

สารบัญ

| หัวข้อ | หน้า |
|--|-----------|
| คำนำ | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูป | ช |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 8 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย | 8 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 8 |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 9 |
| 2.1 พลังงานลม | 9 |
| 2.2 เงื่อนไขของลม (Wind Conditions) | 11 |
| 2.2.1 ลมในช่วงระยะเวลาสั้น (Short Term Wind) | 11 |
| 2.2.2 ลมในช่วงระยะเวลายาว (Long Term Wind) | 12 |
| 2.2.3 ลมขีดสุด (Extreme Winds) | 13 |
| 2.3 หลักการของ Computational Fluid Dynamics (CFD) | 16 |
| 2.3.1 Reynolds number and Turbulence | 20 |
| 2.3.2 Turbulent Kinetic Energy | 20 |
| 2.3.3 TKE Budget | 21 |
| 2.3.4 $k - \epsilon$ Turbulence Model | 22 |
| 2.3.5 <i>TKE</i> และ <i>TI</i> | 23 |
| 2.3.6 Turbulence Intensity | 23 |
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 24 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย | 33 |
| 3.1 พื้นที่ศึกษา | 33 |
| 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย | 33 |
| 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์วัดต่างๆ | 35 |
| 3.4 การประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่ง | 41 |
| บทที่ 4 ผลการศึกษา | 43 |
| 4.1 สถานีวัดลมปากพน้ำ | 43 |
| 4.1.1 อัตราการได้รับข้อมูล (Data Recovery Rate, %) | 43 |

สารบัญ (ต่อ)

| หัวข้อ | หน้า |
|---|-----------|
| 4.2 สถานีวัดลมเกาะพะงัน | 44 |
| 4.2.1 อัตราการได้รับข้อมูล (Data Recovery Rate, %) | 44 |
| 4.2.2 อัตราเร็วลมเฉลี่ยรายเดือน | 44 |
| 4.3 ผังลม (Wind Rose) | 46 |
| 4.4 การแจกแจงไวบูลล์ (Weibull Distribution) | 46 |
| 4.5 การประมาณค่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี | 49 |
| 4.6 ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้า (Cost of Energy) จากโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลม | 54 |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ | 73 |
| 5.1 สรุป | 73 |
| 3.2 ข้อเสนอแนะ | 75 |
| บรรณานุกรม | 76 |

สารบัญตาราง

| | หน้า | |
|--------------|---|----|
| ตารางที่ 2.1 | ระยะขรุขระของสภาพพื้นผิว | 10 |
| ตารางที่ 2.2 | สถานภาพโครงการโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเล | 15 |
| ตารางที่ 2.3 | รูปแบบค่าคงที่มาตรฐาน $k - \epsilon$ | 22 |
| ตารางที่ 2.4 | รูปแบบค่าคงที่ที่ปรับแต่ง $k - \epsilon$ | 23 |
| ตารางที่ 2.5 | กำลังการผลิตติดตั้งกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลในปี พ.ศ. 2554 และ กำลังการผลิตติดตั้งรวมจนกระทั่งถึงปี พ.ศ. 2554 จำแนกตามประเทศต่างๆ | 28 |
| ตารางที่ 3.1 | พิกัดของสถานีวัดลมเกาะพะงัน อ.เกาะพะงัน และ บ้านท่าพญา อ.ปากพ่อง | 33 |
| ตารางที่ 4.1 | สมมติฐานทางการเงินและเศรษฐกิจ | 55 |

สารบัญรูป

| | หน้า | |
|------------|--|----|
| รูปที่ 1.1 | กำลังการผลิตติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าสะสมรายปีทั่วโลก | 1 |
| รูปที่ 1.2 | กำลังการผลิตติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าทั่วโลกรายปี | 2 |
| รูปที่ 1.3 | กำลังการผลิตติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าทั่วโลกรายปีในแต่ละทวีป | 2 |
| รูปที่ 1.4 | กำลังการผลิตติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าสะสมสูงสุด 10 อันดับแรก | 3 |
| รูปที่ 1.5 | กำลังการผลิตติดตั้งกังหันลมในปี ค.ศ. 2013 สูงสุด 10 อันดับแรก | 3 |
| รูปที่ 1.6 | การคาดการณ์กำลังการผลิตติดตั้งกังหันลมจนกระทั่งปี ค.ศ. 2018 | 4 |
| รูปที่ 1.7 | กำลังการผลิตติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2556 | 4 |
| รูปที่ 2.1 | พื้นที่บริเวณทะเลเหนือสำหรับการพัฒนาโครงการโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลม นอกชายฝั่ง | 14 |
| รูปที่ 2.2 | ฟาร์มกังหันลมที่สะพาน Dongbai | 16 |
| รูปที่ 2.3 | กำลังการผลิตติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้านอกชายฝั่งทะเลในทวีปยุโรป จนกระทั่งปี พ.ศ. 2554 | 27 |
| รูปที่ 2.4 | ตำแหน่งของฟาร์มกังหันลมผลิตไฟฟ้านอกชายฝั่งทะเลขนาดใหญ่ที่สุด 22 ใน 25 อันดับแรก | 29 |
| รูปที่ 2.5 | แผนที่ลมความละเอียด 3 km นอกชายฝั่งทะเลประเทศเกาหลี (รูป a) และความหนาแน่นกำลังลม (รูป b) | 31 |
| รูปที่ 2.6 | แผนที่ลมเหนือความละเอียด 1 km บริเวณ Great Lakes จาก AWS TrueWind | 32 |
| รูปที่ 3.1 | พื้นที่ศึกษาของโครงการวิจัย | 34 |
| รูปที่ 3.2 | เซนเซอร์วัดอัตราเร็ว (ซ้าย) และทิศทางลม (ขวา) | 36 |
| รูปที่ 3.3 | เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์รุ่น NRG #110S Temperature Sensor | 37 |
| รูปที่ 3.4 | เซนเซอร์วัดความดันบรรยากาศรุ่น BP20 Barometric Pressure Sensor | 37 |
| รูปที่ 3.5 | อุปกรณ์บันทึกข้อมูลรุ่น NOMAD™ II Wind Data Logger | 38 |
| รูปที่ 3.6 | Solar Charge Regulator | 39 |
| รูปที่ 3.7 | สถาปัตยกรรมของคลัสเตอร์ | 40 |
| รูปที่ 3.8 | เครื่องคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง | 40 |
| รูปที่ 3.9 | ระเบียบวิธีในการวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม | 42 |
| รูปที่ 4.1 | อัตราการได้รับข้อมูลที่ระดับความสูง 120 m ของสถานีวัดลมปากพ่อง | 43 |
| รูปที่ 4.2 | อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 m ของสถานีวัดลมปากพ่อง | 44 |
| รูปที่ 4.3 | อัตราการได้รับข้อมูลที่ระดับความสูง 120 m ของสถานีวัดลมเกาะพะงัน | 45 |
| รูปที่ 4.4 | อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 m ของสถานีวัดลมเกาะพะงัน | 45 |
| รูปที่ 4.5 | ผังลมรายปีจากข้อมูลลมตรวจวัดและจากแบบจำลองบรรยากาศ RAMS | 46 |
| รูปที่ 4.6 | การแจกแจงไวบูลล์ | 47 |
| รูปที่ 4.7 | เปรียบเทียบอัตราเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัดลมปากพ่อง ปี ค.ศ. 2012 | 48 |
| รูปที่ 4.8 | เปรียบเทียบอัตราเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนสถานีวัดลมเกาะพะงันของปี ค.ศ. 2012 | 48 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 4.9 การจัดเรียงฟาร์มกังหันลมขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW บริเวณ อ.เกาะพะงัน จ.สุราษฎร์ธานี G114-2.5 MW (ซ้าย) UP2000-103 (ขวา) | 50 |
| รูปที่ 4.10 การจัดเรียงฟาร์มกังหันลมขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW บริเวณ อ.ปากพ่อง จ.นครศรีธรรมราช G114-2.5 MW (ซ้าย) UP2000-103 (ขวา) | 50 |
| รูปที่ 4.11 เส้นโค้งกำลัง (Power Curve) ของกังหันลมผลิตไฟฟ้ารุ่น UP2000-103 | 51 |
| รูปที่ 4.12 เส้นโค้งกำลัง (Power Curve) ของกังหันลมผลิตไฟฟ้ารุ่น G114-2.5 | 51 |
| รูปที่ 4.13 หน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีจากฟาร์มกังหันลมขนาด 10 MW ในบริเวณพื้นที่ อ.เกาะพะงัน จ.สุราษฎร์ธานี และ อ.ปากพ่อง จ.นครศรีธรรมราช | 52 |
| รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของฟาร์มกังหันลมขนาด 10 MW ในบริเวณพื้นที่ อ.เกาะพะงัน จ.สุราษฎร์ธานี และ อ.ปากพ่อง จ.นครศรีธรรมราช | 53 |
| รูปที่ 4.15 การสูญเสียเนื่องจากอิทธิพลของเวกของฟาร์มกังหันลมขนาด 10 MW ในบริเวณพื้นที่ อ.เกาะพะงัน จ.สุราษฎร์ธานี และ อ.ปากพ่อง จ.นครศรีธรรมราช | 54 |
| รูปที่ 4.16 สัดส่วนต้นทุนของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW กรณีต้นทุน 65 ล้านบาทต่อเมกะวัตต์ | 55 |
| รูปที่ 4.17 สัดส่วนต้นทุนของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW กรณีต้นทุน 70 ล้านบาทต่อเมกะวัตต์ | 56 |
| รูปที่ 4.18 สัดส่วนต้นทุนของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW กรณีต้นทุน 75 ล้านบาทต่อเมกะวัตต์ | 56 |
| รูปที่ 4.19 สัดส่วนผลตอบแทนของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW บริเวณ อ.เกาะพะงัน จ.สุราษฎร์ธานี กรณีพิจารณาพร้อมกับกลไกพัฒนาที่สะอาด (บน) กรณีไม่พิจารณาพร้อมกับกลไกพัฒนาที่สะอาด (ล่าง) | 58 |
| รูปที่ 4.20 สัดส่วนผลตอบแทนของโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาดกำลังผลิตติดตั้ง 10 MW บริเวณ อ.ปากพ่อง จ.นครศรีธรรมราช กรณีพิจารณาร่วมกับ กลไกพัฒนาที่สะอาด (บน) กรณีไม่พิจารณาร่วมกับกลไกพัฒนาที่สะอาด (ล่าง) | 59 |
| รูปที่ 4.21 ความอ่อนไหวของต้นทุนต่อดัชนีทางการเงินของโครงการโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาด 10 MW บริเวณ อ.เกาะพะงัน จ.สุราษฎร์ธานี กรณีพิจารณาร่วมกับ กลไกพัฒนาที่สะอาด (บน) กรณีไม่พิจารณาร่วมกับกลไกพัฒนาที่สะอาด (ล่าง) และต้นทุนโครงการ 75 ล้านบาทต่อเมกะวัตต์ | 60 |
| รูปที่ 4.22 ความอ่อนไหวของ AEP ต่อดัชนีทางการเงินของโครงการโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาด 10 MW บริเวณ อ.เกาะพะงัน จ.สุราษฎร์ธานี กรณีพิจารณาร่วมกับ กลไกพัฒนาที่สะอาด (บน) กรณีไม่พิจารณาร่วมกับกลไกพัฒนาที่สะอาด (ล่าง) และต้นทุนโครงการ 75 ล้านบาทต่อเมกะวัตต์ | 61 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.31 ความอ่อนไหวของต้นทุนต่อโครงการโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาด 10 MW บริเวณ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช กรณีพิจารณาร่วมกับกลไกพัฒนา ที่สะอาด (บน) กรณีไม่พิจารณาร่วมกับกลไกพัฒนาที่สะอาด (ล่าง) และต้นทุนของโครงการ 65 ล้านบาทต่อเมกะวัตต์ | 71 |
| รูปที่ 4.32 ความอ่อนไหวของ AEP ต่อโครงการโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาด 10 MW อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช กรณีพิจารณาร่วมกับกลไกพัฒนาที่สะอาด (บน) กรณีไม่พิจารณาร่วมกับกลไกพัฒนาที่สะอาด (ล่าง) และต้นทุนของโครงการ 65 ล้านบาทต่อเมกะวัตต์ | 72 |