

วันที่ 31 มีนาคม 2563



อธินันทนาการ

สัญญาเลขที่ R2558C180 สำนักหอสมุด

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การออกแบบระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทน  
ด้วยพาร์ติเคิลสวอร์มออปติไมเซชัน  
(Optimal Design for Hybrid Renewable Energy System using  
Particle Swarm Optimization)

ผู้วิจัย  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิโชค ผูกพันธุ์

สังกัด  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
วันลงทะเบียน 22 ก.พ. 2565
เลขทะเบียน 1048988
เลขเรียกหนังสือ ๑-๐A

76.58  
๙๗๒๕  
๑๕๕๘

สนับสนุนโดย  
งบประมาณรายได้มหาวิทยาลัยนครสวรรค์  
ปีงบประมาณ 2558

## Executive Summary

Among the renewable energy sources, wind energy and solar energy are the most utilized due to technology achievement and commercial economy of scale in production enhancing to lower cost in manufacturing. The trend to implement both renewable sources as the electric distributed generation. However, the employment of solar and wind as the individual reliable renewable source would lead to oversizing of specification design and higher COE. Therefore, HRES was developed to integrate the multiple renewable sources performing in more reliable and lower the COEh.

This paper developed the HRES model both energy production and lifetime cost of the project. PSO was implemented to minimize COEh of the designed configuration. The wind speed and solar irradiation data from a particular site are used to determine the energy potential following the HRES configuration. The wind power is extracted in corresponding to any range of wind speed using the wind turbine power curve. While the solar power is generated from solar PV module. The investment per capacity of the solar PV site is collected from commercial suppliers. However, the wind turbine cost are derived from the component cost model developed by NREL. Once the wind turbine and PV module are configured as HRES, the COEh as the objective function can be determined. Then, the developed PSO is used to search for the optimal HRES configuration to minimize COEh within the investment constraint. The minimum COE from this study at 0.1204 \$/kWh was in the 95th percentile of the global renewable power generation cost database from IRENA ranging between 0.06 – 0.22 \$/kWh for solar energy and 0.04 – 0.10 \$/kWh for wind energy but higher than the average value because of the low potential on both solar radiation and wind speed data from the particular site. However, PSO as the preliminary design method could be determined the optimal HRES with minimized COE when compare with the conventional design within the investment constraint.

ชื่อหัวข้อโครงการงาน      การออกแบบระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทน  
ด้วยพาร์ติเคิลสวอร์มออปติไมเซชัน  
ผู้วิจัย      ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิโชค ผูกพันธ์  
คำสำคัญ      ระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทน ออปติไมเซชัน

---

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการหามูลค่าพลังงาน (Cost of Energy, COE) ที่น้อยที่สุดของระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทนที่ประกอบไปด้วยพลังงานลมจากกังหันลมและพลังงานแสงอาทิตย์จากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยวิธีพาร์ติเคิลสวอร์มออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization, PSO) ระบบที่ออกแบบจะทำการค้นหาขนาดของกังหันลมที่ต่างกันและกำลังติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และกำหนดเงินลงทุนเป็นตัวแปรที่ถูกรับควบคุม ข้อมูลสภาพอากาศจริงจากเครื่องวัดจะถูกนำมาวิเคราะห์ ข้อมูลความเร็วลมถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานลมด้วยเส้นโค้งกำลัง ขณะที่พลังงานแสงอาทิตย์จะถูกคำนวณจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองกำลังการผลิตจากขนาดและของแผงโซลาร์เซลล์ (Power generation model) วิธีการนี้จะสามารถหาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีจากระบบไฮบริดที่ได้ออกแบบดังกล่าวด้วยต้นทุนพลังงานที่ต่ำที่สุด การลงทุนประกอบด้วยการลงทุนในระบบเซลล์แสงอาทิตย์จากข้อมูลผู้ผลิตและจัดจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ขณะที่การลงทุนในระบบกังหันลมจะเลือกใช้แบบจำลองแบบแยกส่วนประกอบจากห้องทดลองด้านพลังงานทดแทนแห่งชาติ (National Renewable Energy Laboratory, NREL) และทำเป็นมูลค่าปัจจุบันด้วยอัตราการคิดลดจากอัตราเงินเฟ้อเฉลี่ย เมื่อระบบที่ออกแบบเลือกขนาดกังหันลมและกำลังติดตั้งของเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว แบบจำลองด้านพลังงานและการเงินจะสามารถหามูลค่าพลังงานซึ่งกำหนดให้เป็นสมการเป้าประสงค์ (Objective function) ในงานวิจัยนี้ PSO สามารถออกแบบระบบให้มีค่าต้นทุนพลังงานที่ 0.1204 \$/kWh (3.70 บาท/kWh) อยู่ในเปอร์เซนไทล์ที่ 95 ของฐานพลังงานทดแทนทั้งโลกที่รวบรวมโดย IRENA ซึ่งต้นทุนพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าระหว่าง 0.06 – 0.22 \$/kWh (1.80 – 6.75 บาท/kWh) ขณะที่ต้นทุนพลังงานลมมีค่าระหว่าง 0.04 – 0.10 \$/kWh (1.23 – 3.07 บาท/kWh) ซึ่งพบว่าระบบที่ออกแบบมีค่าต้นทุนพลังงานสูงกว่าค่าเฉลี่ยทั้งนี้เนื่องจากชุดข้อมูลที่ได้จากแหล่งวัดมีศักยภาพต่ำ อย่างไรก็ตาม PSO เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ออกแบบระบบเบื้องต้นที่สามารถหาระบบไฮบริดที่มีขนาดเหมาะสมด้วยต้นทุนพลังงานที่ต่ำกว่าวิธีการออกแบบทั่วไป

Project title            Optimal Design for Hybrid Renewable Energy System  
                                 using Particle Swarm Optimization

Researcher             ASST. PROF. Sittichoke Pookpunt

Keyword                Hybrid Renewable Energy, Optimization

---

### Abstract

This paper proposes the Particle Swarm Optimization (PSO) to minimize the Hybrid Renewable Energy System (HRES) Cost of Energy (COE) on different sizing between wind turbines and solar PV modules subjecting to a particular investment constraint. The wind speed and solar irradiation data from a particular site are used to determine the annual energy production (AEP) following the HRES configuration. While the turbine power curve converts the wind speed range to wind power, solar power generation model transforms solar radiation incident on PV modules. The investment cost of the solar PV system is interpolated from a commercial supplier data. However, the wind turbine cost is derived from the turbine component cost model of the National Renewable Energy Laboratory (NREL) and discounted to the present value using the inflation rate. Once a wind turbine and PV modules are configured as HRES, the COE as the objective function would be determined. The minimum COE from this study at 0.1204 \$/kWh is in the 95th percentile of the global renewable power generation cost database from IRENA ranging between 0.06 – 0.22 \$/kWh for solar energy and 0.04 – 0.10 \$/kWh for wind energy but higher than the average value because of the low potential on both solar radiation and wind speed data from the particular site. However, PSO as the preliminary design method could be determined the optimal HRES with minimized COE when compare with the conventional design.

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการทำโครงการ	3
1.4 สมมุติฐานของงานวิจัย	3
1.5 กรอบแนวความคิดของโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 วิธีการดำเนินการวิจัย	4
1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 พลังงานลม	6
2.2 พลังงานทดแทนพลังงานแสงอาทิตย์	9
2.3 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี (Annual Energy Production)	11
2.4 ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า (System Implementation)	12
2.5 ระบบผลิตไฟฟ้าชนิดไฮบริดพลังงานทดแทน	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการโครงการ	17
3.1 ศักยภาพของแหล่งพลังงาน	17
3.2 พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงาน	19
3.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และการเงิน (Economic and Financial Analysis)	21
3.4 แนวคิดในการออกแบบ (Conceptual design)	24
3.5 พาร์ติเคิลสวอร์มออปติไมเซชัน	26
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	37
5.1 สรุปผลการทดลอง	37
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก ก	41

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานลมที่จ่ายไฟเข้าระบบแล้ว (COD) ในประเทศไทย.....	9
ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะของกังหันลมที่ใช้งานวิจัย.....	20
ตารางที่ 3.2 ค่าบำรุงรักษา (O&M) และค่าเช่าพื้นที่ติดตั้ง (LLC).....	23
ตารางที่ 3.3 ค่าใช้จ่ายการเปลี่ยนอุปกรณ์ (LRC).....	23
ตารางที่ 3. 4 อุปกรณ์ที่ใช้งานในระบบ.....	25
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลของระบบ HRES ที่เหมาะสม เมื่อกำหนดเงินลงทุนไม่เกิน 100 ล้านบาท (3.22M\$) .....	33



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 กำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลม.....	8
รูปที่ 2.2 กระแสลมที่พัดผ่านประเทศไทย .....	8
รูปที่ 2.3 ศักยภาพความเร็วลมประเทศไทย.....	8
รูปที่ 2.4 (ก) แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปี (ข) แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยเดือน เมษายนที่มากที่สุด (ค) แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยเดือนธันวาคมที่น้อยสุด .....	10
รูปที่ 2.5 การแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน โดยเฉลี่ยทุกพื้นที่ทั่วประเทศ.....	10
รูปที่ 2.6 แสดงระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว .....	12
รูปที่ 2.7 PV Stand alone system.....	12
รูปที่ 2.8 ระบบการติดตั้งเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง .....	13
รูปที่ 2.9 PV Grid connected system .....	13
รูปที่ 2.10 โครงสร้างแบบทั่วไปของระบบไฮบริดพลังงานทดแทน [6].....	14
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	17
รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มแสง.....	18
รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความถี่ความเร็วลมที่เกิดขึ้น .....	18
รูปที่ 3.4 Power curve ของกังหันลมขนาด 225kW – 2000 kW .....	20
รูปที่ 3.5 การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าแบบ off-grid สำรองไฟฟ้า.....	26
รูปที่ 3.6 (a) The cognitive ( $c_{1i} = 2.5$ ; $c_{1f} = 0.5$ ) and (b) the social coefficients ( $c_{2i} = 0.5$ ; $c_{2f} = 2.5$ ) in the BPSO-TVAC .....	28
รูปที่ 3.7 Sigmoid function.....	29
รูปที่ 3.8 กระบวนการทำงานของ PSO ในการการออกแบบระบบ HRES.....	30
รูปที่ 4.1 แสดงการคำนวณมูลค่าพลังงานของระบบไฮบริดด้วย PSO เมื่อติดตั้งกังหันลมขนาด 900 kW และ เงินทุนเริ่มต้นไม่เกิน 100 ล้านบาท (3.22M\$).....	31
รูปที่ 4.2 แสดงการคำนวณมูลค่าพลังงานของระบบไฮบริดด้วย PSO เมื่อติดตั้งกังหันลมขนาด 1250 kW และ เงินทุนเริ่มต้นไม่เกิน 100 ล้านบาท (3.22M\$).....	32
รูปที่ 4.3 พลังงานรายปี (AEP) และต้นทุนพลังงานของระบบ (COE) เมื่อกำหนดงบประมาณไม่เกิน 100 ล้านบาท (3.22M\$) .....	34
รูปที่ 4.4 รายได้และอัตราผลตอบแทนของการลงทุนโดยกำหนดไม่เกิน 100 ล้านบาท (3.22M\$).....	35
รูปที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยมูลค่าการลงทุน แฟกเตอร์กำลังการผลิตพลังงานและต้นทุนของพลังงานแสงอาทิตย์จาก ฐานข้อมูล IRENA ระหว่างปี 2010–2018 [30] เปรียบเทียบกับผลการศึกษา .....	36
รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยมูลค่าการลงทุน แฟกเตอร์กำลังการผลิตพลังงานและต้นทุนของพลังงานลมจากฐานข้อมูล IRENA ระหว่างปี 2010–2018 [30] เปรียบเทียบกับผลการศึกษา .....	36

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

วิกฤตพลังงานเป็นปัญหาใหญ่ที่ทั่วโลกกำลังเผชิญ เนื่องจากเป็นทรัพยากรหลักที่มีผลต่อการพัฒนาทั้งด้านเศรษฐกิจและสังคม ดังนั้นเมื่อประเทศต่างๆ มุ่งเน้นพัฒนาศักยภาพและปัจจัยต่างๆ ให้กับประชากรที่มีจำนวนมากขึ้น จึงเป็นการเร่งการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและพลังงานมากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งพลังงานหลักจากเชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นมีอัตราการนำไปใช้งานมหาศาลในแต่ละวัน ทั้งนี้เชื้อเพลิงฟอสซิลเกิดจากการสะสมตามธรรมชาติ มีจำนวนจำกัด ถูกใช้แล้วหมดไป และมีโอกาสขาดแคลนในอนาคต เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น จึงทำให้มูลค่าพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลกระทบต่อทั้งสภาพเศรษฐกิจและสังคมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ นอกจากนี้การเปลี่ยนรูปพลังงานฟอสซิลเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทำให้เกิดมลภาวะต่างๆ ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างเห็นได้ชัดในปัจจุบัน ดังนั้นการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพควบคู่ไปกับการพัฒนาระบบพลังงานทดแทนต่างๆ ขึ้นมา จะทำให้เกิดเสถียรภาพและมีความยั่งยืนด้านพลังงาน รวมไปถึงลดการปล่อยมลภาวะสู่สิ่งแวดล้อมอีกด้วย

พลังงานถูกนำไปใช้ในหลายรูปแบบตามความต้องการ โดยพบว่าพลังงานไฟฟ้าเป็นรูปแบบที่ถูกเปลี่ยนมาจากแหล่งเชื้อเพลิงมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานไฟฟ้ามีความยืดหยุ่นและนำไปประยุกต์เป็นแหล่งต้นกำลังให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ได้ง่ายและหลากหลาย การส่งและกระจายผ่านสถานีย่อยและสายส่งสามารถเข้าถึงและตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานทุกระดับการใช้ไม่ยุ่งยาก ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าปริมาณมากถึง 164,323 GWh/ปี (พศ.2556) และมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 4.45% ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา [1] โดยแหล่งพลังงานในการผลิตไฟฟ้าประกอบไปด้วย ก๊าซธรรมชาติ 65.2% ถ่านหิน 22.2% น้ำมันเตาและดีเซล 1.0% ส่วนที่เหลือเป็นพลังงานหมุนเวียนและพลังงานอื่นๆ 11.6% [2] นั่นคือประเทศไทยจำเป็นต้องพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อผลิตไฟฟ้ากว่า 88.4% จึงจำเป็นต้องนำเข้าเชื้อเพลิงที่เป็นแหล่งพลังงานจำนวนมากในแต่ละปี เป็นผลทำให้ขาดความยืดหยุ่นในการรักษาเสถียรภาพด้านพลังงานในประเทศ

พลังงานทดแทน คือพลังงานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทดแทนแหล่งพลังงานฟอสซิล พลังงานทดแทนภายในประเทศไทย ที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า ได้แก่ พลังงานจากแสงอาทิตย์ ลม ความร้อนใต้พิภพ น้ำ พืช วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร และขยะ เป็นต้น แต่ทว่าพลังงานทดแทนดังกล่าวมีกระจายอยู่ตามธรรมชาติและเป็นแหล่งที่ไม่มีความสม่ำเสมอ การลงทุนเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ผลิตไฟฟ้าจึงสูงกว่าการนำเข้าแหล่งพลังงานประเภทเชื้อเพลิงฟอสซิลมาใช้ ในปัจจุบันพบว่า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตของประเทศไทยมีสัดส่วนในการใช้พลังงานทดแทนในการผลิตไฟฟ้าที่ไม่รวมไฟฟ้าที่ผลิตใช้เอง (Off-grid) และไม่รวมจากพลังงานน้ำเพียง 3,415 GWh/ปี (พศ.2556) หรือเพียง 2.0% เท่านั้นจากผลิตไฟฟ้าทั้งหมด [3] ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มสัดส่วนการนำพลังงานทดแทนมาใช้เพิ่มขึ้น ประเทศไทยจึงมีนโยบายส่งเสริมให้มีการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทน โดย



กำหนดยุทธศาสตร์ส่งเสริมการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกในสัดส่วน 25% ของพลังงานทั้งหมดภายใน 10 ปี (Alternative Energy Development Plan ; AEDP 2012-2021) ซึ่งประกอบไปด้วย 1. การส่งเสริมให้ชุมชนมีส่วนร่วมในการผลิตและการใช้พลังงานทดแทนอย่างกว้างขวาง, 2. การปรับมาตรการจูงใจสำหรับการลงทุนจากภาคเอกชนให้เหมาะสมกับสถานการณ์, 3. การแก้ไขกฎหมาย และกฎระเบียบที่ยังไม่เอื้อต่อการพัฒนาพลังงานทดแทน, 4. การปรับปรุงระบบโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ระบบสายส่ง สายจำหน่ายไฟฟ้า รวมทั้งการพัฒนาสู่ระบบ Smart Grid, 5. การประชาสัมพันธ์ และสร้างความรู้ความเข้าใจต่อประชาชน และ 6. การส่งเสริมให้งานวิจัยเป็นเครื่องมือในการพัฒนาอุตสาหกรรมพลังงานทดแทนแบบครบวงจร [4] จึงมีความจำเป็นในการศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบระบบที่เหมาะสมในเชิงเทคนิคเพื่อรองรับนโยบายดังกล่าว

พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมได้ถูกนำมาผลิตไฟฟ้าและมีบทบาทที่สำคัญอย่างมากต่อการนำพลังงานทดแทนมาใช้อย่างเป็นทางการไม่เพียงส่งเสริมเสถียรภาพและความมั่นคงด้านพลังงาน แต่ยังช่วยลดมลภาวะที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน และส่งผลต่อจิตวิทยาและการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของประชาชนที่ต้องการใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แต่ทว่า ปัญหาของการนำพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมมาใช้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่น การเป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่ให้พลังงานไม่แน่นอน ทำให้การออกแบบระบบพลังงานจากแหล่งผลิตเดียวที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูง (Reliability) จากพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานลม ต้องมีกำลังการผลิตขนาดใหญ่มากเกินความจำเป็น ทั้งยังจำเป็นต้องมีแบตเตอรี่ความจุสูงเพื่อเก็บสะสมพลังงานสำรองใช้ในเวลาที่ไม่มีแสงแดดหรือไม่มีลมพัด เพื่อแก้ปัญหานี้ จึงได้มีการพัฒนาระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทน (Hybrid Renewable Energy System; HRES) ระหว่างแหล่งไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทนด้วยกัน หรือระหว่างพลังงานทดแทนกับการผลิตไฟฟ้าที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ขึ้นมาเพื่อทำให้การจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีความเสถียรภาพและยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น มีความน่าเชื่อถือสูงขึ้นและมูลค่าพลังงานลดลง (Cost of Energy) เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนแหล่งเดียว

งานวิจัยนี้จะทำการออกแบบระบบไฮบริดที่เหมาะสม (Optimal HRES) สำหรับพลังงานทดแทนแบบแยกอิสระ (Off-grid) จากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมซึ่งมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งสะสมพลังงาน โดยวิธีพาร์ติเคิลสวาร์มแบบเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ตัวเร่งตามรอบเวลาการคำนวณ (Particle Swarm Optimization with Time Varying Acceleration Coefficients; PSO-TVAC) จากการกำหนดสมการหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Functions) ที่ขึ้นอยู่กับความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์จากมูลค่าพลังงาน (Levelized Cost of Energy) และความน่าเชื่อถือของระบบจากความเป็นไปได้ในการสูญเสียการจ่ายกำลังทางไฟฟ้าให้กับระบบ (Loss of Power Supply Probability; LPSP) โดยประยุกต์ใช้ข้อมูลเชิงอนุกรมของแสงแดดและลมในพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นกรณีศึกษา เพื่อเป็นแนวทางในการนำระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมและความน่าเชื่อถือของระบบ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อออกแบบระบบพลังงานทดแทนไฮบริดจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมและความน่าเชื่อถือของระบบ

- 1.2.2 เพื่อนำกระบวนการแก้ปัญหาและตัดสินใจทางคณิตศาสตร์แบบเมต้าฮิวริสติกส์ (Metaheuristic Algorithm) มาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาเชิงการออกแบบด้านไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทน
- 1.2.3 เพื่อทราบถึงศักยภาพ ประสิทธิภาพ และการออกแบบระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทนเพื่อผลิตไฟฟ้าใช้อย่างเหมาะสมในพื้นที่กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก
- 1.2.4 เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบที่เหมาะสมในนำไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทนมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1.3 ขอบเขตการทำโครงการงาน

ออกแบบระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทนพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมที่เหมาะสมแบบแยกอิสระ (Optimal for Stand-alone Hybrid Renewable Energy System; PV/Wind Turbine System) ด้วยกระบวนการแก้ปัญหาและตัดสินใจทางคณิตศาสตร์แบบเมต้าฮิวริสติกส์ (Metaheuristic Algorithm) ชนิดพาร์ติเคิลสวอร์มที่เปลี่ยนสัมประสิทธิ์ตัวเร่งตามรอบเวลาการคำนวณ (PSO-TVAC) กับข้อมูลอนุกรมเวลาของแสงแดดและลมในพื้นที่กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก โดยพิจารณาเปรียบเทียบถึงความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม (Levelized Cost of Energy) และเกณฑ์ความน่าเชื่อถือของการจ่ายพลังงาน (Loss of Power Supply Probability) ให้กับภาระทางไฟฟ้าที่ไม่คงที่ (Demand Load)

### 1.4 สมมุติฐานของงานวิจัย

พาร์ติเคิลสวอร์มออปติไมเซชันสามารถนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาในการออกแบบระบบไฮบริดพลังงานทดแทนจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ที่มีลักษณะของพฤติกรรมระบบทั้งแบบต่อเนื่องและแยกเป็นส่วน (Continuous and Discrete behavior) โดยพิจารณาถึงความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมและเกณฑ์ความน่าเชื่อถือของการจ่ายพลังงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1.5 กรอบแนวความคิดของโครงการงาน

การวิจัยมีลำดับการดำเนินการ เริ่มจากรวบรวมข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์และลม โดยใช้ข้อมูลอนุกรมเวลารายชั่วโมงย้อนหลังจำนวน 3 ปี (พศ.2554-2556) บันทึกโดยวิทยาลัยพลังงาน มหาวิทยาลัยนเรศวร นำมาหาข้อสรุป สร้างรูปแบบเชิงสถิติ ได้แก่ แผนที่การกระจายตัวของพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม (Solar and Wind Distribution Map) เพื่อเป็นข้อมูลอินพุตสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลข ทำการพัฒนารูปแบบต่างๆ (Configuration) ของระบบไฮบริดพร้อมทั้งพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์ขององค์ประกอบต่างๆ ภายในระบบดังกล่าว และนำข้อมูลเชิงสถิติข้างต้นมาวิเคราะห์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมพลังงานและการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์พลังงาน ผลที่ได้คือ ศักยภาพ (Energy Potential) และมูลค่าพลังงาน (Cost of Energy) ของพลังงานทดแทนแต่ละประเภท จากนั้นจะทำการพัฒนาอัลกอริทึม PSO-TVAC ด้วยโปรแกรม Matlab เพื่อใช้แก้ปัญหาและออกแบบหาระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทนที่เหมาะสม โดยกำหนดสมการเป้าหมายแบบ Multi-Objective function ที่พิจารณาถึงความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมและเกณฑ์

ความน่าเชื่อถือของการจ่ายพลังงานตามความต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำการทดสอบเชิงทฤษฎีหรือทดสอบหาความถูกต้องของผลลัพธ์จากซอฟต์แวร์สำเร็จรูป

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อออกแบบระบบไฮบริดพลังงานทดแทน
- 1.6.2 ศักยภาพด้านพลังงานทดแทนในระบบไฮบริดพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม
- 1.6.3 ระบบไฮบริดพลังงานทดแทนที่มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และมีความน่าเชื่อถือสูง
- 1.6.4 บทความวิชาการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติที่มี Impact Factor อย่างน้อย 1 ฉบับ เพื่อเผยแพร่ความรู้ให้แก่ผู้สนใจ นักวิจัยหรือผู้พัฒนาพลังงานทดแทน (Developer)
- 1.6.5 ข้อมูลเชิงกลยุทธ์เพื่อกำหนดแนวทางในการพัฒนาระบบพลังงานทดแทนที่เหมาะสม

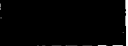


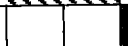





#### 1.7 วิธีการดำเนินการวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัยนี้ประกอบด้วย 7 ขั้นตอนได้แก่

- 1.7.1 รวบรวมข้อมูลอนุกรมเวลาสำหรับค่าปริมาณแสงตกกระทบ (Irradiation) ทั้งแสงตรงและแสงฟุ้ง (Direct and Diffuse) ความเร็วลมและทิศทาง รวมไปถึงทิศทางลมและความชื้นของบรรยากาศ
- 1.7.2 จัดเรียงข้อมูล ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติ จัดทำแผนผังการกระจายตัวของแสงแดดและลม (Solar and Wind Distribution map)
- 1.7.3 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านวิศวกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์ (Energy and Financial Model) สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ทำการคำนวณศักยภาพและค่าพลังงาน (Potential and Cost of Energy) ของแหล่งพลังงานทั้งสอง
- 1.7.4 สร้างรูปแบบของระบบไฮบริด (Configuration) จัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกำเนิดแหล่งพลังงานและระบบสะสมพลังงาน (Reservoir)
- 1.7.5 ออกแบบอัลกอริทึมบนพื้นฐานของ Particle Swarm Optimization พร้อมทั้งทดสอบระบบที่ออกแบบเบื้องต้นกับอัลกอริทึมที่ออกแบบ
- 1.7.6 กำหนดขอบเขตและข้อจำกัดต่างๆ ทำการประเมินผลและปรับปรุงอัลกอริทึม เพื่อให้สามารถใช้แก้ปัญหาให้มีความคลาดเคลื่อนต่ำและมีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับลักษณะปัญหาในพื้นที่
- 1.7.7 สรุปผล จัดทำรายงานและเผยแพร่ผลการพัฒนาอัลกอริทึมในบทความวิชาการที่มี Impact Factor

### 1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงานโครงการ

ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน (  แผนดำเนินงาน  ดำเนินงานจริง )

	การดำเนินงานโครงการ	เดือนที่											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	รวบรวมข้อมูลอนุกรมเวลาและวิเคราะห์เชิงสถิติ												
2	จัดทำแผนผังการกระจายตัว												
3	สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์วิศวกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์												
4	ออกแบบระบบไฮบริด (Config)												
5	ออกแบบพัฒนาอัลกอริทึม												
6	แก้ปัญหาระบบและประเมินผล												
7	สรุปจัดทำรายงาน												



## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

พลังงานทดแทนที่สำคัญ ได้แก่ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานคลื่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวภาพ พลังงานเหล่านี้ตามแผนพัฒนาและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนมีแผนที่จะทำให้มีสัดส่วนเป็นร้อยละ 20 [2] ของพลังงานทั้งหมด การศึกษาและพัฒนาพลังงานทดแทนเป็นการศึกษาค้นคว้าทดสอบ เพื่อให้เกิดการพัฒนาและสาธิต ตลอดจนส่งเสริมและเผยแพร่พลังงานทดแทน ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ในท้องถิ่น เช่น พลังงานลม แสงอาทิตย์ ชีวมวล และอื่นๆ เพื่อให้มีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทน เกิดการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งมีความเหมาะสมทั้งทางด้านเทคนิค เศรษฐกิจและสังคม งานศึกษาและพัฒนาพลังงานทดแทน เป็นส่วนหนึ่งของแผนงานพัฒนาพลังงานทดแทนซึ่งมีโครงการที่เกี่ยวข้องโดยตรงภายใต้แผนงานนี้คือ โครงการศึกษาวิจัยด้านพลังงานและมีความเชื่อมโยงกับแผนงานพัฒนาชนบทในโครงการจัดตั้งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทน สำหรับหมู่บ้านชนบทที่กระแสไฟฟ้าเข้าถึงยาก ประโยชน์ของพลังงานทดแทนในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกพยายามศึกษาและค้นหาพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และมีประสิทธิภาพดียิ่งกว่าพลังงานแบบเดิม เพื่อช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย ลดปัญหามลพิษและสิ่งแวดล้อมของโลก รวมทั้งช่วยประหยัดพลังงาน ดังนั้นพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือก จึงเป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานแบบเดิมได้อย่างไม่จำกัด ทั้งยังหาได้จากธรรมชาติและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพื่อช่วยลดปัญหาการขาดแคลนพลังงานรวมทั้งลดมลพิษอีกด้วย

#### 2.1 พลังงานลม

เป็นพลังงานธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งใช้แล้วไม่มีวันหมดสิ้นไปจากโลก ได้รับความสนใจนำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์อย่างกว้างขวางกังหันลมก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำพลังงานลมมาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ โดยเฉพาะในการผลิตกระแสไฟฟ้าและการสูบน้ำ พลังงานลมเกิดจากพลังงานจากดวงอาทิตย์กระทบโลกทำให้อากาศร้อนและลอยตัวสูงขึ้น ซึ่งอากาศจากบริเวณอื่นเย็นและหนาแน่นมากกว่าจึงเข้ามาแทนที่ การเคลื่อนที่ของอากาศเหล่านี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดลมและมีอิทธิพลต่อสภาพลมฟ้าอากาศในบางพื้นที่ของประเทศไทยโดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวฝั่งทะเลอันดามันและด้านทะเลอ่าวไทยมีพลังงานลมที่อาจนำมาใช้ประโยชน์ในลักษณะพลังงานกล (กังหันสูบน้ำ, กังหันผลิตไฟฟ้า) ศักยภาพของพลังงานลมที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ สำหรับประเทศไทยมีความเร็วอยู่ระหว่าง 3 - 5 เมตรต่อวินาที และความเข้มพลังงานลมที่ประเมินไว้ได้อยู่ระหว่าง 20 - 50 วัตต์ต่อตารางเมตร [3]

##### 2.1.1 กังหันลม

กังหันลม คือเครื่องจักรกลอย่างหนึ่งที่สามารถรับและแปลงพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกลได้ และนำพลังงานกลมาใช้เพื่อสูบน้ำโดยตรงหรือผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า การพัฒนากังหันลมเพื่อ

นำมาใช้ประโยชน์เริ่มมีมาตั้งแต่โบราณจนถึงยุคปัจจุบัน โดยการออกแบบกังหันลมต้องอาศัยความรู้ทางด้านพลศาสตร์ของลมและหลักวิศวกรรมศาสตร์ในแขนงต่างๆ เพื่อให้ได้กำลังงานพลังงาน และประสิทธิภาพสูงสุด กังหันลมได้รับกำลังงาน โดยการเปลี่ยนแรงของลมเป็นแรงบิด (Torque) ที่กระทำต่อใบกังหัน ปริมาณของพลังงานที่ลมส่งผ่านไปยังใบกังหันขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย คือ ความหนาแน่นของอากาศ พื้นที่ของโรเตอร์ โดยปัจจัยแรกนั้น พลังงานจลน์ของลมขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศ กังหันลมจะได้รับพลังงานจากอากาศมากขึ้นเมื่อความหนาแน่นของอากาศมีค่าสูงขึ้น

พลังงานลม ( $E_w$ ) เป็นพลังงานจลน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ดังนั้นอากาศที่มีมวล  $m$  ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  จะก่อให้เกิดพลังงานจลน์ ตามสมการดังนี้

$$E_w = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ  $E_w$  = พลังงานจลน์ของลม [N.m]

$$m = \text{มวลอากาศ [kg] โดย } \dot{m} = \rho AV \quad (2.2)$$

$$v = \text{ความเร็วของมวลอากาศ [m/s]}$$

เมื่อ  $\dot{m}$  คือ อัตราการเคลื่อนที่ของลม [kg/s]

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ [kg/m<sup>3</sup>]

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่มวลไหลผ่าน [m<sup>2</sup>]

จะได้สมการพลังงานจลน์ต่อหน่วยเวลาคือสมการของกำลังลม ( $P_w$ )

$$P_w = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (2.3)$$

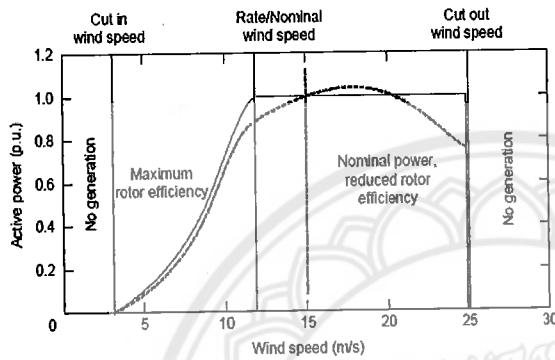
### 2.1.2 เส้นโค้งกำลังของกังหันลม (Turbine power curve)

พลังงานที่ได้รับจากกังหันลมจะมีเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเร็วลม ณ ที่ความเร็วลมต่ำในช่วง 1-3 เมตรต่อวินาที กังหันลมยังไม่ทำงานจึงยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ ความเร็วลมระหว่าง 2.5-5 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะเริ่มทำงานเรียกช่วงนี้ว่า Cut in wind speed และที่ความเร็วลมในช่วง 12-15 เมตรต่อวินาที เรียกว่า Nominal or Rate wind speed ซึ่งเป็นช่วงที่กังหันลมมีกำลังสูงสุด และในช่วง Cut out wind speed คือช่วงที่ความเร็วลมสูงกว่า 25 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะหยุดทำงานเนื่องจากความเร็วลมสูงเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อกลไกและระบบของกังหันลมได้ Power curve ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และสามารถคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ที่ความเร็วต่างๆ ดังสมการดังนี้ [6]

### 2.1.3 ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย

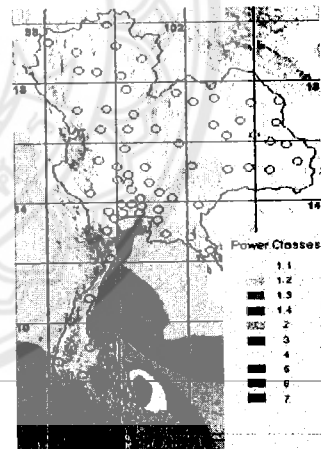
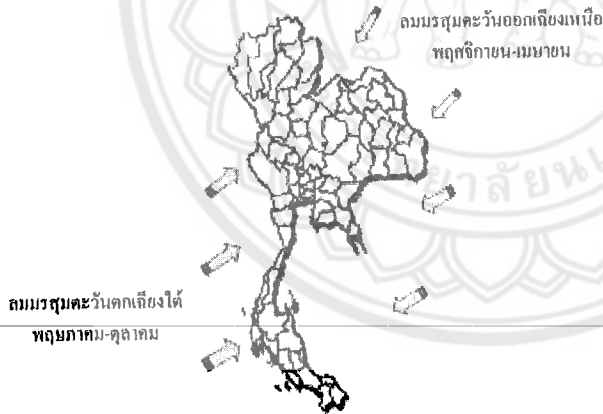
ศักยภาพพลังงานลมเป็นข้อมูลหรือแผนที่ซึ่งบ่งบอกถึงความเร็วลม พลังงานที่มีอยู่ในลมในบริเวณนั้นๆ ในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยปกติแล้วจะใช้ระยะเวลาอย่างน้อย 1 ปี ในการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความเร็วลม ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย ซึ่งจัดทำโดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน

พบว่าประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานลมบ้างค่อนข้างน้อย แม้ว่าพลังงานลมเป็นพลังงานค่อนข้างน้อย แม้ว่าพลังงานลมเป็นพลังงานสะอาด แต่พลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ยังคงต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านอื่นๆประกอบด้วย ยกเว้นในพื้นที่ที่มีลมพัดอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปี เนื่องจากการที่ความเร็วของกังหันลมมีความจำเป็นต้องมีไฟฟ้าตอบสนองความต้องการตลอดเวลา คุณค่าของลมสำหรับระบบไฟฟ้าจึงต่ำ ซึ่งความเร็วลมเฉลี่ยภูมิภาคประเทศไทย มีความเร็วลมเฉลี่ยของประเทศอยู่ในระดับปานกลาง - ต่ำ มีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4-5 เมตร/วินาที พบว่าลมในประเทศไทยส่วนใหญ่อยู่ในระดับที่ 1.1-1.4 มีเพียงพื้นที่ทางชายฝั่งทะเลภาคใต้ตอนล่างที่อยู่ Power Class ระดับ 2 ดังรูปที่ 2.2



$$P(v) = \begin{cases} 0, < V_{cutin} \\ \frac{1}{2} \rho A v^3, >= V_{cutin} \\ P_{rated}, <= V_{cutout} \\ 0, > V_{cutout} \end{cases} \quad (2.4)$$

รูปที่ 2.1 กำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลม  
ที่มา : <http://powerplantkmtnb.blogspot.com>



รูปที่ 2.2 กระแสลมที่พัดผ่านประเทศไทย  
ที่มา : <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=52>

รูปที่ 2.3 ศักยภาพความเร็วลมประเทศไทย  
ที่มา : <http://www.reca.or.th/library/wind-power.aspx>

ตารางที่ 2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานลมที่จ่ายไฟเข้าระบบแล้ว (COD) ในประเทศไทย

ชื่อบริษัท	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	กำลังการผลิตติดตั้ง (MW)
พลังงานลมลำตะคอง	คลองไผ่	สีคิ้ว	นครราชสีมา	2.500
บริษัท เค.อาร์.ทู จำกัด	ห้วยบง	ด่านขุนทด	นครราชสีมา	103.500
แหลมพรหมเทพ	ราไวย์	เมืองภูเก็ต	ภูเก็ต	0.192
โครงการชั่งหัวมัน	เขาระบุก	ท่ายาง	เพชรบุรี	0.050
บริษัท เซาค้อ วินด์ฟาวเวอร์ จำกัด	ทุ่งสมอ	เขาค้อ	เพชรบูรณ์	60.000

ที่มา : [www.dede.go.th/download/state\\_58/en\\_land/Wind.pptx](http://www.dede.go.th/download/state_58/en_land/Wind.pptx)

จะเห็นได้ว่าพื้นที่ที่จะมีศักยภาพลมที่เหมาะสมนั้นส่วนมากจะเป็นพื้นที่บริเวณยอดเขาสูงที่มีการยกตัวของลมตามแนวเขา และพื้นที่เปิดโล่งได้แก่แนวชายฝั่งทะเลฝั่งตะวันออกซึ่งได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดจากอ่าวไทยในเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม และกุมภาพันธ์ แต่พื้นที่หลายแห่งในประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานลมค่อนข้างดี สามารถดำเนินการตั้งกังหันลมได้ ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3

## 2.2 พลังงานทดแทนพลังงานแสงอาทิตย์

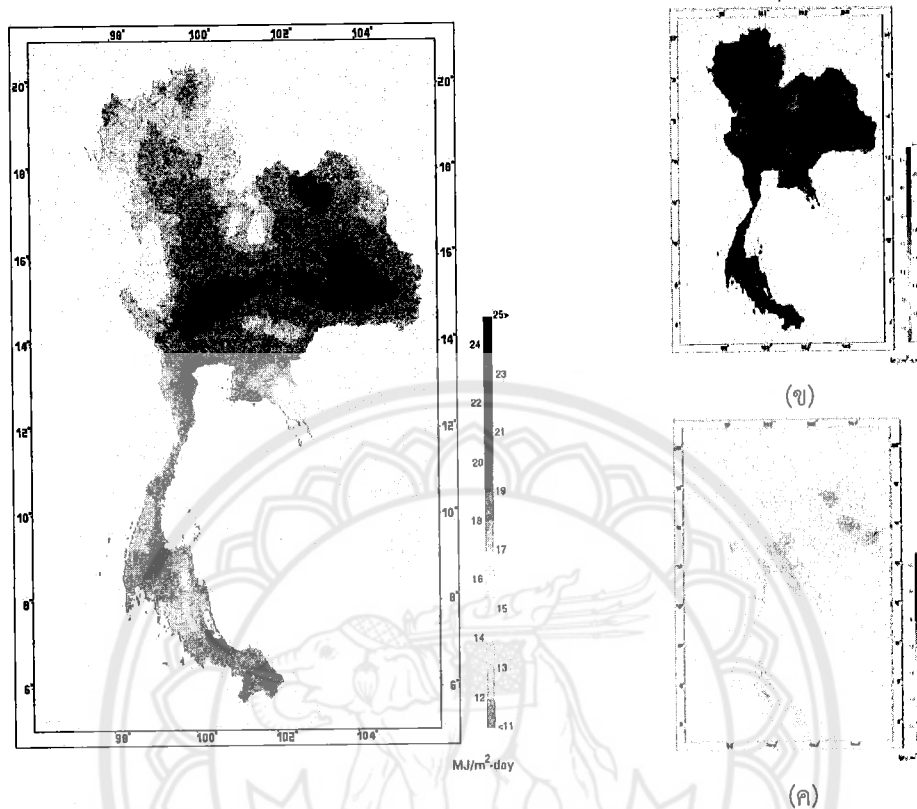
พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ เป็นพลังงานที่สะอาด ปราศจากมลพิษ และเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูง การผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแสงอาทิตย์นี้เป็นพลังงานซึ่งได้มาฟรีและไม่มีสิ้นสุดการนำเอาพลังงานจากแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ต้องอาศัยแผงโซลาร์เซลล์หรือ เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาสำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผ่นเซลล์ ก็จะถ่ายทอดพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดประจุบวกและลบขึ้นในสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำประเภท N จะดึงประจุลบ ส่วนสารกึ่งตัวนำประเภท P จะดึงประจุบวก ทำให้มีการสะสมของประจุที่ขั้วทั้งสองขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมวงจรภายนอก จะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันทีหรือนำไปกักเก็บไว้ในแบตเตอรี่เพื่อใช้งานในภายหลังได้

เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละพื้นที่ต่างกัน และมีความสำคัญในการพิจารณานำไปใช้ในแต่ละพื้นที่ พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีอาทิตย์สูงสุดช่วงเดือนเมษายน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $22 \text{ MJ/m}^2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ข) และรับรังสีอาทิตย์น้อยสุดช่วงเดือนธันวาคมค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $16.1 \text{ MJ/m}^2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ค) เมื่อพิจารณาแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีพบว่าบริเวณที่ได้รับรังสีอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ  $20 \text{ MJ/m}^2 - \text{day}$  จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีค่าเท่ากับ  $18.2 \text{ MJ/m}^2 - \text{day}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก)

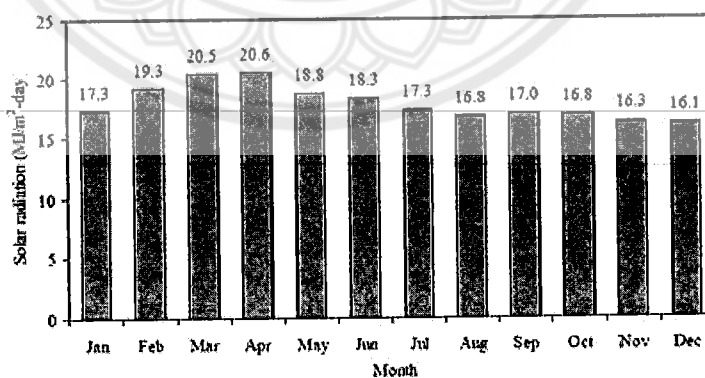
การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์เราจำเป็นต้องทราบการแปรค่าในรอบปีของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ด้วย จึงได้ทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบทุกพื้นที่ทั่วประเทศไทยจากแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายเดือน แล้วนำมาเขียนกราฟกับเวลาในรอบปี ผลที่ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 2.5 จะ



เห็นว่าค่ารังสีดวงอาทิตย์แปรค่าในรอบปีอยู่ในระหว่าง 16-22 MJ / m<sup>2</sup> - day โดยมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่เดือนมกราคมและสูงสุดในเดือนเมษายน แล้วลดลงต่ำสุดในเดือนธันวาคม [8]



รูปที่ 2.4 (ก) แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปี (ข) แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยเดือนเมษายนที่มากที่สุด (ค) แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยเดือนธันวาคมที่น้อยสุด  
ที่มา : <http://www.dede.go.th/main.php?filename=index>



รูปที่ 2.5 การแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน โดยเฉลี่ยทุกพื้นที่ทั่วประเทศ  
ที่มา : <http://www.spower.co.th/spower-solar.php>

พลังงานแสงอาทิตย์ปัจจัยด้านความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ [7]

$$P_s = \eta_s A_s G_\beta \quad (2.5)$$

- เมื่อ  $P_s$  คือ ศักยภาพเชิงกายภาพ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อวัน (kWh/day)
- $\eta_s$  คือ ค่าประสิทธิภาพของแผง PV
- $A_s$  คือ พื้นที่ทั้งหมด ตารางเมตร  $m^2$
- $G_\beta$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต่อตารางเมตรต่อวัน

เมื่อ ประสิทธิภาพของ PV

$$\eta_s = \eta_r \eta_{pc} [1 - \beta \times (T_c - T_{ref})] \quad (2.6)$$

- เมื่อ  $\eta_r$  คือ ประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้งาน
- $\eta_{pc}$  คือ ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดกำหนดให้เท่ากับ 1
- $\beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ มีค่าอยู่ในช่วง 0.0004-0.0006 ต่อองศาเซลเซียส
- $T_{ref}$  คือ อุณหภูมิอ้างอิง ( $^{\circ}C$ )
- $T_c$  คือ อุณหภูมิของ cell ประมาณจากอุณหภูมิในอากาศ ( $^{\circ}C$ ) และความเข้มแสง  $G_\beta$  ดังสมการต่อไปนี้

$$T_c = T_a + \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right) G_\beta \quad (2.7)$$

- เมื่อ NOCT คือ ค่าอุณหภูมิของเซลล์ที่อ้างอิงถึงจากการทดสอบที่ความเข้มแสง  $800 \text{ W / m}^2$
- $G_\beta$  คือ ค่าความเข้มแสงเท่ากับ  $800 \text{ W / m}^2$  สำหรับความเร็วลมที่  $1 \text{ m / s}$
- $T_a$  คือ อุณหภูมิอากาศ ( $^{\circ}C$ )

### 2.3 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี (Annual Energy Production)

ของพลังงานทดแทนทั้ง 3 แหล่ง อันประกอบด้วย พลังงานน้ำ พลังงานลม และ พลังงานแสงอาทิตย์ นั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยการทำงาน ตามสมการดังนี้

$$E_i = P_i \times CF_i \times TF_i \times 24 \times 365 \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $P_i$  คือ กำลังการผลิตของแหล่งพลังงาน
- $CF_i$  คือ อัตราความสามารถในการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงาน โดยกำหนดให้
- $CF_1 = 0.15$  (Solar PV)
- $CF_2 = 0.05$  (Wind at 20m.)
- $CF_3 = 0.3$  (Hydro power)

$TF_i$  คือ ปัจจัยการทำงานของแหล่งพลังงานใน 12 เดือน (1ปี) โดยกำหนดให้  $TF_1, TF_2 = 1$  และ  $TF_3 = 7/12$  เป็นเดือนที่มีการไหลของน้ำ ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปีของแหล่งพลังงานสามารถหาได้จาก

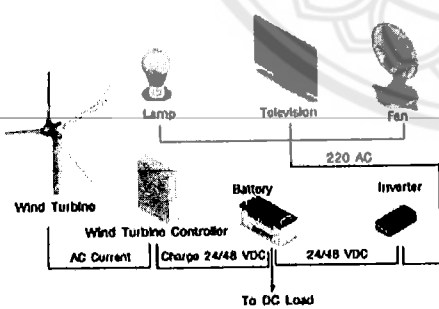
$$AEP_i = P_i \times CF_i \times 8760 \quad (2.9)$$

เมื่อ  $AEP_i$  คือ หน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี (kwh/year)

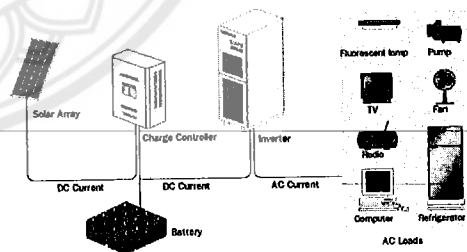
## 2.4 ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า (System Implementation)

ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีส่วนสำคัญอย่างมาก จะต้องมีความเชื่อถือได้ จะต้องประกอบด้วย การรับกระแสไฟฟ้าจาก แหล่งผลิตมีเครื่องช่วยเชื่อมโยงกันในการจ่ายพลังงานไฟฟ้า ระบบการติดตั้งกังหันลมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ ระบบการติดตั้งแบบเดี่ยว (Stand Alone System) และระบบการติดตั้งแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง (Grid Connected System) [8]

2.4.1 ระบบการติดตั้งแบบเดี่ยว (Stand Alone System) ดังแสดงรูปที่ 2.6 เป็นระบบที่ต้องใช้ชุดเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับเป็นที่เก็บพลังงาน (Battery Bank) ซึ่งระบบนี้จะต้องมีการควบคุมการทำงานให้สัมพันธ์กันกับระบบควบคุมการทำงานของกังหันลม (Wind Turbine Controller) เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้เป็นไปตามความเร็วลมที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ระบบควบคุมการทำงานของกังหันลมจะต้องมีระบบป้องกันตัวเอง เพื่อป้องกันกังหันลมไม่ให้เกิดความเสียหาย ในกรณีที่ความเร็วลมของกังหันลมมีค่ามากเกินไปกว่าที่ออกแบบไว้ ระบบการติดตั้งแบบนี้ เหมาะสำหรับติดตั้งใช้งานในที่พักอาศัย ชุมชนหรือพื้นที่ที่ห่างไกลจากสายส่งหลัก ขณะที่ถ้าเป็นระบบ เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand alone system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้า กระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.7

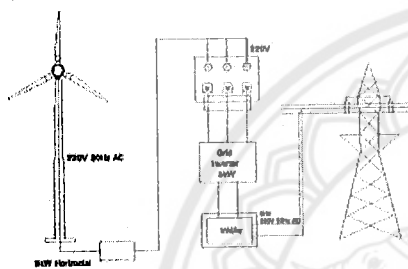


รูปที่ 2.6 แสดงระบบการติดตั้งใช้งานแบบเดี่ยว  
ที่มา : <http://www.encos.co.th/articles/details/5>

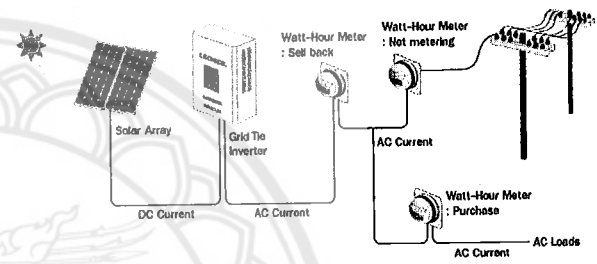


รูปที่ 2.7 PV Stand alone system  
ที่มา : [http://www.leonics.com/system/solar\\_photovoltaic/solar\\_grid\\_tie\\_system/](http://www.leonics.com/system/solar_photovoltaic/solar_grid_tie_system/)

2.4.2 ระบบการติดตั้งใช้งานแบบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง (On grid system) เป็นการติดตั้งใช้งานสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้การเชื่อมต่อกับระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ไม่ต้องมีชุดเก็บพลังงานหรือแบตเตอรี่ โดยชุดแปลงไฟฟ้าของระบบนี้ต้องมีระบบควบคุมที่ซับซ้อนและสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่งได้ อีกทั้งชุดแปลงไฟฟ้าของระบบนี้ยังมีหน้าที่สำคัญ ที่จะต้องควบคุมแรงดันหรือความถี่ทางไฟฟ้าให้เหมาะสมและสามารถป้องกันกระแสไฟฟ้าช้อนกับไฟฟ้าจากสายส่งหลักได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.9



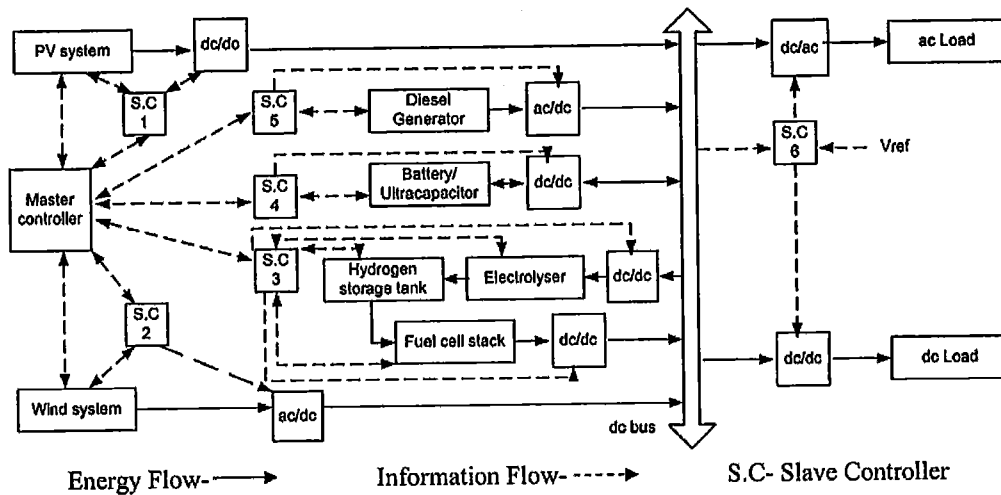
รูปที่ 2.8 ระบบการติดตั้งเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบสายส่ง  
ที่มา : <http://www.encos.co.th/articles/details/5>



รูปที่ 2.9 PV Grid connected system  
ที่มา : [http://www.leonics.com/system/solar\\_photovoltaic/solar\\_grid\\_tie\\_system/](http://www.leonics.com/system/solar_photovoltaic/solar_grid_tie_system/)

## 2.5 ระบบผลิตไฟฟ้าชนิดไฮบริดพลังงานทดแทน

ระบบไฮบริดพลังงานทดแทนคือ การนำแหล่งพลังงานทดแทนมากกว่า 1 แหล่งต่อรวมเข้าด้วยกันดังรูป 2.10 โดยอาจมีการต่อรวมเข้ากับแหล่งพลังงานฟอสซิลชนิดใดชนิดหนึ่ง (Conventional source) และแหล่งเก็บสำรองพลังงานด้วยหรือไม่ก็ได้ โดยอาจเป็นระบบแยกอิสระ (stand-alone) หรือรวมเข้ากับกริดก็ได้ (Grid connection) [5] วิธีที่ง่ายที่สุดคือการออกแบบที่เลือกสภาวะแสงแดดและลมแบบเฉลี่ย หรือเลือกในกรณีเลวร้ายที่สุดที่อาจเกิดขึ้นได้ (Worst Scenario) มาออกแบบระบบ แต่วิธีการนี้มีแนวโน้มทำให้ระบบมีขนาดใหญ่เกินไป เนื่องจากกรณีดังกล่าวมีโอกาสเกิดขึ้นน้อย และค่าเฉลี่ยก็ไม่ได้คงที่ตลอดเวลา ซึ่งโดยทั่วไปการประเมินประสิทธิภาพของระบบพลังงานมักจะใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาของสภาพอากาศและสภาวะความต้องการภาระทางไฟฟ้าที่ต้องใช้เวลานานเป็นปี ทำให้การคำนวณเพื่อหาค่าตอบซับซ้อนมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการพัฒนาปัญหาที่ซับซ้อน การเลือกสมการเป้าหมายที่หลากหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Functions) พฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นของส่วนประกอบระบบ รวมถึงข้อมูลอนุกรมเวลาของตัวแปรสภาพแสง ลมและอากาศ จึงต้องเลือกใช้เครื่องมือทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาที่เหมาะสม



รูปที่ 2.10 โครงสร้างแบบทั่วไปของระบบไฮบริดพลังงานทดแทน [6]

P. Bajpai and V. Dash [6] รวบรวมกระบวนการออกแบบระบบ HRES แบบแยกอิสระเป็น Generalize model ดังรูปที่ 1 โดยเน้นไปที่การเลือกขนาดของระบบที่เหมาะสม โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนประกอบต่างๆ เลือกกลยุทธ์ในการจัดการไหลของพลังงานไปยังโหลดทางไฟฟ้าที่เหมาะสม (Optimal energy flow management)

P. Nema และคณะ [7] แสดงถึงการพัฒนาระบบไฮบริดพลังงานทดแทนในปัจจุบัน แต่ยังคงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงสมรรถนะ ความแม่นยำในการจัดเตรียมพลังงาน และความน่าเชื่อถือของระบบ เพื่อเป็นทางเลือกในพื้นที่ชนบทที่ระบบไฟฟ้าไม่มีความเสถียรภาพ

M.K. Deshmukh และ S.S. Deshmukh [8] ได้พัฒนาในรายละเอียดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบ HRES สำหรับพื้นที่ห่างไกลจากระบบกริด (Remote area) และสรุปถึงแนวโน้มของการพัฒนาระบบดังกล่าวโดยพิจารณาจากจำนวนเอกสารทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์อ้างอิงถึง

R.Luna-Rubio และคณะ [9] ได้รวบรวมกระบวนการในการออกแบบขนาดของระบบ HRES พิจารณาจากสถาปัตยกรรมของระบบ และการเลือกอัลกอริทึมซึ่งแบ่งเป็น กระบวนการทางสถิติความเป็นไปได้ (Probabilistic) และกระบวนการในการวิเคราะห์ (Analytical) ให้เหมาะสมกับสมการเป้าหมาย ขอบเขตและข้อจำกัดต่างๆ

W. Zhou และคณะ [10] ได้รวบรวมกระบวนการออกแบบระบบไฮบริดแบบแยกอิสระ (Stand-alone system) ที่ใช้กันในปัจจุบัน โดยเปรียบเทียบการเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป HOMER ที่พัฒนาโดย NREL, HOGA ที่ใช้ Genetic Algorithms ในการคำนวณ และโปรแกรมสเปรดชีต HYBRID ในการออกแบบ โดยโปรแกรมดังกล่าวเน้นไปที่ผลตอบแทนเชิงเศรษฐศาสตร์เป็นหลัก ขณะที่การออกแบบโดยใช้เทคนิคในการออปติไมเซชัน เช่น กระบวนการทางกราฟฟิก การเลือกใช้ความน่าจะเป็น เทคนิคการคำนวณซ้ำตามลำดับ (Iterative) และการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ จะทำให้งานวิจัยมีความหลากหลายในการเลือกสมการเป้าหมายมากกว่าโปรแกรมสำเร็จรูป

H. Yang และคณะ [11] เสนอวิธีการออกแบบระบบไฮบริดระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานที่มีแบตเตอรี่สำรองพลังงานจากค่าอนุกรมเวลา โดยใช้ Genetic Algorithm ในการเลือกส่วนประกอบที่เหมาะสมของระบบคือจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ ขนาดของกังหันลม ขนาดของแบตเตอรี่ สำหรับโหลดที่ต้องการในสถานีสื่อสารแห่งหนึ่งเป็นกรณีศึกษา โดยมีเป้าหมายให้ Annualized cost ต่ำที่สุด ทั้งยังสามารถรักษาความน่าเชื่อถือของระบบจากโอกาสของการสูญเสียพลังงานไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ (Loss of power supply probability, LPSP) ได้ตามกำหนด จากการออกแบบในเบื้องต้น H. Yang และคณะ [12] ได้ทำการสร้างระบบไฮบริดเพื่อจ่ายพลังงานให้กับสถานีสื่อสารบริเวณชายฝั่งของประเทศจีนที่ต้องการโหลดขนาด 1500 W โดยติดตั้งกังหันลมขนาด 6 kW จำนวน 2 ตัว แผงโซลาร์เซลล์จำนวน 78 ชุดพร้อมกับแบตเตอรี่ขนาด 5000 Ah เพื่อสำรองพลังงาน เมื่อทำการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 1 ปีพบว่าระบบที่สร้างขึ้นสามารถให้พลังงานได้ตามความต้องการได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ

A. Kaabeche และคณะ [13] ใช้เทคนิคของกระบวนการวนซ้ำ (iterative) ในการหาขนาดของระบบ HRES ที่มีแบตเตอรี่สำรอง โดยเปลี่ยนขนาดองค์ประกอบต่างๆ ตามรอบการคำนวณ และเลือกสมการหลักเป้าหมายจากความบกพร่องที่เป็นไปได้ในการจ่ายกำลัง (Deficiency of Power Supply Probability, DPSP) และต้นทุนพลังงาน (Levelised Unit Electricity Cost, LUEC) โดยเลือกใช้กรณีศึกษาข้อมูลอนุกรมเวลาของอากาศที่ Center for Renewable Development ในประเทศไนจีเรีย

J.L. Bernal-Agustin และ R. Dufo-Lopez [14] ได้บรรยายถึงกระบวนการออกแบบระบบ HRES แบบต่างๆ ที่เหมาะสม การเลือกโปรแกรมสำเร็จรูป และการเลือกสมการหลักเป้าหมายให้เหมาะสมกับระบบ HRES ที่แตกต่างกัน

M.Fadaee และ M.A.M. Radzi [15] ได้รวบรวมการออกแบบระบบไฮบริดพลังงานทดแทนแบบแยกอิสระ โดยใช้ Evolutionary algorithms กับสมการหลักเป้าหมาย (Multi-objective; MOEA) ที่ใช้ในการเลือกตำแหน่ง ขนาด การวางแผนในการควบคุมระบบ นอกจากนี้ยังแสดงถึงการใช้ MOEA ในการแก้ปัญหาที่มีความอ่อนไหว (Sensitivity) ต่อสภาวะความต้องการพลังงาน พบว่าการใช้ GA และ PSO มีความเหมาะสมมากที่สุดในการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

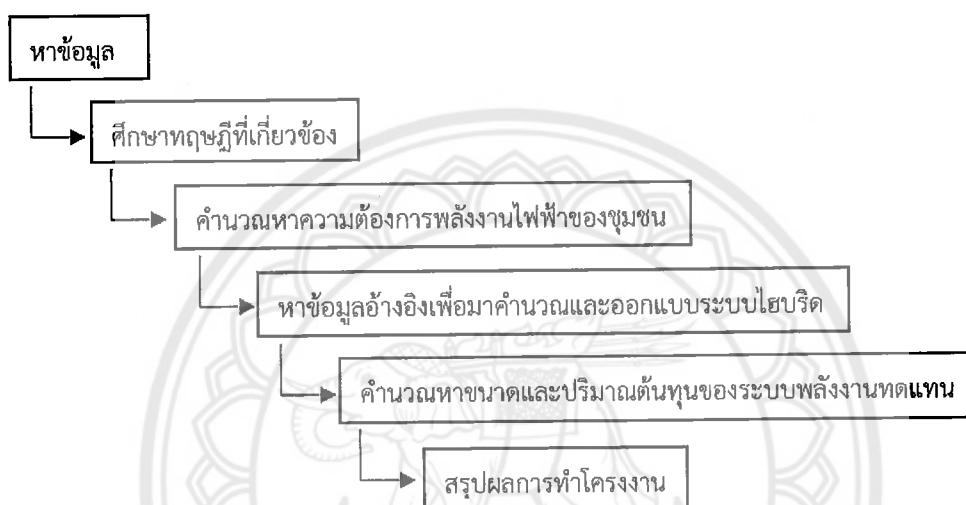
ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การออกแบบระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทนเป็นการเลือกขนาดของส่วนประกอบภายในระบบ (Components) ที่เหมาะสมเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์และเทคโนโลยีที่จะนำระบบดังกล่าวมาใช้ส่งเสริมเพื่อเข้าแข่งขันในตลาดการค้าพลังงานได้ การออกแบบที่เหมาะสมคือการเลือกหาคำตอบที่ดีที่สุด หรือหากกลุ่มของส่วนประกอบที่ดีที่สุดจากกลุ่มที่มีความเป็นไปได้ทั้งหมด โดยขึ้นอยู่กับทางเลือกสมการเป้าหมาย (Objective Function) และเงื่อนไขข้อจำกัด (Constraints) ที่กำหนดขึ้น นอกจากนี้ปัญหาดังกล่าวยังเพิ่มความซับซ้อนขึ้นเนื่องจากมีองค์ประกอบของระบบมีพฤติกรรมตอบสนองในลักษณะไม่เป็นเส้นตรง (Non-Linear Characteristics) มีความไม่สม่ำเสมอและไม่แน่นอนของแหล่งพลังงานทดแทน รวมไปถึงจำนวนเงื่อนไขข้อจำกัดและตัวแปรของการออกแบบที่เป็นทั้งแบบต่อเนื่อง (Continuous) และแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ดังนั้น วิธีและกระบวนการแก้ปัญหาที่เป็น Combination ดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับทางเลือกวิธีการที่เหมาะสมที่จะมาใช้ในการออกแบบ

กระบวนการแก้ปัญหาและตัดสินใจทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือที่สำคัญต่อการออกแบบระบบทางวิศวกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วระบบต่างๆ สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นการกำหนดความต้องการหรือสมการเป้าหมายในการออกแบบ (Objective function) ภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัด (Constraints) ต่างๆ และเลือกใช้กระบวนการแก้ปัญหาที่เหมาะสมก็จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากกลุ่มของความเป็นไปได้ที่หลากหลาย การประยุกต์ใช้กระบวนการแก้ปัญหาและตัดสินใจทางคณิตศาสตร์สำหรับออกแบบระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทนได้ถูกนำเสนอมาแล้วในหลากหลายวิธี การแก้ปัญหาที่ต้องการคำตอบที่แม่นยำหรือแบบดั้งเดิมต้องทำการคำนวณทุกทางเลือกของผลเฉลย แล้วจึงเลือกผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่ทว่าวิธีการนี้เหมาะสำหรับปัญหาที่มีข้อจำกัดด้านกฎเกณฑ์ที่ค่อนข้างตายตัว เมื่อนำมาใช้แก้ปัญหาที่ซับซ้อนเช่น การออกแบบระบบต่างๆ ที่มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้ใช้เวลาในการหาผลลัพธ์นานและสิ้นเปลืองทรัพยากรโดยไม่จำเป็น ปัจจุบันการหาคำตอบโดยหลักการประมาณถูกนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้งานกับปัญหาที่ซับซ้อนหลากหลาย และได้ผลเฉลยที่รวดเร็วมากขึ้น กระบวนการทางเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristic Algorithm) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อหา แม้ว่าปัญหาจะมีความซับซ้อนและมีตัวแปรตัดสินใจจำนวนมาก และผลเฉลยอาจไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด หรือไม่ตรงกับผลเฉลยที่ครั้งที่ทำการประมวลผล แต่เป็นที่ยอมรับว่าทำให้ได้คำตอบที่ดีเพียงพอในเวลาที่ยอมรับ

พาร์ติเคิลสวาร์ม (Particle Swarm Optimization ; PSO) เป็นกระบวนการแก้ปัญหาวีธีค้นหาแบบสุ่ม โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มประชากรของคำตอบ (Population-based Stochastic Search Algorithm) ซึ่งอาศัยหลักการการเลียนแบบพฤติกรรมทางสังคมของสัตว์สังคม เช่น ผึ้งนกหรือปลา เป็นต้น ซึ่งได้นำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรม เพื่อหาผลเฉลยที่ดีที่สุดตามเงื่อนไขข้อจำกัดที่ถูกตั้งขึ้นมา หลักการทำงานของ PSO ซึ่งจำลองมาจากการใช้ชีวิตของฝูงสัตว์ (Swarm) ในธรรมชาตินั้นคือ PSO ได้จำลองกลุ่มฝูงของพาร์ติเคิลในพื้นที่หลายมิติ ซึ่งแต่ละพาร์ติเคิลจะต้องเก็บข้อมูลเวกเตอร์สองเวกเตอร์คือ เวกเตอร์ระบุตำแหน่งและเวกเตอร์ระบุความเร็วในการวิ่งออกไปค้นหาตำแหน่งใหม่ เราสมมุติให้ฝูงพาร์ติเคิลบินอยู่ในพื้นที่ค้นหาหลายมิติ ตัวพาร์ติเคิลแต่ละตัวในฝูงจะต้องจำตำแหน่งที่ดีที่สุดของตัวเอง (Particle best) และตำแหน่งที่ดีที่สุดของเพื่อนร่วมฝูง (Group best) ความหมายของคำว่า ตำแหน่งที่ดีที่สุด ในที่นี้ หมายถึง ตำแหน่งที่มีค่าคำตอบที่ดีที่สุดนั่นเอง สมาชิกในฝูงจะทำการสื่อสารข้อมูลของตำแหน่งกับสมาชิกตัวอื่นและทำการเปลี่ยนความเร็ว และเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่เพื่อให้เข้าใกล้ตำแหน่งที่ดีที่สุดมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปแล้ว การสื่อสารเกิดขึ้นได้โดยผ่านทางสองวิธีคือ ผ่านทางตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (Global Best Position) ซึ่งคือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ฝูงทั้งฝูงค้นพบ และผ่านทางตำแหน่งที่ดีที่สุดเฉพาะกลุ่ม (Neighbors' best Position) ซึ่งหมายความว่า พาร์ติเคิลแต่ละตัวจะสื่อสารกับเฉพาะพาร์ติเคิลตัวอื่นบางตัวเท่านั้น ในวิธี PSO แบบมาตรฐาน [16] ตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลถูกใช้เป็นแหล่งข้อมูลเดียวที่ใช้ติดต่อกันในฝูง การใช้ตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลนำมาสู่การทำให้พาร์ติเคิลในฝูงวิ่งมากระจุกตัวรวมกันอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงทำให้ฝูงพาร์ติเคิลติดกบอยู่ในจุดที่ดีที่สุดเฉพาะบริเวณ (Local Optimum) ด้วยจุดอ่อนข้อนี้ของ PSO แบบมาตรฐานนี้ ทำให้นักวิจัยทำการปรับปรุงวิธี PSO แบบใหม่ๆ โดยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมกับปัญหาแบบต่างๆ แทนการใช้ค่าสัมประสิทธิ์แบบคงที่ [17, 18]

### บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ

การดำเนินโครงการตั้งแต่การเริ่มต้นหาข้อมูล การศึกษาระบบไฟฟ้าพลังงานทดแทนระบบต่างๆ และการคำนวณหาความต้องการพลังงานไฟฟ้า รวมถึงการเก็บข้อมูลต่างๆ เพื่อนำมาอ้างอิงในการค้นคว้าและออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยรวบรวมข้อมูลที่ใช้ประกอบการคำนวณจากสถานีตรวจวัดสภาพอากาศวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร [11] ซึ่งได้รับมาตรฐานแหล่งสอบเทียบอุปกรณ์ด้านพลังงานทดแทนจึงเป็นแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินโครงการ

#### 3.1 ศักยภาพของแหล่งพลังงาน

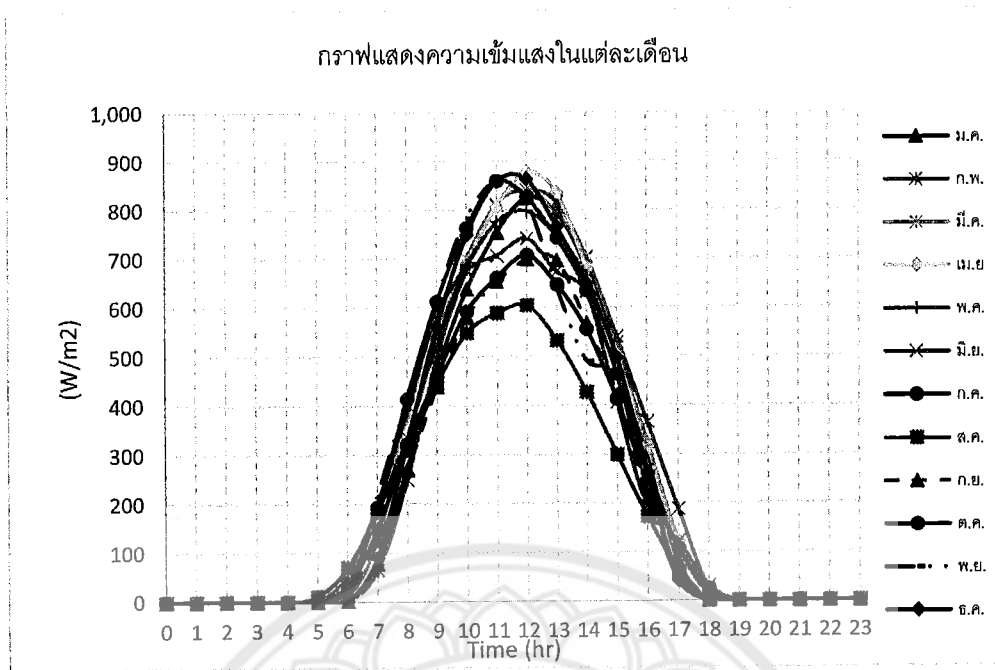
ศักยภาพของแหล่งพลังงานทดแทนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการใช้พลังงานทดแทนซึ่งศักยภาพในแต่ละพื้นที่ของแต่ละประเทศอาจจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับที่ตั้งของแหล่งพลังงาน เช่น ที่ตั้งที่มีโอกาสได้รับรังสีของดวงอาทิตย์ที่มาก มรสุมของลมที่แตกต่างกันในแต่ละประเทศ ปริมาณน้ำฝนต่อปีที่แตกต่างกัน จึงต้องมาจำแนกย่อยเพื่อดูศักยภาพของแหล่งพลังงานดังนี้

##### 3.1.1 ศักยภาพของแผงโซลาร์เซลล์

ในประเทศไทยมี 3 ฤดู ทำให้ในแต่ละฤดูมีค่าของความเข้มแสงแตกต่างกัน เมื่อร้อนอย่างประเทศไทยมีค่าความเข้มแสงมากที่สุดเดือนเมษายน เมื่อถึงฤดูฝนประเทศไทยแทบจะไม่มีแสงแดดช่วงเดือนสิงหาคมถึงกันยายนทำให้แผงโซลาร์เซลล์ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยการออกแบบจะใช้ข้อมูลจาก วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร [11]

พิจารณารูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มแสง ซึ่งพบว่าในแต่ละเดือนความเข้มแสงจะเพิ่มขึ้นที่เวลา 06.00 น. เพิ่มขึ้นสูงสุดที่เวลา 13.00 น. จากนั้นความเข้มแสงจะลดลงเรื่อยๆจนถึงเวลา 19.00 น. จะเห็นว่าความเข้มแสงสูงสุดอยู่ที่เดือนเมษายน ความเข้มแสงต่ำสุดอยู่ที่เดือนสิงหาคม

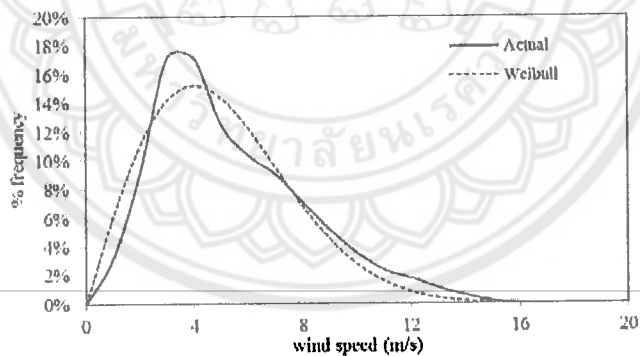




รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความเข้มแสง

### 3.1.2 ศักยภาพของกังหันลม

ประเทศไทยอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะพัดปกคลุมประเทศไทยระหว่างเดือน พฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ จะพัดปกคลุมประเทศไทยประมาณกลางเดือน ตุลาคมจนถึงเดือนกุมภาพันธ์



รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความถี่ความเร็วลมที่เกิดขึ้น

พิจารณารูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความถี่ของความเร็วลมที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่า ความเร็วลมเพิ่มขึ้นทำให้ความถี่ของกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความถี่ของความเร็วลมที่พบมากที่สุด คือความเร็วลมที่ 4 เมตร/วินาที และลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

### 3.2 พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงาน

#### 3.2.1 พลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์

พลังงานที่ผลิตได้จากโซลาร์เซลล์ขึ้นอยู่กับจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ทั้งหมด ขนาดของแผงโซลาร์เซลล์ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ดังต่อไปนี้

$$P_s = N_{PV} \times P_{PV} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $P_s$  คือ กำลังติดตั้ง (kW)

$P_{PV}$  คือ ขนาดของแผงโซลาร์เซลล์ (W)

$N_{PV}$  คือ จำนวนของแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้ง ซึ่งสามารถหาได้จาก สมการดังต่อไปนี้

$$N_{PV} = \frac{\max \left( \left( \frac{E_d}{\sum P_{solar}} \right) \times P_{solar,i} \right) \times 1000}{P_{PV}} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\sum P_{solar}$  คือ เท่ากับผลรวมของพลังงานที่แผงโซลาร์เซลล์ผลิตได้ต่อตารางเมตร ( $\sum P_{s_i}$ ) (kWh/m<sup>2</sup>)

$P_{solar,i}$  คือ กำลังไฟฟ้าที่แผงโซลาร์เซลล์ผลิตได้ในช่วงเวลา (kWh/m<sup>2</sup>) ซึ่งหาได้จากสมการ (2.6)

จะได้สมการพลังงานของโซลาร์เซลล์ที่สามารถผลิตได้ตามขนาดติดตั้งต่อปี ตามสมการดังนี้

$$E_{PV} = N_{PV} \times P_{PV} \times hr \quad (3.3)$$

เมื่อ  $E_{PV}$  คือ พลังงานของโซลาร์เซลล์ที่สามารถผลิตได้ตามขนาดติดตั้ง (kWh/year)  
จากสมการ (2.6)

จะได้สมการพลังงานที่สามารถผลิตได้จริงตามสภาพอากาศ ตามสมการดังนี้

$$E_s = \eta_s \times A_s \times G_{\beta} \times hr \quad (3.4)$$

เมื่อ  $E_s$  คือ พลังงานที่สามารถผลิตได้จริงตามสภาพอากาศ (kWh/year)

$\eta_s$  คือ ค่าประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์

$A_s$  คือ พื้นที่รับแสงอาทิตย์ (m<sup>2</sup>)

$G_{\beta}$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต่อตารางเมตร

hr คือ จำนวนชั่วโมงใน 1 ปี

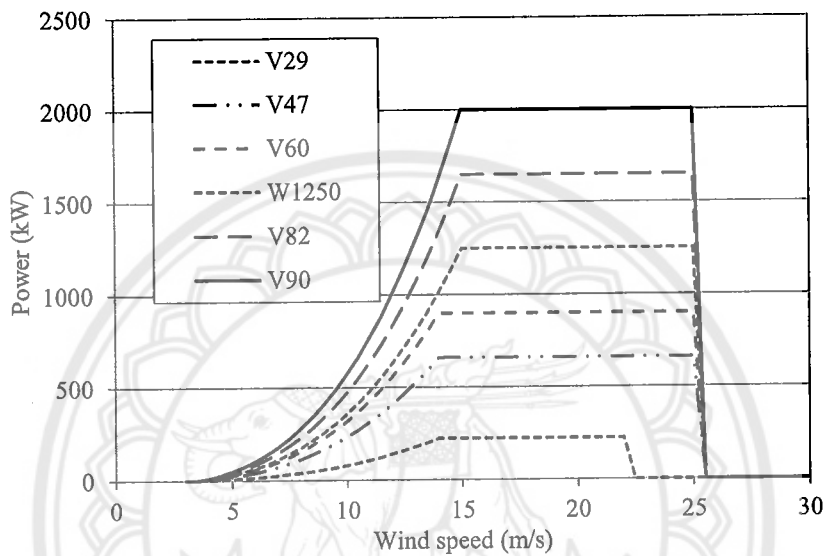
ประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ที่ผลิตไฟฟ้าได้ต่อปี ดังสมการต่อไปนี้

$$CF_s = \frac{E_s}{E_{PV}} \quad (3.5)$$

### 3.2.2 พลังงานไฟฟ้าจากกังหันลม

กำลังไฟฟ้าของลมสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ และนำมาสร้าง Power Curve จากสมการ (3.6)

$$P(\bar{u}_i) = \begin{cases} 0 & : \bar{u}_i < c_i \\ \frac{1}{2} \rho A_s C_p \bar{u}_i^3 & : c_i \leq \bar{u}_i < c_r \\ T_R & : c_r \leq \bar{u}_i \leq c_o \\ 0 & : \bar{u}_i > c_o \end{cases} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.4 Power curve ของกังหันลมขนาด 225kW – 2000 kW

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของกังหันลมที่ใช้งานวิจัย

inde x (i)	model	$T_{Ri}$ (kW)	rotor, $d_R$ (m)	hub, $H_b$ (m)	$c_i$ (m/s)	$c_r$ (m/s)	$c_o$ (m/s)	$A_s$ ( $m^2$ )	Cost (M\$)	Cost/k W (\$/kW)
1	V29	225	29	31	3	13	20	661	0.302	1,345
2	V47	660	47	50	3.5	14	25	1,735	0.762	1,155
3	V60	900	60	60	3.5	15	25	2,827	1.124	1,249
4	W1250	1,250	70	70	3.5	15	25	3,848	1.576	1,261
5	V82	1,650	82	80	3.5	15	25	5,281	2.132	1,292
6	V90	2,000	90	90	3.5	15	25	6,362	2.741	1,371

พิจารณารูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความเร็วลม เป็นการบ่งบอกถึงกังหันลมขนาดต่าง ๆ จะเริ่มผลิตไฟฟ้าได้ที่ความเร็วลมต่างกัน โดยข้อมูลกังหันลมขนาดต่างๆ ระบุดังตารางที่ 3.1 และสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดโดยขึ้นอยู่กับขนาดของกังหันลมที่เลือกใช้

เมื่อ  $P_T$  คือ กำลังไฟฟ้าที่กังหันลมสามารถผลิตได้ (kW)  
 $V_i$  คือ ความเร็วลม (m/s)

$$a = \frac{T_{rate}}{V_{rate}^3 - V_{cutin}^3} ; b = -a(V_{cutin})^3$$

เมื่อ  $T_{rate}$  คือ ขนาดกังหันลมที่ติดตั้ง (kW)  
 $V_{rate}$  คือ ความเร็วลมที่กังหันลมผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด (m/s)  
 $V_{cut in}$  คือ ความเร็วลมที่ทำให้กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้ (m/s)

จะได้สมการพลังงานไฟฟ้าที่กังหันลมสามารถผลิตได้ใน 1 ปี ตามสมการดังนี้

$$E_w = \sum P_T(v) \times 8760 \quad (\text{kWh/year}) \quad (3.7)$$

ซึ่งผลรวมของกำลังไฟฟ้า ( $\sum P_T(v)$ ) ขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่ ( $V_i = 0,1,2,3,\dots,i$ )  
 ประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ที่ผลิตไฟฟ้าได้ต่อปี ดังสมการต่อไปนี้

$$CF_w = \frac{E_w}{P_R \times N_T \times 8760} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $P_R$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ติดตั้งของกังหันลม (kW)  
 $N_T$  คือ จำนวนกังหันลม

### 3.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และการเงิน (Economic and Financial Analysis)

เศรษฐศาสตร์เป็นการวิเคราะห์ เพื่อพิจารณาถึงการจัดสรร การดำเนินงานตามแผนงานและหรือโครงการต่างๆ อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และให้ผลประโยชน์ มีความคุ้มค่า โดยใช้ปัจจัยชี้วัดความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา โดยการเปรียบเทียบต้นทุนการใช้ทรัพยากรและผลประโยชน์ที่ได้รับกลับคืน ซึ่งในโครงการนี้จะประกอบด้วย

#### 3.3.1 การวิเคราะห์ด้านการลงทุน (Initial Capital Cost)

จะทำการวิเคราะห์หามูลค่าเงินลงทุนของทั้ง โซลาร์เซลล์และ กังหันลม โดยจะคิดมูลค่าของอุปกรณ์หลัก คือ อินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ คอนโทรลเลอร์ มูลค่าในการติดตั้งขนย้ายอุปกรณ์เช่น สายไฟ การขอมิเตอร์ (balance of system) เป็นต้น

มูลค่าเงินลงทุนทั้งหมดของโซลาร์เซลล์และกังหันลม

$$ICC = f(C_{P_i}, C_{INV}, C_{Batt}, C_{Control}, C_{Bos})$$

เมื่อ ICC คือ มูลค่าเงินลงทุนทั้งหมดของโซลาร์เซลล์และกังหันลม  
 ซึ่งประกอบด้วย  $C_{P_i}$  มูลค่าเงินลงทุนซื้อแผงโซลาร์เซลล์และกังหันลม  
 กำหนด  $P_i = 1$  ; Solar cell และ  $P_i = 2$  ; Wind turbine  
 $C_{INV}$  มูลค่าเงินลงทุนซื้ออินเวอร์เตอร์

$C_{Batt}$  มูลค่าเงินลงทุนซื้อแบตเตอรี่สำรองไฟ  
 $C_{Cont}$  มูลค่าเงินลงทุนซื้อตู้คอนโทรล  
 $C_{Bos}$  มูลค่าขนส่งและติดตั้ง

ซึ่งมูลค่าเงินลงทุนซื้อแผงโซลาร์เซลล์และกังหันลม จะสามารถหาได้จากกำลังไฟฟ้าที่ต้องการโดยจะขึ้นอยู่กับ การเลือกขนาดติดตั้ง ราคา และจำนวนที่ติดตั้งทั้งหมด ดังสมการดังนี้

$$C_{Pi} = \frac{P_{INV}}{Size_{Pi}} \times Cost_{Pi/machine} \times N_{Pi} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $P_{INV}$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ก่อนเข้าอินเวอร์เตอร์  
 $Size_{Pi}$  คือ ขนาดแผงโซลาร์เซลล์และกังหันลมที่ติดตั้ง  
 $Cost_{Pi/machine}$  คือ ราคาต่อเครื่อง  
 $N_{Pi}$  คือ จำนวนทั้งหมดที่ต้องการ

ซึ่ง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ก่อนเข้าอินเวอร์เตอร์ ดังสมการดังนี้

$$P_{INV} = \frac{P_i}{\eta_{INV}} \quad (kW) \quad (3.10)$$

เมื่อ  $P_i$  คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ (kW)  
 $\eta_{INV}$  คือ ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

$$P_i = \text{Max}(P_d) \quad (3.11)$$

เมื่อ  $\text{Max}(P_d)$  คือ กำลังไฟฟ้าที่แต่ละแหล่งพลังงานผลิตได้สูงสุด (kW)

ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโซลาร์เซลล์และกังหันลมได้  
 มูลค่าเงินลงทุนซื้ออินเวอร์เตอร์ ( $C_{INV}$ )

$$C_{INV} = \frac{P_{INV}}{Size_{Pi}} \times Cost_{INV/1} \times N_{Pi} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $Size_{Pi}$  คือ ขนาดของอินเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้ (kW)  
 $Cost_{INV/1}$  คือ ราคาอินเวอร์เตอร์ / เครื่อง (baht)  
 $N_{Pi}$  คือ จำนวนอินเวอร์เตอร์ที่ต้องใช้ทั้งหมด

มูลค่าเงินลงทุนซื้อแบตเตอรี่ที่จะใช้สำหรับสำรองไฟฟ้าได้  $n$  วัน ( $C_{Batt}$ ) ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ต้องทำการสำรองใน  $n$  วัน ขนาดความจุและโวลต์ที่เลือกใช้ ดังสมการ

$$C_{Batt} = \frac{E_d \times Cost_{Batt/1}}{V_{Batt} \times Size_{Batt}} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $E_d$  คือ พลังงานที่ต้องการสำรองใน  $n$  วัน (kWh)  
 $V$  คือ ขนาดแรงดันที่เลือกใช้ 24 Volt  
 $Cost_{Batt/1}$  คือ ราคาแบตเตอรี่ / ลูก

ซึ่งขนาดความจุของแบตเตอรี่ (Amp) ที่จะเลือกใช้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Ah_{need} = \frac{E_d}{V_{Batt}} \times 1000 \quad (3.14)$$

มูลค่าเงินลงทุนซื้อตู้คอนโทรล ( $C_{Cont}$ ) ขึ้นอยู่กับขนาดของ ( $V$ ) แบตเตอรี่ที่เลือกใช้ก่อนหน้านี้ จากนั้นจึงจะทำการเลือกขนาด Amp ของตู้คอนโทรลที่ต้องการ

$$I_{Cont} = \frac{P_{INV}}{V} \quad (3.15)$$

จากนั้นจึงทำการเลือกขนาด amp ที่ต้องการเลือกใช้ (Select Amp) จะทำให้ได้จำนวนตู้คอนโทรลที่ต้องการออกมา

$$C_{Cont} = \frac{I_{Cont}}{Size_{Cont}} \times cost_{Cont/1machine} \quad (3.16)$$

มูลค่าขนส่งและติดตั้งระบบ ( $C_{BOS}$ ) เมื่อ ( $C_{BOS}$ ) คือโซล่าเซลล์และกังหันลม 0.5 (บาท/kWh)

### 3.3.2 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายรายปี (Annual expenses)

มูลค่าเงินที่ใช้เป็นค่าจ้างผู้ดูแล ค่าใช้จ่ายด้านค่าซ่อมบำรุง ค่าเช่าพื้นที่ในการดำเนินงานโดยกำหนดให้

ตารางที่ 3.2 ค่าบำรุงรักษา (O&M) และค่าเช่าพื้นที่ติดตั้ง (LLC)

	ค่าบำรุงรักษา (บาท/kWh)	ค่าเช่าพื้นที่ (บาท/ไร่)
โซล่าเซลล์	0.5	10000
กังหันลม	0.5	10000

ตารางที่ 3.3 ค่าใช้จ่ายการเปลี่ยนอุปกรณ์ (LRC)

โซล่าเซลล์	ปี	กังหันลม	ปี
Battery เปลี่ยนทุก	4	Battery เปลี่ยนทุก	4
Inverter เปลี่ยนทุก	7	Inverter เปลี่ยนทุก	7
Controller เปลี่ยนทุก	10	Controller เปลี่ยนทุก	10

### 3.3.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย

ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าขึ้นอยู่กับเงินลงทุนเริ่มต้น ค่าใช้จ่ายรายปีหรือค่าใช้จ่ายเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งาน และพลังงานที่ผลิตได้ใน 1 ปี จากสมการ (3.10) จะได้

$$LICC_i = ICC_i \times (A / P) \quad (3.18)$$

เมื่อ  $LICC_i$  คือ กระจายเงินลงทุนเริ่มต้นให้เป็นรายปี (บาท/ปี)

$$(A / P) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.19)$$

เมื่อ  $i$  คือ อัตราผลตอบแทน  
 $n$  คือ จำนวนปี

ค่าใช้จ่ายรายปีและค่าเปลี่ยนแปลง (AOE)

$$AOE_i = O \& M_i + LRC_i + LLC_i \quad (\text{baht/year}) \quad (3.20)$$

เมื่อ  $O \& M_i$  คือ ค่าบำรุงรักษา (บาท/ปี)

$LRC_i$  คือ ค่าเปลี่ยนแปลง (บาท/ปี)

$LLC_i$  คือ ค่าเช่าพื้นที่ติดตั้ง (บาท/ปี)

ดังนั้นจะได้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย ตามสมการดังนี้

$$LCOE = \frac{\sum (LICC_i + AOE_i)}{\sum AEP_i} \quad (\text{baht/kWh}) \quad (3.21)$$

เมื่อ  $i = 1$  คือ Solar cell และ  $i = 2$  คือ Wind Turbine

### 3.4 แนวคิดในการออกแบบ (Conceptual design)

สำหรับแนวคิดในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้า ด้วยพลังงานทดแทนแบบไฮบริด เป็นการนำเอาระบบพลังงานทดแทนจากพลังงานลม และ พลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ ให้รองรับกับความต้องการ การใช้ไฟฟ้าของชุมชนที่กำหนดไว้ และสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้สำรองได้ตามวันที่กำหนด โดยทั้งสองระบบที่ออกแบบ จะมีชุดอุปกรณ์หลัก คือ กังหันลม (Wind turbine) และ แผงโซลาร์เซลล์ (Solar cell) และชุดอุปกรณ์ที่ประกอบอยู่ในระบบ คือ เครื่องควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (Charge controller) แบตเตอรี่ (Battery) และเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ซึ่งแต่ละอุปกรณ์จะทำหน้าที่สัมพันธ์กัน ซึ่งรายละเอียดจะแสดงอยู่ในตารางที่ 3.4

#### 3.4.1 การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าแบบ on-grid

การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าแบบ on-grid จะมีความแตกต่างกับระบบ off-grid โดยจะสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้แบตเตอรี่ ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมและแผงโซลาร์เซลล์สามารถป้อนเข้าไป

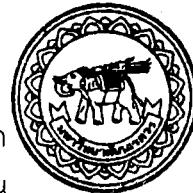
จ. ๐๓

๗๖.๗๘

๓๗๔๕

๒๕๕๙

1048988



สำนักหอสมุด

ระบบไฟฟ้าหลักที่ใช้ของชุมชนได้เลย โดยผ่านเครื่องแปลงไฟหรือที่เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ ไฟฟ้าดังกล่าวจะถูกนำไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในชุมชน หากปริมาณผลิตไฟฟ้าไม่เพียงพอ ไฟฟ้าจากภายนอกจะเข้ามาชดเชยในส่วน ของไฟฟ้าที่ยังขาดอยู่ เช่น หากระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ผลิตได้เพียง 800 วัตต์ และต้องการไฟฟ้าอีก 200 วัตต์ จะมาจากไฟฟ้าของการไฟฟ้า ระบบนี้จะช่วยให้เราจ่ายค่าไฟฟ้าน้อยลง ถัดไป ซึ่งจะแสดงการต่อเป็น ไดอะแกรมดังแสดงดังรูปที่ 3.5

22 ก.พ. 2565

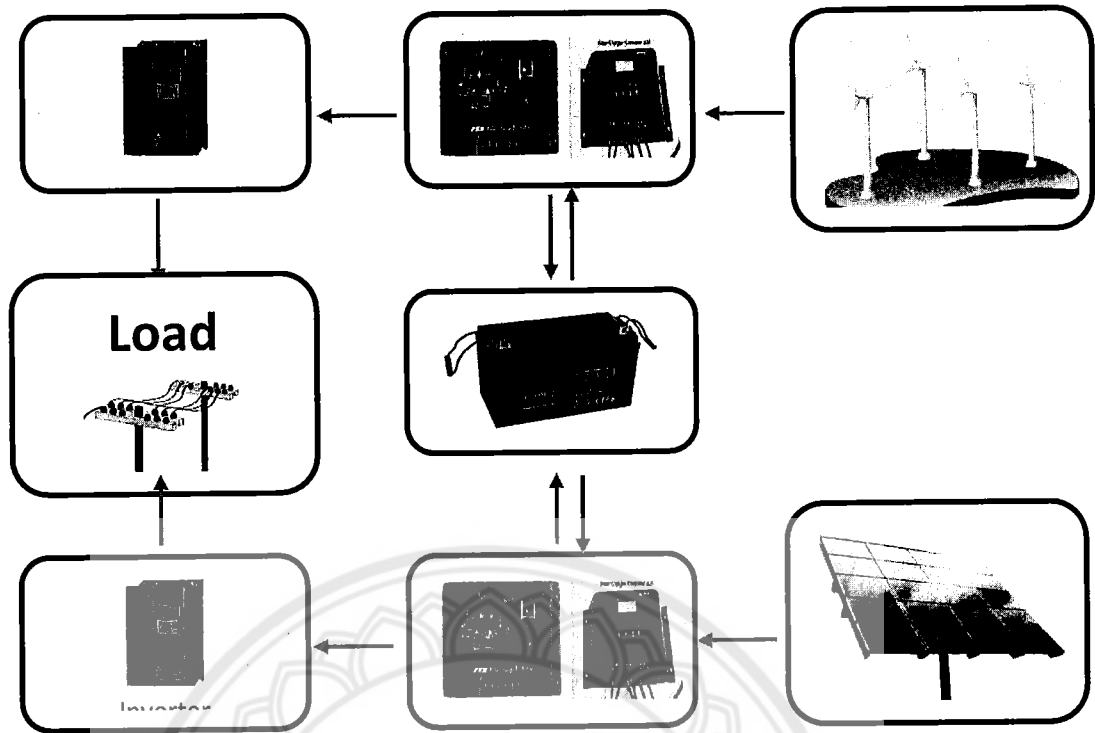
ตารางที่ 3. 4 อุปกรณ์ที่ใช้ภายในระบบ

อุปกรณ์	หน้าที่
<p>Charge controller</p>	<p>เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ประจุไฟฟ้าที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาประจุให้กับแบตเตอรี่ซึ่งจะต้องไม่ให้มีการประจุมากเกินไป (Over charge) ซึ่งจะมีผลทำให้แบตเตอรี่ร้อนจัดทำให้เสื่อมสภาพเร็ว</p>
<p>แบตเตอรี่ (Battery)</p>	<p>แบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้จัดเก็บพลังงานไฟฟ้ามีการพัฒนาให้มีความเหมาะสมในการใช้งานโดยจะออกแบบให้สามารถจัดเก็บประจุได้มากๆและจ่ายกระแสไฟฟ้าได้นาน</p>
<p>อินเวอร์เตอร์ (Inverter)</p>	<p>เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในบ้าน</p>

### 3.4.2 การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าแบบ off-grid สำหรับไฟฟ้า

การออกแบบระบบระบบผลิตไฟฟ้าแบบ off-grid จะมีการต่อชุดอุปกรณ์ของให้เข้ากับระบบก่อนที่ จะจ่ายให้กับโหลด ในระบบผลิตไฟฟ้าจาก พลังงานลม และ พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อสำรองตามวันที่ต้องการ ระบบนี้จะทำงานจำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่ ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมและแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งสามารถป้อนเข้าไป ในระบบไฟฟ้าหลักที่จะนำไปใช้ โดยผ่านเครื่องแปลงไฟหรือที่เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ ไฟฟ้าดังกล่าวจะถูกนำไปใช้กับ เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในชุมชน หากปริมาณผลิตไฟฟ้าที่ผลิตได้มากกว่าความต้องการการใช้ไฟฟ้าของชุมชน ก็จะถูก เก็บไว้ในแบตเตอรี่เพื่อสำรองไว้ใช้ในวันถัดไป ซึ่งจะแสดงการต่อเป็นไดอะแกรมดังแสดงดังรูปที่ 3.11 โดยการ ออกแบบระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า ด้วยพลังงานทดแทนแบบไฮบริด จะใช้ระบบ Off-Grid ในการออกแบบ เนื่องจากเป็นการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในชุมชนและจะทำการเก็บพลังงานไฟฟ้าที่เหลือใช้ไว้ในแบตเตอรี่





รูปที่ 3.5 การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าแบบ off-grid สำหรับไฟฟ้า

### 3.5 พาร์ติเคิลสวาร์มออปติไมเซชัน

พาร์ติเคิลสวาร์มออปติไมเซชัน (Particle Swarm Optimization, PSO) เป็นกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Kennedy & Eberhart, 1995) โดยมีพื้นฐานพัฒนามาจากวิธีการค้นหาแบบฝูงโดยอาศัยจุดเริ่มต้นหลายจุดโดยที่ประยุกต์มาจากหลักการทางจิตวิทยาสังคม ในการหาอาหารของฝูงสัตว์ เช่น ฝูงนก หรือ ฝูงปลา เป็นต้น ซึ่งมีธรรมชาติในการเคลื่อนที่ไปเป็นฝูง แม้จะมีบางตัวแยกออกจากฝูงแต่ก็จะรวมกลับเข้ามาในฝูงอีกครั้ง การเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคนี้จัดเป็นพฤติกรรมทางสังคมฝูงสัตว์ (Swarm) ดังนั้น PSO คือกลุ่มของอนุภาคที่สามารถอยู่ในพื้นที่หลายมิติ ซึ่งแต่ละอนุภาคจะต้องเก็บข้อมูลเวกเตอร์สองเวกเตอร์คือ เวกเตอร์ระบุตำแหน่งและเวกเตอร์ระบุความเร็วในการค้นหา เราสมมติให้ฝูงอนุภาควิ่งอยู่ในพื้นที่ค้นหาหลายมิติ ตัวอนุภาคแต่ละตัวในฝูงจะต้องจำตำแหน่งที่ดีที่สุดของตัวเอง และตำแหน่งที่ดีที่สุดของเพื่อนร่วมฝูง ซึ่งคำว่า ตำแหน่งที่ดีที่สุด นั้นหมายถึง ตำแหน่งที่มีค่าค่าตอบที่ดีที่สุดนั่นเอง สมาชิกในฝูงจะทำการสื่อสารข้อมูลของตำแหน่งกับสมาชิกตัวอื่นและทำการเปลี่ยนความเร็ว และเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่เพื่อให้เข้าใกล้ตำแหน่งที่ดีที่สุดมากยิ่งขึ้น การเคลื่อนที่เป็นกลุ่มประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคโดยที่แต่ละอนุภาคเป็นตัวแทนของคำตอบของระบบที่เราต้องการหา โดยตำแหน่งของแต่ละอนุภาคจะเปลี่ยนไปตามข้อมูลของสถานะแวดล้อมที่เคลื่อนที่ผ่านมาและข้อมูลจากอนุภาคภายในกลุ่มด้วยตัวเอง ดังนั้น PSO จึงเป็นอัลกอริทึมเชิงประชากรโดยใช้หลักการทำงานร่วมมือกันในการแก้ปัญหาของอนุภาค สิ่งที่น่าสนใจใน PSO คือความเรียบง่ายของอัลกอริทึม และกระบวนการคิดทำให้นำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 3.5.1 BPSO

กำหนดให้ *particle* เป็น element ที่อยู่ในกลุ่มหรือฝูงประชากร (*swarm*) *particle* แต่ละตัวจะมี *position* และ *velocity* รวมถึงค่า *objective function* ที่คำนวณได้ ณ ที่ตำแหน่งนั้นๆ *population* หรือ *swarm* เป็นเซตของจำนวน  $N_p$  particles หรือสามารถกล่าวได้ว่า *population* ประกอบไปด้วย particles จำนวน  $N_p$  ตัว ตำแหน่งของอนุภาค  $i^{th}$  เมื่อมีการคำนวณซ้ำรอบที่  $k^{th}$  จะถูกระบุเป็น  $x_i^k$  และอยู่ภายในมิติของ  $j^{th}$  สามารถเขียนได้เป็น  $x_{ij}^k = (x_{i,1}^k, \dots, x_{i,j}^k)$  ค่าของ *position* ในแต่ละอนุภาคที่ระบุในรูปของ binary (0 หรือ 1) สามารถเขียนในรูปของสมการ (3.3)

$$x_{ij}^k = [S_{i1}^k S_{i2}^k S_{i3}^k \dots S_{iq}^k] \quad (3.22)$$

เมื่อ  $x_{ij}^k$  คืออนุภาค,  $S_{pq}^k$  คือตำแหน่งในรูปของไบนารีที่มีรอบการคำนวณจำนวน  $k$  รอบ

ผลคำนวณ *fitness value* คือค่าผลลัพธ์ที่ได้จากสมการ *objective function* ตามตำแหน่งตัวแปรต่างๆ ในสมการ (3.18) ค่าความเร็วพาร์ติเคิลหรือ *velocity value* ของพาร์ติเคิล  $i^{th}$  ที่รอบการคำนวณ  $k^{th}$  จะถูกเขียนในเทอมของตัวแปร  $v_i^k$  ในมิติขนาด  $j^{th}$  จะถูกนำเสนอในรูปแบบ  $v_{ij}^k = (v_{i,1}^k, \dots, v_{i,j}^k)$  ในงานวิจัยนี้จะกำหนดขอบเขตเวกเตอร์ความเร็วระหว่าง  $[-4, 4]$  เวกเตอร์ความเร็วนี้จะทำการอัปเดตตำแหน่งของพาร์ติเคิลในรอบการคำนวณก่อนหน้า โดยรวมกับการหาผลต่างระหว่างตำแหน่งที่ดีที่สุดของพาร์ติเคิล *best position* และตำแหน่งที่ดีที่สุดของกลุ่ม *global best* ตามสมการ (3.4)

$$v_{ij}^{k+1} = \omega v_{ij}^k + c_1 r_1 (pbest_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 r_2 (gbest_{ij}^k - x_{ij}^k) \quad (3.23)$$

เมื่อ  $v_{ij}^{k+1}$  คือ updated velocity ของพาร์ติเคิล  $i^{th}$  ในขนาดมิติ  $j^{th}$  โดยกำหนดให้  $\omega$  คือสัมประสิทธิ์ inertia weight coefficient ค่า  $c_1$  และ  $c_2$  เป็นสัมประสิทธิ์ของ acceleration coefficients เมื่อ  $r_1$  และ  $r_2$  เป็นค่าสุ่มทางตัวเลข real numbers randomly generated ที่มีค่าระหว่าง  $[0,1]$

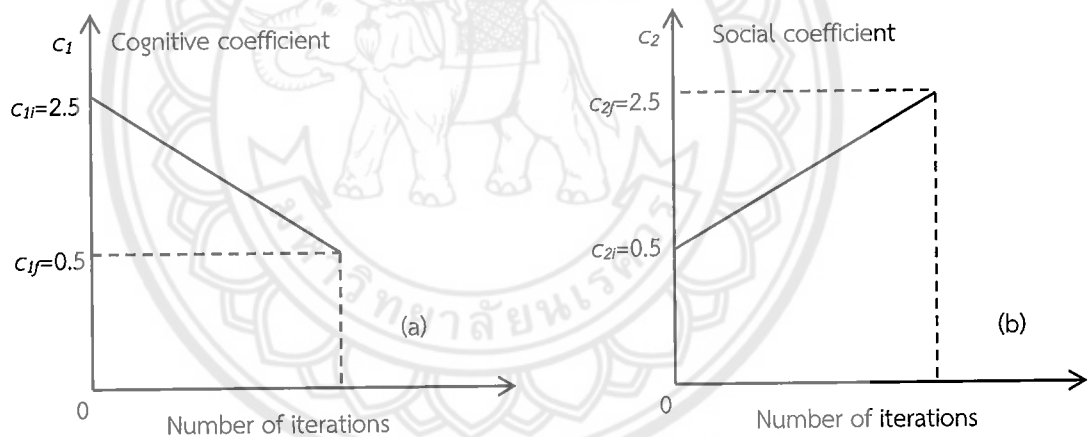
เวกเตอร์ของแต่ละพาร์ติเคิล *Personal guidance* ( $pbest_{ij}^k$ ) คือตำแหน่งที่ดีที่สุดพบโดยแต่ละพาร์ติเคิล  $i^{th}$  เมื่อคำนวณเป็นจำนวน  $k^{th}$  iteration ตามค่าสมการ *objective* ในการคำนวณหาค่าตอบสำหรับปัญหา minimization ค่าเริ่มต้นของการคำนวณ  $pbest_{ij}^1 = x_{ij}^1$  หลังจากนั้นเมื่อคำนวณในรอบต่อไป ( $k \geq 1$ ) ค่าตำแหน่ง  $pbest_{ij}^k = x_{ij}^k$  เมื่อผลการคำนวณรอบ  $k^{th}$  พบว่ามีค่าน้อยกว่ารอบการคำนวณก่อนหน้า และมีค่าเท่าเดิมถ้าคำนวณได้ค่าที่มากกว่า ขณะเดียวกัน เวกเตอร์ของกลุ่ม *Global guidance* ( $gbest_{ij}^k$ ) คือตำแหน่งที่ดีที่สุดพบโดยพาร์ติเคิลที่มีค่า *fitness value* น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งกลุ่ม โดยเริ่มต้นให้  $gbest_{ij}^1 = \min(x_{i,1}^1, \dots, x_{i,j}^1)$  หลังจากนั้นในรอบการคำนวณในครั้งต่อไป ( $k \geq 1$ ),  $gbest_{ij}^k = \min(x_{i,1}^k, \dots, x_{i,j}^k)$  ถ้าพบว่ามีรอบที่  $k^{th}$  iteration พบค่า *fitness value* ที่ต่ำกว่าในรอบก่อนหน้า และจะให้  $gbest_{ij}^k$  มีค่าเท่าเดิมถ้าไม่พบค่าที่น้อยกว่า

ในการคำนวณมีการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ inertia weight coefficient ( $\omega$ ) เป็นค่าคงที่ 1 และค่าสัมประสิทธิ์ acceleration coefficient ( $c_1, c_2$ ) เปลี่ยนแปลงตามรอบการคำนวณที่เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 3.6 และสมการ (3.24) และสมการ (3.25):

$$c_1 = (c_{1f} - c_{1i}) \frac{k}{k_{max}} + c_{1i} \quad (3.24)$$

$$c_2 = (c_{2f} - c_{2i}) \frac{k}{k_{max}} + c_{2i} \quad (3.25)$$

สัมประสิทธิ์  $c_1$  เปลี่ยนแปลงลดลงจาก 2.5 เป็น 0.5 และสัมประสิทธิ์  $c_2$  เปลี่ยนแปลงจาก 0.5 เป็น 2.5 ตลอดรอบของการคำนวณเพื่อหาคำตอบ (Ratnaweera et al., 2004) นั่นคือสัมประสิทธิ์การเรียนรู้หรือการจดจำตำแหน่งของแต่ละพาร์ติเคิล cognitive component ( $c_1$ ) ถูกลดความสำคัญลงเมื่อจำนวนรอบการคำนวณเพิ่มขึ้น ขณะที่สัมประสิทธิ์การเรียนรู้หรือจดจำตำแหน่งของกลุ่ม social component ( $c_2$ ) ถูกทำให้เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบการคำนวณเพิ่มขึ้น ตอนเริ่มต้นค้นหากระบวนการจะให้ความสำคัญของความสามารถในแต่ละพาร์ติเคิลเพื่อความหลากหลายในการค้นหานั้นคือค่าสัมประสิทธิ์การจดจำตำแหน่งของตัวเองมีค่ามาก ขณะที่เมื่อรอบการคำนวณเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์ของกลุ่มมีเพิ่มขึ้น นั่นคือกระบวนการจะกลับมาให้ความสำคัญของตำแหน่งกลุ่มมากกว่าเพื่อมุ่งเน้นการค้นหาของกลุ่มมากขึ้นเพื่อให้ประสิทธิภาพการค้นหามุ่งเน้นไปที่ Global optima นั้นเอง



รูปที่ 3.6 (a) The cognitive ( $c_{1i} = 2.5$ ;  $c_{1f} = 0.5$ ) and (b) the social coefficients ( $c_{2i} = 0.5$ ;  $c_{2f} = 2.5$ ) in the BPSO-TVAC

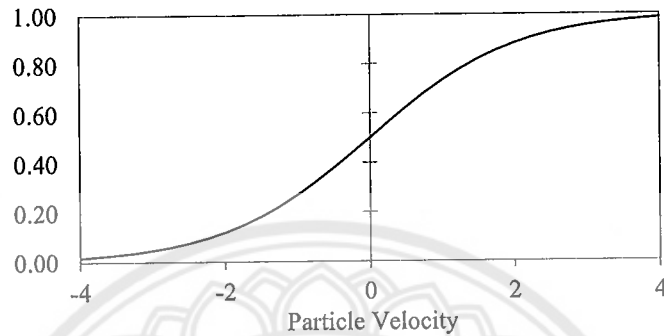
กรณีที่เป็นปัญหารูปแบบ Combination หรือ Discrete เช่นการเลือกขนาดของกังหันลมให้เหมาะสม BPSO-TVAC จะถูกนำมาใช้ โดยอาศัยการจดจำตำแหน่งโดยการเทียบกับสมการความเป็นไปได้ เช่นถ้าพาร์ติเคิลที่มีเวกเตอร์ความเร็วสูงจะมีโอกาสเลือกจำนวนเต็ม 1 หรือคำตอบ YES ขณะที่พาร์ติเคิลที่มีเวกเตอร์ความเร็ว น้อยจะมีโอกาสเลือกคำตอบจำนวน 0 หรือ NO มากกว่า ดังนั้นสมการเพื่อใช้เปรียบเทียบจึงต้องมีพิสัยระหว่าง  $[0, 1]$  โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ sigmoid function ดังแสดงในสมการ (3.26), (3.27) ดังรูปที่ 3.7

$$sig(v_i^{k+1}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_i^{k+1})} \quad (3.26)$$

$$\text{if } p_i^{k+1} < \text{sig}(v_i^{k+1}) \text{ then } S_n^{k+1} = 1; \text{ else } S_{pq}^{k+1} = 0 \quad (3.27)$$

เมื่อ  $p_i^{k+1}$  คือเวกเตอร์สุ่ม random numbers ที่มีค่าระหว่าง  $[0, 1.0]$  และการอัปเดตตำแหน่งของพาร์ติเคิลจะเป็นไปตามสมการ (3.28)

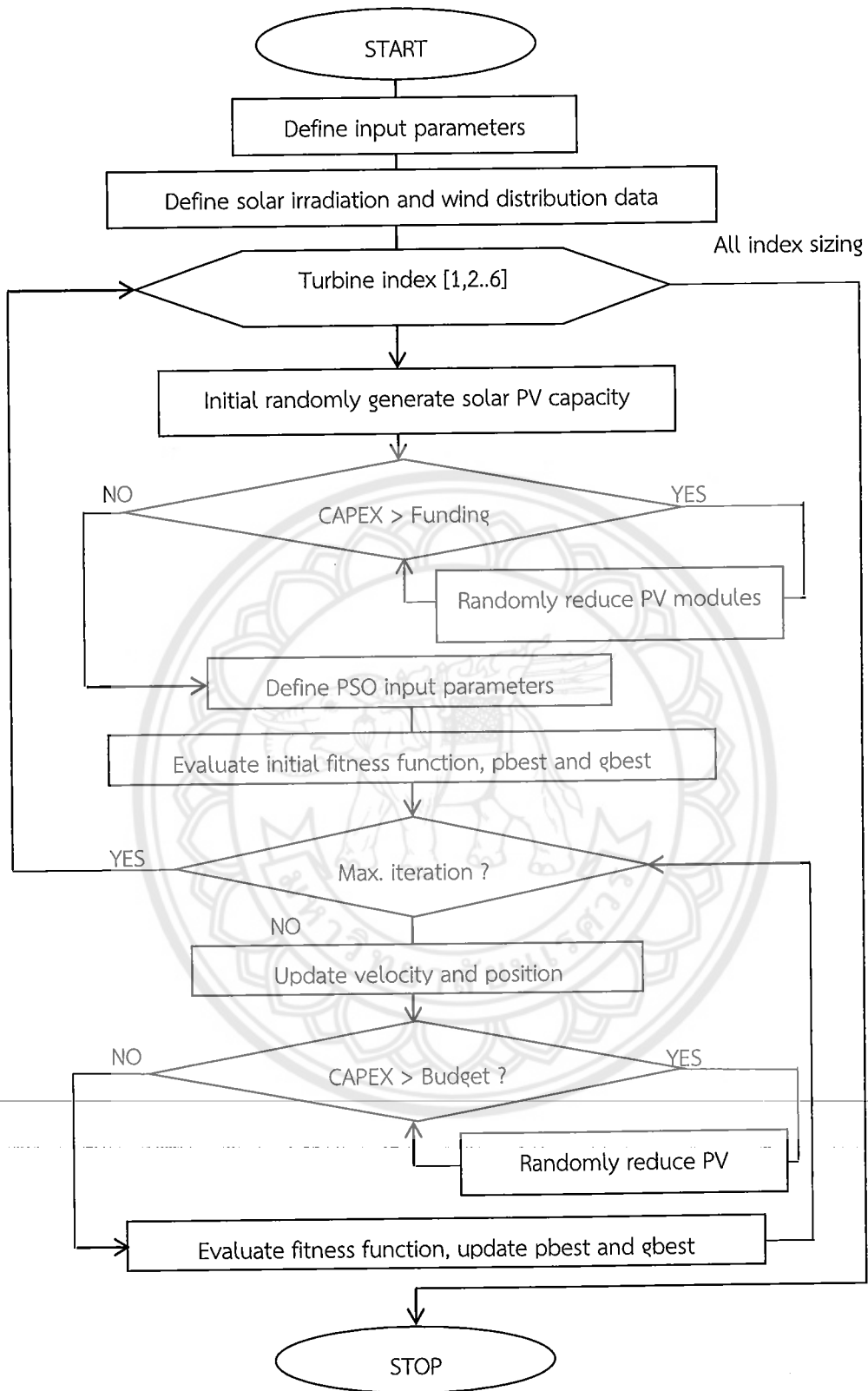
$$x_{ij}^{k+1} = [S_{11}^{k+1} S_{12}^{k+1} S_{13}^{k+1} \dots S_{pq}^{k+1}] \quad (3.28)$$



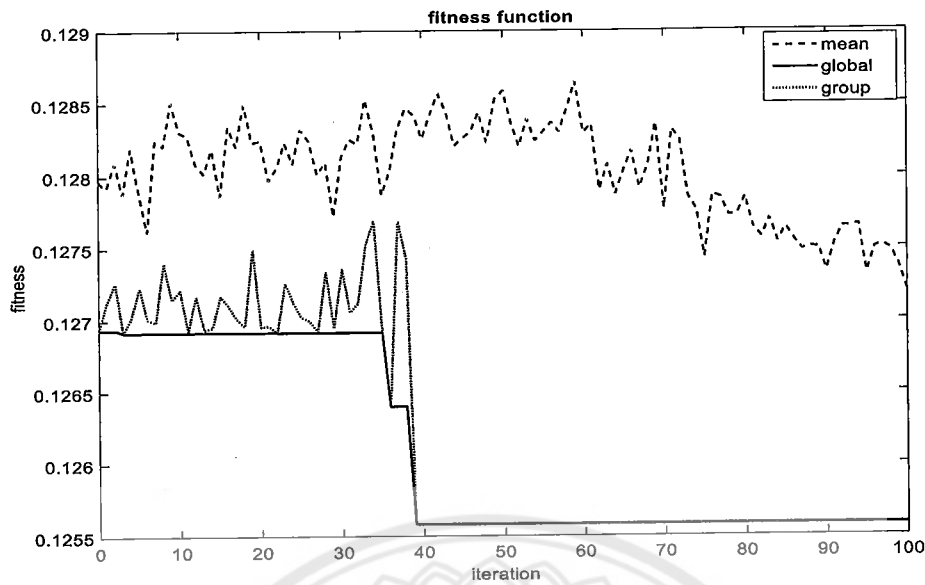
รูปที่ 3.7 Sigmoid function

### 3.2.3 กระบวนการของ BPSO

ขั้นตอนแรกของการหาทาง BPSO-TVAC คือกำหนดขนาดกลุ่ม swarm หรือจำนวนของพาร์ติเคิลและพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ สัมประสิทธิ์  $w$ ,  $c1$ ,  $c2$  จำนวนรอบการคำนวณและความผิดพลาดของการคำนวณ Global optima จากนั้นกำหนดเวกเตอร์เริ่มต้นของพาร์ติเคิลด้วยการสุ่ม ทำการคำนวณหาพาร์ติเคิล best positions และกลุ่ม global best position ขั้นตอนต่อไปคือการอัปเดตตำแหน่งของแต่ละพาร์ติเคิลด้วยเวกเตอร์ความเร็ว ในกรณีที่เป็นปัญหา Discrete หรือ Combination โดยการเปรียบเทียบจากสมการความเป็นไปได้ sigmoid function จำนวนรอบการคำนวณถูกกำหนดไว้ในพารามิเตอร์เริ่มต้นที่ 500 รอบ กระบวนการ BPSO แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กระบวนการทำงานของ PSO ในการการออกแบบระบบ HRES



รูปที่ 4.2 แสดงการค้นหามูลค่าพลังงานของระบบไฮบริดด้วย PSO เมื่อติดตั้งกังหันลมขนาด 1250 kW และเงินทุนเริ่มต้นไม่เกิน 100 ล้านบาท (3.22M\$)

ตารางที่ 4.1 แสดงถึงการเปรียบเทียบมูลค่าพลังงาน HRES COEh ที่ต่ำที่สุดของระบบระหว่างรูปแบบการเลือกขนาดของกังหันลมและกำลังติดตั้งของแผงโซลาร์เซลล์โดยกำหนดเงินทุนเริ่มต้นไม่เกิน 100 ล้านบาท พบว่าค่าพลังงานของแสงอาทิตย์และลม COEs, COEw และขนาดพื้นที่ติดตั้ง (utilized area) เพิ่มขึ้นตามกำลังติดตั้ง และพบว่ารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจะพบที่รูปแบบที่มีมูลค่าพลังงานของระบบไฮบริดต่ำที่สุด การเพิ่มขนาดกังหันลมจะทำให้ต้องลดการลงทุนในกำลังติดตั้งขอโซลาร์เซลล์ อย่างไรก็ตามการลงทุนในกังหันลมที่มากกว่า 49% ที่ขนาด 1250kW แสดงให้เห็นว่าจะไม่สามารถติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ในรูปแบบนี้ได้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นกำลังติดตั้งโซลาร์เซลล์จะทำให้ต้นทุนพลังงานของระบบไฮบริด COEh สูงกว่าต้นทุนพลังงานเมื่อติดตั้งกังหันลมเพียงอย่างเดียว แม้จะมีการเพิ่มการลงทุนแต่ค่า capacity factor (CFs) ของพลังงานแสงอาทิตย์ยังให้ค่าคงที่เนื่องจากการติดตั้งแผงหันหน้าไปยังทิศทางรับรังสีดวงอาทิตย์ในทิศทางเดียว ขณะที่พลังงานลมสามารถเพิ่ม capacity factor (CFw) ของพลังงานด้วยการเพิ่มขนาดกังหันลมทำให้ติดตั้งใบพัดที่ตำแหน่งสูงขึ้นซึ่งจะทำให้ความเร็วลมมากขึ้นนั่นเอง

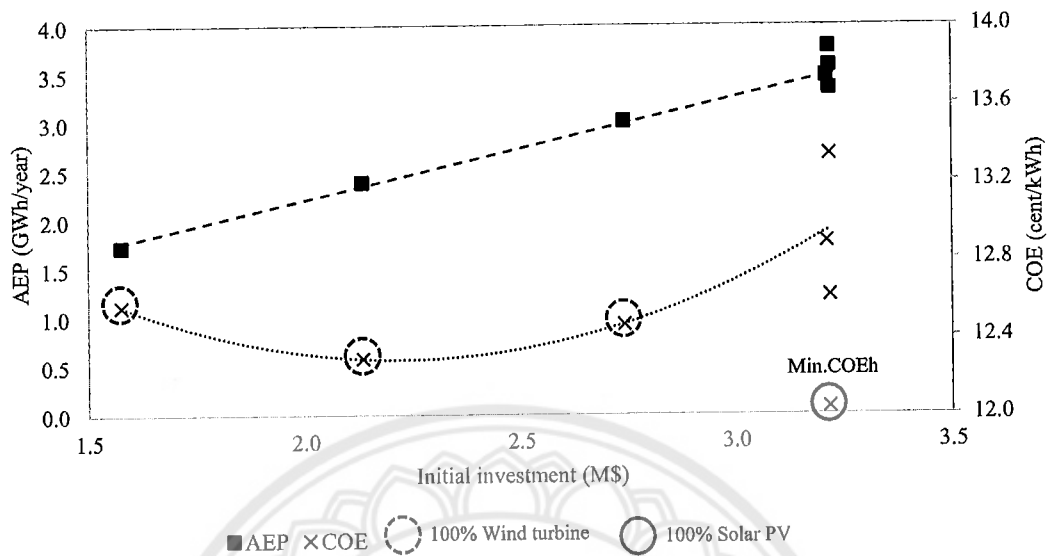
จากการคำนวณของแบบจำลองด้วย PSO พบว่าสถานีตัวอย่างสามารถติดตั้งระบบไฮบริดที่มีต้นทุนพลังงานต่ำที่สุดที่ COE (COEh) 3.68 บาท/kWh (12.04 cent/kWh) ซึ่งมีค่าเท่ากับต้นทุนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยได้จากรูปของการลงทุนติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ 100% ทั้งนี้เนื่องจากการลงทุนจำนวนแผงโซลาร์เซลล์เริ่มต้นมีจำนวนมากจึงมีข้อได้เปรียบจากขนาด economy of model นั่นคือยิ่งเพิ่มขนาดติดตั้งโซลาร์มากขึ้นจะทำให้ราคาต่อหน่วยอุปกรณ์เช่นแผงโซลาร์เซลล์ อินเวอร์สเตอร์ วัสดุประกอบต่างๆ ลดลงมากกว่า การลงทุนในจำนวนเงินที่เท่ากันหรือกำลังการผลิตที่เท่ากันในการติดตั้งกังหันลมเพียงตัวเดียวทำให้ต้นทุนพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าต้นทุนพลังงานลม

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลของระบบ HRES ที่เหมาะสม เมื่อกำหนดเงินลงทุนไม่เกิน 100 ล้านบาท (3.22M\$)

		0%	9%	24%	35%	49%	66%	85%
% wind investment		0%	9%	24%	35%	49%	66%	85%
% solar investment		100%	91%	76%	65%	0%	0%	0%
List	Unit							
Budget funding	(M\$)	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22
Capital expenditure	(M\$)	3.22	3.22	3.21	3.22	1.58	2.13	2.74
- Invest on wind turbine	(M\$)	0	0.30	0.76	1.12	1.58	2.13	2.74
- Invest on solar PV	(M\$)	3.22	2.92	2.45	2.09	0	0	0
Total capacity	(kW)	2,778	2,714	2,706	2,617	1,250	1,650	2,000
Price/total power	(\$/kW)	1,157	1,185	1,186	1,229	1,261	1,292	1,371
- Wind turbine rating	(kW)	0	225	660	900	1,250	1,650	2,000
- Installed Solar PV	(kW)	2,778	2,489	2,046	1,717	0	0	0
Avg. HRES power	(kW)	431.6	409.1	397.4	382.5	197.9	273.2	344.6
- Average wind power	(kW)	0	22.5	79.5	115.8	197.9	273.2	344.6
- Average solar power	(kW)	431.6	386.7	317.9	266.7	0	0	0
CF HRES (CFh)		0.155	0.151	0.147	0.146	0.158	0.166	0.172
- CF Wind (CFw)		0	0.100	0.120	0.129	0.158	0.166	0.172
- CF Solar (CFs)		0.155	0.155	0.155	0.155	0	0	0
COE HRES	(c/kWh)	12.04	12.61	12.89	13.34	12.56	12.29	12.46
- COE Wind energy	(c/kWh)	0	20.53	15.03	15.18	12.56	12.29	12.46
- COE Solar energy	(c/kWh)	12.04	12.15	12.35	12.54	0	0	0
Utilized area	(10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> )	19.45	20.78	23.16	26.42	19.60	25.60	32.40
- Wind turbine area	(10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> )	0	3.36	8.84	14.40	19.60	25.60	32.40
- Solar farm area	(10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> )	19.45	17.42	14.32	12.02	0	0	0
AEP	(GWh/y)	3.78	3.58	3.48	3.35	1.73	2.39	3.02
Revenue	(M\$/y)	0.69	0.66	0.64	0.62	0.34	0.47	0.59
ROI		21.4%	20.4%	20.0%	19.4%	21.4%	21.9%	21.5%

ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พลังงานสูงสุดที่ระบบไฮบริดที่ผลิตได้รายปี (AEP) มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมูลค่าการลงทุนและสัดส่วนของการลงทุนในพลังงานแต่ละชนิด การลงทุนมูลค่าต่ำลงจะทำให้ระบบไฮบริดผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ลดลงตามเนื่องจากอัลกอริทึมจะค้นหารูปแบบที่มีค่าต้นทุนพลังงานน้อยที่สุด นั่นคือการเลือกติดตั้งกังหันลมเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์เนื่องจากต้นทุนพลังงานระบบไฮบริด COEh มีค่าเท่ากับต้นทุนพลังงานลม อย่างไรก็ตามเมื่อเปลี่ยนสถานีติดตั้ง ข้อมูลสภาพอากาศก็จะเปลี่ยนไป ซึ่งในสถานีที่

มีความเร็วลมสูงกว่าอาจจะให้ต้นทุนที่แตกต่างออกไปดังนั้นจะต้องทำการค้นหาคำตอบอีกครั้งโดยสามารถใช้เครื่องมือค้นหา PSO ของงานวิจัยนี้ได้เช่นกัน

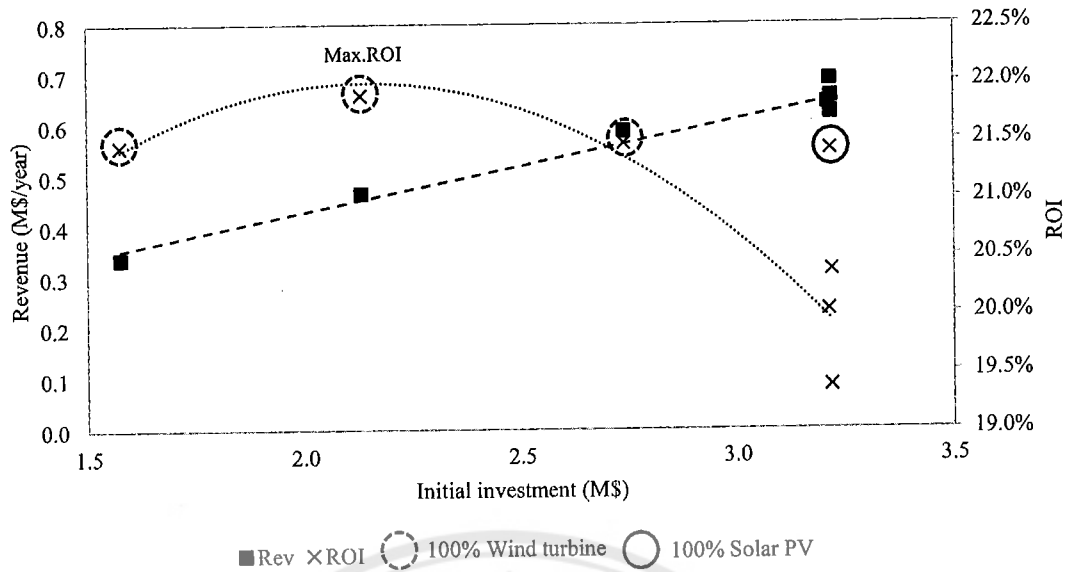


รูปที่ 4.3 พลังงานรายปี (AEP) และต้นทุนพลังงานของระบบ (COE) เมื่อกำหนดงบประมาณไม่เกิน 100 ล้านบาท (3.22M\$)

รายได้จากการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบไฮบริดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการลงทุนเพิ่มขึ้นและจะมีค่าสูงสุดเมื่อระบบผลิตพลังงานออกมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.4 แสดงถึงอัตราผลตอบแทนของการลงทุน (Return of Investment, ROI) จะแปลงผกผันกับพฤติกรรมของต้นทุนพลังงาน COEH โดยที่ ROI มากที่สุดจะเกิดขึ้นกับรูปแบบการติดตั้งกังหันลมขนาด 1650kW ด้วยมูลค่า COEH 3.76 บาท/kWh (12.29 cent/kWh) ซึ่งมีค่ามากกว่าต้นทุนที่ต่ำที่สุด 3.68 บาท/kWh (12.04 cent/kWh) ซึ่งมีค่าเท่ากับการเลือกติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากอัตรารับซื้อพลังงานลมของประเทศไทยมีค่า 6.06 บาท/kWh (FITw=19.50 cent/kWh [17]) ซึ่งมากกว่าอัตรารับซื้อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ 5.65 บาท/kWh (FITs=18.21 cent/kWh [17]) ดังนั้นรายได้จากการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกับพลังงานที่ผลิตได้รายปี (AEP)

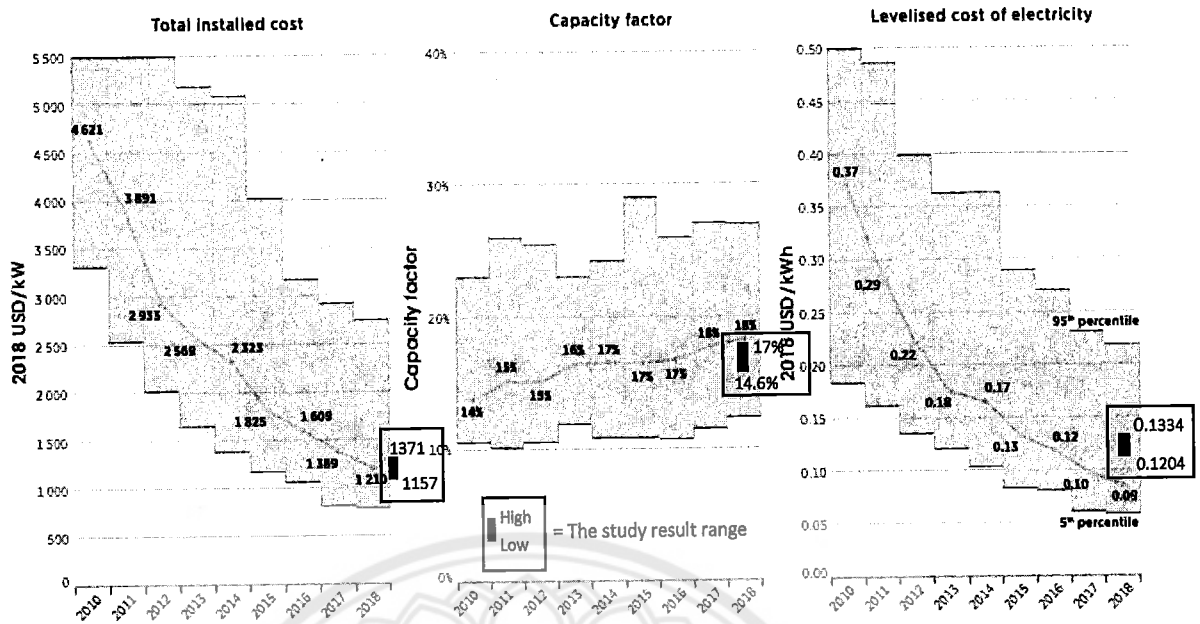
ผลการคำนวณจากข้อมูลสถานีเดียวกันเพื่อหาคำตอบในงานวิจัยนี้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับต้นทุนพลังงานจากรูปแบบของระบบไฮบริดที่ต่างกัน จึงไม่สามารถนำผลลัพธ์จากงานวิจัยอื่นมาเปรียบเทียบได้ เนื่องจากข้อมูลสภาพอากาศและลักษณะของสถานีติดตั้งแตกต่างกัน การคำนวณต้นทุนพลังงานทดแทนจึงเป็นงานที่มีลักษณะขึ้นอยู่กับตำแหน่งเฉพาะ (location base) อย่างไรก็ตามเพื่อให้งานวิจัยเกิดประโยชน์จึงทำการเปรียบเทียบต้นทุนพลังงานที่ทำคำตอบได้นี้ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลต้นทุนพลังงานและแฟกเตอร์ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน Capacity factor จากแหล่งฐานข้อมูลอ้างอิงระดับนานาชาติจาก the International Renewable Energy Agency (IRENA) database [30] ดังแสดงในรูปที่ 4.5 สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์และรูปที่ 4.6 สำหรับพลังงานลมชนิดติดตั้งบนพื้นดิน



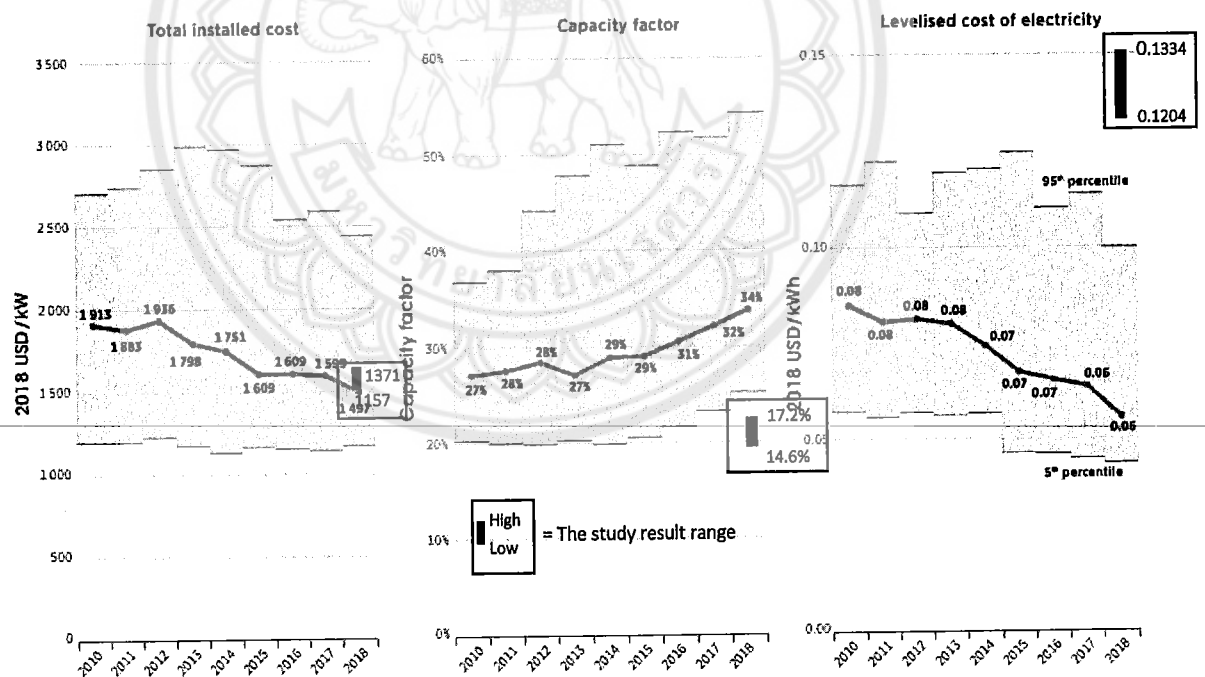


รูปที่ 4.4 รายได้และอัตราผลตอบแทนของการลงทุนโดยกำหนดไม่เกิน 100 ล้านบาท (3.22M\$)

จากตารางที่ 4.1 ต้นทุนพลังงานระบบไฮบริด COEh มีพิสัยระหว่าง 0.1204 – 0.1334 \$/kWh (3.70-4.09 บาท/kWh) ซึ่งมีค่าสูงกว่าต้นทุนพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยของฐานข้อมูล IRENA database ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของต้นทุนพลังงานลมที่ 0.06 \$/kWh (1.84 บาท/kWh) และต้นทุนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ 0.10 \$/kWh (3.07 บาท/kWh) มูลค่าการลงทุนต่อกำลังติดตั้งของงานวิจัยนี้อยู่ระหว่าง 1157-1371 \$/kW (35,520 – 42,090 บาท/kW) ซึ่งอยู่ภายในพิสัยเฉลี่ยของฐานข้อมูล อย่างไรก็ตามพบว่า แפקเตอร์การผลิตพลังงานของระบบ HRES capacity factors (CFh) ในงานวิจัยนี้มีค่าระหว่าง 14.6% - 17.2% ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยแפקเตอร์ของพลังงานลมและแสงอาทิตย์จากฐานข้อมูล นั่นคือเหตุผลที่ทำให้ต้นทุนพลังงานที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าฐานข้อมูล IRENA โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานลมที่มีค่าแפקเตอร์การผลิตน้อยมากจึงทำให้ต้นทุนพลังงานลมมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยอย่างมากตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากกำลังลมที่ได้จากข้อมูลสถานีลมเป็น Class 1 มีค่าเฉลี่ยเพียง 4.40 m/s ที่ความสูง 40 เมตร [31].



รูปที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยมูลค่าการลงทุน แพกเตอร์กำลังการผลิตพลังงานและต้นทุนของพลังงานแสงอาทิตย์จากฐานข้อมูล IRENA ระหว่างปี 2010-2018 [30] เปรียบเทียบกับผลการศึกษา



รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยมูลค่าการลงทุน แพกเตอร์กำลังการผลิตพลังงานและต้นทุนของพลังงานลมจากฐานข้อมูล IRENA ระหว่างปี 2010-2018 [30] เปรียบเทียบกับผลการศึกษา

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาถึงแหล่งพลังงานทดแทนที่น่ากลับมาใช้ใหม่ได้ พบว่าพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้ามากที่สุดเนื่องจากมีการพัฒนาเทคโนโลยีจนสามารถนำมาผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์จึงทำให้เกิดความได้เปรียบเชิงขนาดและจำนวนทำให้ต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยมีราคา ลดลงจนสามารถแข่งขันกับการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานสิ้นเปลืองต่างๆ ไป แนวโน้มในการลงทุนนำแหล่งพลังงานดังกล่าวมาผลิตไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายจึงเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเลือกนำแหล่งพลังงานเฉพาะเพียงแหล่งเดียวเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ หรือพลังงานลมมาผลิตพลังงานไฟฟ้า จะพบปัญหาความน่าเชื่อถือของการจ่ายพลังงานเนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่แน่นอนจึงทำให้การออกแบบโรงจักรไฟฟ้าเฉพาะเพียงแหล่งพลังงานเดียวมีขนาดใหญ่เกินความจำเป็นนำมาสู่ต้นทุนพลังงานที่สูงขึ้น ดังนั้นระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทนจึงถูกพัฒนาขึ้นด้วยการรวมแหล่งพลังงานทดแทนต่างๆ เข้าด้วยกัน เพื่อให้การผลิตพลังงานไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือ ลดขนาดการลงทุนมากเกินความจำเป็น ซึ่งจะช่วยให้ต้นทุนพลังงานต่ำลง

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทน (HRES) ประกอบการหาค่าศักยภาพด้านพลังงานที่ผลิตได้ และต้นทุนพลังงาน โดยนำกระบวนการพาร์ติเคิลสวอร์มออปติไมเซชัน (PSO) มาใช้ในการค้นหาค่าตอบของการออกแบบระบบให้ต้นทุนพลังงานที่ต่ำที่สุด ข้อมูลสภาพอากาศจากสถานีเช่น ความเร็วลม การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศ เป็นต้น ถูกนำมาวิเคราะห์ในแบบจำลองเพื่อหาค่าศักยภาพด้านพลังงานตามรูปแบบของ HRES ที่ออกแบบไว้ พลังงานลมถูกผลิตจากกังหันลมโดยแบบจำลองโค้งกำลังลม (Turbine power curve) ตามขนาดติดตั้ง ขณะที่พลังงานแสงอาทิตย์ถูกผลิตจากแผงโซลาร์เซลล์ด้วยแบบจำลองการผลิตพลังงาน (Solar power generation) การลงทุนโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์คำนวณมาจากข้อมูลที่รวบรวมจากตัวแทนจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ขณะที่การลงทุนโรงไฟฟ้าพลังงานลมจะใช้แบบจำลององค์ประกอบ (Component cost model) ที่พัฒนาโดย NREL เมื่อจัดการรูปแบบ HRES ด้วยกังหันลมและแผงโซลาร์เซลล์แล้ว จะสามารถคำนวณหาต้นทุนพลังงานด้วยสมการเป้าประสงค์ของงานวิจัย จากนั้นกระบวนการทาง PSO จะทำหน้าที่ในการค้นหาค่าตอบเพื่อให้ออกแบบระบบไฮบริดที่ทำให้ต้นทุนพลังงานน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขการลงทุนที่กำหนดไว้ พบว่าต้นทุนพลังงานที่ต่ำที่สุดจากงานวิจัยมีค่า 3.70 บาท/kWh (0.1204 \$/kWh) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ 95 ของฐานข้อมูลพลังงานทดแทนโลกที่รวบรวมโดย IRENA ซึ่งมีพิสัยระหว่าง 1.84 – 6.75 บาท/kWh (0.06 – 0.22 \$/kWh) สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์และ 1.23 – 3.07 บาท/kWh (0.04 – 0.10 \$/kWh) สำหรับพลังงานลม นอกจากนี้ต้นทุนที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าต้นทุนเฉลี่ยของฐานข้อมูล เนื่องจากข้อมูลแหล่งพลังงานจากสถานีดังกล่าวมีศักยภาพน้อย อย่างไรก็ตามกระบวนการ PSO นี้สามารถใช้สำหรับการออกแบบระบบไฮบริดเบื้องต้นในการพิจารณาเปรียบเทียบต้นทุนพลังงานที่ต่ำที่สุดเพื่อเปรียบเทียบกับพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้กันทั่วไปภายใต้งบประมาณลงทุนที่จำกัด

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 เพิ่มการออกแบบกังหันลม และนำข้อมูลจากสถานีที่มีศักยภาพสูงมาค้นหาค่าตอบ
- 5.2.2 เพิ่มการพยากรณ์มูลค่าลงทุนโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนในอนาคต
- 5.2.3 รวบรวมฐานข้อมูลด้านราคาของกังหันลมและแผงโซลาร์เซลล์ในเชิงพาณิชย์
- 5.2.4 วิเคราะห์ผลตอบแทนเมื่อกำหนดตัวแปรเชิงสังคม เศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

## เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Lazarov, G. Notton, Z. Zarkov, and I. Bochev, "Hybrid Power Systems with Renewable Energy Sources – Types, Structures, Trends for Research and Development " presented at the 11st International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA 2005), Sofia, BULGARIA, 2005.
- [2] P. Bajpai and V. Dash, "Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 2926-2939, 2012.
- [3] P. Nema, R. K. Nema, and S. Rangnekar, "A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2096-2103, 2009.
- [4] K. D. Mercado, J. Jiménez, and M. C. G. Quintero, "Hybrid renewable energy system based on intelligent optimization techniques," in *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2016, pp. 661-666.
- [5] S. Belgana, A. Dabib, H. Bilil, and M. Maaroufi, "Hybrid renewable energy system design using multobjective optimization," in *2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2013, pp. 955-960.
- [6] P. S. Acharya, M. M. Wagh, and V. V. Kulkarni, "Intelligent Algorithmic Multi-Objective Optimization for Renewable Energy System Generation and Integration Problems: A Review," *International Journal of Renewable Energy Reserach*, vol. 9, p. 10, March, 2019 2019.
- [7] M. K. Deshmukh and S. S. Deshmukh, "Modeling of hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 235-249, 2008.
- [8] D. I. Alvarez, C. J. C. Castro, F. C. Gonzalez, A. L. Uguña, and J. F. T. Toledo, "Modeling and simulation of a hybrid system solar panel and wind turbine in the locality of Molleturo in Ecuador," in *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2017, pp. 620-625.
- [9] R. Luna-Rubio, M. Trejo-Perea, D. Vargas-Vázquez, and G. J. Ríos-Moreno, "Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies," *Solar Energy*, vol. 86, pp. 1077-1088, 2012.
- [10] W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu, and H. Yang, "Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar and wind power generation systems," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 380-389, 2010.
- [11] B. F. Ronad and S. H. Jangamshetti, "Optimal cost analysis of wind-solar hybrid system powered AC and DC irrigation pumps using HOMER," in *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2015, pp. 1038-1042.
- [12] A. Kaabeche, M. Belhamel, and R. Ibtouen, "Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system," *Energy*, vol. 36, pp. 1214-1222, 2011.

- [13] M. Fadaee and M. A. M. Radzi, "Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 3364-3369, 2012.
- [14] J. L. Bernal-Agustin and R. Dufo-Lopez, "Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2111-2118, 2009.
- [15] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, and Z. Fang, "Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm," *Solar Energy*, vol. 82, pp. 354-367, 2008.
- [16] H. Yang, Z. Wei, and L. Chengzhi, "Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system," *Applied Energy*, vol. 86, pp. 163-169, 2009.
- [17] P. Ananjanich, "Thailand: Renewable Energy Policy Update," in *New Power Development Plan announced in May (Status May 2015)*, T. Chrometzka, Ed., ed. German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy: German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2015, p. 4.
- [18] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, "Alternative Energy Development Plan : AEDP2015," Department of Alternative Energy Development and Efficiency September 2015.
- [19] A. A. Teyabeen, F. R. Akkari, and A. E. Jwaid, "Power Curve Modelling For Wind Turbines," presented at the UKSim-AMSS 19th International Conference on Modelling & Simulation, Cambridge, United Kingdom, 2017.
- [20] K. Demerdziev, V. Dimchev, and M. Celeska, "Analytical Method for Wind Turbine Power Curve Uncertainty Estimation," in *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2018, pp. 1-6.
- [21] M. Pierrot. (2016, 18th December). *Wind turbines and wind farms database*. Available: [http://www.thewindpower.net/manuturb\\_turbines\\_en.php](http://www.thewindpower.net/manuturb_turbines_en.php)
- [22] L. Fingersh, M. Hand, and A. Laxson "Wind Turbine Design Cost and Scaling Model," National Renewable Energy Laboratory, Technical report NREL/TP-500-40566, December 2006.
- [23] W. Direkudomsak, "Inflation dynamics and inflation expectations in Thailand," Bank for International Settlements, Bank for International Settlements 15 November 2016.
- [24] S. Diaf, G. Notton, M. Belhamel, M. Haddadi, and A. Louche, "Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions," *Applied Energy*, vol. 85, pp. 968-987, 2008.
- [25] DEDE, "Annual Report 2016," Ministry of Energy, Department of Alternative Energy Development and Efficiency 2016.
- [26] D. Chaichuangchok, S. Tongsovit, and N. Hoonchareon, "Appropriate Financial Measures for the Support of Residential Rooftop Solar Systems in Thailand," *Energy Research*, vol. 3, p. 14, September-December 2013.
- [27] W. Chanovit, "Cost Benefit Analysis of Solar photovoltaic rooftop project (Residential type) in different radiation area of Thailand," Master, School of Development Economics, National

- Institute of Development Administration, National Institute of Development Administration, 2014.
- [28] S. Prampayoong, "Economic Value Analysis of Solar Farm Project for Electricity Generation and Supply," School of Development Economics, National Institute of Development Administration, 2014.
- [29] DEDE. (2009, 10/3/2019). *DEDE's 1.5 MW wind power pilot project proven to be great success*. Available: <http://weben.dede.go.th/webmax/content/dede's-15-mw-wind-power-pilot-project-proven-be-great-success>
- [30] IRENA, "Renewable Power Generation Costs in 2018," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi 2019.
- [31] B. H. Bailey, S. L. McDonald, D. W. Bernadett, M. J. Markus, and K. V. Elsholz, "Wind resource assessment handbook: Fundamentals for conducting a successful monitoring program," United States 1997-04-01, 1997.





ก1. ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์

ลำดับ	รายละเอียดวัตถุประสงค์	เปรียบเทียบ
1.2.1	เพื่อออกแบบระบบพลังงานทดแทนไฮบริดจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมและความสำเร็จของระบบ	ได้ผลลัพธ์ตามที่วางไว้
1.2.2	เพื่อนำกระบวนการแก้ปัญหาและตัดสินใจทางคณิตศาสตร์แบบเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristic Algorithm) มาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาเชิงการออกแบบด้านไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทน	ได้ผลลัพธ์ตามที่วางไว้
1.2.3	เพื่อทราบถึงศักยภาพ ประสิทธิภาพ และการออกแบบระบบไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทนเพื่อผลิตไฟฟ้าใช้อย่างเหมาะสมในพื้นที่กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก	ได้ผลลัพธ์ตามที่วางไว้
1.2.4	เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบที่เหมาะสมในนำไฮบริดสำหรับพลังงานทดแทนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ	ได้ผลลัพธ์ตามที่วางไว้

ก2. ตัวชี้วัดเพื่อการประเมินผลสำเร็จของโครงการ

ประเภท	ผลงาน	จำนวน	ผลสำเร็จ
การตีพิมพ์และเผยแพร่	13.1 ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติที่มีค่า Impact Factor	1 เรื่อง	แล้วเสร็จ
	13.2 นำเสนอในการประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ ตีพิมพ์บทความบน Proceedings	1 เรื่อง	แล้วเสร็จ

ก3. ตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ

- S.Pookpant, Optimal Design for Hybrid Renewable Energy System Using Particle Swarm Optimization, INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH, Vol.9, No.4, December 2019, impact factor 3.12 (<https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer>)



# Optimal Design for Hybrid Renewable Energy System Using Particle Swarm Optimization

Sittichoke Pookpunt\*†

\* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand  
(sittichokepo@nu.ac.th)

† Sittichoke Pookpunt, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University,  
Phitsanulok, Thailand, Tel: +66 559 614 259, Fax: +66 559 614 260,  
sittichokepo@nu.ac.th

*Received: 21.08.2019 Accepted: 04.10.2019*

**Abstract-** This paper proposes the Particle Swarm Optimization (PSO) to minimize the Hybrid Renewable Energy System (HRES) Cost of Energy (COE) on different sizing between wind turbines and solar PV modules subjecting to a particular investment constraint. The wind speed and solar irradiation data from a particular site are used to determine the annual energy production (AEP) following the HRES configuration. While the turbine power curve converts the wind speed range to wind power, solar power generation model transforms solar radiation incident on PV modules. The investment cost of the solar PV system is interpolated from a commercial supplier data. However, the wind turbine cost is derived from the turbine component cost model of the National Renewable Energy Laboratory (NREL) and discounted to the present value using the inflation rate. Once a wind turbine and PV modules are configured as HRES, the COE as the objective function would be determined. The minimum COE from this study at 0.1204 \$/kWh is in the 95th percentile of the global renewable power generation cost database from IRENA ranging between 0.06 – 0.22 \$/kWh for solar energy and 0.04 – 0.10 \$/kWh for wind energy but higher than the average value because of the low potential on both solar radiation and wind speed data from the particular site. However, PSO as the preliminary design method could be determined the optimal HRES with minimized COE when compare with the conventional design.

**Keywords** Hybrid Renewable Energy System, Solar Energy, Wind Energy, Particle Swarm Optimization.

## 1. Introduction

Renewable energy is the energy collected from the natural source and capable to regenerate within a short period. It could originate both directly and indirectly from the sun causing the natural movement or environment transform. Solar and wind energy as renewable energy could provide a high potential in electrical energy production because of available technology on commercial and economical investment proof. Moreover, many countries provide the various incentives to promote the utilization of both solar and wind energy to meet the stability of the energy capacity performance and indirectly affect the low carbon society including social behavior and awareness.

However, the uncertainty of the single renewable source decreases in the utilized reliability leading to the redundant system design and the need to install the amount of battery

storage for the unavailable source period. For this reason, the Hybrid Renewable Energy System (HRES) is developed by integrating between the different renewable energy and the conventional source to stability, flexibility and reliability system as shown in Figure 1. The system could be configured into stand-alone with the storage unit or grid connection leading to decrease on both capital investment and cost of energy when compared with only single renewable source [1].

The conventional system design chooses the HRES configuration based on the average wind and solar information or the worst scenario data leading to the excessive system causing oversize neither wind turbine nor solar PV capacity. This situation rarely appears and unsteady caused by the long period of time-series data collection with the inconsistency of weather conditions and electrical

demand. Moreover, the objective function directly deals with the algorithm. Therefore, the solution for optimal configuration would combine with both linear and non-linear characteristics which are difficult to meet the global optimal. Much research have been studied the various method to design the system.

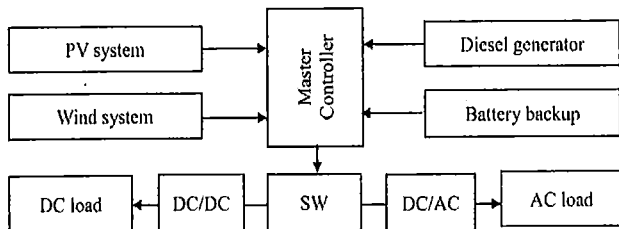


Fig.1 The generalized HRES schematic

P. Bajpai and V. Dash [2] develop the generalized model of HRES used to choose the strategy for information control and energy flow management. They classify the HRES sizing methods based on available weather data. The conventional technique including the energy balance method and reliability of the supply method are used when the long term meteorological data available which could not collect in many remote areas. For the non-availability data area, Artificial Intelligence (AI) techniques could be implemented to search for optimal sizing including Neural Networks (ANN), Fuzzy Logic (FL), Genetic Algorithms (GA) or a hybrid of such technique. These methods provide approximate results depending on diversifying the search. P.Nema et al. [3] showed the system design development for the rural area should be improved including the performance, accurate energy reserve and reliability. The pre-feasibility design strongly depends on available weather data at the site both solar insolation and wind speed. Then, the unit sizing of the integrated power system plays an important role in deciding the reliability and economy of the system. Various optimization techniques including linear programming, iterative technique and metaheuristic algorithm or intelligent optimization were used to search for the most cost effective energy production [4-6]. The HRES components modeling was developed including a photovoltaic system, wind energy system and the criteria for HRES selection including loss of load probability and cost analysis [7, 8]. They conclude that to penetrate the renewable energy in power generation capacity needs to integrate HRES in the conventional network system.

For algorithms development, R.Luna-Rubio et al. [9] collected the various HRES design procedure and classified into different system architectures. They presented the appropriated algorithms into the probabilistic and analytical procedure with the compatible objective function, boundary and constraints. W. Zhou et al. [10] collected the design procedure for stand-alone HRES as the currently application. To validate the system, the algorithm was compared to the commercial software including HOMER of NREL, HOGA based on Genetic Algorithms and the spreadsheet software. Mostly commercial software focused on the economical return [11]. Therefore, the algorithm design including the

graphic process, the probability and the numerical iterative should be consideration in order to diversification the objective function, boundary and constraints.

For the system with multi-objective function, A. Kaabeche et al. [12] proposed the iterative technique in order to define the HRES sizing with storage battery by changing the component sizing in each iteration. The multi-objective function required the deficiency of power supply probability (DPSP) and the levelized unit electricity cost (LUEC) using the time-series data from the Center for Renewable Development, Nigeria. M.Fadaee and M.A.M. Radzi [13] collected the stand alone HRES design using Evolutionary algorithms the multi-objective (MOEA) considering location, sizing, and systems controller. Moreover, the algorithm showed the MOEA can determine the problem with sensitivity to various energy demand situations. They found that GA and PSO appropriated capable to provide least square error in the solution. J.L. Bernal-Agustin and R. Dufo-Lopez [14] describe the comparative optimal HRES design from the commercial software with the different multi-objective in different system.

To prove the algorithm, H. Yang et al.[15] firstly proposed the HRES design method including wind turbine, solar PV module and battery storage using the genetic algorithm based on time series data. The solution showed the selected system sizing for load requirement in order to minimize the annualized cost at the telecommunication station case study. The system would be followed by keep the loss of power supply probability (LPSP). Secondly, H. Yang et al [16] constructed the HRES to serve the telecommunicated station in the coaster area in China. The system capacity at 1500W includes 2 of 6 kW wind turbines and 78 PV modules with 500Ah battery storage. One-year period collection data showed the performance of system satisfied the load requirement.

Therefore, the HRES design mainly depends on the sizing of optimal components leading to feasibility on both technology, economy and promoted the policy to launch the system into the energy market. This combination of optimal design is to choose the optimal components from the possibility depending on the objective function with specific boundaries and constraints. Beside, the more system complexity depends on the behavior of components, which can be both linear and non-linear characteristics, the uncertainty of renewable source and the design condition including continuous and discrete.

This paper proposes the optimal preliminary design for HRES sizing between solar PV modules and wind turbines based on the solar radiation data and wind speed distribution collected from the meteorological site at Naresuan University, the central of Thailand. Using solar PV generated power model and wind turbine power curve, both power extraction from solar radiation and wind speed would be derived. Besides, the solar PV cost modeling from an average Thailand commercial retail price [17] and the wind turbine cost component from the National Renewable Energy Laboratory (NREL) discounted to the present value using the

inflation rate [18] are used to determine the capital expenditures and operational expenditures. PSO is employed to search for the minimum HRES cost of energy (COE<sub>h</sub>) subject to the weighting of investment constraint between solar and wind capacity.

## 2. Mathematical Modelling

### 2.1. Wind turbine power curve

Wind turbine transforms a particular wind speed into electricity by turning a mechanical shaft work and consequently drives through an electrical power generation. The wind turbine power curve shows the relationship range between wind speeds and electrical power outputs. In principle, turbine blades initially turn and generate electricity when the wind speed at the hub height is greater than a cut-in wind speed ( $c_i$ ). The electrical power would be proportional rises up with the wind speed until it achieves the rated wind speed ( $c_r$ ). The blade's pitch angle would be controlled to meet the constant rated power ( $T_R$ ) specified as the turbine sizing. However, the more wind speed than cut-out speed ( $c_o$ ), the brake system would be lock turbine turning because of preventing machine failure. This characteristic of a particular sizing of the wind turbine power curve could be found by a manufacturer field test. To simplified the model, this paper formed a power curve by implementing the power-coefficient based model by the given cut-in, rated and cut-out speed with the least root mean square error compared to other models [19, 20] as following Eq.(1)

$$P(\bar{u}_i) = \begin{cases} 0 & : \bar{u}_i < c_i \\ \frac{1}{2} \rho A_s C_p \bar{u}_i^3 & : c_i \leq \bar{u}_i < c_r \\ T_R & : c_r \leq \bar{u}_i \leq c_o \\ 0 & : \bar{u}_i > c_o \end{cases} \quad (1)$$

where  $P(\bar{u}_i)$  is electrical power output,  $\bar{u}_i$  is a wind speed at turbine hub height,  $\rho$  is air density,  $A_s$  is swept area of wind turbine and  $C_p$  is a coefficient of power defined as 0.4 [19] and  $T_R$  represents the turbine rating  $R$  kW.

The larger turbine rating generates more power and needs a higher hub height to install. In Table 1, the turbine rated power ranging from 225 to 2000 kW is represented by size index ( $i$ ) from 1 to 6. The turbine technical specification including turbine rated power, rotor diameter, hub height, cut-in, rated speed, and cut-out speed are collected from manufacturer data. Because of the consistency sizing interval, all models assort from the Vestas series except model W1250 which from Shanghai Electric Wind Power [21]. The particular turbine power curves present in Figure 2. Additional, the wind turbine cost could be found by using the National Renewable Energy Laboratory (NREL)'s component cost model as in [22].

The wind speed data generally collect from a particular height could not provide all sizes of wind turbines. At the different hub height, the wind power law is used to the model of vertical wind speed profile as following,

$$\bar{u}_H = \bar{u}_{ref} \left( \frac{H}{H_{ref}} \right)^\alpha \quad (2)$$

where  $\bar{u}_H$  is the hub height ( $H$ ) wind speed,  $\bar{u}_{ref}$  is the recorded wind speed at the reference height ( $H_{ref}$ ) and  $\alpha$  is the wind speed power law coefficient defined as 1/7 for the low roughness surfaces.

Table 1. The characteristic of wind turbine series

Index (i)	1	2	3	4	5	6
model	V29	V47	V60	W1250	V82	V90
$T_R$ (kW)	225	660	900	1,250	1,650	2,000
Rotor(m)	29	47	60	70	82	90
Hub (m)	31	50	60	70	80	90
$c_i$ (m/s)	3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
$c_r$ (m/s)	13	14	15	15	15	15
$c_o$ (m/s)	20	25	25	25	25	25
$A_s$ (m <sup>2</sup> )	661	1,735	2,827	3,848	5,281	6,362
Cost (M\$)	0.302	0.762	1.124	1.576	2.132	2.741
Cost/kW (\$/kW)	1,345	1,155	1,249	1,261	1,292	1,371

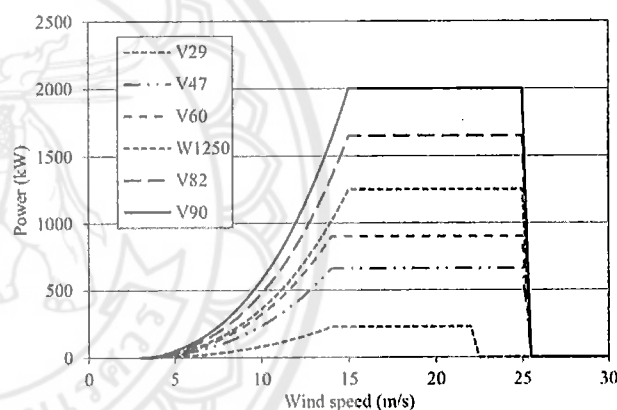


Fig. 2 The series of wind turbine power curve model following Eq.(1)

The average annual power generation ( $P_w$  as kW) represents the constant power output from the wind turbine determined from the accumulation product of particular turbine power from Eq.(1) and its frequency wind distribution within the range of wind speed around the site as:

$$P_w = \sum_{i=c_i}^{c_o} f_i P(\bar{u}_i) \quad (3)$$

where  $f_i$  is the wind probability distribution at speed  $i$  m/s as shown in Figure 6. Therefore, the annual energy production from the wind turbine ( $AEP_w$ ) obtains by Eq.(4) :

$$AEP_w = P_w \times 24 \times 365 \quad (4)$$

Additional, the wind capacity factor ( $CF_w$ ) for the particular site is determined from the following relation:

$$CF_w = \frac{AEP_w}{T_R \times 8760} = \frac{P_w}{T_R} \quad (5)$$

### 2.2. Wind turbine cost model

National Renewable Energy Laboratory (NREL) proposes a component cost model of wind turbine and its implementation cost based on a spreadsheet scaling model using the regression between component weight and manufacture cost for the different turbine sizing. The total capital expenditure of wind farm ( $CAPEX_w$ ) could be found as shown in Eq.(6) [22].

$$CAPEX_w = TCC_i + BOS_i \quad (6)$$

where  $TCC_i$  is the turbine components cost and  $BOS_i$  is the balance of station cost of wind turbine size index  $i$ .

The turbine components cost would be proportional determines from its component weight including rotor diameter, drive train and nacelle, tower height and manufacture work. This model accounts for the balance of station cost including the foundation construction, logistics, installation and assembly work, road and site assessment, control system and electrical interface and connection, engineering design, safety and permit registration cost. Moreover, this paper account for Thailand 10 years averages inflation rate as 2.5% [23] as an incremental price to the year of consideration. To determine the cost of wind energy, the model proportional treats including the operation and maintenance cost, land lease cost and replacement part as the amount of annual energy production as shown in Eq.(12).

### 2.3. Solar PV power assessment

The solar PV module power output mostly depends on solar radiation, weather condition, and module temperature. To estimate the solar PV power generator output, the data including solar radiation on the module surface, ambient temperature and manufacturers data of the PV module are used as the input in the simplified simulation model [24] as shown in Eq (7),

$$P_s = \eta_s A_s G_\beta \quad (7)$$

where  $\eta_s$  is the PV module efficiency,  $A_s$  is the total area of the PV module ( $m^2$ ) and  $G_\beta$  is the solar radiation on the tilted plane ( $W/m^2$ ) as the PV module inclined angle following the site latitude. Additional, the PV generator efficiency could be found as,

$$\eta_s = \eta_r \eta_{pc} [1 - \beta \times (T_c - T_{ref})] \quad (8)$$

where  $\eta_r$  is the reference module efficiency,  $\eta_{pc}$  is the power conditioning efficiency generally equaling to 100% for the complete track on the maximum power point (MPPT),  $\beta$  is the temperature coefficient ranging 0.0004-0.0006 per  $^\circ C$ ,  $T_{ref}$  is the reference cell temperature ( $^\circ C$ ) from manufacturer testing data and  $T_c$  is the cell temperature estimating from the ambient temperature ( $T_a$ ) and the solar

radiation ( $G_\beta$ ) from site data logger as following,

$$T_c = T_a + \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right) G_\beta \quad (9)$$

$NOCT$  is the normal operating cell temperature generally providing as  $T_{a,NOCT} = 20^\circ C$  and  $G_{\beta,NOCT} = 800 W/m^2$  at 1 m/s of wind speed.

### 2.4. Solar PV cost model

In this paper, the solar PV cost model is derived from the PV system component cost model. The main parts and accessories cost data are collected from the commercial average price in the Thailand market. The 300W of PV module specification shown Table 2 is used in this study. The transportation and installation cost is based on the medium price from various project TOR announcing from the Department of Alternative Energy Development and Efficiency [25], Thailand Ministry of Energy and the internal publication in Thai [26-28]. The total capital expenditure per capacity power unit is shown in Figure 3, This cost model is compared with a few actual solar farm sites less than 20kW and could have a huge error in the large capacity projects. However, the improvement of the solar cost model could be modified and applied in this developed algorithm.

Table 2 Solar PV specification.

Cell type	Monocrystalline
Maximum Power (Pmax, W)	300
Module Efficiency (%)	17.5
Cell Dimensions ( $mm^2$ )	161.7 x 161.7
NOCT ( $^\circ C$ )	45
Output Warranty of Pmax	1) 1st year: 98% 2) After 1st year: 0.5%p annual degradation 3) 86% for 25 years

Note: Standard Test Condition (STC) at irradiance 1000  $W/m^2$ , cell temperature  $25^\circ C$

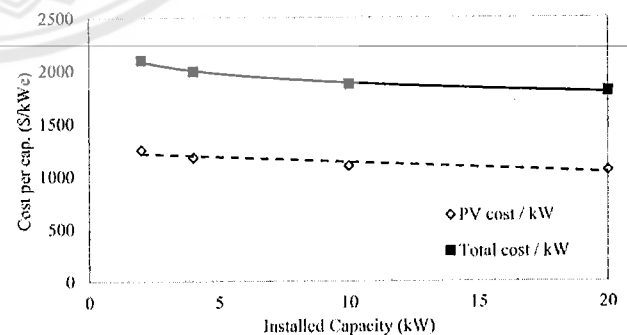


Fig. 3 the total cost of solar PV per capacity

## 3. Methodology

### 3.1. HRES configuration

In this paper, the on-grid HRES is configured with both

solar PV and wind turbine as shown in Figure 4. A wind turbine converts wind speed into energy via its generator and distributes electricity through an inverter device. As the parallel system, solar PV modules likewise convert the sunlight into energy and distributes through another inverter device. The step-up transformer increases the generated electricity to high voltage and distributes it into the utility transmission line. The metering device is installed to collect the supply of electrical energy. This simplify configuration could lower the capital expenditure and O&M cost without the battery storage. Moreover, this decreases the additional cost from the replaced and eliminated cost from an amount of battery.

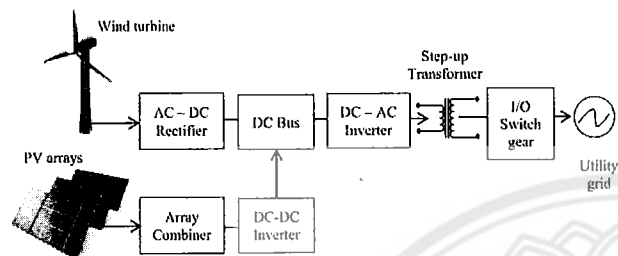


Fig. 4 the schematic diagram of the HRES preliminary design

### 3.2. Solar irradiation data

In this paper, 3 years of solar radiation data was collected from Naresuan University, Central of Thailand (latitude  $16^{\circ}44'43''N$ , longitude  $100^{\circ}11'28''E$ ) as the studied site. Due to the Northern Hemisphere location, the monthly average global solar radiation with  $15^{\circ}$  tilted to South direction is used to determine the solar energy potential as shown in Figure 5.

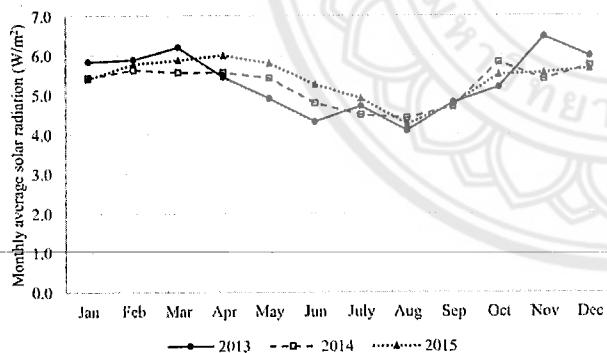


Fig. 5 the monthly average global solar radiation with  $15^{\circ}$  tilted to South direction at Naresuan University

### 3.3. Wind distributed data

The wind speed at Naresuan University was collected at 10 meters height, wind power law was used to find the wind speed at the turbine hub height. However, the average wind speed from this location is much lower than wind turbine rated speed as shown in Figure 6 leading to low potential in wind energy production. The search algorithm found the optimal HRES configuration without any sizing of wind turbine selection. For this reason, the data from a higher

average wind speed location as Huasai district in the south of Thailand (latitude  $8^{\circ}04.376''N$ , longitude  $100^{\circ}27.513''E$ ) is applied in the search procedure as shown in Figure 6. This paper uses the Hausai wind data because the Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE) already installed the pilot project wind turbine sizing 1.5MW since 2009 costing around 2420 \$/kW [29] and currently plan to increase site capacity to meet the Alternative Energy Development Plan (AEDP) requirement by the year 2036 [18]. They need to compensate for the COE by other renewable sources such as solar PV. Collected wind data generally transform into the Weibull distribution and use to determine the wind energy potential. However, the actual data provides more accurate for specific site potential.

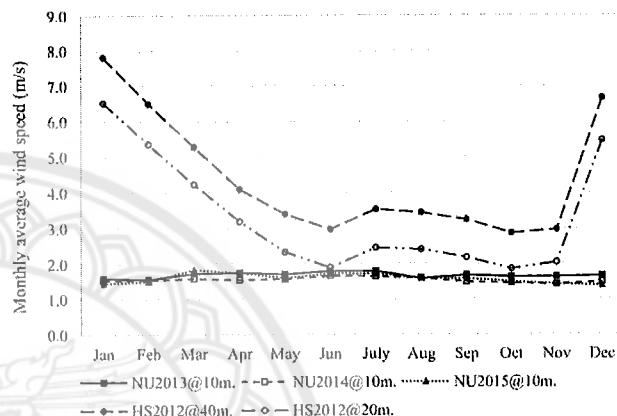


Fig. 6 the monthly average wind speed at Naresuan University (NU) and Huasai district (HS)

The location on both wind turbines and solar PV should be close to each other. This collaborated data was not appropriate in practical design but it could be used to prove the search method. However, in this paper, the algorithm has been developed to determine optimal sizing between a wind turbine and solar PV subject to investment constraint as a preliminary design. The wind speed and solar radiation should be high potential enough to apply in this developed algorithm. If any particular site provides both wind speed and solar radiation data, this PSO could be re-run and uses as a preliminary design to determine the potential sizing of HRES. Moreover, this method could be useful for a developer with a particular fund who could be considered the priority of investment between solar and wind energy in different locations. This implies that there is no limitation of data available to apply in this algorithm.

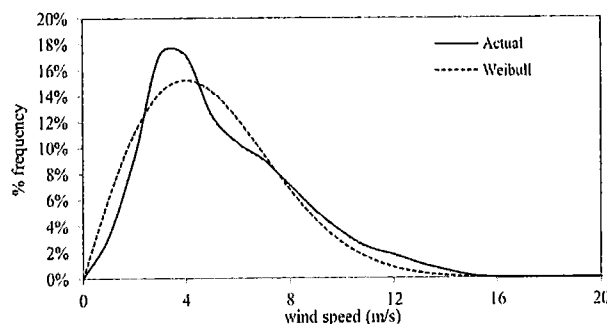


Fig. 7 The frequency of wind speed and its Weibull distribution

### 3.4. Particle swarm optimization (PSO)

PSO is one of the metaheuristic algorithms or the population-based stochastic search algorithm developing to search for the optimal answer based on the objectives and constraints of the complexity and multi-dimensional variables problem. The PSO concept is imitated from the group of social creatures or swarm behavior such as fish or birds. PSO emulates a population or a group of particles within the search space.

A particle ( $i$ ) holds its information vectors both a current position ( $x_i$ ) and velocity ( $v_i$ ). While the swarm flow in the search space in each iteration, any particle would be found its best position called "Particle best ( $pbest_i$ )" and the swarm or group best position called "Group best ( $gbest_i$ )". The best position in each iteration ( $k$ ) reminded as the answer value following the objective or fitness function. Both information would be exchanged within the swarm would be driving the other particle to change their position and velocity in the next iteration ( $k+1$ ). Note that, the members of a swarm would be remains in the search process.

Following the procedure of PSO, a swarm has  $N$  particles. Each particle ( $x_1, x_2, \dots, x_N$ ) in  $k$  iteration denoted as  $x_i^k$  would hold its velocity  $v_i^k$ . Each particle best denoted as  $pbest_i^k$  is the best fitness value than the previous iteration. If the next best group fitness value is not better than the previous one, then  $pbest_i^{k+1}$  is equal to  $pbest_i^k$ . While the swarm or group best denoted as  $gbest_i^k$  is the best fitness value found by the whole particles. If the next best group fitness value is not better than the previous one, then  $gbest_i^{k+1}$  is equal to  $gbest_i^k$ . Generally, the initial velocity is randomly generated within the boundary of the search space. The updated velocity as  $v_i^{k+1}$  used to update the next iteration particle position defined as following,

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (gbest_i^k - x_i^k) \quad (10)$$

where  $\omega$  is an inertia weight coefficient,  $c_1$  and  $c_2$  are cognitive coefficient and social coefficients used to accelerate the search,  $r_1$  and  $r_2$  are the randomly real numbers between  $[0,1]$ . In this paper,  $\omega$  defined as 0.4,  $c_1$  and  $c_2$  are defined as 2. Then PSO would update the particle position using the updated velocity as following,

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (11)$$

In this study,  $x_i^k$  represents the ratio between a solar capital expenditure to the total investment constraint and  $v_i^{k+1}$  is the probability used to update the next  $x_i^{k+1}$ .

### 3.5. Problem formulation and calculation procedure

In this paper, the wind turbine is initially selected from 225kW to 2000kW because of its discrete capacity characteristics. The wind turbine installed area is calculated based on 2 times of rotor diameter spacing (2D). Next, the capacity of solar PV modules is randomly generated based on capital expenditure. To optimal of HRES both wind

turbine and solar PV modules sizing, this paper used economical fitness function is to minimize the HRES cost of energy ( $COE_h$ ) as Eq.(12)

$$\begin{aligned} &\text{Minimize : fitness function} = \min (COE_h) \\ &= \min. \left( \frac{\text{Leverlized capital expenditure} + \text{Annual expense}}{\text{HRES annaul energy production}} \right) \\ &= \frac{\left\{ \left( \frac{d(1+d)^{n_h}}{(1+d)^{n_h} - 1} \right) \times CAPEX_h + (LLC_h + O\&M_h + LRC_h) \right\}}{AEP_h} \quad (12) \end{aligned}$$

subject to the budget investment of 3.22M\$ (100 Million THB) and the lifetime of the project ( $n_h$ ) is 20 years for wind energy and 25 years for solar energy following the utility contracts,

where ;

- $AEP_h = P_h \times 8760$  (kWh/year) when,
- $P_h$  = average power generation of renewable source (kW),
- $CAPEX_h$  = capital expenditure of renewable source,
- $LLC_h$  = land lease cost of renewable source,
- $O\&M_h$  = Operation and maintenance cost,
- $LRC_h$  = Levelized replacement cost,
- $d$  = the discount rate as 10%

Note : subscript  $h$  refer to renewable energy source ( $h=s$  for solar,  $h=w$  for wind)

To evaluated the  $COE_h$ , the overall procedure to evaluate the HRES optimization is shown in Figure 8. Firstly, the HRES input parameters including budget constraint, wind distribution and solar irradiation data, wind turbine and solar PV power and cost model were defined. Wind turbine sizing from 255kW to 3000kW as in Table 1 is selected as the discrete input parameters. The wind turbine power curve in Eq (1) and the cost component from Table 1 are applied to determine the wind cost of energy ( $COE_w$ ). The solar PV capacity is randomly generated to meet the project budget constraint. Solar PV power and cost model are applied to determine the solar cost of energy ( $COE_s$ ). Therefore, HRES cost of energy ( $COE_h$ ) as the fitness function could be derived. In the PSO optimization process, if updated particles from a previous iteration cause the capital expenditure to exceed its maximum limit, solar PV modules are randomly reduced until each budget constraint is satisfied.

## 4. Result

PSO converges the fitness value as the HRES cost of energy ( $COE_h$ ) between wind and solar energy at the simulated data site as shown in Figures 9 and 10. The global fitness represents the optimal solution, the mean fitness shows the diversification of the search and the group fitness reveals the minimum of each iteration.

When the single turbine rating between 225 to 900 kW is selected, the PSO would search for the optimal solar PV rating with the minimized  $COE_h$  as shown in Figure 9. While the single turbine rating 1250 to 2000 kW is selected, the PSO shows the flat group fitness of each iteration indicating the minimized  $COE_h$  is equal to the wind cost of energy ( $COE_w$ ) as shown in Figure 10. The small amount of solar PV installation causes a higher  $COE_h$  than a single wind

turbine installation. This shows the lower weight of investment in solar PV leading to a higher  $COE_s$  than  $COE_w$ .

Table 3 shows the comparison result of minimized HRES  $COE_h$  between the different configurations of wind turbine sizing and solar PV installation capacity with the same budget constraint.  $COE_s$ ,  $COE_w$  and utilized area increase with installed capacity and therefore the optimal configuration depends on the minimal  $COE_h$  achievement. The increase wind turbine investment shows a decrease in solar PV investment; however, the higher investment than 49% at 1250kW wind turbine shows the solar PV for none because the small amount solar PV capacity provides the higher  $COE_h$  than the single wind turbine installation. The increasing capital expenditure maintains the solar capacity factor (CF<sub>s</sub>) due to facing the same solar irradiation. While the increasing wind capacity factor (CF<sub>w</sub>) is caused by wind speed at the higher hub height of the larger wind turbine sizing.

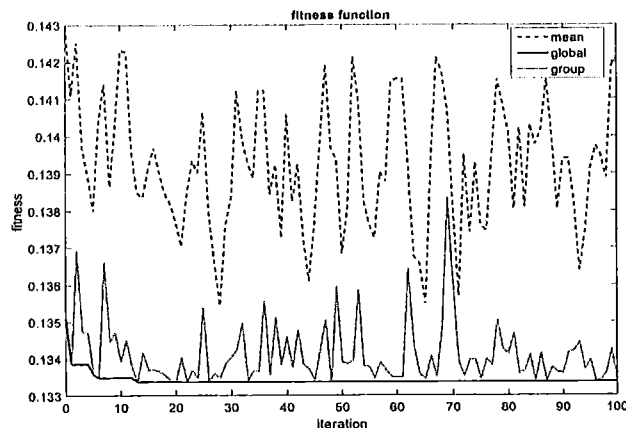


Fig. 9 The convergence of fitness function with 900 kW turbine rating and 3.22M\$ of capital expenditure constrains

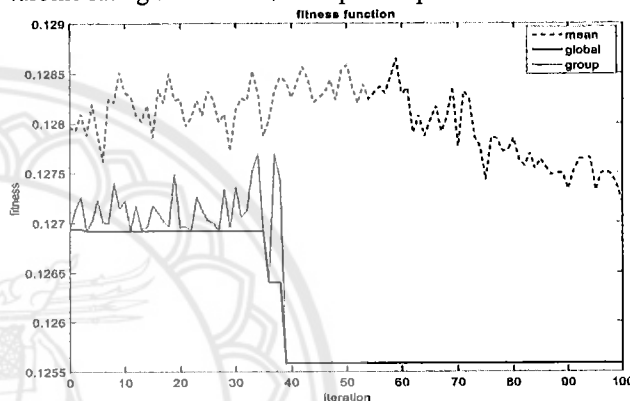


Fig. 10 The convergence of fitness function with 1,250 kW turbine rating and 3.22M\$ of capital expenditure constrains

The minimum HRES COE ( $COE_h$ ) of this site is 12.04 cent/kWh as equal to the  $COE_s$  at 100% solar PV investment. Due to the economy of scales model, the larger solar PV farm decreases the cost per capacity unit until its lower than the single unit of wind turbine cost with the similar installed power capacity leading to the  $COE_s$  is lower than  $COE_w$  in this simulation. As shown in Figure 11, the maximum AEP is obtained at around the budget constrain and depended on the weighting of investment. The lower investment shows the lower AEP because the algorithm achieves the lowest  $COE_h$  as the same as  $COE_w$  without solar PV installation.

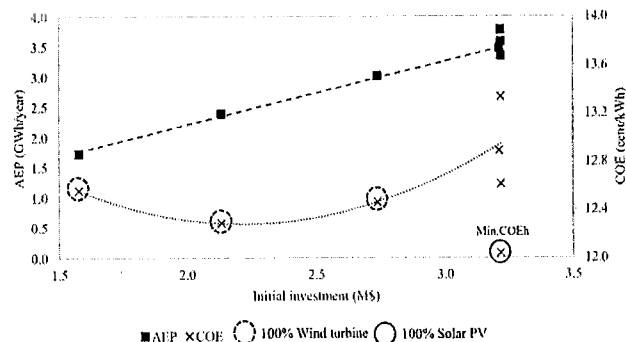


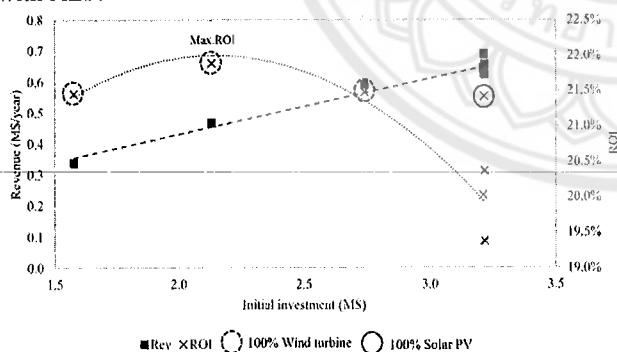
Fig. 11 AEP and COE to Capital expenditure with 3.22M\$ of investment constrain

Fig. 8 The overall procedure of HRES optimization

**Table 3.** Comparison result of HRES optimization with 3.22M\$ capital expenditure constraint

weight of wind to total investment	0%	9%	24%	35%	49%	66%	85%
weight of solar to total investment	100%	91%	76%	65%	0%	0%	0%
List	Unit						
Budget funding	(M\$)	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22
Capital expenditure	(M\$)	3.22	3.22	3.21	3.22	1.58	2.13
- Invest on wind turbine	(M\$)	0	0.30	0.76	1.12	1.58	2.13
- Invest on solar PV	(M\$)	3.22	2.92	2.45	2.09	0	0
<b>Total capacity</b>	<b>(kW)</b>	<b>2,778</b>	<b>2,714</b>	<b>2,706</b>	<b>2,617</b>	<b>1,250</b>	<b>1,650</b>
Price/total power	(\$/kW)	1,157	1,185	1,186	1,229	1,261	1,292
- Wind turbine rating	(kW)	0	225	660	900	1,250	1,650
- Installed Solar PV	(kW)	2,778	2,489	2,046	1,717	0	0
<b>Avg. HRES power</b>	<b>(kW)</b>	<b>431.6</b>	<b>409.1</b>	<b>397.4</b>	<b>382.5</b>	<b>197.9</b>	<b>273.2</b>
- Average wind power	(kW)	0	22.5	79.5	115.8	197.9	273.2
- Average solar power	(kW)	431.6	386.7	317.9	266.7	0	0
<b>CF HRES (CF<sub>h</sub>)</b>		<b>0.155</b>	<b>0.151</b>	<b>0.147</b>	<b>0.146</b>	<b>0.158</b>	<b>0.166</b>
- CF Wind (CF <sub>w</sub> )		0	0.100	0.120	0.129	0.158	0.166
- CF Solar (CF <sub>s</sub> )		0.155	0.155	0.155	0.155	0	0
<b>COE HRES</b>	<b>(c/kWh)</b>	<b>12.04</b>	<b>12.61</b>	<b>12.89</b>	<b>13.34</b>	<b>12.56</b>	<b>12.29</b>
- COE Wind energy	(c/kWh)	0	20.53	15.03	15.18	12.56	12.29
- COE Solar energy	(c/kWh)	12.04	12.15	12.35	12.54	0	0
<b>Utilized area</b>	<b>(10<sup>3</sup> m<sup>2</sup>)</b>	<b>19.45</b>	<b>20.78</b>	<b>23.16</b>	<b>26.42</b>	<b>19.60</b>	<b>25.60</b>
- Wind turbine area	(10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> )	0	3.36	8.84	14.40	19.60	25.60
- Solar farm area	(10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> )	19.45	17.42	14.32	12.02	0	0
AEP	(GWh/y)	3.78	3.58	3.48	3.35	1.73	2.39
Revenue	(M\$/y)	0.69	0.66	0.64	0.62	0.34	0.47
ROI		21.4%	20.4%	20.0%	19.4%	21.4%	21.9%

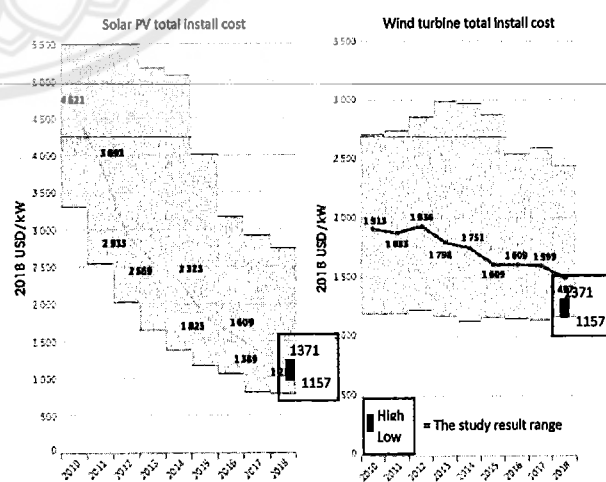
The revenue increases following capital expenditure and achieve the maximum at the same of maximum AEP. As shown in Figure 12, the ROI inversely has characteristics with COE<sub>h</sub>. The maximum ROI locates on the investment in the single 1650kW wind turbine rating with 12.29 cent/kWh COE<sub>h</sub> which is higher than the lowest 12.04 cent/kWh COE<sub>h</sub> of the 100% solar PV installation because the higher wind energy FIT (FIT<sub>w</sub>=19.50 cent/kWh in Thailand [17]) than the solar energy FIT (FIT<sub>s</sub>=18.21 cent/kWh in Thailand [17]). In addition, the revenue shows the same characteristic with AEP.



**Fig.12** Revenue and ROI to Capital expenditure with 3.22M\$ of investment constrain

This result presents the comparison of COE in different HRES configurations with the same site data. The other reference works could not directly compare with this result because of the diversity of location-based data. However, the Global weighted average total installed costs, capacity factors and COE as the International Renewable Energy Agency (IRENA) database [30] would be used to compare with this paper as shown in Figure 13 for solar PV and

Figure 14 for onshore wind. From Table 3, COE<sub>h</sub> ranges between 0.1204 – 0.1334 \$/kWh which is higher than the average COE in the IRENA database on both wind energy cost at 0.06 \$/kWh and solar energy cost at 0.10 \$/kWh. The installation cost per capacity of this paper ranging between 1157-1371 \$/kW is within the average range; however, the HRES capacity factors (CF<sub>h</sub>) ranging between 14.6% - 17.2% is lower than the average CF<sub>s</sub> and wind CF<sub>w</sub> in the database leading to higher in COE<sub>h</sub> as shown. Especially in wind energy shows much lower CF<sub>w</sub> and much higher in COE<sub>w</sub> than average in the database because the wind power from the wind speed data is in class 1 with 4.40 m/s of average wind speed at 40-meter height [31].



**Fig. 13** Global weighted average total installed costs for solar PV and onshore wind, 2010–2018 [30] compare to the result of study.



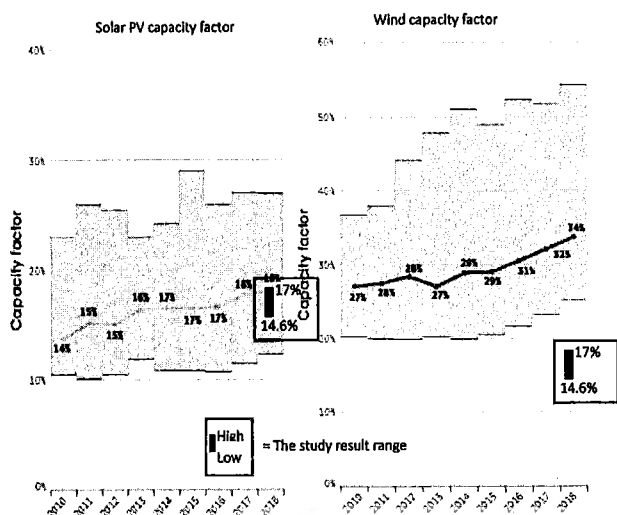


Fig. 14 Global capacity factors for solar PV and wind, 2010–2018 [30] compare to the result of study.

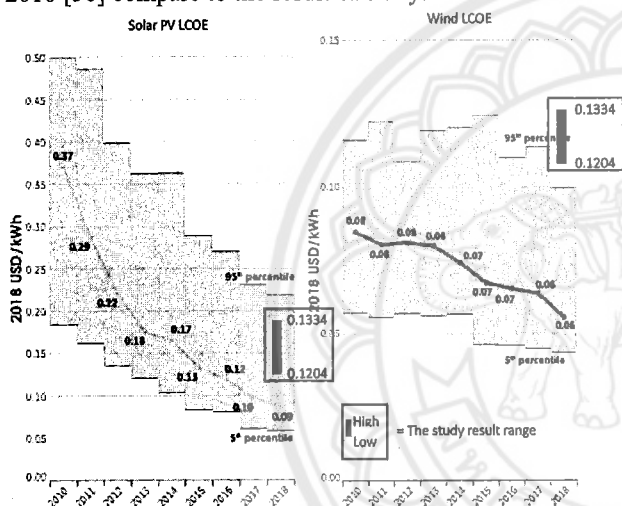


Fig. 15 Global LCOE for solar PV and onshore wind, 2010–2018 [30] compare to the result of study.

## 5. Conclusion

Among the renewable energy sources, wind energy and solar energy are the most utilized due to technology achievement and commercial economy of scale in production enhancing to lower cost in manufacturing. The trend to implement both renewable sources as the electric distributed generation. However, the employment of solar and wind as the individual reliable renewable source would lead to oversizing of specification design and higher COE. Therefore, HRES was developed to integrate the multiple renewable sources performing in more reliable and lower the COE<sub>h</sub>.

This paper developed the HRES model both energy production and lifetime cost of the project. PSO was implemented to minimize COE<sub>h</sub> of the designed configuration. The wind speed and solar irradiation data from a particular site are used to determine the energy potential following the HRES configuration. The wind power is

extracted in corresponding to any range of wind speed using the wind turbine power curve. While the solar power is generated from solar PV module. The investment per capacity of the solar PV site is collected from commercial suppliers. However, the wind turbine cost are derived from the component cost model developed by NREL. Once the wind turbine and PV module are configured as HRES, the COE<sub>h</sub> as the objective function can be determined. Then, the developed PSO is used to search for the optimal HRES configuration to minimize COE<sub>h</sub> within the investment

constraint. The minimum COE from this study at 0.1204 \$/kWh was in the 95th percentile of the global renewable power generation cost database from IRENA ranging between 0.06 – 0.22 \$/kWh for solar energy and 0.04 – 0.10 \$/kWh for wind energy but higher than the average value because of the low potential on both solar radiation and wind speed data from the particular site. However, PSO as the preliminary design method could be determined the optimal HRES with minimized COE when compare with the conventional design within the investment constraint.

## Acknowledgements

The author would like to acknowledge the Naresuan University of Thailand for financial support during the research study period and the School of Renewable Energy Technology of Naresuan University for support the weather data.

## References

- [1] V. Lazarov, G. Notton, Z. Zarkov, and I. Bochev, "Hybrid Power Systems with Renewable Energy Sources – Types, Structures, Trends for Research and Development " presented at the 11st International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA 2005), Sofia, BULGARIA, 2005.
- [2] P. Bajpai and V. Dash, "Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 2926-2939, 2012.
- [3] P. Nema, R. K. Nema, and S. Rangnekar, "A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2096-2103, 2009.
- [4] K. D. Mercado, J. Jiménez, and M. C. G. Quintero, "Hybrid renewable energy system based on intelligent optimization techniques," in *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2016, pp. 661-666.
- [5] S. Belgana, A. Dabib, H. Bilil, and M. Maaroufi, "Hybrid renewable energy system design using multiobjective optimization," in *2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2013, pp. 955-960.
- [6] P. S. Acharya, M. M. Wagh, and V. V. Kulkarni, "Intelligent Algorithmic Multi-Objective Optimization for Renewable Energy System Generation and Integration Problems: A Review," *International*

- Journal of Renewable Energy Reserach*, vol. 9, p. 10, March, 2019 2019.
- [7] M. K. Deshmukh and S. S. Deshmukh, "Modeling of hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 235-249, 2008.
- [8] D. I. Alvarez, C. J. C. Castro, F. C. Gonzalez, A. L. Uguña, and J. F. T. Toledo, "Modeling and simulation of a hybrid system solar panel and wind turbine in the locality of Molleturo in Ecuador," in *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2017, pp. 620-625.
- [9] R. Luna-Rubio, M. Trejo-Perea, D. Vargas-Vázquez, and G. J. Ríos-Moreno, "Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies," *Solar Energy*, vol. 86, pp. 1077-1088, 2012.
- [10] W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu, and H. Yang, "Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar and wind power generation systems," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 380-389, 2010.
- [11] B. F. Ronad and S. H. Jangamshetti, "Optimal cost analysis of wind-solar hybrid system powered AC and DC irrigation pumps using HOMER," in *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2015, pp. 1038-1042.
- [12] A. Kaabeche, M. Belhamel, and R. Ibtouen, "Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system," *Energy*, vol. 36, pp. 1214-1222, 2011.
- [13] M. Fadaee and M. A. M. Radzi, "Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 3364-3369, 2012.
- [14] J. L. Bernal-Agustin and R. Dufo-Lopez, "Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2111-2118, 2009.
- [15] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, and Z. Fang, "Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm," *Solar Energy*, vol. 82, pp. 354-367, 2008.
- [16] H. Yang, Z. Wei, and L. Chengzhi, "Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system," *Applied Energy*, vol. 86, pp. 163-169, 2009.
- [17] P. Ananjavanich, "Thailand: Renewable Energy Policy Update," in *New Power Development Plan announced in May (Status May 2015)*, T. Chrometzka, Ed., ed. German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy: German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2015, p. 4.
- [18] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, "Alternative Energy Development Plan : AEDP2015," Department of Alternative Energy Development and Efficiency September 2015.
- [19] A. A. Teyabeen, F. R. Akkari, and A. E. Jwaid, "Power Curve Modelling For Wind Turbines," presented at the UKSim-AMSS 19th International Conference on Modelling & Simulation, Cambridge, United Kingdom, 2017.
- [20] K. Demerdziev, V. Dimchev, and M. Celeska, "Analytical Method for Wind Turbine Power Curve Uncertainty Estimation," in *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2018, pp. 1-6.
- [21] M. Pierrot. (2016, 18th December). *Wind turbines and wind farms database*. Available: [http://www.thewindpower.net/manuturb\\_turbines\\_en.php](http://www.thewindpower.net/manuturb_turbines_en.php)
- [22] L. Fingersh, M. Hand, and A. Laxson "Wind Turbine Design Cost and Scaling Model," National Renewable Energy Laboratory, Technical report NREL/TP-500-40566, December 2006.
- [23] W. Direkudomsak, "Inflation dynamics and inflation expectations in Thailand," Bank for International Settlements, Bank for International Settlements 15 November 2016.
- [24] S. Diaf, G. Notton, M. Belhamel, M. Haddadi, and A. Louche, "Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions," *Applied Energy*, vol. 85, pp. 968-987, 2008.
- [25] DEDE, "Annual Report 2016," Ministry of Energy, Department of Alternative Energy Development and Efficiency 2016.
- [26] D. Chaichuangchok, S. Tongsovit, and N. Hoonchareon, "Appropriate Financial Measures for the Support of Residential Rooftop Solar Systems in Thailand," *Energy Research*, vol. 3, p. 14, September-December 2013.
- [27] W. Chanovit, "Cost Benefit Analysis of Solar photovoltaic rooftop project (Residential type) in different radiation area of Thailand," Master, School of Development Economics, National Institute of Development Administration, National Institute of Development Administration, 2014.
- [28] S. Prampayoong, "Economic Value Analysis of Solar Farm Project for Electricity Generation and Supply," School of Development Economics, National Institute of Development Administration, 2014.
- [29] DEDE. (2009, 10/3/2019). *DEDE's 1.5 MW wind power pilot project proven to be great success*. Available: <http://weben.dede.go.th/webmax/content/dede's-15-mw-wind-power-pilot-project-proven-be-great-success>
- [30] IRENA, "Renewable Power Generation Costs in 2018," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi 2019.
- [31] B. H. Bailey, S. L. McDonald, D. W. Bernadett, M. J. Markus, and K. V. Elsholz, "Wind resource assessment handbook: Fundamentals for conducting a successful monitoring program," United States 1997-04-01, 1997.

#### ก4. นำเสนอในงานประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ

- S.Pookpant, Optimal Design for Hybrid Renewable Energy System GMSARN Int. Conf. on Innovative Energy, Environment, and Development in GMS, Kunming, Yunnan, China, 16-18 November 2016 (<http://gmsarnjournal.com/home/gmsarn-journal-vol/>)

- S.Pookpant, Floating Solar PV Project Technical and Financial Analysis, GMSARN Int. Conf. on Smart Energy, Environment, and Development for Sustainable GMS, Luang Prabang, Lao PDR, 27-29 November 2019 (<http://gmsarnjournal.com/home/gmsarn-journal-vol/>)



# Greater Mekong Subregion Academic and Research Network (GMSARN)



Asian Institute  
of Technology



Hanoi  
University  
of Technology



to Chi Minh City  
University of  
Technology



Institute of  
Technology  
Cambodia



Khon Kaen  
University



Kunming  
University of  
Science and  
Technology

October 17, 2016

Mr. Sittichoke Pookpunt  
Mechanical Engineering department,  
Faculty of Engineering,  
Naresuan University,  
Phitsanulok 65000 Thailand

**Subject: Notification of Acceptance and Invitation to the 11<sup>th</sup> GMSARN International Conference 2016**

Dear Mr. Sittichoke Pookpunt,

It is my pleasure to inform you that the paper reference no. GMSARN-2016-12-E entitled "*Optimal Design for Hybrid Renewable Energy System*" has been now accepted on the understanding that the author will register for the GMSARN 2016 conference and attend to present the paper.

On behalf of GMSARN organizing committee, I am pleased to invite you to be a Chairman and participate in the 11th GMSARN International Conference 2016 on "*Innovative Energy, Environment, Development in GMS*" during 16-18 November 2016 at Uchoice Hotel Kunming, Yunnan Province, China.

The conference aims to bring together members from the GMSARN network as well as GMS practitioners on the field, education, industry, private sector and governments, to share the research findings, innovative practices, experience and lessons learned in various sustainable development issues in GMS, especially in areas of climate change, energy, environment, natural resource management, and development planning.

Registration form and accommodation booking form are attached with. Conference information is made available online at [www.gmsarn.com/conference2016](http://www.gmsarn.com/conference2016). Any requires related to the conference may please be directed to the GMSARN Secretariat at (+66)-2-524-6537 (Ms. Watcharathorn) or by email: [gmsarn@ait.asia](mailto:gmsarn@ait.asia).

Best regards,

Weerakorn Ongsakul, Ph.D.  
GMSARN Secretary General & Conference Coordinator

GMSARN Office: Asian Institute of Technology

Postal Address:  
P.O. Box 4  
Klong Luang  
Pathumthani 12120  
Thailand

Street Address:  
Km. 42 Paholyothin Highway  
Klong Luang  
Pathumthani 12120  
Thailand

Tel: (66-2) 524-5437  
Fax: (66-2) 524-6589  
(for local calls, dial 02 before the tel/fax nos.)  
E-mail: [gmsarn@ait.ac.th](mailto:gmsarn@ait.ac.th)  
Internet: <http://www.gmsarn.org>



National  
University  
of Laos



Royal University  
of Phnom Penh



Thammasat  
University



Yangon  
Technological  
University



Yunnan  
University

# Optimal Design for Hybrid Renewable Energy System

Sittichoke Pookpant

**Abstract**— This paper developed the on-grid HRES model both energy production and life time cost of project. The Particle Swarm Optimization (PSO) was implemented to minimize the COE of the designed configuration. The wind speed and solar irradiation data was collected in every 10 minutes at the site for 3 year periods. Using the wind turbine power curve, the wind power was extracted by corresponding to any range of wind speed. While the solar power was generated from solar PV module with inverter. The initial investment cost of solar PV module was collected from the commercial suppliers. However, the wind turbine cost was derived from the wind turbine cost model developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL). Once the wind turbine and PV module were configured as HRES, the COE as the objective function can be determined. Then, the PSO was used to find the optimal configuration of the HRES system to minimized the COE within the budget constraint. The comparison between the HRES conventional design based on average wind speed and solar irradiation with the optimal design showed the design algorithm achieved the lower in COE with the same budget investment constraints.

**Keywords**— Hybrid Renewable Energy System, Wind Energy, Solar Energy, Optimization

## 1. INTRODUCTION

Renewable energy is the energy source naturally regenerated over a short time scale and derived both directly and indirectly from the sun, or from other natural movements and mechanisms of the environment excluding the energy derived from fossil fuels, waste products from fossil sources, or waste products from inorganic sources. Solar and wind energy as renewable energy could provide a high potential in electrical production due to available on commercial and economical investment proof. Moreover, many countries provided the various incentives to promote the utilization of this both energy in order to support the stability of the energy capacity performance and indirectly affects to the low carbon society including the social behavior and awareness.

However, the uncertainty of the single renewable source decreases in the utilized reliability leading to the redundantly system design and need to install a number of battery storage for the unavailable source period. For this reason, the hybrid renewable energy system (HRES) was developed by integrating between the different renewable energy or the conventional source in order to stability, flexibility and reliability system. The system could be configured into stand-alone with the storage unit or grid connection. This reducing in both initial investment and the cost of energy when compare with a single renewable source. [2]

The conventional system design chooses the HRES configuration based on the average wind and solar information or the worst scenario data leading to the

excessive system causing oversize neither wind turbine nor solar PV capacity. This situation rarely appears and unsteady caused by the long period of time-series data collection with inconsistency of weather condition and electrical demand. Moreover, the objective function directly deals with the algorithm. Therefore, the solution for optimal configuration would combines with both linear and non-linear characteristics which is difficult to meet the global optimal. Many research shown the various method to design the system.

P. Bajpai and V. Dash [3] developed the HRES into the generalize model as shown in Figure 1. Mathematical model of the system was used to choose the strategy for the optimal information and energy flow management. For stand-alone HRES design method, P.Nema et al. [4] showed the system design development for rural area should be improve including the performance, accurate energy reserve and reliability. M.K. Deshmukh and S.S. Deshmukh [5] developed the system modelling detail for the remote area and classify based on the configuration in the number of publication papers. is point out the system.

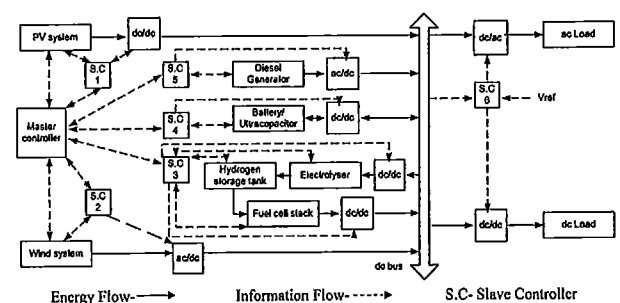


Fig.1 the generalized HRES schematic [3]

For algorithms development, R.Luna-Rubio et al. [6] collected the various HRES design procedure and classified into different system architectures. They presented the appropriated algorithms into the probabilistic and analytical procedure with the compatible objective function, boundary and constraints. W. Zhou et

# Greater Mekong Subregion Academic and Research Network (GMSARN)



Asian Institute of Technology



Hanoi University of Technology



Chiang Mai University of Technology



Institute of Technology Cambodia



Khon Kaen University



Kunming University of Science and Technology

October 9, 2019

Sittichoke Pookpant  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
Naresuan University  
Phitsanulok, Thailand

**Subject: Notification of Acceptance for the 14th GMSARN International Conference 2019**

Dear Sittichoke Pookpant,

It is my pleasure to inform you that the abstract reference no. GMSARN-2019-CFN-81-E entitled "*Floating Solar PV Project Technical and Financial Analysis*" has been now accepted by the GMSARN 2019 conference organizing committee and to submit your full paper to us by 31 October 2019.

On behalf of GMSARN organizing committee, I am pleased to invite you to participate in the 14<sup>th</sup> GMSARN International Conference 2019 on "*Smart Energy, Environment, and Development for Sustainable GMS*" during 27-29 November 2019 at The Grand Luang Prabang, Luang Prabang City, Lao PDR.

The conference aims to bring together members from the GMSARN network as well as GMS practitioners on the field, education, industry, private sector and governments, to share the research findings, innovative practices, experience and lessons learned in various sustainable development issues in GMS, especially in areas of climate change, energy, environment, natural resource management, and development planning.

Conference information is made available online at [www.gmsarn.com/conference2019](http://www.gmsarn.com/conference2019). Any requires related to the conference may please be directed to the GMSARN Secretariat at (+66)-2-524-6537 (Ms. Watcharathorn) or by email: [gmsarn@ait.ac.th](mailto:gmsarn@ait.ac.th).

Best regards,

Professor Weerakorn Ongsakul, Ph.D.  
GMSARN Secretary General and Conference Executive Director

GMSARN Office: Asian Institute of Technology

Postal Address:  
P.O. Box 4  
Klong Luang  
Pathumthani 12120  
Thailand

Street Address:  
Km. 42 Paholyothin Highway  
Klong Luang  
Pathumthani 12120  
Thailand

Tel: (66-2) 524-5437  
Fax: (66-2) 524-6589  
(for local calls, dial 02 before the tel/fax nos.)  
E-mail: [gmsarn@ait.ac.th](mailto:gmsarn@ait.ac.th)  
Internet: <http://www.gmsarn.org>



National University of Laos



Royal University of Phnom Penh



Thammasat University



Yangon Technological University



Yunnan University

# Floating Solar PV Project Technical and Financial Analysis

Sittichoke Pookpant

**Abstract**— Ground Solar PV Farm (GPV) encroaching a large area for land use and the long period of investment would defect the land value leading to loss of chance in land development. Floating Solar PV (FPV) as a replacement opportunity provides a lot of benefit including the increase higher energy production because of lower operation temperature, shows a better water quality by decreasing the algae growth and reduce the rate of water evaporation. In Thailand, there are some water reservoirs in the remote area currently installed in a small hydropower plant but could not provide the energy in the day time because of irrigation planning priority. This paper proposes the technical and financial analysis Floating Solar PV (FPV) hybrid system to supply day time energy. The solar energy production of ground solar PV (GPV) is determined from the solar power model validated with the PVsyst which could derive the meteorology data at a particular site from many different sources. The PV module temperature in FPV is used in the solar power model to derive the energy production. The components specification and components cost model is developed by collection price data from the supplier in Thailand in the current year of study, 2019. The result shows the FPV has a lower module average temperature than GPV by 7.07%. Therefore, FPV shows higher energy production than GPV by 4.14%. However, the 29.7% higher investment but 14.2% lower annual expense in a floating system because of exceptional land lease shows the higher cost of energy of FPV than GPV by 16.7%. The financial parameters including Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and Benefit to Cost ratio (B/C) are presented in this study.

**Keywords**— Renewable Energy, Floating Solar PV, PVsyst, Net Present Value

## 1. INTRODUCTION

Solar photovoltaic (PV) power plant is the one most renewable source implemented in a utility grid. The commercial available with an economy of scale in the production of PV development shows the worldwide increasing capacity while the decreasing of investment per installed power. Therefore, the electrical production cost from a large PV farm could be competitively lower than the generation cost from a conventional thermal power plant. However, increasing in PV on a ground area with long term investment deficits the land utilization leading to a loss in area development and encroach the agricultural production. Floating Solar PV (FPV) could implement on both open and closed water reservoir as a replacement opportunity of on-ground solar PV (GPV). FPV provides a lot of benefit including the increase higher energy production than GPV because of lower operation temperature, shows a better water quality by decreasing the algae growth and preserve the rate of water evaporation.

In 2018, the worldwide solar PV cumulative capacity is 509 GW with a 45% growth rate in the last 10 years, while the floating solar PV is 1.097GW with a 156% growth rate in the last 5 years as shown in Figure 1 [1] and 2 [2]. FPV accounts for 0.02% compare to the total capacity; however, the high demand is required as shown

in the higher growth rate. Currently at 2018, Japan is the world largest total capacity of FPV at 130.8 MW, while the biggest 60 MW FPV project was launched in Huainan City, China with 77,693 MWh per year of expectation (1,295 MWh/MW) and plans to fully construct 150 MW FPV as world largest total capacity with 1 billion CNY of investment (28.7 THB/W) by 2020 [3].

Thailand by Siam Cement Group (SCG) installed 1.0 MW of FPV with 9.9 million USD (40 million THB or 40 THB/W) of investment and estimated 1,430 MWh per year of production. Moreover, Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) initials 45 MW of FPV project integrating with hydro power plant at the Sirindhorn Dam [4], the northeastern part of the country with 74.6 million USD (2.27 billion THB or 38.75 THB/W) of investment and would launch on 2020 with 87.53 GWh per year (1,496 MWh/MW) of expectation. EGAT plan to install 16 FPV with a combined capacity of 2.7 GW on nine of its hydroelectric dam reservoirs by 2037 as the world biggest FPV [5-6]. Moreover, there are some water reservoirs in the remote area currently installed in a small hydropower plant but could not provide the energy in the day time of all year because of irrigation planning priority. FPV could be implemented as a hybrid renewable system to support the day time energy demand. However, the remote area generally unavailable to achieve the resource data such as solar radiation and meteorology data, the method to determine both energy generation and financial investment need to pre-feasibility the project.

This paper proposes the technical and financial analysis method of FPV as a hybrid system to supply day time energy. The solar power model validated with the PVsyst which could derive the meteorology data at a

---

Sittichoke Pookpant is with the Naresuan University, Faculty of Engineering, Muang, Phitsanulok 65000, Thailand (corresponding author to provide phone: 66-5-596-4259; Fax: 66-5-596-4260; e-mail: sittichokepo@nu.ac.th)