{coll}}{\dot{m} c_p} \quad (3.28)$$

โดยประสิทธิภาพหลังการรับแคว้นนิยามตามหัวข้อ 3.1.6.

3.1.4 Junction box

ในกรณีของการทำ Validation ข้อมูลสำหรับการทำ Validation มาจากผลการทดลองสำหรับ SSCPP ที่ไม่มีการติดตั้งกังหันเพื่อกำเนิดกระแสไฟฟ้า (Kalash *et al.*, 2013) ดังนั้นความดันตำแหน่งที่ 3 จึงใช้ Bernoulli's Equation ในการทำนายโดยสามารถซึ่งจัดรูปได้ดังนี้

$$p_3 = p_2 - \frac{1}{2}(\rho_2 + \rho_3)gh_{23} - \left(\frac{\dot{m}^2}{2\rho_3 A_3^2} - \frac{\dot{m}^2}{2\rho_2 A_2^2} \right) \quad (3.29)$$

และอุณหภูมิของอากาศตำแหน่งที่ 3 คำนวณโดยใช้สมการสมดุลพลังงานสามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$\dot{m}c_p(T_2 - T_3) = U_j A_j \left(\frac{T_2 + T_3}{2} - T_a \right) \quad (3.30)$$

เมื่อ $U_j = U_t$ และกำหนดให้ $(T_2 + T_3)/2$ คือ อุณหภูมิที่ผิวของ Junction box

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ จำลองเกี่ยวกับ SSCPP ที่มีกำลังการผลิตขนาด 500 kW การทำนายความดันและอุณหภูมิตำแหน่งที่ 3 จึงใช้สมการที่ผ่านการทำ Validation มาแล้วในงานวิจัยของ Koonsrisuk (2013) ดังนี้

$$\dot{W}_{ext} = \frac{\dot{m}}{(\rho_2 + \rho_3)/2} (p_2 - p_3) \quad (3.31)$$

$$T_3 = T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (3.32)$$

3.1.5 ปล่อง

ผลต่างความดันและอุณหภูมิ ระหว่างตำแหน่งทางเข้ากับทางออกปล่องสามารถคำนวณได้ดังนี้ (Koonsrisuk and Chitsomboon, 2013)

$$p_3 = p_4 + \frac{1}{2}(\rho_3 + \rho_4)gh_{chi} + \left(\frac{\dot{m}}{2\rho_3}\right)^2 \left(\frac{1}{A_4^2} - \frac{1}{A_3^2}\right) \quad (3.33)$$

เมื่อ

$$p_4 = p_a \left(1 - \frac{g}{c_p T_a} (h_{chi} + h_{roof,2} + h_{coll})\right)^{\frac{c_p}{R}} \quad (3.34)$$

$$T_4 = T_3 - \frac{\dot{m}^2}{2c_p \rho_3^2} \left(\frac{1}{A_4^2} - \frac{1}{A_3^2}\right) - \frac{g}{c_p} h_{chi} \quad (3.35)$$

โดยความหนาแน่นตำแหน่งต่างๆ สามารถหาได้จากกฎของก๊าซอุดมคติ

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} \quad (3.36)$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2} \quad (3.37)$$

$$\rho_3 = \frac{p_3}{RT_3} \quad (3.38)$$

$$\rho_4 = \frac{p_4}{RT_4} \quad (3.39)$$

3.1.6 ประสิทธิภาพหลังคาร์บเดตและประสิทธิภาพของระบบ

ประสิทธิภาพหลังคาร์บเดตสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{coll} = \frac{q''}{I_t} \quad (3.40)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบสามารถคำนวณได้ดังนี้

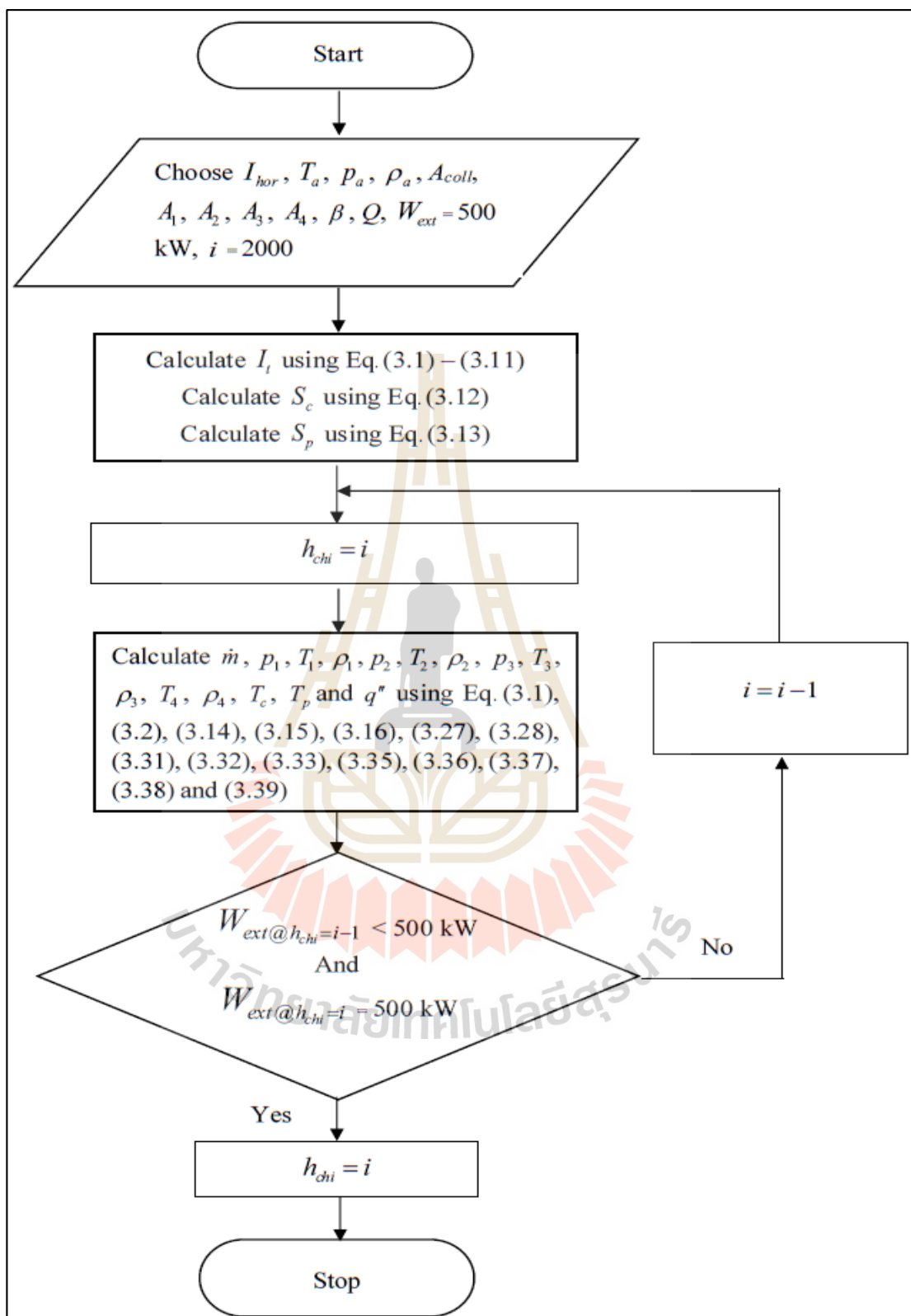
$$\eta_{system} = \frac{W_{ext}}{I_t A_{coll} + Q} \quad (3.41)$$

3.2 วิธีการจำลอง

ในการศึกษาจะเป็นการจำลองเพื่อหาแนวทางในการลดความสูงปล่อง พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ส่วนแรกของการจำลองเป็นการหาค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนพื้นเอียงโดยใช้สมการที่ (3.3) – (3.11) และหาค่าพลังงานที่หลังคาและพื้นดินได้รับจากรังสีดวงอาทิตย์โดยใช้สมการที่ (3.12) และ (3.13) ตามลำดับ ถัดจากนั้นแก้สมการที่ (3.1), (3.2), (3.14), (3.15), (3.16), (3.27), (3.28), (3.31), (3.32), (3.33), (3.35), (3.36), (3.37), (3.38) และ (3.39) โดยใช้วิธี Newton – Raphson method ซึ่งมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ $p_1, T_1, \rho_1, p_2, T_2, \rho_2, p_3, T_3, \rho_3, T_4, \rho_4, T_c, T_p, m$ และ q'' เมื่อกำหนดให้ $\dot{W}_{ext} = 500$ kW โดย flowchart ของกระบวนการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.3 และจำลองภายใต้เงื่อนไขสภาพอากาศของอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ดังตารางที่ 3.1 นอกจากนี้ ในการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อความสูงปล่องสำหรับสร้างกำลังไฟฟ้า 500 kW ได้กำหนดให้ geometry baseline มีขนาดดังตารางที่ 3.2 และการตั้งค่าตัวแปรอื่นๆ ในการจำลองแต่ละกรณีตั้งค่าดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 รูปทรงพื้นฐานสำหรับการศึกษานี้

Parameter	value
Collector area (m ²)	40,000
Chimney diameter (m)	20
Collector angle (degree)	45



รูปที่ 3.3 Flowchart ของขั้นตอนการจำลอง

ตารางที่ 3.3 ค่าของตัวแปรสำหรับการจำลองแต่ละหัวข้อในบทที่ 4

Section	AR12		AR43	A_{coll} (m ²)	D_{chi} (m)	β (degree)	h_{coll} (m)	W_{ext} (kW)
	SSCPP	SSCPP-WH						
4.1 Model validation	0.71	-	1	12.93	0.31	30.9	9	-
4.2 Performance characteristic of SSCPP and SSCPP-WH								
4.2.1 Effects of AR12	x		1	40,000	20	45	y	500
4.2.2 Effects of A_{coll}	2	14	1	x	20	45	y	500
4.2.3 Effects of D_{chi}	2	14	1	40,000	x	45	y	500
4.2.4 Effects of β	2	14	1	40,000	20	x	y	500
4.3 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์	2	14	1	x	20	45	y	500
4.4 Effect of AR43	-	14	x	ตารางที่ 4.4	20	45	ตารางที่ 4.4	y
4.5 Sensitivity analysis of discount rate and inflation rate	-	14	3	26,200	20	45	283	1,321
4.6 ระยะเวลาคืนทุนกรณีที่มีการคิดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการสร้างพื้นเอียงร่วมด้วย	-	14	3	26,200	20	45	283	1,321

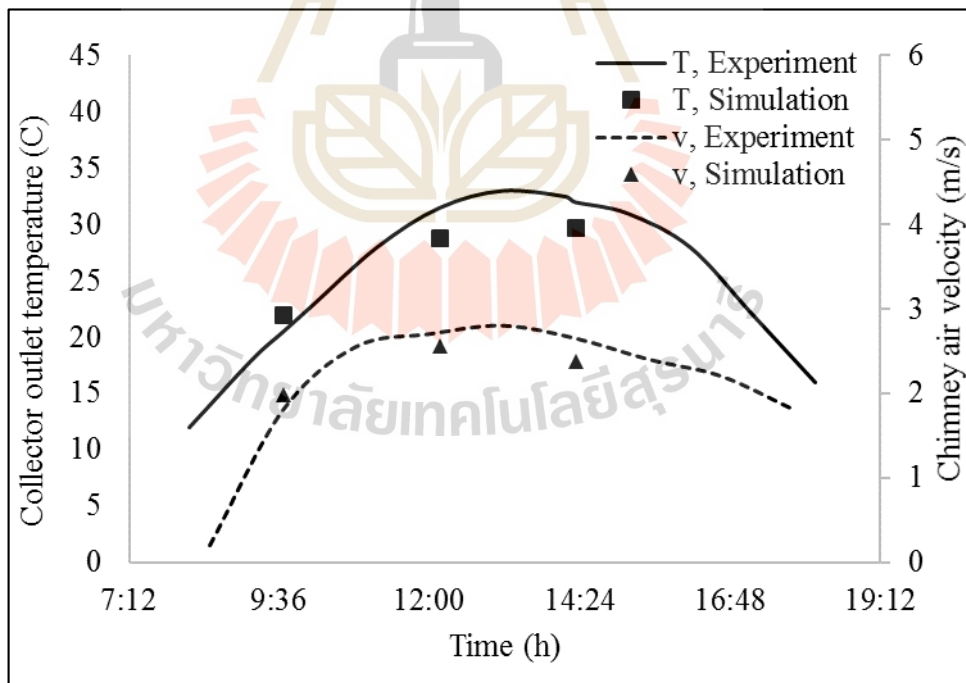
Note: x is independent variable and y is dependent variable

บทที่ 4

ผลการจำลองและการอภิปราย

4.1. Model validation

ในหัวข้อนี้เป็นการทำ validation เทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ Kalash *et al.* (2013) ซึ่งทำการทดลองที่เมือง Damascus ประเทศ Syria ณ วันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2555 ซึ่งเป็นฤดูหนาวของภูมิภาค โดยตัวแปรที่ทำการเปรียบเทียบก็คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหลังคา รั้วแดด และความเร็วของอากาศทางเข้าปล่อง ผลการทำ validation พบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองประมาณ 10% แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากการจำลองใช้ความเร็วลมของภูมิภาคเฉลี่ยตลอดทั้งเดือน ขณะที่ผลการทดลองเป็นข้อมูลที่วัดจริง ณ เวลาที่ทำการทดลอง

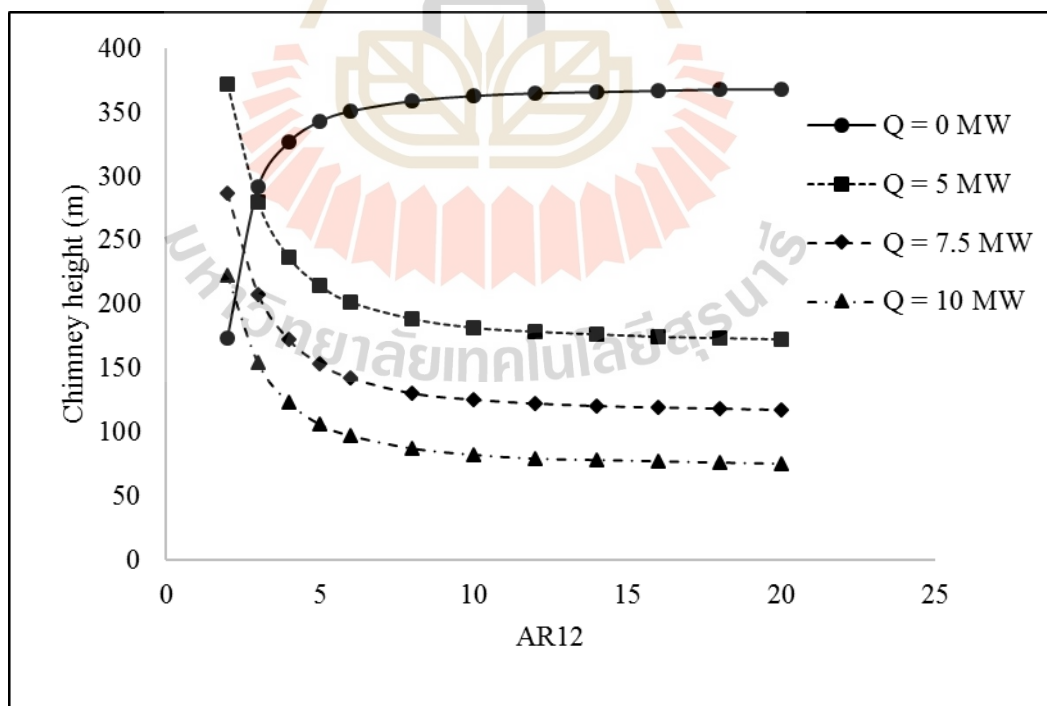


รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ออกจากหลังคารั้วแดดและความเร็วลมที่ฐานปล่องระหว่างผลการจำลองกับข้อมูลจากการทดลอง

4.2 Performance characteristic of SSCPP and SSCPP-WH

4.2.1 Effects of AR_{12}

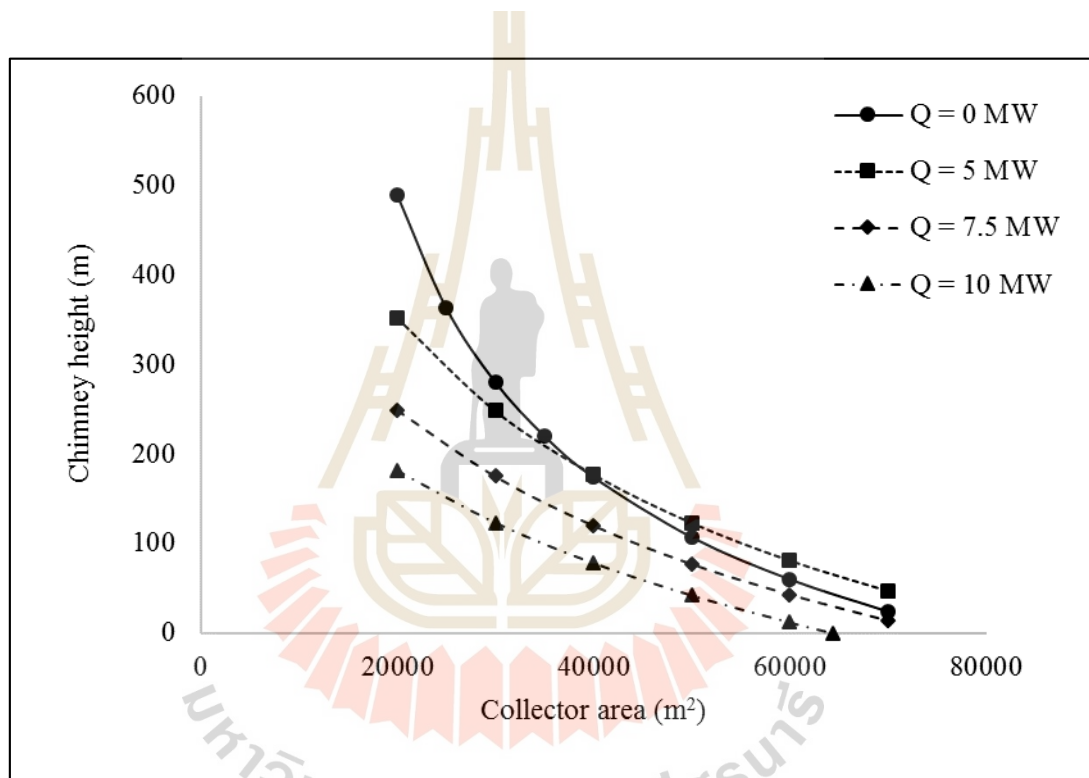
ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดการไหลที่ทางเข้าหลังคาร์บแคด ต่อ ทางออกหลังคาร์บแคด (AR_{12}) แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยกำหนดให้ มุมเอียงของพื้น เส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง และพื้นที่หลังคาร์บแคดมีค่าดังตารางที่ 3.2 พบว่า เมื่อ AR_{12} มีค่าเพิ่มขึ้น SSCPP ($Q = 0$ MW) จะใช้ปล่องที่มีความสูงเพิ่มขึ้น และเมื่อ AR_{12} เท่ากับ 2 ระบบจะใช้ปล่องสั้นที่สุด เกิดจากการสูญเสียความดันอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดการไหลดังพจน์ที่ 3 ฟังก์ชัน ของสมการที่ (3.27) อย่างไรก็ตาม สำหรับ SSCPP ไม่สามารถใช้ค่า $AR_{12} = 1$ ได้ เนื่องมาจากการกำหนดค่าดังกล่าวจะส่งผลให้ m มีค่าสูงมาก ทำให้ $T_2 - T_1$ มีค่าติดลบ (Koonsrisuk, 2012) ในส่วนของ SSCPP-WH ($Q = 5, 7.5$ และ 10 MW) จะใช้ปล่องที่มีความสูงลดลง เนื่องจากทางเข้ามีพื้นที่หน้าตัดกว้างขึ้นทำให้ความเร็วของอากาศลดลง ความดันสูญเสียที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีค่าลดลง แต่ทั้งสองกรณีระบบจะใช้ความสูงปล่องค่อนข้างคงที่เมื่อ AR_{12} มีค่าตั้งแต่ 14 ขึ้นไป ดังนั้น ในหัวข้อถัดไป SSCPP และ SSCPP-WH จึงใช้ค่า AR_{12} เท่ากับ 2 และ 14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปล่อง กับ AR_{12} สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนที่ค่าต่างๆ

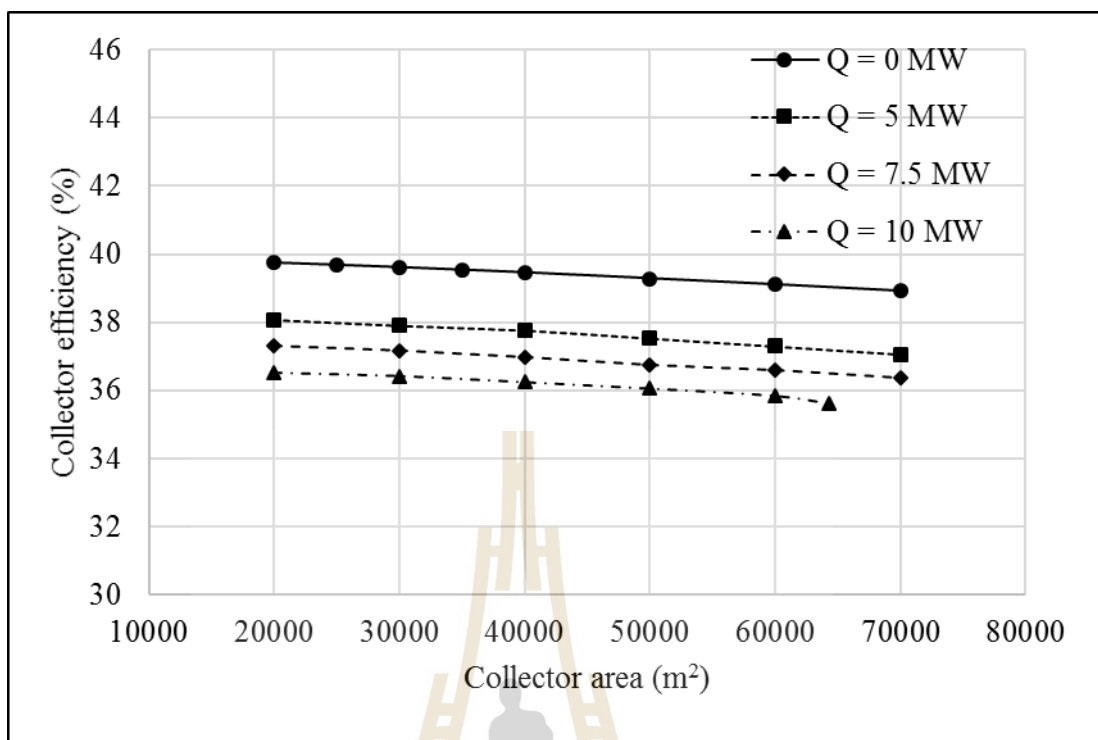
4.2.2 Effects of A_{coll}

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของพื้นที่หลังคาจับแดด แสดงดังรูปที่ 4.3 กำหนดให้มุมเอียงของพื้น และเส้นผ่านศูนย์กลางปล่องมีค่าดังตารางที่ 3.2 โดย AR12 ของ SSCPP และ SSCPP-WH มีค่าเท่ากับ 2 และ 14 ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่า เมื่อเพิ่มพื้นที่หลังคาจับแดดส่งผลให้ระบบสามารถใช้ปล่องที่มีความสูงลดลง เนื่องมาจากระบบได้รับพลังงานจากแสงแดดมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ระบบมากขึ้น ระบบสามารถใช้ปล่องที่มีความสูงลดลงได้เช่นกัน



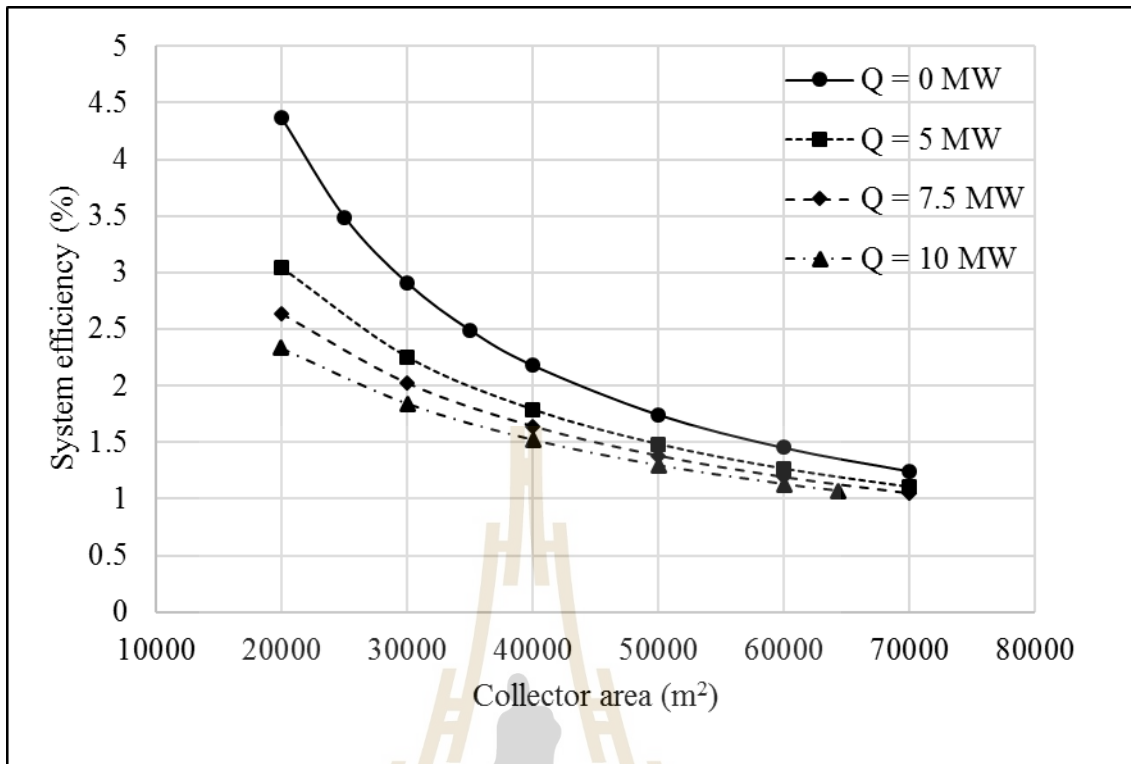
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปล่อง กับ พื้นที่หลังคาจับแดด สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนที่ค่าต่าง ๆ

จากขนาดของระบบในรูปที่ 4.3 เมื่อนำมาหาประสิทธิภาพหลังคาจับแดดและประสิทธิภาพระบบจะได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพหลังคารับแดด

จากรูปที่ 4.4 พบว่าประสิทธิภาพหลังคารับแดดลดลงเมื่อเพิ่มพื้นที่หลังคารับแดด เนื่องจากพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นระบบจึงมีโอกาสสูญเสียความร้อนมากขึ้น นอกจากนี้จะเห็นว่า ประสิทธิภาพหลังคารับแดดลดลงเมื่อความร้อนที่ระบบได้รับเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากการแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก่อนแล้ว อากาศจึงรับความร้อนจากแสงแดดได้ลดลง ประสิทธิภาพของหลังคารับแดดสำหรับระบบที่ไม่นำความร้อนที่ใช้งานมีค่าประมาณ 40% ซึ่งมีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Bilgen and Rheault (2005), Koonsrisuk (2012) และ Zhou *et al.* (2013) ที่กำหนดประสิทธิภาพหลังคารับแดดเท่ากับ 56%

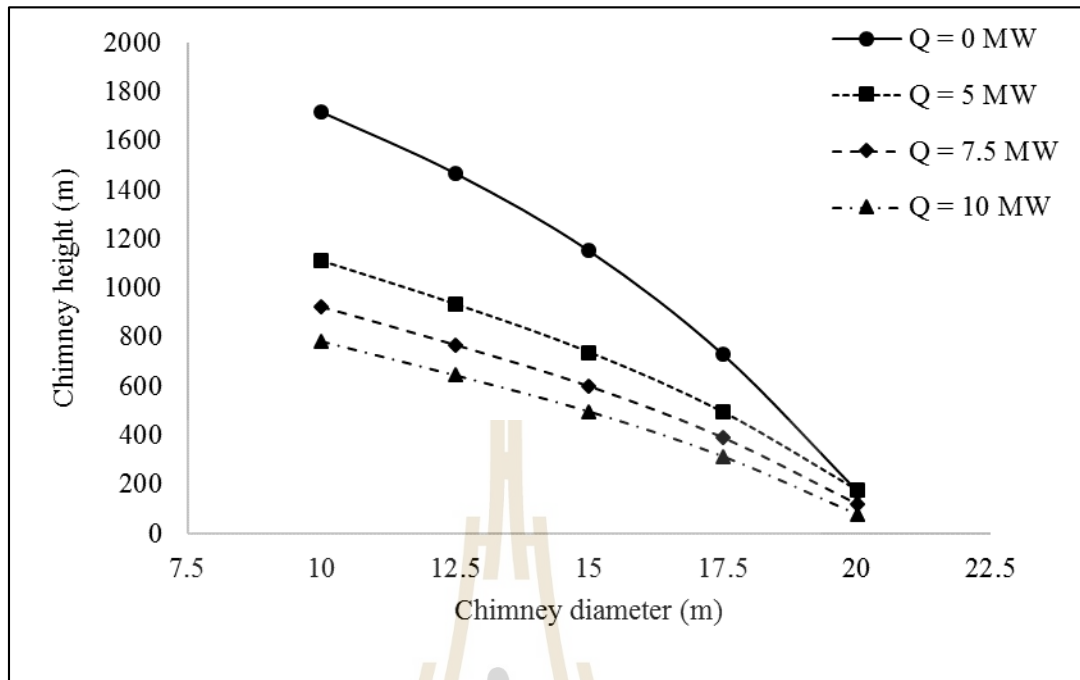


รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพระบบ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพของระบบลดลงเมื่อพื้นที่หลังคาร์บแดดและความร้อนที่ระบบได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากประสิทธิภาพหลังคาร์บแดดลดลง และประสิทธิภาพของปล่องซึ่งขึ้นกับความสูงปล่องก็มีค่าลดลง (Ali, 2017)

4.2.3 Effects of D_{chi}

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง แสดงดังรูปที่ 4.6 กำหนดให้มุมเอียงของพื้น และหลังคาร์บแดดมีค่าดังตารางที่ 3.2 โดย AR12 ของ SSCPP และ SSCPP-WH มีค่าเท่ากับ 2 และ 14 ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางปล่องมากขึ้น ส่งผลให้ความสูงปล่องที่ระบบใช้ลดลง เนื่องจาก m เพิ่มขึ้น ระบบจึงสามารถใช้ปล่องสั้นลงได้อย่างมีนัยสำคัญ

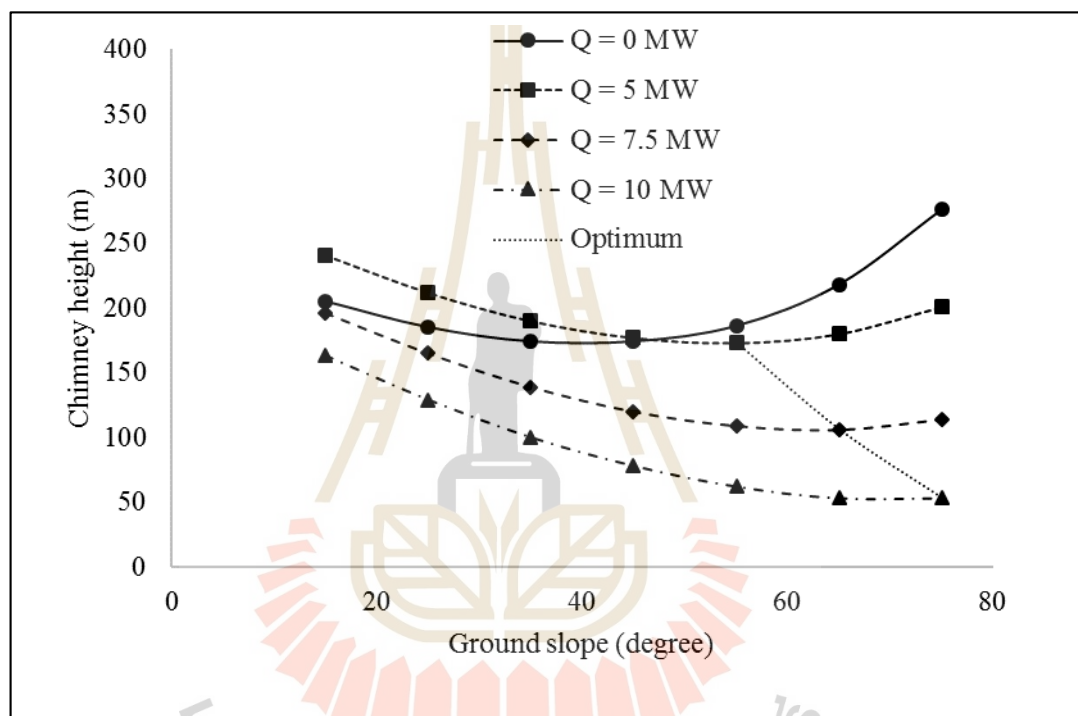


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปล่อง กับ เส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง สำหรับระบบที่ได้รับ ความร้อนที่ค่าต่าง ๆ

4.2.4 Effects of β

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาโรงไฟฟ้าปล่องลมแควแบบหลังคาเอียงสำหรับติดตั้งบนเนินเขาโดยนำความร้อนที่จากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ร่วมด้วย ในหัวข้อนี้จึงเป็นการศึกษาอิทธิพลมุมเอียงของเนินเขาที่ส่งผลต่อความสูงปล่อง แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง และหลังคาเรียบแควมีค่าดังตารางที่ 3.2 และ AR12 ของ SSCPP และ SSCPP-WH มีค่าเท่ากับ 2 และ 14 ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของพื้นดินจะทำให้ระบบได้รับอิทธิพลจากสองตัวแปรหลักก็คือ h_{coll} และ I_t โดยที่ h_{coll} มีค่าสูงขึ้นเนื่องมาจากมุมเอียงพื้นดินมากขึ้นซึ่งจะส่งผลดีต่อระบบ และ I_t จะส่งผลเสียต่อระบบก็ต่อเมื่อมุมเอียงพื้นดินห่างจากละติจูดของภูมิภาคประเทศมาก ๆ จากรูปที่ 4.7 ในช่วงแรกของกราฟพบว่า เมื่อมุมเอียงมากขึ้นระบบต้องการปล่องที่มีความสูงลดลง อันเนื่องมาจาก อิทธิพลของการเพิ่ม h_{coll} รุนแรงกว่าอิทธิพลจากการลดลงของ I_t และหลังจากนั้นเมื่อเพิ่มมุมเอียงพื้นดินจะทำให้ระบบต้องการปล่องที่มีความสูงเพิ่มขึ้นซึ่งระบบได้รับผลเสียเนื่องจากอิทธิพลของ I_t ลดลงรุนแรงกว่า อิทธิพลของการเพิ่ม h_{coll} นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อระบบได้รับความร้อนที่มากขึ้น มุมเอียงพื้นดินที่ทำให้ความสูงปล่องต่ำที่สุดมีค่ามากขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ระบบได้รับมีค่ามากอยู่แล้ว ระบบจึงต้องการเพียง h_{coll} ที่มีค่าสูงที่สุดจนกว่าอิทธิพลจากการลดลง

ของรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนพื้นเอียงจะรุนแรงกว่า สำหรับระบบที่ไม่นำความร้อนทิ้งมาใช้งาน มุมเอียงหลังคาร์บแดดที่ทำให้ความสูงปล่องน้อยที่สุด คือ 35 - 45 degree ซึ่งมีค่ามากกว่าละติจูดภูมิประเทศ 20 - 30 degree สอดคล้องกับผลการจำลองของ Sakonidou *et al.* (2008) ระบุว่าหากพิจารณาอัตราการไหลของอากาศในระบบที่มีค่าสูงสุด มุมเอียงของหลังคาร์บแดดควรมีค่ามากกว่าละติจูดของภูมิประเทศประมาณ $20^\circ - 25^\circ$ และ Cao *et al.* (2013a) ระบุว่า ถ้าพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากที่สุด มุมเอียงของหลังคาร์บแดดควรมีค่ามากกว่าละติจูดของภูมิประเทศประมาณ $25^\circ - 38^\circ$



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปล่อง กับ ความเอียงของพื้นดิน สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนทิ้งค่าต่าง ๆ

4.3 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

การหาค่าใช้จ่ายในการลงทุน จะพิจารณาโดยใช้ขนาดของโรงไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิต 500 kW ในรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นส่วนหลัก (ความสูงปล่อง และ พื้นที่หลังคาร์บแดด) โดยที่ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างหลังคาร์บแดดและปล่องของระบบที่มี $h_{chi} = 174$ m, $A_c = 40,000$ m², $AR_{12} = 2$, $\beta = 45$ degree, $D_{chi} = 20$ m และ $Q = 0$ MW เมื่อปริมาณวัสดุและค่าใช้จ่ายส่วนต่างๆสามารถประเมินได้ดังนี้

- ปริมาณเหล็กที่ใช้ก่อสร้างหลังคารับแดดต่อพื้นที่หลังคาคิดเป็น 18.1 kg/m^2 (Cao *et al.*, 2013c)
- ปริมาณคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับสร้างผนังด้านข้างหลังคารับแดด ประเมินโดยกำหนดให้ผนังมีความหนา 0.3 m
- ปริมาณคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้สร้างปล่อง ประเมินจากความหนาผนังปล่องโดยให้มีค่าเท่ากับ 0.3 m ในกรณีปล่องสูงไม่เกิน 450 m สำหรับปล่องที่สูงเกิน 450 m ความยาว 450 m นับจากปลายปล่องคิดความหนาผนังปล่องเป็น 0.3 m ส่วนเกินให้เพิ่มความหนาเป็นแบบเชิงเส้น โดยที่ทุก ๆ 1 m ความหนาต้องเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.2545 mm จนถึงฐานปล่อง (Schlaich, 2004)

ตารางที่ 4.2 แสดงราคาต่อหน่วยของวัสดุและอุปกรณ์แต่ละชนิด โดยวิธีการหาราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนพบได้ในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4.3 แสดงราคาสำหรับส่วนต่าง ๆ ซึ่งคำนวณจากข้อมูลในตารางที่ 4.1 และ 4.2 โดยที่ค่าก่อสร้าง ค่าขนส่ง และรายละเอียดอื่น ๆ สามารถประเมินได้ดังนี้

- ค่าก่อสร้างปล่อง หลังคารับแดดและค่าขนส่งคิดเป็น 100%, 25% และ 5% ของราคาวัสดุทั้งหมด ตามลำดับ
- ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับฐานรากปล่องและ Circumferential Stiffener คิดเป็น 17.5% และ 7.5% ของราคาวัสดุที่ใช้สร้างปล่อง (Fluri *et al.*, 2009)
- ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับ PCU (Power conversion unit) กำหนดให้มีค่าประมาณ 600 USD/kW

เมื่อประเมินราคาทั้งระบบจากตารางที่ 4.3 พบว่ามีค่าใช้จ่ายในการสร้างทั้งระบบประมาณ 2,434,000 USD

จากข้อมูลข้างต้นสามารถนำมาสร้างเป็นสมการเพื่อหาค่าใช้จ่ายการลงทุนของแต่ละส่วน ดังนี้

ค่าใช้จ่ายสำหรับหลังคารับแดด คือ

$$C_{coll} = 1.3(A_{coll}C_{glass} + 18.1A_{coll}C_{steel} + V_{wall,coll}C_{RCC}) \quad (4.1)$$

เมื่อ V_{wall} คือ ปริมาตรของผนังคอนกรีตสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{wall, coll} = \frac{1}{4} \left(\frac{AR12\pi D_{chi}^2}{\sqrt{A_{coll}}} + \pi D_{chi} \right) \left(\sqrt{\left(\sqrt{A_{coll}} \cos \beta \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{A_{coll}}}{2} \right)^2} \right) t_{wall} \quad (4.2)$$

ค่าใช้จ่ายสำหรับปล่อง คือ

$$C_{chi} = 2.3V_{wall, chi} C_{RCC} \quad (4.3)$$

เมื่อ V_{chi} คือ ปริมาตรผนังปล่องคอนกรีตสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{wall, chi} &= \left(\frac{\pi(D_{chi} + 0.3)^2}{4} - \frac{\pi D_{chi}^2}{4} \right) h_{\leq 450} \\ &+ \frac{1}{3} \pi h_{>450} \left((D_{chi} + 0.3)^2 + (D_{chi} + 0.3 + 1.2545 \times 10^{-3} h_{>450})^2 \right. \\ &\left. + (D_{chi} + 0.3)(D_{chi} + 0.3 + 1.2545 \times 10^{-3} h_{>450}) \right) - \frac{\pi D_{chi}^2}{4} h_{>450} \end{aligned} \quad (4.4)$$

เมื่อ $h_{\leq 450m}$ คือความสูงปล่องช่วง 0-450 m, $h_{>450m}$ คือความสูงปล่องส่วนที่เกิน 450 m, และค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} C_{total} &= 1.3(A_{coll} C_{glass} + 18.1A_{coll} C_{steel} + V_{wall, coll} C_{RCC}) + 2.3V_{wall, chi} C_{RCC} \\ &+ \frac{W_{ext} C_{PCU}}{1000} + 0.0279Q + 40.945 \end{aligned} \quad (4.5)$$

ตารางที่ 4.1 ปริมาณวัสดุที่ต้องการสำหรับ 500 kW SSCPP เมื่อ $h_{chi} = 174$ m, $A_{coll} = 40,000$ m²,

$\beta = 45$ degree, $D_{chi} = 20$ m และ $Q = 0$ MW.

Subject	Component	Quantity
Solar collector	Glass (m ²)	40,000
	Steel (kg)	724,000
	Reinforced concrete (m ³)	1,317.5
Chimney	Reinforced concrete (m ³)	3,329

ตารางที่ 4.2 ราคาวัสดุและอุปกรณ์

Subject/Component	Prices	Unit
Glass	0.482	USD/m ²
Steel	0.558	USD/kg
Reinforced concrete	133	USD/m ³
PCU	600	USD/kW
Heat exchanger	$0.0279Q + 40.945$	USD

ตารางที่ 4.3 ราคารวมสำหรับ 1MW SSCPP เมื่อ $h_{chi} = 174$ m, $A_{coll} = 40,000$ m², $\beta = 45$ degree, $D_{chi} = 20$ m, $Q = 0$ MW และ AR12 = 2.

Subject	Component	Cost (USD)
Solar collector	Glass	19,280
	Steel	403,990
	Reinforced concrete	175,230
	Construction	149,630
	Transportation	29,925
	Total	778,060
Chimney	Reinforced concrete	442,760
	Foundation	77,483
	Stiffener	33,207
	Construction	553,450
	Hoising	221,380
	Transportation	27,672
	Total	1,356,000
PCU		300,000
Total		2,434,060

ถัดจากนั้น นำค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่คำนวณได้จากข้อมูลข้างต้น ไปคำนวณหาค่า Levelized cost of electricity (LCOE) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการแบบรายปี กับ

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปีของโรงไฟฟ้า โดยค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับค่าดำเนินการและค่าซ่อมบำรุงตลอดอายุโครงการ 25 ปี คำนวณได้ดังนี้ (Fluri *et al.*, 2009)

$$P_{OM} = \frac{A_1}{f-i} \left[\left(\frac{1+f}{1+i} \right)^N - 1 \right] \quad (4.6)$$

เมื่อ A_1 คือ ค่าดำเนินการและค่าซ่อมบำรุงในปีแรก

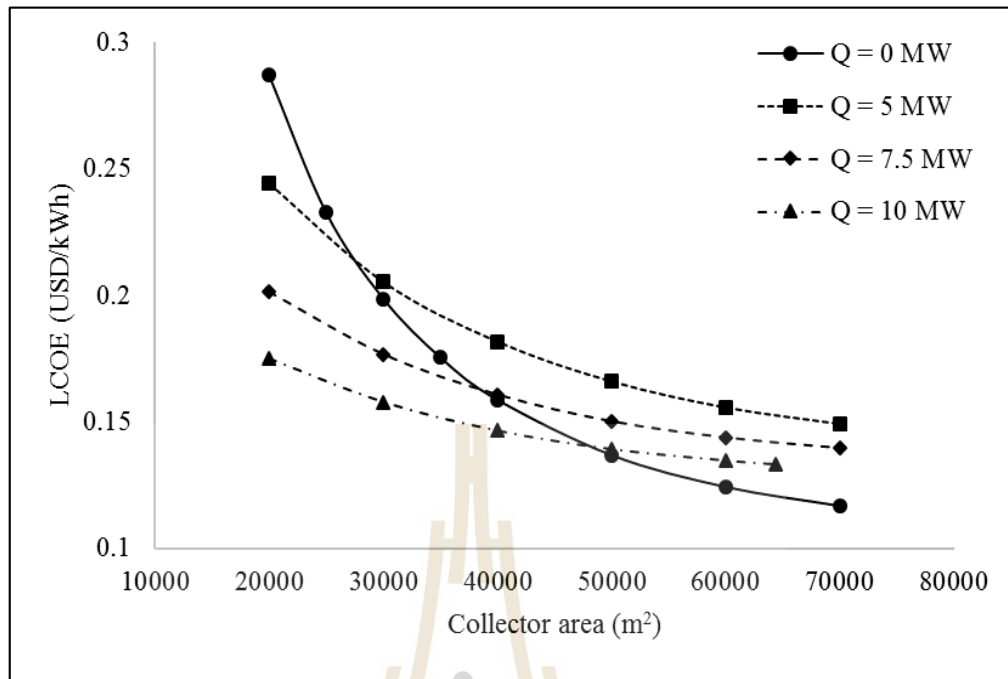
ถัดจากนั้น คำนวณหาเงินลงทุนรายปีของค่าซ่อมบำรุงรวมกับค่าใช้จ่ายในการลงทุน ดังนี้

$$A = (C_{total} + P_{OM}) \left[\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right] \quad (4.7)$$

และกำหนดให้ระยะเวลาการทำงานของโรงไฟฟ้าเท่ากับ 2,920 ชั่วโมงต่อปี (8 ชั่วโมงต่อวัน) จะได้

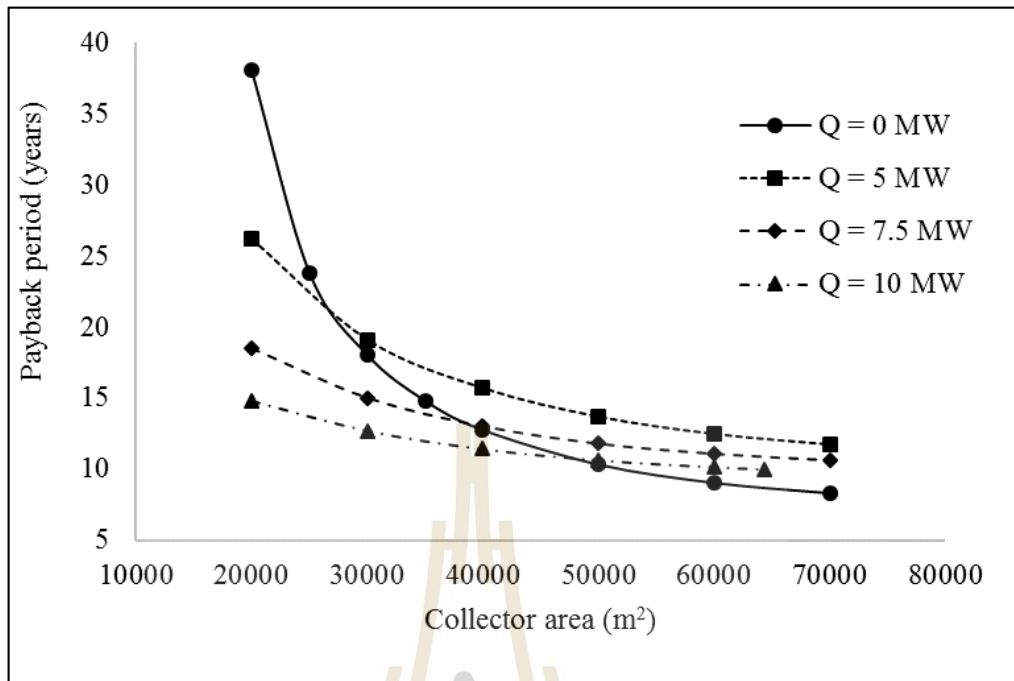
$$LCOE = \frac{A}{APO} \quad (4.8)$$

โดยที่ APO คือหน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละปี



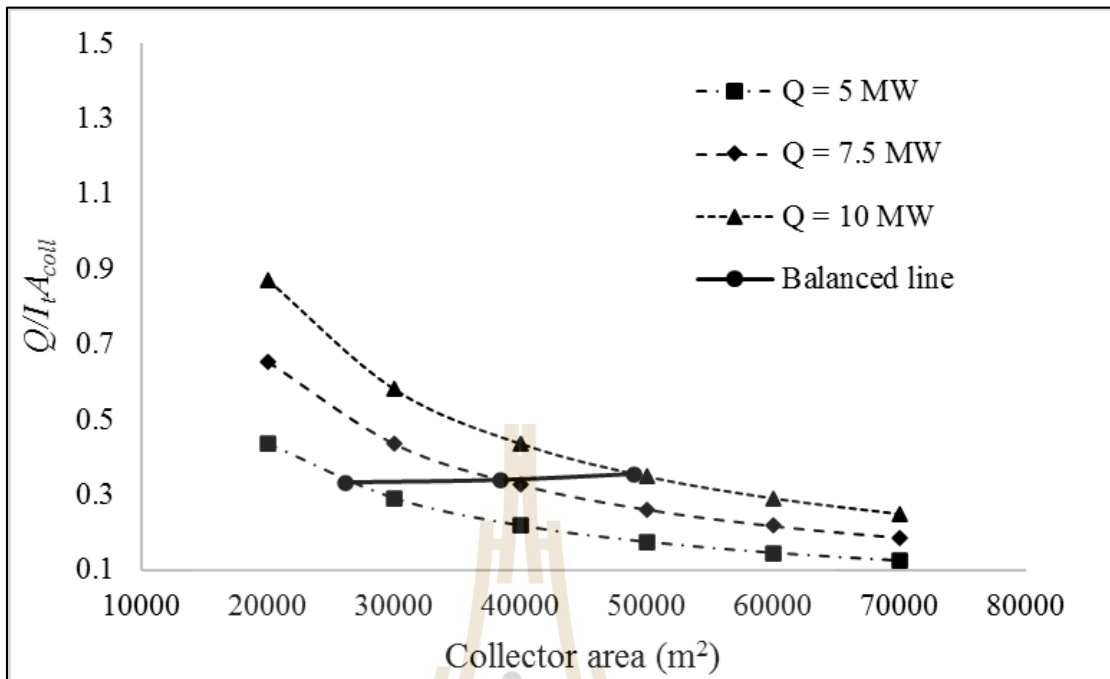
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง LCOE กับ พื้นที่หลังการรับแดด สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนที่ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.8 พบว่า LCOE มีค่าลดลงเมื่อพื้นที่หลังการรับแดดและความร้อนที่ระบบได้รับมีค่ามากขึ้น และเมื่อนำไปหารระยะเวลาคืนทุน โดยกำหนดราคาขายไฟฟ้าต่อหน่วยเท่ากับ 0.189 USD/kWh ซึ่งเป็นค่าไฟฟ้าที่รัฐรับซื้อจากผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแหล่งผลิตในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ จะได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาคืนทุน กับ พื้นที่หลังคารับแดด สำหรับระบบที่ได้รับ ความร้อนทิ้งค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.9 พบว่าระยะเวลาคืนทุนลดลงเมื่อพื้นที่หลังคารับแดดมากขึ้น นอกจากนี้ เมื่อนำ ข้อมูลในรูปที่ 4.8 มาหาค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนทิ้งที่ได้รับต่อปริมาณความร้อนจาก ดวงอาทิตย์จะได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเมื่อพิจารณาจุดตัดกันของเส้นกราฟระหว่าง เส้นของ $Q = 0$ MW กับ เส้นอื่น ๆ ในรูปที่ 4.9 พบว่าจุดดังกล่าวจะมีอัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนทิ้งที่ได้รับต่อ ปริมาณความร้อนจากดวงอาทิตย์ใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่า ถ้าต้องการใช้ SSCPP ที่มีการนำ ความร้อนทิ้งมาใช้ งาน ระบบต้องมีความร้อนทิ้งมากกว่า 0.34 เท่าของปริมาณความร้อนจากดวง อาทิตย์ จึงจะมีระยะเวลาคืนทุนที่ต่ำกว่าระบบที่ไม่นำความร้อนทิ้งมาใช้ โดยที่จุดตัดของเส้นกราฟ จะมีขนาดของ SSCPP ดังตารางที่ 4.4

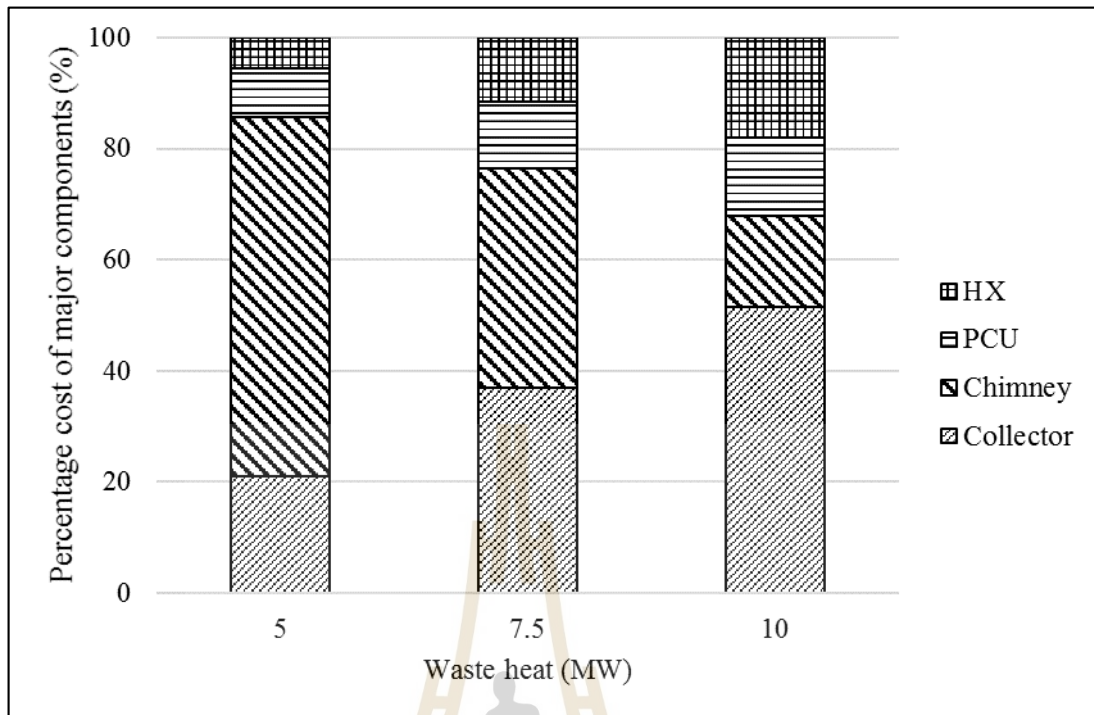


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Q/I_t A_{coll}$ กับ พื้นที่หลังคารับแดด สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนทั้งค่าต่าง ๆ

ตารางที่ 4.4 ขนาดและค่าใช้จ่ายทั้งหมดของ SSCPP-WH ที่ความร้อนทั้งค่าต่าง ๆ ที่มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ SSCPP เมื่อ $D = 20$ m, $\beta = 45$ degree และ $AR12 = 14$

Q (MW)	h_{chi} (m)	A_{coll} (m ²)	Total cost (USD)
5	283	26,200	3,415,460
7.5	127	38,500	2,498,505
10	45	49,000	2,124,280

จากตารางที่ 4.4 เมื่อนำมาหาสัดส่วนค่าใช้จ่ายแต่ละส่วนประกอบจะได้ดังรูปที่ 4.11



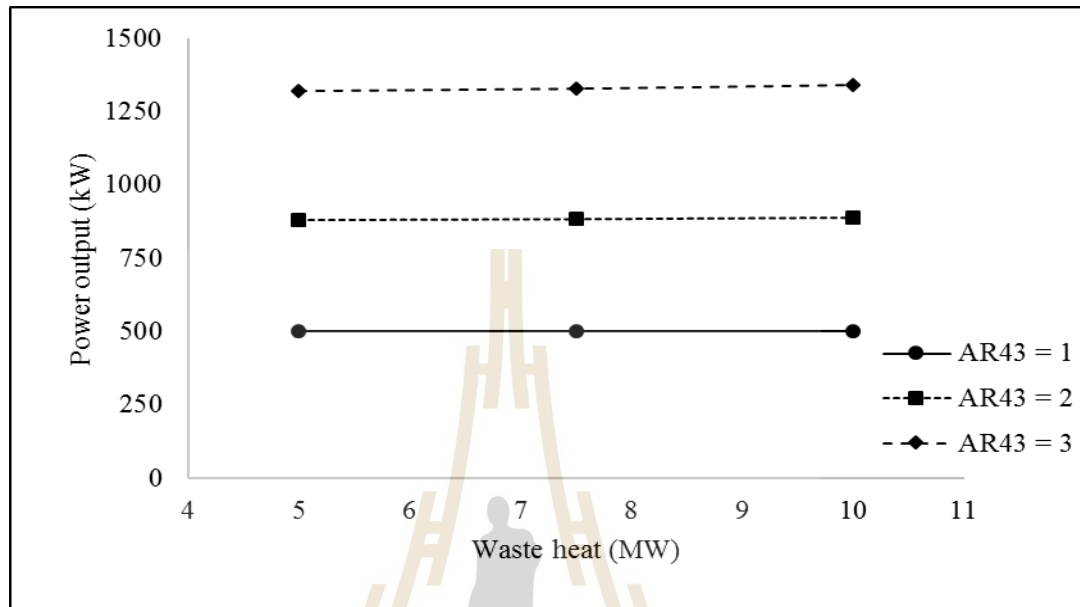
รูปที่ 4.11 จำนวนร้อยละของราคาส่วนประกอบหลักสำหรับ SSCPPs

รูปที่ 4.11 แสดงสัดส่วนค่าใช้จ่ายในการลงทุนแต่ละส่วนประกอบของโรงไฟฟ้าต่อค่าใช้จ่ายทั้งหมดเฉพาะกรณีของระบบที่นำความร้อนทิ้งมาใช้งานที่มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับระบบที่ไม่นำความร้อนทิ้งมาใช้งานสำหรับปริมาณความร้อนทิ้งแต่ละค่า พบว่า ค่าใช้จ่ายที่มีอิทธิพลต่อค่าใช้จ่ายทั้งระบบเมื่อค่าความร้อนทิ้งเปลี่ยนไป คือ ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับปล่อง และ หลังคารับแดด

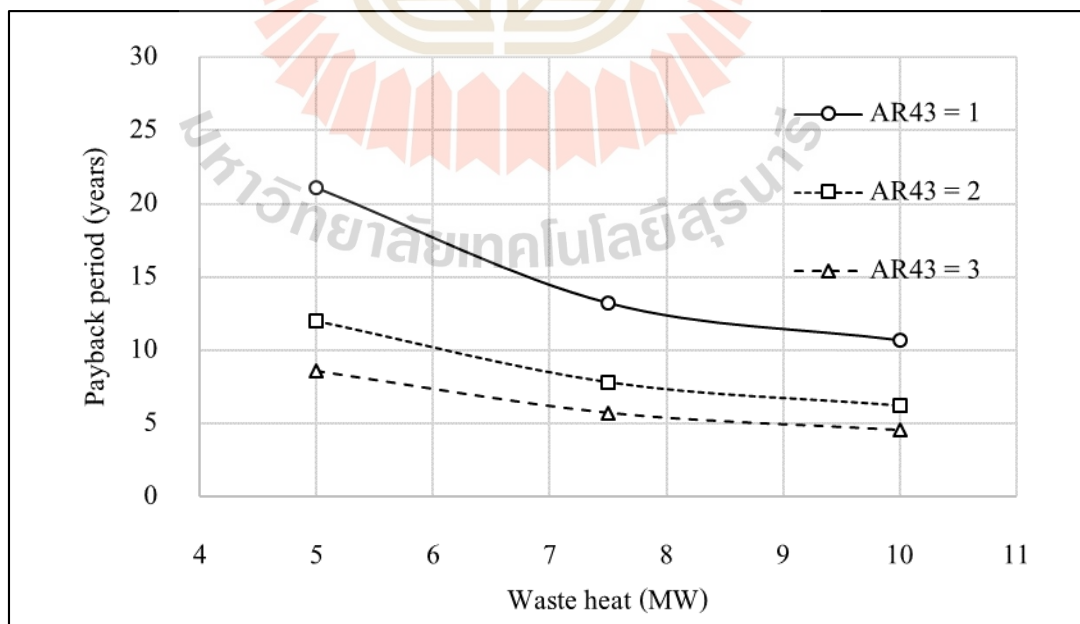
4.4 Effect of AR43

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของ AR43 ซึ่งจะนำ SSCPP ที่มีขนาดดังตารางที่ 4.4 มาทำการจำลอง โดยเพิ่มค่า AR43 พบว่า w_{ext} สูงสุดที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.12 จะเห็นว่า ที่ค่า AR43 เท่ากัน ค่า w_{ext} สูงสุดที่ได้มีค่าค่อนข้างคงที่แม้ความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับที่ค่าเปลี่ยนไป เมื่อพิจารณา AR43 ที่มีค่าเท่ากับ 2 และ 3 ระบบสามารถสร้างกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นจากระบบที่ใช้ AR43 = 1 ประมาณ 76% และ 160% ตามลำดับ เนื่องจากการที่ปล่องบานออกความเร็วของอากาศจะมีค่าลดลงทำให้การสูญเสียที่อยู่ในรูปของพลังงานลดลง อย่างไรก็ตาม ในการจำลองได้ลองใช้ค่า AR43 มากกว่า 3 พบว่า ความดันตำแหน่งที่ 3 จะมีค่าน้อยกว่าความดันตำแหน่งที่ 4 (ปลายปล่อง) ซึ่งจะทำให้เกิด

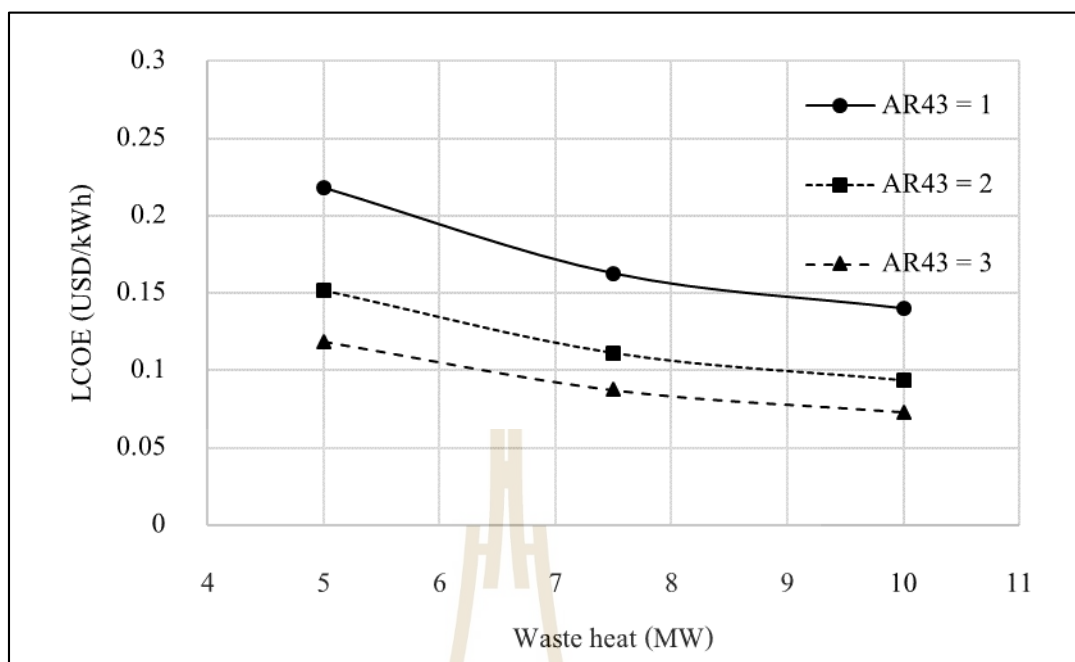
recirculation โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hassan *et al.* (2018) ที่พบว่า ระบบจะสร้างกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อ AR43 มีค่าประมาณ 2.8



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิต กับ ความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับ สำหรับ AR43 ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาคืนทุน กับ ความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับ สำหรับ AR43 ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง LCOE กับ ความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับ สำหรับ AR43 ค่าต่าง ๆ

รูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงระยะเวลาคืนทุนและ LCOE ตามลำดับ สำหรับโรงไฟฟ้าที่มีขนาดดังตารางที่ 4.4 โดยการคำนวณหาปริมาณคอนกรีตเสริมเหล็กของผนังปล่องบานผู้เขียนได้นำเสนอวิธีการประเมินอย่างง่ายดังนี้ ขั้นแรกจะกำหนดให้ความหนาของผนังปล่องเท่ากับ 0.3 m ตลอดทั้งความสูง จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความเค้นเนื่องจากน้ำหนักผนังปล่องที่ฐานปล่องเพื่อตรวจสอบว่ามีค่าเกิน 11.6 MPa (Schlaich, 2004) หรือไม่ ถ้าไม่เกินสามารถใช้ความหนาดังกล่าวได้ แต่ถ้าเกินให้ทำการเพิ่มความหนาของผนังปล่องที่ฐานปล่องและให้ความหนาลดลงแบบเชิงเส้นจนไปถึงปลายปล่องที่ยังคงความหนาผนังปล่องเท่ากับ 0.3 m ทำการคำนวณหาค่าความเค้นเนื่องจากน้ำหนักผนังปล่องที่ฐานปล่องเพื่อตรวจสอบและทำซ้ำจนผ่านเงื่อนไขดังกล่าว ราคาของส่วนประกอบอื่นสามารถคำนวณตามหัวข้อ 4.3

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.13 พบว่า ถ้าระบบมี AR43 = 3 จะทำให้ระยะเวลาคืนทุนลดลงจากระบบที่มี AR43 = 1 ประมาณ 60% เนื่องจากปล่องบานระบบมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ดังรูปที่ 4.12 และจากรูปที่ 4.14 พบว่า ถ้าระบบมี AR43 = 3 LCOE มีค่าลดลงจากระบบที่มี AR43 = 1 ประมาณ 50% นอกจากนี้จะเห็นว่า เมื่อระบบได้รับความร้อนทิ้ง 10 MW มีพื้นที่หลังคารับแดดเท่ากับ 49,000 m² ความสูงปล่องเท่ากับ 45 m เส้นผ่านศูนย์กลางปล่องที่ฐาน 20 m มุมเอียงพื้นดิน 45 องศา AR12 เท่ากับ 14 และ AR43 เท่ากับ 3 ระบบจะมี

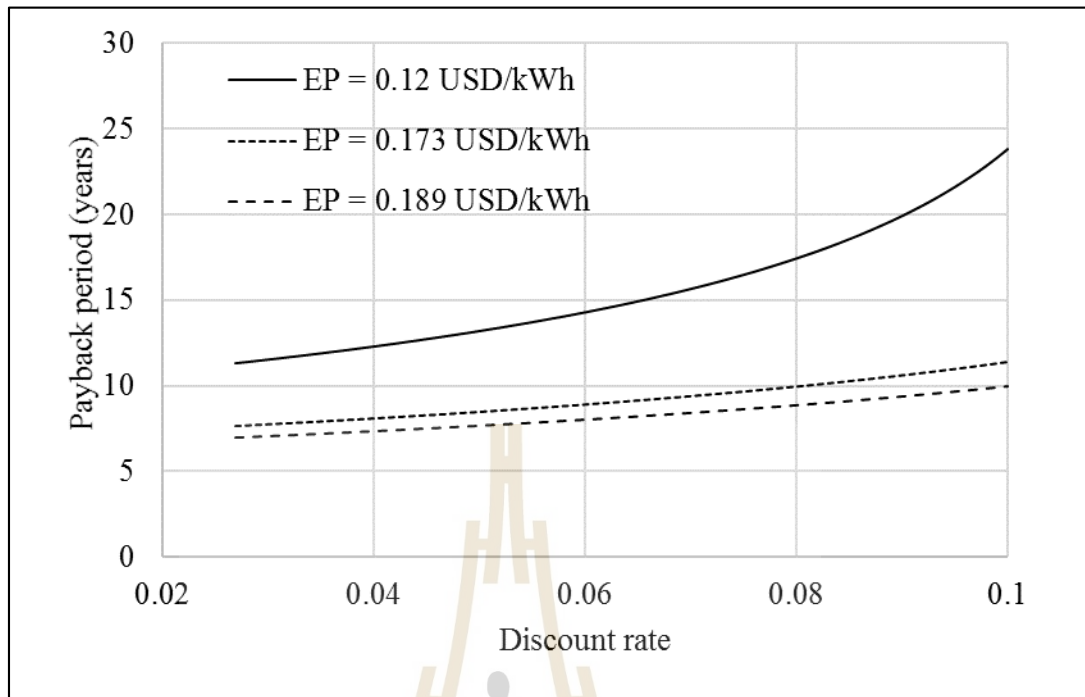
ค่า LCOE ประมาณ 0.075 USD/kWh ซึ่งเมื่อเทียบกับอัตราค่ารับซื้อไฟฟ้าของรัฐสำหรับแหล่งผลิตที่ถูกติดตั้งในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ เท่ากับ 0.189 USD/kWh จะพบว่า ระบบสามารถสร้างกำไรให้ได้ ซึ่งจะมีระยะเวลาคืนทุนไม่เกิน 5 ปี ดังนั้น จากระบบที่ไม่เคยถูกสร้างจริงในเชิงพาณิชย์ ถ้ามีเงินเขาก็จะมีโอกาสที่จะสร้างขึ้นเพื่อคืนทุนได้

4.5 Sensitivity analysis of discount rate and inflation rate

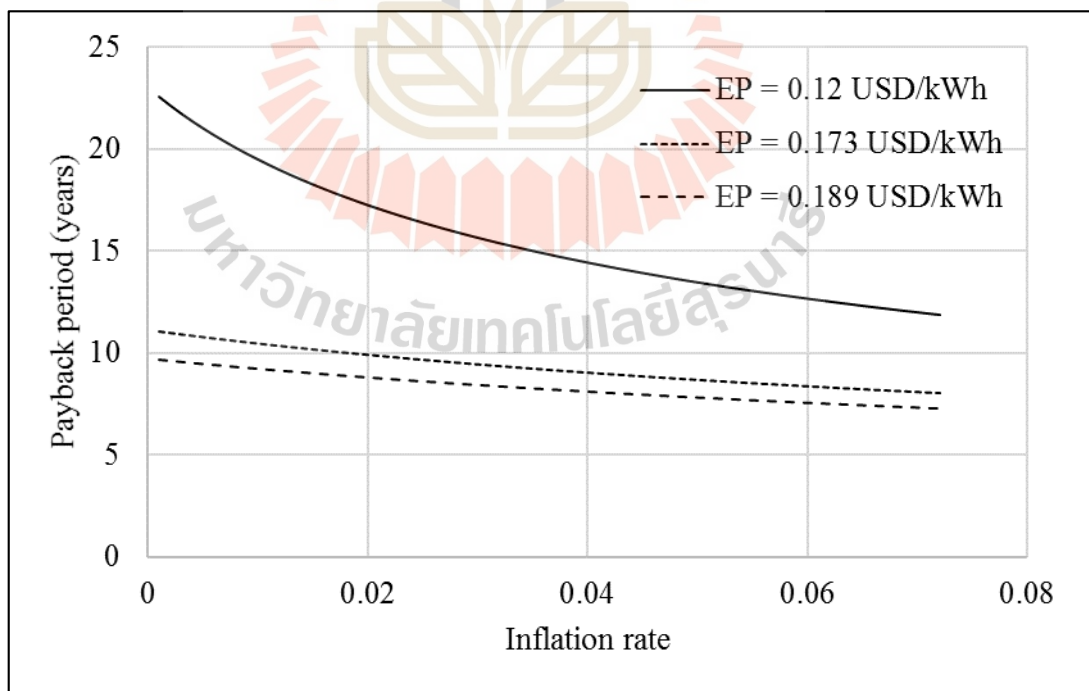
หัวข้อนี้จะนำ SSCPP-WH ที่มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับระบบที่ไม่มี การนำความร้อนทิ้งมาใช้งาน มาทำ Sensitivity analysis ของอัตราดอกเบี้ยและอัตราเงินเฟ้อ โดยพิจารณาจากโรงไฟฟ้าที่มี $h_{chi} = 283$ m, $A_c = 26,200$ m², AR12 = 14, AR43 = 3, $\beta = 45$ degree, $D_{chi} = 20$ m, $Q = 5$ MW และ ค่าใช้จ่ายการลงทุนเท่ากับ 4,703,300 USD ซึ่งสามารถสร้างกำลังไฟฟ้าได้เท่ากับ 1,321 kW

รูปที่ 4.15 แสดง Sensitivity analysis ของอัตราดอกเบี้ยเมื่อกำหนดให้อัตราเงินเฟ้อเท่ากับ 2.6% ซึ่งเป็นอัตราเงินเฟ้อเฉลี่ยของประเทศไทย ในช่วง ปี 1998 – 2017 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2560) และกราฟแต่ละเส้นคือค่าไฟฟ้าต่อหน่วย โดยที่ 0.12 USD/kWh คือ ค่าไฟฟ้าโดยทั่วไปของประเทศไทย 0.173 USD/kWh คือค่าไฟฟ้าที่รัฐรับซื้อจากผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงแดด 0.189 USD/kWh คือค่าไฟฟ้าที่รัฐรับซื้อจากผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงแดดที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ พบว่า เมื่อ Discount rate เปลี่ยนแปลงในช่วง 2.6% - 10% และขายไฟฟ้าในอัตรา 0.189 USD/kWh จะทำให้ระยะเวลาคืนทุนเปลี่ยนแปลงในช่วง 7 – 10 ปี

จากรูปที่ 4.16 แสดง Sensitivity analysis ของอัตราเงินเฟ้อเมื่อกำหนดให้อัตราดอกเบี้ยเท่ากับ 7.35% พบว่า เมื่ออัตราเงินเฟ้อเปลี่ยนแปลงในช่วง 0% – 7.35% และขายไฟฟ้าในอัตรา 0.189 USD/kWh ระยะเวลาคืนทุนเปลี่ยนแปลงในช่วง 7.5 – 10 ปี



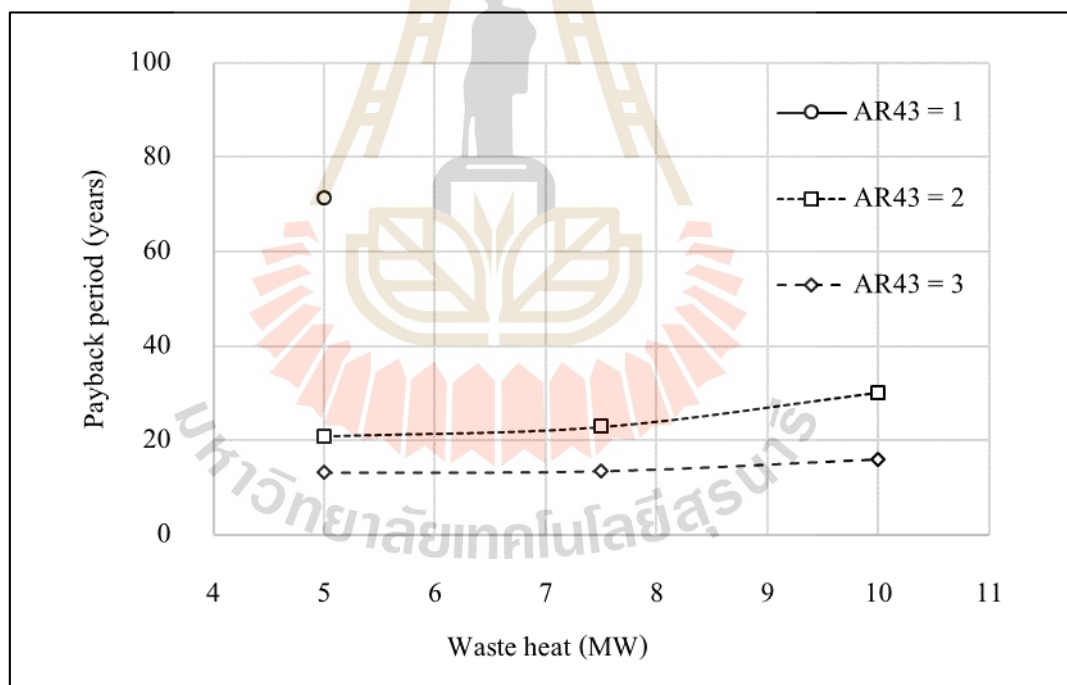
รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของ Discount rate



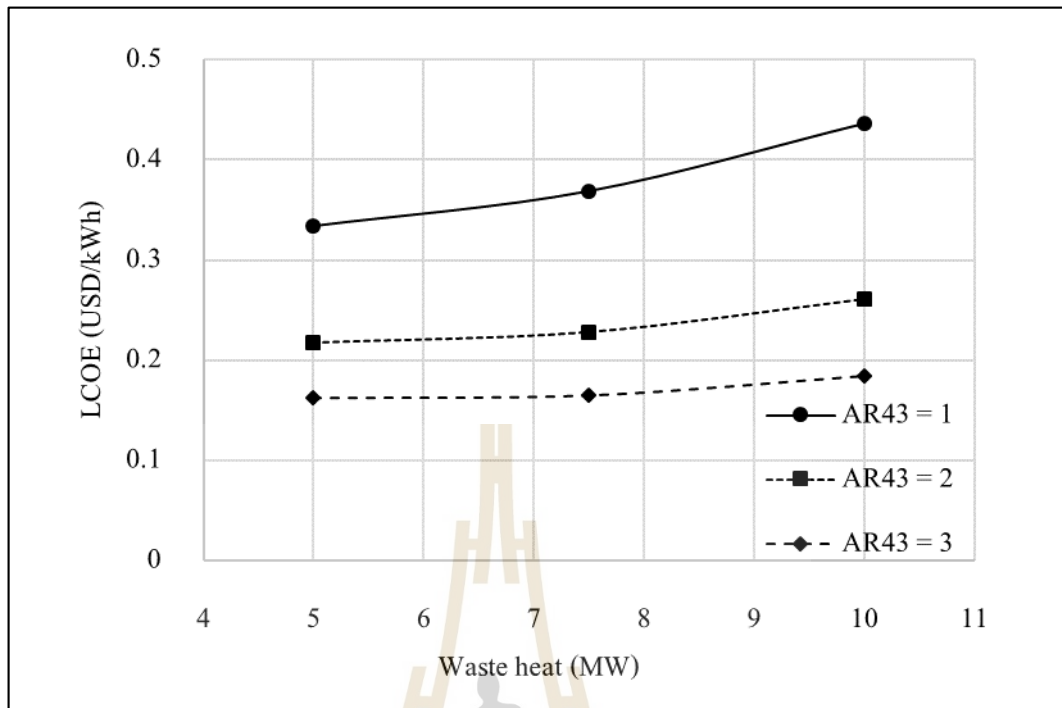
รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของ Inflation rate

4.6 ระยะเวลาคืนทุนสำหรับกรณีที่มีการคิดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการสร้างพื้นเอียงร่วมด้วย

งานวิจัยเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าปล่องลมแควดแบบหลังคาเอียง ส่วนใหญ่ทำการศึกษาเพื่อติดตั้งบนเนินเขาแต่ในหัวข้อนี้ต้องการหาระยะเวลาคืนทุนและค่า LCOE สำหรับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งบนเนินเขา แต่จะใช้วิธีการถมที่แทน โดยนำระบบที่มีขนาดดังตารางที่ 4.4 มาหาระยะเวลาคืนทุนและ LCOE โดยมีวิธีการหาค่าใช้จ่ายในการลงทุนเหมือนกับหัวข้อ 4.3 เพียงแต่มีการคิดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการสร้างพื้นเอียงเพิ่มเติม ซึ่งประเมินจากปริมาตรดินที่ต้องใช้สำหรับพื้นเอียงซึ่งเป็นรูปทรงพีระมิดฐานสามเหลี่ยม โดยราคาดินรวมค่าปรับผิวดินคิดเป็น 1.92 USD/m³ ซึ่งเป็นราคากลางในพื้นที่ ผลการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนและ LCOE แสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ พบว่า เมื่อ AR43 = 1 ระบบแทบจะไม่คืนทุน แต่เมื่อระบบมี AR43 = 3 ระยะเวลาคืนทุนจะอยู่ในช่วง 10–20 ปี ซึ่งมี LCOE ประมาณ 0.17 USD/kWh ซึ่งเมื่อเทียบที่ขนาดเท่ากับหัวข้อ 4.4 สำหรับกรณีที่ใช้ความร้อนถึง 5 MW พบว่า LCOE กรณีที่มีการคิดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการสร้างพื้นเอียงมีค่ามากกว่าประมาณ 40%



รูปที่ 4.17 ระยะเวลาคืนทุนสำหรับกรณีที่มีการคิดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการสร้างพื้นเอียง



รูปที่ 4.18 LCOE สำหรับกรณีที่มีการคิดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการสร้างพื้นเอียง

บทที่ 5

สรุป

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบโรงไฟฟ้าปล่องลมแควแบบหลังคาปรับแควเชิงขนาด 500 kW ที่ใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้ง โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ในการจำลอง จากผลการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

การศึกษาอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง พื้นที่หน้าตัดการไหลที่ทางเข้าหลังคาปรับแคว ต่อ ทางออกหลังคาปรับแคว (AR12) พบว่า โรงไฟฟ้าปล่องลมแควแบบหลังคาเอียงกรณีที่ไม่มีการนำความร้อนทิ้งมาใช้งานและมีการนำความร้อนทิ้งมาใช้งาน ควรจะมีค่า AR12 เท่ากับ 2 และ 14 ตามลำดับ

การศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หลังคาปรับแคว พบว่า ความสูงปล่องสามารถลดลงได้ เมื่อพื้นที่หลังคาปรับแควและความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ประสิทธิภาพของหลังคาปรับแควสำหรับระบบที่ไม่นำความร้อนทิ้งมาใช้งานมีค่าประมาณ 40% ระบบที่นำความร้อนทิ้งมาใช้งานมีค่าประมาณ 36 - 38% และประสิทธิภาพหลังคาปรับแควจะมีค่าลดลง เมื่อพื้นที่หลังคาปรับแควและปริมาณความร้อนทิ้งที่ได้รับเพิ่มขึ้น

การศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง พบว่า ความสูงปล่องมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง และจากการศึกษาอิทธิพลของมุมเอียงพื้นดิน พบว่า เมื่อระบบได้รับความร้อนทิ้งมากขึ้นมุมเอียงพื้นดินที่ทำให้ความสูงปล่องต่ำที่สุดมีค่ามากขึ้น

โรงไฟฟ้าปล่องลมแควแบบหลังคาเอียงที่นำความร้อนทิ้งมาใช้งาน ควรจะมีอัตราส่วนระหว่างความร้อนทิ้งที่ได้รับต่อความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์มากกว่า 0.34 จึงจะมีระยะเวลาคืนทุนมากกว่าระบบที่ไม่นำความร้อนทิ้งมาใช้งาน

นอกจากนี้ กรณีระบบใช้ปล่องบาน โดยที่ AR43 เท่ากับ 3 จะทำให้ระยะเวลาคืนทุนลดลงจากระบบที่ใช้ปล่องตรงประมาณ 60% และ LCOE ลดลงประมาณ 50% เมื่ออายุโครงการเท่ากับ 25 ปี

ระบบที่ได้รับความร้อนทิ้ง 10 MW มีพื้นที่หลังคาปรับแควเท่ากับ 49,000 m² ความสูงปล่องเท่ากับ 45 m เส้นผ่านศูนย์กลางปล่องที่ฐาน 20 m มุมเอียงพื้นดิน 45 องศา AR12 เท่ากับ 14 และ AR43 เท่ากับ 3 ระบบจะมีค่า LCOE ประมาณ 0.075 USD/kWh ซึ่งเมื่อเทียบกับอัตราค่ารับซื้อไฟฟ้าของรัฐสำหรับแหล่งผลิตที่ถูกคิดตั้งในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ เท่ากับ 0.189 USD/kWh จะพบว่า ระบบสามารถสร้างกำไรให้ได้ ซึ่งจะมีระยะเวลาคืนทุนไม่เกิน 5 ปี

รายการอ้างอิง

- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2559). ความต้องการไฟฟ้าของระบบ [ออนไลน์]. Available: <https://www.egat.co.th>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2553). พลังงานแสงอาทิตย์จากการตรวจวัด [ออนไลน์]. Available: <http://www4.dede.go.th>
- ธนาคารแห่งประเทศไทย. (2018). StatMacroEconomicIndicators [ออนไลน์] Available: <https://www.bot.or.th/English/Statistics/EconomicAndFinancial/Pages/StatMacroEconomicIndicators.aspx>
- กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. (2559). Waste Heat Recovery Guide [ออนไลน์]. Available: http://www.enconlab.com/wasteheat/downloads/WasteHeatRecoveryGuide_220458.pdf
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2559). อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งเดือนในแต่ละจังหวัด [ออนไลน์]. Available: <http://www.e-report.energy.go.th>
- Ali, B. (2017). Techno-economic optimization for the design of solar chimney power plants. *Energy Conversion and Management*, 138, 461-473.
- Bernardes, M. D., Voß, A., & Weinrebe, G. (2003). Thermal and technical analyses of solar chimneys. *Solar Energy*, 75(6), 511-524.
- Bilgen, E., & Rheault, J. (2005). Solar chimney power plants for high latitudes. *Solar Energy*, 79(5), 449-458.
- Cao, F., Zhao, L., & Guo, L. (2011). Simulation of a sloped solar chimney power plant in Lanzhou. *Energy Conversion and Management*, 52(6), 2360-2366.
- Cao, F., Zhao, L., Li, H., & Guo, L. (2013a). Performance analysis of conventional and sloped solar chimney power plants in China. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 582-592.
- Cao, F., Li, H., Zhang, Y., & Zhao, L. (2013b). Numerical Simulation and Comparison of Conventional and Sloped Solar Chimney Power Plants: The Case for Lanzhou. *The Scientific World Journal*, 2013, 1-8.
- Cao, F., Li, H., Zhao, L., & Guo, L. (2013c). Economic analysis of solar chimney power plants in Northwest China. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(2), 021406.

- Choi, Y. J., Kam, D. H., Park, Y. W., & Jeong, Y. H. (2016). Development of analytical model for solar chimney power plant with and without water storage system. *Energy*, 112, 200-207.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. Hoboken: Wiley.
- Fluri, T., Pretorius, J., Dyk, C. V., Backström, T. V., Kröger, D., & Zijl, G. V. (2009). Cost analysis of solar chimney power plants. *Solar Energy*, 83(2), 246-256.
- Ghorbani, B., Ghashami, M., Ashjaee, M., & Hosseinzadegan, H. (2015). Electricity production with low grade heat in thermal power plants by design improvement of a hybrid dry cooling tower and a solar chimney concept. *Energy Conversion and Management*, 94, 1-11.
- Guo, P., Zhai, Y., Xu, X., & Li, J. (2017). Assessment of levelized cost of electricity for a 10 – MW solar chimney power plant in Yinchuan China. *Energy Conversion and Management*, 152, 176-185.
- Haaf, W. (1984). Solar Chimneys: part II: preliminary test results from the Manzanares pilot plant. *Solar Energy*, 2, 141-161.
- Han, W., Sun, L., Zheng, D., Jin, H., Ma, S., & Jing, X. (2013). New hybrid absorption–compression refrigeration system based on cascade use of mid-temperature waste heat. *Applied Energy*, 106, 383-390.
- Hassan, A., Ali, M., & Waqas, A. (2018). Numerical investigation on performance of solar chimney power plant by varying collector slope and chimney diverging angle. *Energy*, 142, 411-425.
- Huang, M., Chen, L., He, Y., Cao, J., & Tao, W. (2017). 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*, 85, 100-106.
- Jung, H., Krumdieck, S., & Vranjes, T. (2014). Feasibility assessment of refinery waste heat-to-power conversion using an organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, 77, 396-407.
- Kalash, S., Naimeh, W., & Ajib, S. (2013). Experimental investigation of the solar collector temperature field of a sloped solar updraft power plant prototype. *Solar Energy*, 98, 70-77.

- Kalash, S., Naimeh, W., & Ajib, S. (2014). Experimental Investigation of a Pilot Sloped Solar Updraft Power Plant Prototype Performance Throughout a Year. *Energy Procedia*, 50, 627-633.
- Kasaeian, A., Heidari, E., & Vatan, S. N. (2011). Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 5202-5206.
- Koonsrisuk, A. (2012). Mathematical modeling of sloped solar chimney power plants. *Energy*, 47(1), 582-589.
- Koonsrisuk, A. (2013). Comparison of conventional solar chimney power plants and sloped solar chimney power plants using second law analysis. *Solar Energy*, 98, 78-84.
- Koonsrisuk, A., & Chitsomboon, T. (2013). Mathematical modeling of solar chimney power plants. *Energy*, 51, 314-322.
- Koonsrisuk, A., & Chitsomboon, T. (2013). Effects of flow area changes on the potential of solar chimney power plants. *Energy*, 51, 400-406.
- Li, J., Guo, P., & Wang, Y. (2012). Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines. *Renewable Energy*, 47, 21-28.
- Le, V. L., Kheiri, A., Feidt, M., & Pelloux-Prayer, S. (2014). Thermodynamic and economic optimizations of a waste heat to power plant driven by a subcritical ORC (Organic Rankine Cycle) using pure or zeotropic working fluid. *Energy*, 78, 622-638.
- Maia, C. B., Ferreira, A. G., Valle, R. M., & Cortez, M. F. (2009). Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney. *Computers & Fluids*, 38(3), 625-636.
- Mirolli, M. (2005). The kalina cycle for cement kiln waste heat recovery power plants. *Conference Record Cement Industry Technical Conference*, 2005.
- Pasumarthi, N., & Sherif, S. A. (1998). Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model - Part I: mathematical model development. *International Journal of Energy Research*, 22(3), 277-288.
- Sakonidou, E., Karapantsios, T., Balouktsis, A., & Chassapis, D. (2008). Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow. *Solar Energy*, 82(1), 80-94.

- Schlaich, J., Bergemann, R., Schiel, W., & Weinrebe, G. (2004). Sustainable Electricity Generation with Solar Updraft Towers. *Structural Engineering International*, 14(3), 225-229.
- Zandian, A., & Ashjaee, M. (2013). The thermal efficiency improvement of a steam Rankine cycle by innovative design of a hybrid cooling tower and a solar chimney concept. *Renewable Energy*, 51, 465-473.
- Zhou, X., Yuan, S., & Bernardes, M. A. (2013). Sloped-collector solar updraft tower power plant performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66, 798-807.
- Zhou, X., Yang, J., Xiao, B., & Hou, G. (2007). Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup. *Applied Thermal Engineering*, 27(11-12), 2044-2050.
- Zou, Z., Guan, Z., Gurgenci, H., & Lu, Y. (2012). Solar enhanced natural draft dry cooling tower for geothermal power applications. *Solar Energy*, 86(9), 2686-2694.
- Zou, Z., Guan, Z., & Gurgenci, H. (2013). Optimization design of solar enhanced natural draft dry cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 76, 945-955.
- Zou, Z., & He, S. (2015). Modeling and characteristics analysis of hybrid cooling-tower-solar-chimney system. *Energy Conversion and Management*, 95, 59-68.





ภาคผนวก ก.

การประเมินราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การประเมินราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ได้มาจากการสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับราคา จากนั้นนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณความร้อนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ กับ ราคา และทำ curve fitting โดยกำหนดให้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น แสดงในรูปที่ ก.1 ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$C_{HX} = 0.027886Q + 40.945$$



รูปที่ ก.1 ราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากการสำรวจ

เมื่อ C_{HX} คือ ราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (USD) และ Q คือปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนได้ (W)



ภาคผนวก ข.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทความในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ

บัณฑิต จันทร์สว่าง, ทวีพรพรภู่ ศรีอ่อน และ อาทิตย์ คุณศรีสุข (2559). การประเมินสมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบดูดกลืนที่ใช้เครื่องทำน้ำร้อนพลังแสงอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศเป็นแหล่งความร้อนสำหรับร้าน 7-Eleven ในประเทศไทย. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 30 จังหวัดสงขลา

บัณฑิต จันทร์สว่าง และ อาทิตย์ คุณศรีสุข (2560). การออกแบบโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียง. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 จังหวัดเชียงใหม่

บัณฑิต จันทร์สว่าง และ อาทิตย์ คุณศรีสุข (2561). การจำลองโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงขนาด 500 กิโลวัตต์ ที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 32 จังหวัดมุกดาหาร

บทความในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Bundit Chansawang and Atit Koonsrisuk (2019). Design of a sloped solar chimney power plant powered by industrial waste heat. The 10th TSME International Conference on Mechanical Engineering. Pattaya, Thailand

บทความที่ถูกตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ

บัณฑิต จันทร์สว่าง และ อาทิตย์ คุณศรีสุข (2563). การจำลองโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงขนาด 500 กิโลวัตต์ ที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม. วารสารวิชาการและวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ประวัติผู้เขียน

นายบัณฑิต จันทร์สว่าง เกิดเมื่อวันที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2537 ณ โรงพยาบาลจักราช อำเภอจักราช จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาชั้นประถมที่โรงเรียนวัดหนองจอก ชั้นมัธยมต้นและมัธยมปลายที่โรงเรียนจักราชวิทยา จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2555 เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปี พ.ศ. 2558 จบจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีด้วยเกียรตินิยมอันดับหนึ่งและได้รับทุนกิตติบัณฑิตเพื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ในรายวิชาการเขียนแบบวิศวกรรม 1 รายวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล และรายวิชาปฏิบัติการด้านความร้อนและของไหล

ผลงานวิจัยระดับปริญญาโท ได้มีผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการในระดับชาติ 3 บทความ และระดับนานาชาติ 1 บทความ เกี่ยวกับการประเมินสมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบดูดกลืน และการออกแบบโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียง นอกจากนี้ ได้มีผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ 1 บทความ เกี่ยวกับการออกแบบโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี