สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีพลังงานลม

จอมภพ แววศักดิ์

2136

สำนักหอสมุดกลาง
CENTRAL LIBRARY

เทคโนโลยีพลังงานลม

จอมภพ แววศักดิ์

เลขทะเบียน M 0149115
วันลงทะเบียน 2 9 เม.ย. 2559
เลขเรียกหนังสือ 621.312136
จ 193ท
2558

สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2558

570.-

จรัสพร แววศักดิ์
เทคโนโลยีพลังงานลม / จรัสพร แววศักดิ์
1. พลังงานลม 2. โรงไฟฟ้าพลังงานลม
621.312 30
ISBN 978-974-03-3397-5
สพจ. 1948

สถาบันตำราวิชาการ สู่สังคม
www.ChulaPress.com
Knowledge to All

ลิขสิทธิ์ของสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พิมพ์ครั้งที่ 1 จำนวน 1,500 เล่ม พ.ศ. 2558

การผลิตและการลอกเลียนหนังสือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้น
ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้จัดจำหน่าย **ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

สาขา **ตลาดพระเกี้ยว** โทร. 0-2218-7000-3 โทรสาร 0-2255-4441
อยามสแควร์ โทร. 0-2215-9681-2 โทรสาร 0-2254-9495
ม.นเรศวร จ.พิษณุโลก โทร. 0-5526-0162-4 โทรสาร 0-5526-0165
ม.เทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา โทร. 0-4421-6131-4 โทรสาร 0-4421-6135
ม.บูรพา จ.ชลบุรี โทร. 0-3839-4855-9 โทรสาร 0-3839-3239
โรงเรียนนายร้อย จปร. จ.นครนายก โทร. 0-3739-3023 โทรสาร 0-3739-3023
ม.พะเยา จ.พะเยา โทร. 0-5446-6799-800 **โทรสาร** 0-5446-6798
จัตุรัสจามจุรี (CHAMCHURI SQUARE) ชั้น 4 โทร. 0-2160-5301-2 โทรสาร 0-2160-5304
รัตนาธิเบศร์ (แยกแคราย) โทร. 0-2950-5408-9 โทรสาร 0-2950-5405
Call Center (จัดส่งทั่วประเทศ) โทร. 0-2255-4433 http://www.chulabook.com
และเครือข่าย
ร้านค้า, หนังสือเข้าชั้นเรียน ติดต่อแผนกขายส่ง สาขารัตนาธิเบศร์ (แยกแคราย) โทร. 0-2950-5408-9 โทรสาร 0-2950-5405
มีจำหน่ายที่ ร้านซีเอ็ดยุคสาขา ร้านนายอินทร์ทุกสาขา และร้านหนังสือชั้นนำทั่วประเทศ

กองบรรณาธิการ : ชรีวรรณ จันทรเวโร
พิสูจน์อักษร : ปุญญิดา บุญเกิดผล
ออกแบบปก : กิตติพงษ์ สุวาคต์
ออกแบบรูปเล่ม : วิษณุนันท์ ชาญณรงค์
พิมพ์ที่ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (5812-116)
โทร. 0-2218-3549 โทรสาร 0-2215-3612
http://www.cuprint.chula.ac.th

คำนำ

หนังสือเทคโนโลยีพลังงานลมเล่มนี้จัดทำขึ้นจากแรงบันดาลใจของผู้เขียน โดยอาศัยองค์ความรู้ในศาสตร์ต่าง ๆ จากสถาบันวิทยาการ และประสบการณ์การทำงานวิจัยของผู้เขียนที่เกี่ยวข้องกับพลังงานลมและการประยุกต์ นอกจากนั้นหนังสือเล่มนี้ยังได้ถูกเรียบเรียงขึ้นโดยอาศัยข้อมูลและองค์ความรู้ที่ทันสมัยและเหมาะกับนิสิต นักศึกษาและผู้สนใจทั่วไปรวมทั้งการนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมของประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นศาสตร์ทางด้านอุตุนิยมวิทยาของลม แบบจำลองบรรยากาศสำหรับทำนายแหล่งลมและแบบจำลองการไหลของลม การเปลี่ยนรูปพลังงานลมโดยอาศัยกังหันลม การออกแบบกังหันลมโดยอาศัยหลักการอากาศพลศาสตร์ ส่วนประกอบของโรงไฟฟ้าทุ่งกังหันลม เศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมของพลังงานลม รวมทั้งมิติทางสังคมของการยอมรับเทคโนโลยีพลังงานลมสำหรับการผลิตไฟฟ้า

ผู้เขียนขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้โอกาสแก่ข้าพเจ้าโอกาสการศึกษาวิจัยทางด้านพลังงานลมตั้งแต่ พ.ศ. 2549 และขอขอบคุณกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณ ที่สนับสนุนทุนวิจัยประเภทความร่วมมือกับต่างประเทศ และ Co Funding ร่วมกับ วช. และภาคเอกชนในการดำเนินการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพลังงานลมและการพัฒนาทุ่งกังหันลมในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย นอกจากนี้ผู้เขียนยังขอขอบคุณ กองทุนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยในการประเมินศักยภาพพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลของประเทศไทย ทำให้ผู้เขียนมีประสบการณ์และค้นพบองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับศาสตร์พลังงานลมและนำมาเขียนเป็นส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้

การจัดทำหนังสือเล่มนี้ได้พยายามอ้างอิงศัพท์เทคนิคต่าง ๆ ให้ตรงกับพจนานุกรมศัพท์พลังงานอังกฤษ-ไทย ฉบับราชบัณฑิตสถาน พ.ศ. 2545 โดยเลือกใช้หน่วยในระบบ SI เพื่อให้เป็นมาตรฐานสากล สำหรับนิสิต นักศึกษา และผู้ที่สนใจอ่านทั่วไป

หนังสือเล่มนี้จะสำเร็จลงมาเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์ไม่ได้ถ้าหากไม่ได้รับความอนุเคราะห์และการช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีรายนามดังต่อไปนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูสิรัตน์ คงเรือง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สเนศ ไชยชนะ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพร แก้วอ่อน นายชนะ จันทร์ฉ่ำ นางสาวปราณี หนูทองแก้ว นายสมพล ชีวะมงคลกานต์ นางสาวสุภลักษณ์ นาคนุ่น และนางสาวทัศนียา เพชรชู ผู้เขียนขอขอบคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สุดท้ายผู้เขียนขอขอบคุณครอบครัวอันเป็นที่รักของผู้เขียนที่ได้ให้กำลังใจให้ผู้เขียนจนสามารถจัดทำหนังสือเล่มนี้ออกมาจนประสบผลสำเร็จ คุณความดีของหนังสือเล่มนี้ประการใดพึงมีผู้เขียนขอมอบให้กับบูรพาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้เขียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัฒน์ แววศักดิ์

ตุลาคม 2558

สารบัญ

หน้า

คำนำ
สารบัญ
สารบัญตาราง
สารบัญรูป

บทที่ 1 บทนำ (Introduction) 1
1.1 ประวัติศาสตร์ของพลังงานลม (History of Wind Energy) 3
1.2 สถานภาพปัจจุบันและมุมมองอนาคต (Current Status and Future Prospects) 8
1.3 การพัฒนาพลังงานลมในประเทศไทย (Development of Wind Energy in Thailand) 11
คำถามท้ายบท 27

บทที่ 2 การวัดลม (Wind Measuerment) 29
2.1 ตัวบ่งชี้ทางนิเวศ (Ecological Indicators) 30
2.2 แอนิมอมิเตอร์ (Anemometer) 31
2.2.1 แอนิมอมิเตอร์ชนิดลูกปิงปอง (Ping Pong Ball Anemometer) 32
2.2.2 แอนิมอมิเตอร์ชนิดหมุน (Rotational Anemometer) 33
2.2.3 แอนิมอมิเตอร์ชนิดความดัน (Pressure Type Anemometer) 36
2.2.4 แอนิมอมิเตอร์ชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Type Anemometer) 38
2.2.5 แอนิมอมิเตอร์ชนิดการเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase Shift Anemometer) 39
2.2.6 อิทธิพลของความหนาแน่นที่มีผลต่อการวัดความเร็วลม 48
2.3 ศรลม (Wind Vane) 49
2.4 สถานีวัดลม (Met Station) 50
2.4.1 เสาวัดลม (Met Mast) 51
2.4.2 มาตรฐานการตรวจวัดลม IEC (IEC Standard for Wind Measurement) 57
คำถามท้ายบท 63

บทที่ 3 การวิเคราะห์แหล่งลม (Analysis of Wind Regime) 65
3.1 ลม (Wind) 66
3.1.1 แบบจำลองการไหลเวียนทั่วไป (General Circulation Model) 66
3.1.2 อิทธิพลของท้องถิ่น (Local Effects) 73
3.1.3 แรงเฉือนลม (Wind Shear) 73

3.1.4 ความปั่นป่วน (Turbulence) 77
3.1.5 อิทธิพลของความเร่ง (Acceleration Effect) 78
3.1.6 การเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา (Time Variation) 79
3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลลม (Analysis of Wind Data) 80
3.2.1 อัตราเร็วลมเฉลี่ย (Average Wind Speed) 81
3.2.2 การแจกแจงของอัตราเร็วลม (Distribution of Wind Speed) 82
3.2.3 แบบจำลองเชิงสถิติสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลลม (Statistical Models for Wind Data Analysis) 86
3.3 การประมาณค่าพลังงานของแหล่งลม (Energy Estimation of Wind Regimes) 98
3.3.1 วิธีการของไวบูลล์ (Weibull Based Approach) 99
3.3.2 วิธีการของเรลีย์ (Rayleigh Based Approach) 102
คำถามท้ายบท 106

บทที่ 4 การจำลองแบบการไหลของลม (Wind Flow Modeling) 109
4.1 การไหลเหนือลักษณะภูมิประเทศ (Flow over Terrain) 110
4.1.1 ภูมิประเทศแบบราบเรียบและเอกพันธุ์ (Homogeneous and Flat Terrain) 110
4.1.2 ภูมิประเทศแบบราบเรียบและวิวิธพันธุ์ (Non-Homogeneous and Flat Terrain) 111
4.1.3 ภูเขาลูกเดียว (Single Hill) 112
4.1.4 หุบเขาเดียว (Single Valley) 113
4.1.5 ภูมิประเทศแบบภูเขาสูง (Hilly Terrain) 114
4.1.6 ภูมิประเทศแบบสลับซับซ้อน (Complex Terrain) 114
4.1.7 ภูมิประเทศแบบสลับซับซ้อนมาก (Very Complex Terrain) 114
4.2 เทคนิคการจำลองแบบการไหล (Flow Modeling Techniques) 115
4.2.1 แบบจำลอง Diagnostic (Diagnostic Model) 117
4.2.2 แบบจำลองการไหลเวียน Prognostic (Prognostic Circulation Models) 129
4.3 ลักษณะภูมิประเทศ (Topography) 133
4.3.1 ความขรุขระของพื้นผิว (Surface Roughness) 133
4.3.2 สิ่งกีดขวาง (Obstacles) 134
4.3.3 ความแตกต่างของลักษณะภูมิประเทศ (Terrain Orography) 135
4.3.4 ป่าไม้ (Forest) 135
4.4 สมรรถนะของแบบจำลองการไหลของลม (Wind Flow Model Performance) 136
4.4.1 กรณีศึกษาที่ 1 WAsP 136
4.4.2 กรณีศึกษาที่ 2 WAsP กับ Phoenics 140
4.4.3 กรณีศึกษาที่ 3 WAsP กับ WindSim 146

4.4.4 กรณีศึกษาที่ 4 WAsP/CFD/Mass Consistent Coupled NWP/Mass Consistent Coupled NWP/LES 150
4.5 แบบจำลองบรรยากาศคู่ควบกับแบบจำลองการไหลของลม (Atmospheric Model Coupling Wind Flow Model) 153
คำถามท้ายบท 156

บทที่ 5 พื้นฐานของการเปลี่ยนรูปพลังงานลม (Basic of Wind Energy Conversion) 157
5.1 กำลังลม (Wind Power) 158
5.2 กำลังและทอร์กของกังหันลม (Wind Turbine Power and Torque) 160
5.3 การจำแนกกังหันลม (Classification of Wind Turbines) 162
5.3.1 กังหันลมแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbines) 163
5.3.2 กังหันลมแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbines) 166
5.4 คุณลักษณะของส่วนหมุนของกังหันลม (Characteristics of Wind Rotor) 169
5.5 อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม (Aerodynamics of Wind Turbines) 170
5.5.1 แผ่นอากาศ (Airfoil) 170
5.5.2 ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics Theories) 174
5.6 การออกแบบส่วนหมุน (Rotor Design) 186
5.7 สมรรถนะของส่วนหมุน (Rotor Performance) 191
5.8 นวัตกรรมแบบกังหันลม (Innovative Wind Turbine Design) 194
5.9 กังหันลมขนาดใหญ่สมัยใหม่ (Modern Large Wind Turbine) 198
คำถามท้ายบท 206

บทที่ 6 โรงไฟฟ้าทุ่งกังหันลม (Wind Farm Power Plant) 207
6.1 ส่วนประกอบของโรงไฟฟ้าทุ่งกังหันลม (Wind Farm Power Plant) 208
6.1.1 หอคอย (Tower) 209
6.1.2 ส่วนหมุน (Rotor) 215
6.1.3 กลองเกียร์ (Gearbox) 218
6.1.4 การรักษาระดับกำลัง (Power Regulation) 220
6.1.5 เบรกความปลอดภัย (Safety Brakes) 225
6.1.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) 228
6.1.7 การทำงานแบบอัตราเร็วรอบคงแปรและแบบตรึง (Fixed and Variable Speed Operation) 233
6.1.8 การเชื่อมต่อกับระบบกริด (Grid Integration) 239
6.2 ทุ่งกังหันลมบนฝั่ง (Onshore Wind Farms) 251
6.3 ทุ่งกังหันลมนอกชายฝั่งทะเล (Offshore Wind Farms) 255

6.4 สมรรถนะของกังหันลมผลิตไฟฟ้า (Performance of Wind Turbine Generators) 276
6.4.1 เส้นโค้งกำลัง (Power Curve) 277
6.4.2 พลังงานที่ผลิตได้จากกังหันลม 281
6.4.3 คาปาซิตีแฟกเตอร์ (Capacity Factor) 285
6.4.4 การจับคู่กังหันลมกับแหล่งลม (Matching the Turbine with Wind Regime) 286
6.5 ความปลอดภัยของกังหันลม (Safety of Wind Turbine) 289
6.6 อุบัติเหตุจากการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลม (Wind Power Production Accidents) 292
คำถามท้ายบท 298

บทที่ 7 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าทุ่งกังหันลม (Environmental Impacts of Wind Farm Power Plant) 299
7.1 บทนำ (Introduction) 300
7.2 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) 301
7.2.1 ประเภทของผลกระทบ (Impact Categories) 302
7.2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของพลังงานลม (LCA in Wind Energy) 303
7.2.3 ผลการจัดทำบัญชีรายการของทุ่งกังหันลมบนฝั่ง (LCI Results: Onshore Wind Farm) 304
7.2.4 ผลการประเมิน LCA ของทุ่งกังหันลมบนฝั่ง (LCA Results: Onshore Wind Farm) 304
7.2.5 ผลการจัดทำบัญชีรายการของทุ่งกังหันลมนอกชายฝั่งทะเล (LCI Results: Offshore Wind Farm) 307
7.2.6 ผลการประเมิน LCA ของทุ่งกังหันลมนอกชายฝั่งทะเล (LCA Results: Offshore Wind Farm) 310
7.2.7 การวิเคราะห์สมดุลพลังงาน (Energy Balance Analysis) 312
7.2.8 การเปรียบเทียบผลตอบแทนระหว่างเทคโนโลยีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานในแบบและพลังงานหมุนเวียน (Comparative Benefits with Conventional and Renewable Technologies System) 313
7.3 ผลตอบแทนทางสิ่งแวดล้อมของพลังงานลม (Environmental Benefits of Wind Energy) 316
7.4 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าทุ่งกังหันลมบนฝั่ง 316
7.4.1 การปลดปล่อยมลพิษทางเสียง (Noise Emission) 316
7.4.2 ผลกระทบทางสายตา (Visual Impact) 331
7.4.3 ผลกระทบของเงากะพริบ (Shadow Flicker) 337
7.4.4 ผลกระทบต่อนกและค้างคาว (Bird and Bat Impact) 345
7.4.5 การแทรกสอดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference) 351
7.4.6 ผลกระทบต่อเรดาร์ (Radar Impact) 352

7.5 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าพลังกังหันลมนอกชายฝั่งทะเล 369
7.5.1 ผลกระทบทางสายตา (Visual Impact) 369
7.5.2 ผลกระทบทางเสียง (Noise Impact) 370
7.5.3 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสิ่งมีชีวิตในน้ำ 372
(Electromagnetic Fields and Marine Organism)
7.5.4 ผลกระทบต่อสัตว์ทะเลที่อาศัยอยู่บริเวณท้องทะเล (Impacts on Benthos) 372
7.5.5 ผลกระทบต่อปลา (Impacts on Fish) 373
7.5.6 ผลกระทบต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่อาศัยอยู่ในน้ำ 374
(Impacts on Marine Mammals)
7.5.7 ผลกระทบต่อนกทะเล (Impacts on Sea Birds) 375
7.5.8 ผลกระทบต่อการเดินเรือ 376
7.5.9 ผลกระทบต่อสัญญาณเรดาร์และคลื่นวิทยุ 377
คำถามท้ายบท 378

บทที่ 8 เศรษฐศาสตร์ของพลังงานลม (Economics of Wind Energy) 379
8.1 บทนำ (Introduction) 380
8.2 นโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม (Wind Power Policy) 381
8.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบของเศรษฐศาสตร์พลังงานลม 388
(Factors Influencing the Wind Economics)
8.3.1 ปัจจัยทางตำแหน่งที่ตั้ง (Site Specific Factors) 389
8.3.2 พารามิเตอร์ของเครื่องจักร (Machine Parameters) 390
8.3.3 ตลาดทางด้านพลังงาน (Energy Market) 392
8.3.4 การจูงใจและการยกเว้น (Incentives and Exemptions) 392
8.4 วิธีมูลค่าปัจจุบัน (The Present Worth Approach) 394
8.5 ต้นทุนของพลังงานลม (Cost of Wind Energy) 399
8.5.1 เงินลงทุนเริ่มต้น (Initial Investment) 401
8.5.2 ต้นทุนดำเนินการและบำรุงรักษา (Operation and Maintenance Costs) 402
8.5.3 มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรายปี (Present Value of Annual Costs) 402
8.6 ผลตอบแทนของพลังงานลม (Benefits of Wind Energy) 405
8.7 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Yardsticks of Economic Merit) 407
8.7.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) 408
8.7.2 อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit Cost Ratio) 409
8.7.3 ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period) 409
8.7.4 อัตราส่วนผลตอบแทนการลงทุน (Internal Rate of Return) 411

8.8 การลดหย่อนภาษีเนื่องจากค่าเสื่อมในการลงทุน (Tax Deduction due to Investment Depreciation) 413
8.8.1 การเสื่อมแบบเส้นตรง (Straight Line Depreciation) 414
8.8.2 การเสื่อมแบบสมดุลการลด (Declining Balance Depreciation) 414
8.8.3 การเสื่อมแบบผลรวมตัวเลขรายปี (Sum of the Year's Digit Depreciation) 414
8.9 ผลกระทบภายนอกของพลังงานลมเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีอื่น ๆ 416
8.9.1 แนวคิดทางด้านเศรษฐศาสตร์ของดิฟลิพลของผลกระทบภายนอก 416
8.9.2 ความสำคัญของผลกระทบภายนอก 417
8.9.3 ผลกระทบภายนอกของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแต่ละชนิด 418
คำถามท้ายบท 421

บทที่ 9 การยอมรับจากสังคมของพลังงานลมและทุ่งกังหันลม (Social Acceptance of Wind Energy and Wind Farms) 423
9.1 บทนำ (Introduction) 424
9.2 การยอมรับทุ่งกังหันลมบนบก (Onshore Wind Farm Acceptance) 426
9.2.1 การยอมรับพลังงานลมจากสาธารณชน (Public Acceptance of Wind Energy) 426
9.2.2 การยอมรับพลังงานลมและทุ่งกังหันลมจากชุมชน (Community Acceptance of Wind Energy and Wind Farms) 429
9.2.3 การยอมรับจากสังคม-การเมือง (Socio-Political Acceptance) 431
9.3 การยอมรับทุ่งกังหันลมนอกชายฝั่งทะเล (Offshore Wind Farm Acceptance) 432
9.4 ทัศนคติของสาธารณชนที่มีต่อกังหันลมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย : กรณีศึกษาอำเภอหัวไทรจังหวัดนครศรีธรรมราช 435
คำถามท้ายบท 437

บรรณานุกรม 439
ดรรชนี 449
ประวัติผู้เขียน 455