

การหาตำแหน่งเหมาะสมของกังหันลมที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงที่สุดสำหรับฟาร์มกังหันลม
ในภูมิประเทศแบบสลับซับซ้อนด้วยขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด
Optimum Location of Wind Turbine for Maximizing Electrical Energy for Wind Farm
in Complex Terrain by Ant Colony Optimization Algorithm

พงษ์ศักดิ์ มะขามป้อม^{1*} จอมภพ แวศศักดิ์² ชนะ จันทร์ฉ่ำ³ และสมพล ชิวมงคลกานต์¹
Pongsak Makhampom^{1*} Jompob Waewsak² Chana Chancham³ and Somphol Chiwamongkhonkarn¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

²สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

³ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

¹ Energy Engineering, Thaksin University, Phatthalung, 93210

²Department of Physics, Faculty of science, Thaksin University, Phatthalung, 93210

³Research Center in Energy and Environment, Faculty of science, Thaksin University, Phatthalung, 93210

*Corresponding author: Tel.: 082 963 1386. E-mail address: 602995011@tsu.ac.th

Received: 16 September 2022, Revised: 24 September 2023, Accepted: 17 November 2023, Published online: 30 December 2023

Abstract

In the development of a wind farm, besides assessing the potential of wind energy sources, it is also essential to study the optimum location of wind turbines to maximize the power generation. In this research, an Ant Colony Optimization Algorithm (ACO) has been applied to determine the optimum wind turbine generator locations, comparing the outcomes with those generated by the GH WindFarmer program, a tool commonly used for wind farm design.

The ACO is a conceptual algorithm based on the foraging behavior of ants that has been studied in complex terrain for the Rom Klao wind farm in Mukdahan province. The CFD model and long-term wind data from 1985–2015 were used to assess the wind potential of the study area. In this research, there will be 13 wind turbines (Gamesa G126) with a nominal capacity of 2.5 MW, a hub height of 100 m, and a rotor diameter of 126 m. The results show the Rom Klao wind farm has an average annual wind speed ranging from 3.53 - 5.42 m/s. Comparing the net annual energy production, wake loss, and capacity factor (C.F.) values of ACO and the GH WindFarmer showed differences, with ACO yielding 25.70 GWh/year, 13.74%, and 9.03% respectively, and GH WindFarmer showing 30.75 GWh/year, 10.88%, and 10.80% respectively. Notably, the ACO method requires approximately twice the time taken by the GH WindFarmer program.

Keywords: Ant colony optimization algorithm (ACO), Wind farm, Wake loss, CFD model

บทคัดย่อ

การพัฒนาฟาร์มกังหันลมนอกจากต้องศึกษาศักยภาพของแหล่งพลังงานลมแล้วยังจำเป็นต้องศึกษาตำแหน่งของกังหันลมที่เหมาะสมเพื่อให้ฟาร์มกังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด งานวิจัยนี้นำเสนออัลกอริทึมการหาสภาวะที่เหมาะสมแบบอาณานิคมมด (Ant colony optimization algorithm, ACO) มาช่วยในการหาตำแหน่งของกังหันลมเปรียบเทียบกับแบบจำลอง GH WindFarmer ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการออกแบบฟาร์มกังหันลม โดย ACO เป็นขั้นตอนวิธีที่มีแนวคิดจากพฤติกรรมกรหาอาหารของมด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับภูมิประเทศแบบสลับซับซ้อนในพื้นที่ฟาร์มกังหันลมร่มเกล้า จังหวัดมุกดาหาร ขนาด 10x10 km² โดยใช้แบบจำลอง CFD ในการประเมินศักยภาพของแหล่งลมร่วมกับข้อมูลลมระยะยาวตั้งแต่ พ.ศ. 2528-2558 โดยใช้กังหันลมผลิตไฟฟ้ารุ่น Gamesa G126 ขนาด 2.5 MW ความสูงศูนย์กลางส่วนหมุน 100 m เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนหมุน 126 m จำนวน 13 ต้น จากการวิจัยพบว่า พื้นที่ฟาร์มกังหันลมร่มเกล้ามีอัตราเร็วลมเฉลี่ยรายปีที่ตั้งแต่ 3.53-5.42 m/s จากการใช้ ACO ในการหาตำแหน่งของกังหันลม พบว่าพลังงานไฟฟ้าสุทธิที่รายปีเท่ากับ 25.70 GWh/year การสูญเสียเนื่องจาก wake เท่ากับ 13.74% C.F. เท่ากับ 9.03% และเมื่อจำลองด้วย GH WindFarmer พบว่าพลังงานไฟฟ้าสุทธิรายปีเท่ากับ 30.75 GWh/year การสูญเสียเนื่องจาก wake เท่ากับ 10.88% C.F. เท่ากับ 10.80% และเมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการจำลองพบว่า ACO ใช้เวลามากกว่าแบบจำลอง GH WindFarmer ประมาณ 2 เท่า

คำสำคัญ: ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด ฟาร์มกังหันลม การสูญเสียเนื่องจาก wake แบบจำลอง CFD

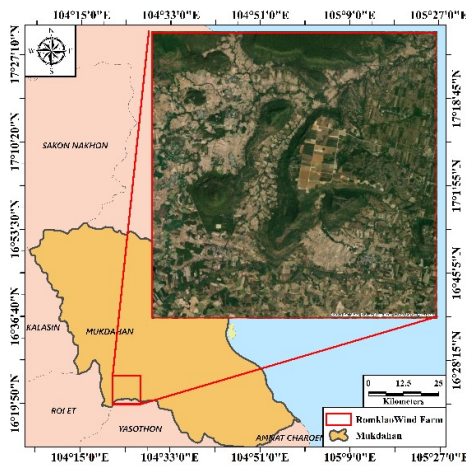
บทนำ

สำหรับศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยนั้นถูกจัดว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ จากข้อมูลแผนที่ศักยภาพพลังงานลมจัดทำโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน พบว่าประเทศไทยมีความเร็วลมค่อนข้างต่ำ โดยที่ความสูง 90 m พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีอัตราเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ 4-5 m/s [1] บางพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยเฉพาะบริเวณขอบที่ราบสูงโคราช มีศักยภาพพลังงานลมที่ดีกว่าพื้นที่อื่นๆ รวมไปถึงพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราชลงไป นั้นแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาฟาร์มกังหันลม นอกจากต้องคำนึงถึงความเร็วลมแล้ว ยังต้องคำนึงถึงลักษณะภูมิประเทศ ประเภทของการใช้ที่ดินและสถิติความเร็วลม ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ในการพัฒนาฟาร์มกังหันลม สำหรับการพัฒนาฟาร์มกังหันลมจำเป็นต้องศึกษาและประเมินศักยภาพแหล่งลม เพื่อประเมินว่าพื้นที่หรือตำแหน่งใดที่เหมาะสมกับการติดตั้งกังหันลม จากการศึกษาของ Mohamed และคณะ [2] ได้ศึกษาหาตำแหน่งของกังหันลมที่เหมาะสมในฟาร์มกังหันลมคาเบอร์เทิน ในประเทศแอลจีเรีย โดยใช้โปรแกรม WASP ประเมินศักยภาพแหล่งลม และใช้โปรแกรม GH WindFarmer ในการหาตำแหน่งของกังหันลม ซึ่งฟาร์มกังหันลมมีกำลังการผลิตติดตั้งเท่ากับ 10 MW จากการศึกษาพบว่าพื้นที่ศึกษามีอัตราเร็วลมเฉลี่ย 5.7 m/s และพลังงานไฟฟ้าที่ฟาร์มผลิตได้เท่ากับ 21.80 GWh/year แต่หลังจากใช้ GH WindFarmer พลังงานไฟฟ้าที่ฟาร์มผลิตได้เท่ากับ 22.10 GWh/year และ González-Longatt และคณะ [3] ทำการประเมินศักยภาพแหล่งลมในประเทศเวเนซุเอลา โดยใช้ชุดข้อมูลการสังเกตการณ์ลมที่บันทึกไว้ของสถานีอุตุนิยมวิทยาตั้งแต่ พ.ศ. 2548-2550 โดยใช้ข้อมูลความเร็วและทิศทางลมจากเสาวัดลม 32 แห่ง และใช้ซอฟต์แวร์ OpenWind ในการประเมินศักยภาพแหล่งลม พบว่าพื้นที่ที่เหมาะสมอยู่ทางภาคเหนือ ซึ่งสามารถพัฒนาเป็นโครงการพลังงานลมเชิงพาณิชย์เพื่อการผลิตพลังงานลมสำหรับโรงไฟฟ้าขนาดเล็กทั้งระบบเชื่อมต่อสายส่งและไม่เชื่อมต่อสายส่ง

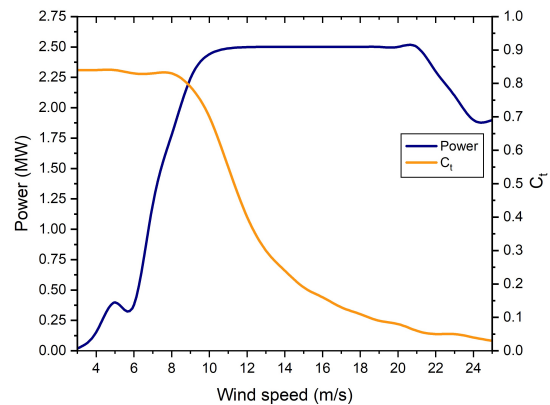
จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการศึกษาและประเมินแหล่งลมจะสามารถหาตำแหน่งของกังหันลมที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ซึ่งทำให้สามารถออกแบบฟาร์มกังหันลม ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของกังหันลมโดยใช้อัลกอริทึมการหาสภาวะที่เหมาะสมแบบอาณานิคมมด (Ant colony optimization algorithm, ACO) โดยทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้สุทธิรายปี การสูญเสียเนื่องจาก wake ค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม (C.F.) และเวลาที่ใช้ในการจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง GH WindFarmer

วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกพื้นที่ฟาร์มกังหันลมร่มเกล้า จังหวัดมุกดาหาร โดยมีขนาดพื้นที่ศึกษาเท่ากับ $10 \times 10 \text{ km}^2$ แสดงดังภาพที่ 1 และใช้กังหันลม Gamesa G126-2.5MW ขนาด 2.5 MW ความสูงศูนย์กลางส่วนหมุน 100 m เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนหมุน 126 m กังหันลมเริ่มทำงานและหยุดทำงานที่อัตราเร็วลม 3 m/s และ 25 m/s ตามลำดับ เส้นโค้งกำลังแสดงดังภาพที่ 2 [4] จำนวน 13 ต้น โดยฟาร์มกังหันลมมีกำลังผลิตติดตั้งอยู่ที่ 32.5 MW และใช้ข้อมูลลมระยะยาวตั้งแต่ พ.ศ. 2528-2558 จากฐานข้อมูล MERRA ความสูง 50 m ณ ตำแหน่ง $16^\circ 22' 49.206'' \text{ N } 104^\circ 24' 51.1632'' \text{ E}$ เพื่อวิเคราะห์ทิศทางและความเร็วลมด้วยการแจกแจงไวบูลล์ซึ่งเป็นการแจกแจงทางสถิติวิธีหนึ่งในการใช้วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของลม พารามิเตอร์ของการแจกแจงไวบูลล์ประกอบด้วย พารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter, k) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะการกระจายของข้อมูลความเร็วลม (v) ถ้ามีค่าน้อยแสดงว่ามีความเร็วลมต่ำพัดบ่อยกว่าความเร็วลมสูง และพารามิเตอร์ระดับ (Scale parameter, c) เป็นพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับความเร็วลมเฉลี่ย ถ้าความเร็วลมเฉลี่ยมีค่าสูง ค่าจะมากตามไปด้วย [5]

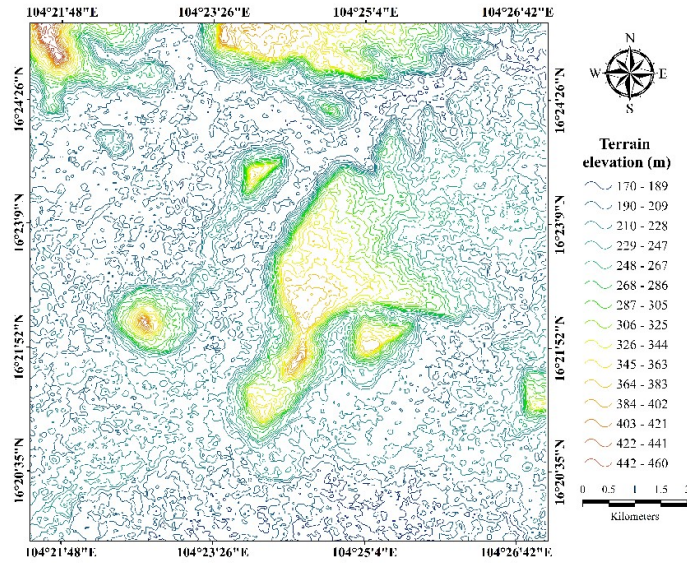


ภาพที่ 1 พื้นที่ฟาร์มกังหันลมร่มเกล้า จังหวัดมุกดาหาร

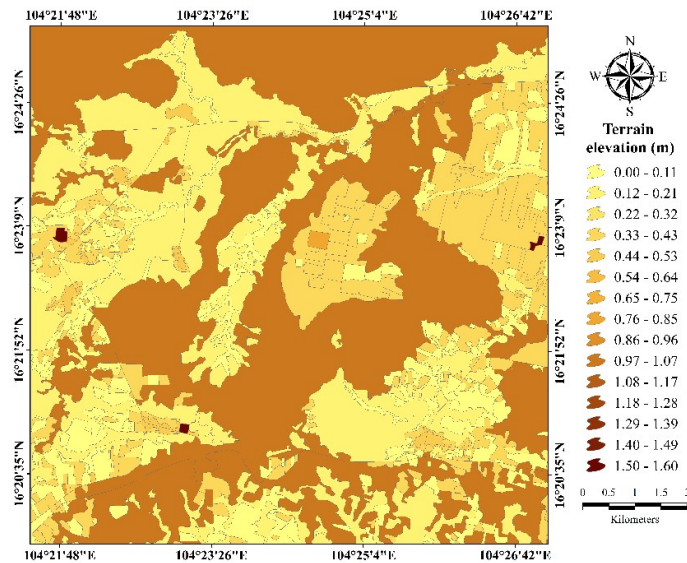


ภาพที่ 2 เส้นโค้งกำลังของกังหันลม Gamesa G126-2.5MW

ในการประเมินศักยภาพแหล่งลมเฉพาะแหล่งจำเป็นต้องทำแผนที่ลมระดับจุลภาคมี โดยอาศัยด้วยเทคนิค CFD ซึ่งจำเป็นต้องเตรียมแผนที่เส้นชั้นความสูงและแผนที่ดัชนีความขรุขระของพื้นที่ศึกษา ได้ดำเนินการจัดทำโดยอาศัยแผนที่แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) ขนาด 10×10 ตารางกิโลเมตร และใช้โปรแกรม Arcgis สำหรับการสร้าง grid cell ใหม่เพื่อจัดเตรียมแผนที่ฐาน [6] โดยได้ดำเนินการสร้างแผนที่เพื่อแสดงระดับความสูงต่ำหรือลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา และแสดงความขรุขระของพื้นที่ศึกษาดังภาพที่ 3 และ 4



ภาพที่ 3 แผนที่เส้นชั้นความสูงของกิ่งหันลมร่มเกล้า จังหวัดมุกดาหาร



ภาพที่ 4 แผนที่ความขรุขระของกิ่งหันลมร่มเกล้า จังหวัดมุกดาหาร

การประเมินศักยภาพแหล่งลม

การประเมินศักยภาพแหล่งลมในพื้นที่ฟาร์มกิ่งหันลมร่มเกล้า จังหวัดมุกดาหาร ซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศแบบสลับซับซ้อน ทำการประเมินศักยภาพแหล่งลมโดยใช้โปรแกรม WindSim ด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics : CFD) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- 1) ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล (Input) ประกอบด้วยแผนที่ระดับจุลภาคและข้อมูลทิศทางและความเร็วลม
- 2) ขั้นตอนการประมวลผลโดยใช้วิธีทาง CFD Process
- 3) การแสดงผล (Output)

อัลกอริทึมการหาสถานะที่เหมาะสมแบบอาณานิคมมด (Ant colony optimization algorithm, ACO)

ระเบียบวิธีอาณานิคมมดถูกพัฒนาโดย Dorigo และคณะ [7] ในปี 1992 โดยมีแนวคิดจากการเลียนแบบพฤติกรรมกรหาอาหารของอาณานิคมมด โดยเริ่มจากมดจะเดินหาอาหารกลับมายังรัง ในขณะที่เดินหาอาหารอยู่นั้น มดจะปล่อยสารเคมีที่เรียกว่า ฟีโรโมน ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างมดด้วยกัน เพื่อให้สมาชิกตัวอื่นๆ ตามไปยังแหล่งอาหารได้อย่างถูกต้อง [8] ปริมาณของฟีโรโมนที่มดปล่อยระหว่างทางจะขึ้นอยู่กับระยะทางและปริมาณของแหล่งอาหาร [9] การทำงานของ ACO ในการแก้ปัญหาการหาตำแหน่งของกังหันลมในฟาร์มกังหันลมแสดงดังภาพที่ 5

```
1. Initialization;
Set the initial values: Number of turbines  $N_t$ , Number of ants
Generate initial solution: Randomly locate each turbine with respect to
assumptions six and eight and compute  $Pup_i$  and  $totalPup_i$  as the optimal
solution
2. Compute  $Vel\_defi$ ,  $c_i$ ,  $P_i$ , and  $P_f$ 
3. set  $best=P_f$ 
4. for  $iter=1$  to  $MaxIter$ 
5. compute  $\pi_i$  and number of ants  $Tant_i$  for each turbine proportional with  $\pi_i$ 
if  $best \neq totalPup_i$  or  $iter \neq MaxIter$ 
for each turbine  $i=1$  to  $N_t$ 
for  $ant=1$  to  $Tant_i$ 
re-locate turbine  $i$  randomly with respect to assumptions six and eight
end
re-compute (2)
if  $P_f > best$ 
 $best = P_f$  and update  $farm$  by new best turbine locations
end
end
re-compute (5)
else
STOP
 $P_f$  is the solution and turbine locations ( $farm$ ) give the optimized layout
```

ภาพที่ 5 การทำงานของ ACO ในการหาตำแหน่งของกังหันลม [9]

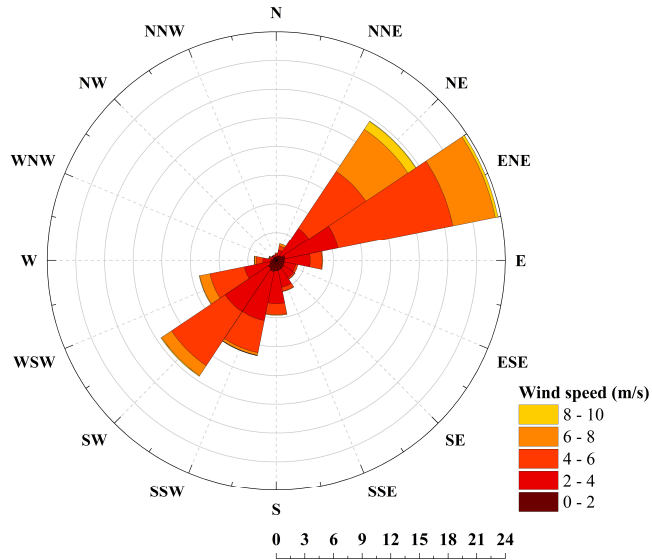
ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

เมื่อนำข้อมูลระยะยาวตั้งแต่ พ.ศ. 2528-2558 จากฐานข้อมูล MERRA ในพื้นที่ฟาร์มกังหันลมร่มเกล้า จังหวัดมุกดาหาร ทำการประเมินศักยภาพด้วยแบบจำลอง CFD พบว่า ทิศที่มีความถี่ในการเคลื่อนที่ของลมมากที่สุด (ENE) อยู่ระหว่างทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (EN) กับทิศตะวันออก (E) รองลงมาคือทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (EN) และ ตะวันตกเฉียงใต้ (SW) โดยมีความถี่เท่ากับ 22.76% 20.06% และ 13.61% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 8 และเมื่อวิเคราะห์สถิติลมด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull distribution) โดยมีพารามิเตอร์รูปร่างเท่ากับ 2.63 และ พารามิเตอร์ระดับเท่ากับ 4.8 m/s และอัตราเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 4.22 m/s แสดงดังภาพที่ 9

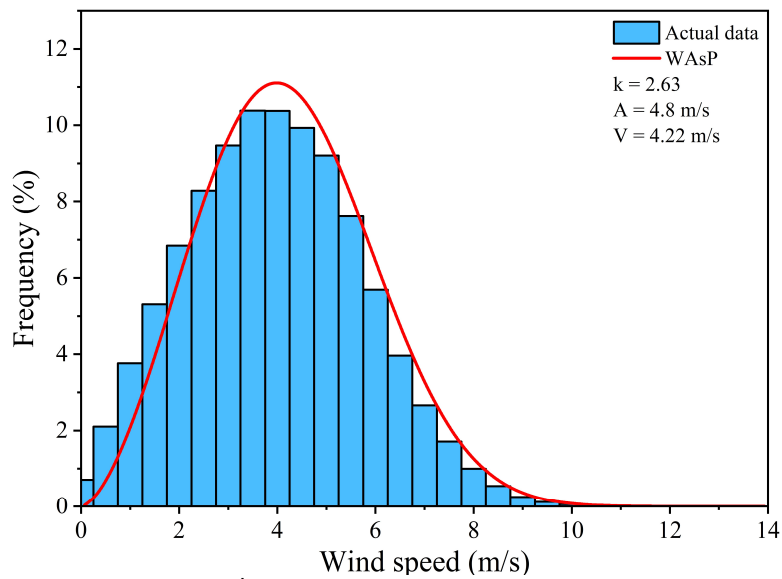
การประเมินศักยภาพแหล่งลมโดยใช้โปรแกรม WindSim ด้วยเทคนิค CFD ขนาด 10×10 km² แสดงดังภาพที่ 10 พบว่า อัตราเร็วลมเฉลี่ยรายปีของพื้นที่ศึกษาอยู่ในช่วง 3.14-6.45 m/s และเมื่อเจาะจงไปยังพื้นที่ฟาร์มกังหันลมร่มเกล้า พบว่า อัตราเร็วลมเฉลี่ยรายปีอยู่ในช่วง 3.53-5.42 m/s แสดงดังภาพที่ 11

ฟาร์มกังหันลมมีกำลังผลิตติดตั้งอยู่ที่ 32.5 MW ประกอบด้วยกังหันลมจำนวน 13 ต้น จากการใช้ ACO ในการหาตำแหน่งของกังหันลม พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีเท่ากับ 29.80 GWh/year พลังงานไฟฟ้าสุทธิที่รายปีเท่ากับ 25.70 GWh/year การสูญเสียเนื่องจาก wake เท่ากับ 13.74% C.F. เท่ากับ 9.03 % และใช้เวลาในการจำลองเท่ากับ 7 ชั่วโมง 36 นาที ซึ่งตำแหน่งของกังหันลมแสดงดังภาพที่ 12 และเมื่อจำลองด้วย GH WindFarmer พบว่า พลังงานไฟฟ้าที่

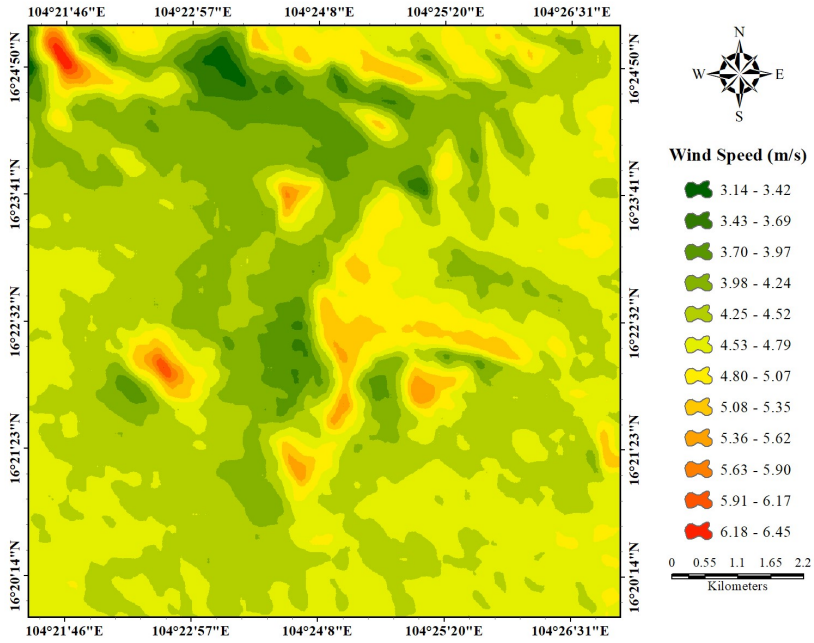
ผลิตได้รายปีเท่ากับ 34.501 GWh/year พลังงานไฟฟ้าสุทธิรายปีเท่ากับ 30.75 GWh/year การสูญเสียเนื่องจาก wake เท่ากับ 10.88% C.F. เท่ากับ 10.80% และใช้เวลาในการจำลองเท่ากับ 3 ชั่วโมง 14 นาที ซึ่งตำแหน่งของกังหันลมแสดงดังภาพที่ 13 รายละเอียดผลการจำลองด้วย ACO และ ด้วย GH WindFarmer แสดงดังตารางที่ 1 และ 2



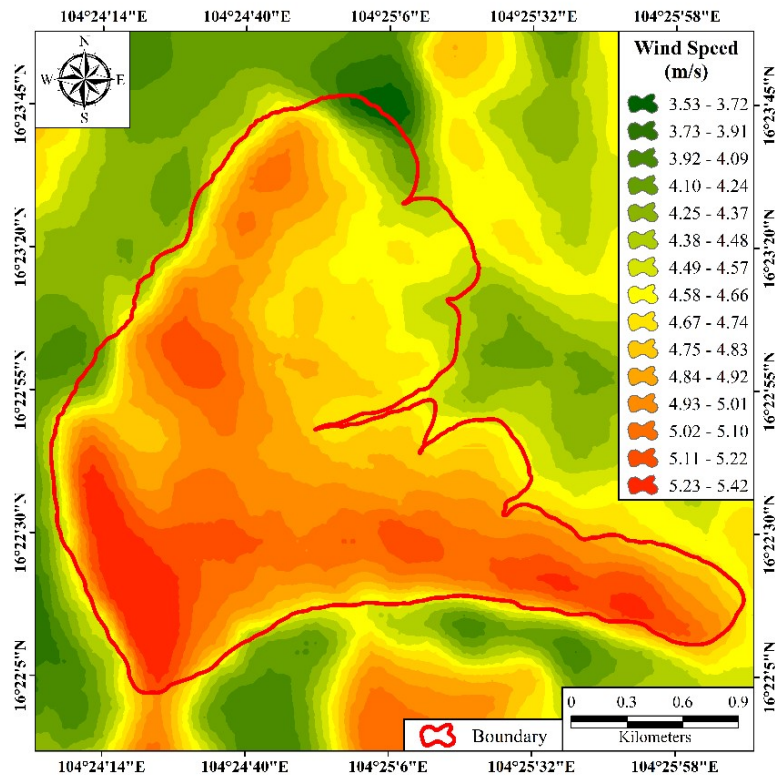
ภาพที่ 8 แผนภูมิทิศทางและอัตราเร็วลมเฉลี่ยรายปีที่ความสูง 100 m



ภาพที่ 9 ผลการวิเคราะห์การแจกแจงไวล์บูลล์



ภาพที่ 10 แผนที่ความเร็วลมเฉลี่ยรายปีในพื้นที่ฟาร์มกังหันลมร่มเกล้า จังหวัดมุกดาหาร ขนาด 10x10 km² ที่ความสูง 100 m



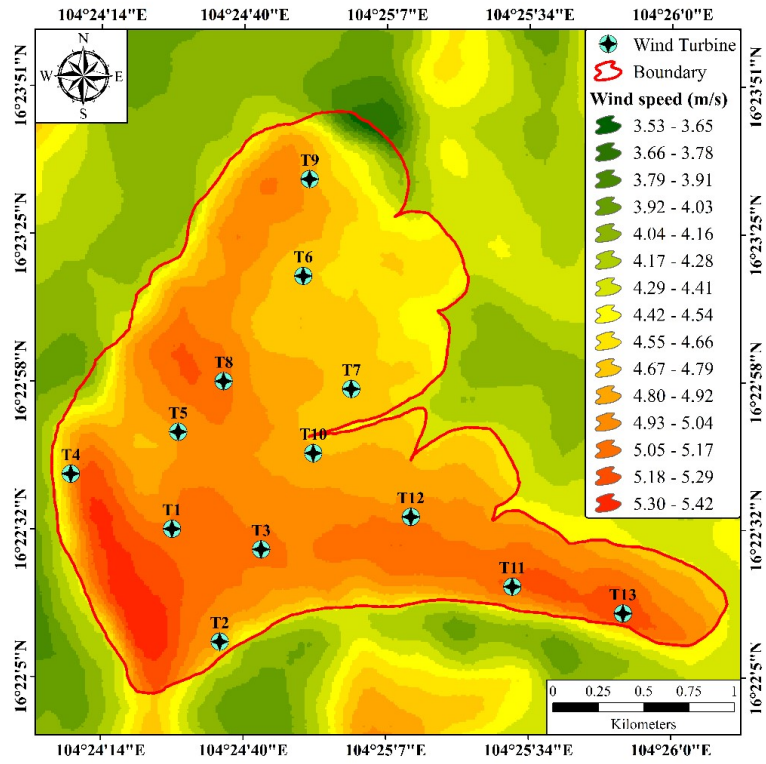
ภาพที่ 11 แผนที่ความเร็วลมเฉลี่ยรายปีของฟาร์มกังหันลมร่มเกล้า จังหวัดมุกดาหาร ที่ความสูง 100 m

ตารางที่ 1 รายละเอียดผลการจำลองด้วย ACO

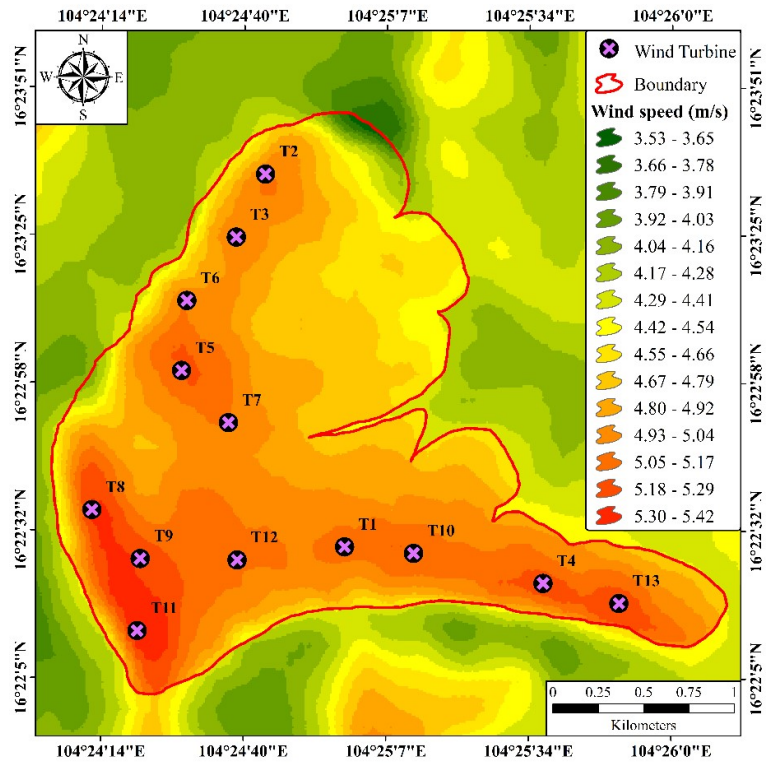
Turbines	Wind speed (m/s)	Gross AEP (GWh/year)	Net AEP (GWh/year)	Wake loss (%)	C.F. (%)
1	4.07	2.48	2.03	18.13	9.27
2	3.88	2.06	1.80	12.86	8.19
3	4.05	2.47	2.05	17.19	9.34
4	3.92	2.21	1.69	23.51	7.71
5	3.95	2.25	1.35	40.05	6.16
6	3.75	1.94	1.82	5.84	8.32
7	3.78	1.96	1.76	9.82	8.05
8	4.07	2.51	1.89	24.42	8.64
9	3.86	2.18	2.11	2.99	9.63
10	3.84	2.09	1.64	21.41	7.49
11	4.09	2.60	2.57	1.00	11.74
12	3.95	2.32	2.25	3.06	10.27
13	4.13	2.74	2.74	0.22	12.48

ตารางที่ 2 รายละเอียดผลการจำลองด้วย GH WindFarmer

Turbines	Wind speed (m/s)	Gross AEP (GWh/year)	Net AEP (GWh/year)	Wake loss (%)	C.F. (%)
1	4.06	2.53	2.43	3.72	11.1
2	4.02	2.52	2.41	4.40	11.01
3	4.05	2.51	2.12	15.79	9.66
4	4.17	2.79	2.77	0.72	12.64
5	4.15	2.70	2.57	4.93	11.71
6	4.02	2.43	1.88	22.63	8.58
7	4.03	2.41	2.16	10.33	9.87
8	4.25	2.90	2.47	14.94	11.27
9	4.22	2.81	2.10	25.40	9.57
10	4.06	2.54	2.50	1.54	11.41
11	4.35	3.12	2.36	24.33	10.77
12	4.07	2.49	2.24	10.02	10.2
13	4.14	2.75	2.74	0.18	12.52



ภาพที่ 12 ตำแหน่งของกังหันลมจากการใช้ ACO



ภาพที่ 13 ตำแหน่งของกังหันลมจากการใช้ GH WindFarmer

สรุปผลการวิจัย

ศักยภาพแหล่งลมบริเวณพื้นที่ฟาร์มกังหันลมร่มเกล้าที่ความสูง 100 m มีความเร็วลมเฉลี่ยรายปีอยู่ในช่วง 3.14-6.45 m/s และเมื่อเจาะจงไปยังพื้นที่ของฟาร์มกังหันลม ความเร็วลมเฉลี่ยรายปีอยู่ในช่วง 3.53-5.42 m/s ผลจากการจำลองการหาพลังงานไฟฟ้าสุทธิของฟาร์มกังหันลมและระยะเวลาในจำลองเปรียบเทียบระหว่าง ACO และ GH WindFarmer พบว่า การจำลองด้วย ACO ฟาร์มกังหันผลิตพลังงานไฟฟ้าสุทธิได้น้อยกว่า GH WindFarmer และใช้ระยะเวลาในการจำลองมากกว่าประมาณ 2 เท่า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ที่อำนวยความสะดวกด้านบุคลากรและเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ที่ได้สนับสนุนเงินทุนการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.). (ม.ป.ป.). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 – 2580 (AEDP2018) สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม 2565, จาก https://www.dede.go.th/download/Plan_62/20201021_TIEB_AEDP2018.pdf.
- [2] Mohamed, B., Fadela, B., & Mounir, K. (2015). Optimization of the Wind Turbines Location in Kaberten Wind Farm in Algeria. *Energy Procedia*, 74, 122–129.
- [3] González-Longatt, F., Serrano González, J., Burgos Payán, M., & Riquelme Santos, J. M. (2014). Wind-resource atlas of Venezuela based on on-site anemometry observation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 898–911.
- [4] wind-turbine-models.com. (ม.ป.ป.). Gamesa G126-2.5MW สืบค้นเมื่อ 12 กรกฎาคม 2565 จาก <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1286-gamesa-g126-2.5mw>.
- [5] ภาควิชา รัตน์จิรานุกูล, สุจิตรา รัตน์จิรานุกูล. (2561). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ การประเมินศักยภาพพลังงานลมบริเวณภาคเหนือของประเทศไทยในอนาคตด้วยแบบจำลองภูมิอากาศความละเอียดสูง สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม 2565, จาก <http://cmruir.cmru.ac.th/handle/123456789/1363>.
- [6] มวลทกานต์ พีชโรจน์. (2551). การประเมินศักยภาพของพลังงานลมเฉพาะพื้นที่ชายฝั่งทะเลของจังหวัด นครศรีธรรมราช. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. พัทลุง : มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- [7] M. Dorigo, M. Birattari, T. Stutzle. (2006). Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(4), 28–39.
- [8] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.). (ม.ป.ป.). วิธีของมดงานในสังคมใหญ่ สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม 2565, จาก <https://www.scimath.org/article-science/item/8642-2018-09-11-07-44-25>.
- [9] Yunus EROĞLU. 2011. Wind Farm Layout Optimization using Ant Colony and Particle Filtering Approaches. Thesis M.Sc. in Industrial Engineering. Turkish : Gaziantep University.