การพัฒนาแผนที่ลมสำหรับประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศระดับสเกลปานกลาง

สำนักหอสมุดกลาง

โดย

นายวรภาส พรมเสน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาแผนที่ลมสำหรับประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศระดับสเกลปานกลาง

สำนักหอสมุดกลาง

โดย

นายวรภาส พรมเสน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF WIND MAPS FOR THAILAND BY USING ATMOSPHERIC MESOSCALE MODEL

สำนักหอสมุดกลาง

By

Mr. Worrapass Promsen

มหาวิทยาลัยศิลปากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Doctor of Philosophy Program in Curriculum and Supervision

Department of Physics

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2011

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง " การพัฒนาแผนที่ลมสำหรับประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศระดับสเกลปานกลาง " เสนอโดย นายวรภาส พรมเสน เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

……...

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.........เดือน................... พ.ศ...........

สำนักหอสมุดกลาง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ สายคณิต)

............/......................../..............

.... กรรมการ

(ดร.ดุษฎี ศุขวัฒน์)

............/......................../..............

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย)

............/......................../..............

52306801 : สาขาวิชาฟิสิกส์
คำสำคัญ : แผนที่ลม/แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง/พลังงานลม

วรภาส พรมเสน : การพัฒนาแผนที่ลมสำหรับประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศระดับสเกลปานกลาง. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รศ.ดร.เสริม จันทร์ฉาย. 156 หน้า.

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาแผนที่ลมระดับสเกลปานกลาง (mesoscale wind map) ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 3 x3 ตารางกิโลเมตรสำหรับประเทศไทย ในการพัฒนาแผนที่ลมดังกล่าว ผู้วิจัยจะทำการคำนวณความเร็วลมด้วยแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง KAMM (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model) รายชั่วโมง โดยใช้ข้อมูลโปรไฟล์ของความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิอากาศ ที่ได้จากการตรวจอากาศชั้นบน จำนวน 15 ปี (ค.ศ. 1995 – 2009) เป็นข้อมูลอินพุท ร่วมกับข้อมูลความหยาบของพื้นผิว (roughness) และข้อมูลระดับความสูงของพื้นที่ จากนั้นนำข้อมูลความเร็วลมที่คำนวณได้ ที่ระดับความสูง 90 เมตรมาหาค่าเฉลี่ยรายเดือนและรายปี แล้วนำผลที่ได้มาจัดแสดงในรูปของแผนที่ลมรายเดือนและรายปี จากแผนที่ลมรายเดือน พบว่า การกระจายตามพื้นที่ของความเร็วลมในเดือนต่างๆของประเทศไทย ได้รับอิทธิพลมาจากมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และลักษณะทางภูมิศาสตร์ของท้องถิ่น กรณีแผนที่ลมรายปี พบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีความเร็วลมต่ำกว่า 5 m/s อย่างไรก็ตามสามารถพบความเร็วลม 5-6 m/s ได้ตามบริเวณแนวเขา ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้ สำหรับความเร็วลมนอกชายฝั่งมีค่าเฉลี่ยรายปีค่อนข้างต่ำเช่นเดียวกัน โดยพบบริเวณที่มีความเร็วลม 5-6 m/s ที่บริเวณอ่าวบ้านดอน ทะเลสาบสงขลาและอ่าวปัตตานี นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการวิเคราะห์หาบริเวณที่มีศักยภาพในการพัฒนาพลังงานลมโดยใช้ระบบภูมิศาสตร์สารสนเทศ (geographic information system, GIS) ผลการวิเคราะห์พบว่า บริเวณที่มีศักยภาพในการพัฒนาพลังงานลมจะอยู่ในบริเวณแคบๆ ตามแนวเขาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและในภาคใต้

ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ลายมือชื่อนักศึกษา.. ปีการศึกษา 2554
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ....

52306801 : MAJOR : PHYSICS

KEY WORD : WIND MAP/ATMOSPHERIC MESOSCALE MODEL/WIND ENERGY

WORRAPASS PROMSEN : DEVELOPMENT OF WIND MAPS FOR THAILAND BY USING ATMOSPHERIC MESOSCALE MODEL. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.SERM JANJAI, Ph.D. 156 pp.

In this study mesoscale wind maps with the special resolution of 3x3 km^2 for Thailand was developed. In developing these maps, the atmospheric mesoscale model “KAMM” was used to calculate hourly wind speed using the vertical profiles of wind speed, relative humidity and air temperature from upper air sounding for the period of 15 years (1995-2009) as the main inputs of the model. Moreover, roughness and elevation data over the country were also used as the input. Afterward, values of wind speed at the height of 90 m were averaged to obtain monthly and yearly mean wind speeds. These wind speeds were displayed as monthly and yearly wind maps. The monthly wind maps revealed that geographical distribution of monthly wind speed was strongly influenced by the northeast and southwest monsoons and local topography. For the case of yearly wind speed, it was found that most parts of the country have wind speed lower than 5 m/s. However, the areas with wind speed higher than 5 m/s were found along the mountain range, especially in the southern region. For the offshore, the wind speed was generally low although the wind speed of 5-6 m/s was found in the bay of Baan-don, Songkhla Lake and the bay of Puttani. Finally, relatively high potential wind energy areas were also identified by using geographical information system (GIS) approach. The results showed that these areas were found in a small area along the mountain ranges in the northeast and southern regions.

สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยศิลปากร

Department of Physics Graduate School, Silpakorn University

Student's signature .... Academic Year 2011

Thesis Advisor's signature ....

กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินการวิจัยในหัวข้อเรื่องการพัฒนาแผนที่ลมสำหรับประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศระดับสเกลปานกลาง ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย อาจารย์ที่ปรึกษา สำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ สายคณิต และ ดร.ดุษฎี ศุขวัฒน์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณนักวิจัยทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ให้ความช่วยเหลือ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร.อิสระ มะศิริ ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านโปรแกรม

ท้ายสุดนี้ คุณค่าและคุณประโยชน์ของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบตอบแทนพระคุณบุพการีและบุรพคณาจารย์ทุกๆท่าน

สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ........ ฉ

สารบัญภาพ .... ฌ

สารบัญตาราง .... ฒ

บทที่

1 บทนำ........ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

2 หลักทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 การเกิดลม 3

2.2 ความหยาบของพื้นผิวโลก 9

2.3 พลังงานของกระแสลม 12

2.4 เครื่องวัดความเร็วลม........ 13

2.5 อุปกรณ์วัดทิศทางลม 20

2.6 สถานีวัดลม........ 21

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลลม........ 24

2.8 แผนที่ลม 39

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 44

3 วิธีวิจัยและผล 59

3.1 แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง........ 59

3.2 การทดสอบผลการคำนวณกับข้อมูลวัด 78

3.3 การจัดทำแผนที่ลม........ 96

3.4 การประยุกต์ใช้แผนที่ลมระดับสเกลปานกลาง 127

บทที่		หน้า

4 สรุป 143

บรรณานุกรม 145

ภาคผนวกที่ 1 148

ภาคผนวกที่ 2 155

ประวัติผู้วิจัย 156

สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	การไหลเวียนของอากาศในบรรยากาศโลก	4
2.2	ลักษณะของต้นไม้ ซึ่งอยู่ในบริเวณที่มีลมแรงพัดผ่านประจำ	5
2.3	การแปรค่าของความเร็วลมตามความสูงจากพื้นผิวโลก	6
2.4	การแปรค่าของความเร็วลมตามเวลา	7
2.5	การเกิดความปั่นป่วนของลมเมื่อผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆ	8
2.6	การเพิ่มขึ้นของความเร็วลม เมื่อพัดขึ้นเนินเขา	9
2.7	การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมตามความสูง	9
2.8	พื้นผิวน้ำ เช่น ทะเล มหาสมุทร อ่างเก็บน้ำ และทะเลสาบ มีความหยาบ (Z_0) เป็น 0.0002 เมตร และจัดอยู่ในความหยาบ class 0	10
2.9	พื้นที่โล่งและเรียบ ไม่มีสิ่งกีดขวางทางลม เช่น ทุ่งนา จะมีความหยาบของพื้นผิว เท่ากับ 0.03 เมตร จัดอยู่ในความหยาบ class 1	10
2.10	พื้นผิวที่เป็นไร่นา มีต้นไม้กระจายเล็กน้อย จะมีความหยาบเท่ากับ 0.10 เมตร จัดอยู่ใน ความหยาบ class 2	10
2.11	พื้นผิวที่ซึ่งประกอบด้วยแนวไม้และพื้นที่โล่งสลับกัน โดยป่าไม้และตัวเมือง หรือหมู่บ้านจะมีความหยาบ 0.40 เมตร จัดอยู่ในความหยาบ class 3	11
2.12	มวลของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A ด้วยความเร็ว V	12
2.13	แอนนิโมมิเตอร์แบบถ้วย	13
2.14	แอนนิโมมิเตอร์แบบกังหันลม	14
2.15	แอนนิโมมิเตอร์แบบแผ่นความดันสี่เหลี่ยม	15
2.16	หลักการทำงานของแอนนิโมมิเตอร์แบบท่อความดัน	15
2.17	แอนนิโมมิเตอร์แบบท่อความดัน	17
2.18	แอนนิโมมิเตอร์แบบโซนิก	17
2.19	แอนนิโมมิเตอร์แบบลวดร้อน ของบริษัท Omni-instruments	19
2.20	โซดาร์ รุ่น Triton ของบริษัท Second Wind	20
2.21	เครื่องวัดทิศทางลม	20
2.22	เสาวัดลมแบบทรงกระบอก	22

รูปที่		หน้า

รูปที่		หน้า
2.23	กราฟแสดงเส้นระดับค่าความเร็วลมที่เท่ากัน (isovent) ของลมรอบเสาวัดลมแบบทรงกระบอก เมื่อมีลมพัดจากด้านซ้ายไปยังเสาวัดลม (ตัวเลขในรูปแสดงอัตราส่วนของความเร็วลม เมื่อมีเสาวัดลมอยู่ต่อค่าความเร็วลมกรณีที่กระแสลมไม่ถูกรบกวนโดยเสาวัดลม ถ้ามีค่าเป็น 1 แสดงว่า ณ ตำแหน่งนั้น กระแสลมไม่ถูกรบกวนโดยเสาวัดลม	22
2.24	เสาวัดลมแบบโครงถัก	23
2.25	กราฟแสดงเส้นระดับค่าความเร็วลมที่เท่ากันรอบเสาวัดลมแบบโครงถัก เมื่อลมพัดจากด้านซ้ายไปทางขวา	23
2.26	ตัวอย่างของการติดตั้งอุปกรณ์วัดลมที่ดี	24
2.27	การเปลี่ยนแปลงระยะสั้นของความเร็วลม..	25
2.28	ตัวอย่างการแปรค่าของความเร็วลมจากสถานีวัด 2 แห่ง	27
2.29	ตัวอย่าง power curve ของกังหันลม	27
2.30	ตัวอย่างการแจกแจงของความเร็วลมใน 1 เดือน	28
2.31	ตัวอย่างการแจกแจงสะสมของความเร็วลมใน 1 เดือน	28
2.32	การแจกแจงของ Weibull ในรูปของฟังก์ชันความน่าจะเป็น....................	30
2.33	แสดงการแจกแจงสะสมของ Weibull	31
2.34	การแจกแจงความเร็วลมของ Weibull ที่ shape factor (k) ค่าต่างๆ	32
2.35	การแจกแจงสะสมของ Weibull ที่ shape factor (k) ค่าต่างๆ....................	32
2.36	แสดงตัวอย่างกราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\{-\ln[1-F(V)]\}$ กับ ln(V) ..	35
2.37	การเปรียบเทียบกราฟการแจกแจงสะสมซึ่งได้จากค่า k และ A ที่หาจากวิธีการใช้กราฟ	37
2.38	แผนที่ลมของภาคตะวันตกเฉียงใต้ของมลรัฐออนตาริโอ ประเทศแคนาดา	41
2.39	แผนที่ลมของสหภาพยุโรป	42
2.40	แผนที่ลมของประเทศศรีลังกาที่สร้างโดยการใช้แบบจำลองบรรยากาศ	44
2.41	แผนที่ลมที่ระดับ 50 เมตรของรัฐ Newfoundland ประเทศแคนาดา............	45
2.42	แผนที่ลมที่ระดับ 30 เมตรของประเทศบังคลาเทศ................................	46
2.43	แผนที่ลมของประเทศอียิปต์..	47
2.44	แผนที่ลมเฉลี่ยของเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ของ Exell และคณะฯ	48
2.45	แผนที่ลมที่พัฒนาโดย Suwantragul และคณะฯ	49

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

รูปที่ หน้า

2.46 แผนที่ลมของประเทศไทย ของกรมพัฒนาพลังงานและส่งเสริมพลังงาน 50
2.47 แผนที่ลมของ World Bank 51
2.48 ตัวอย่างแผนที่ลม (เดือนมิถุนายน 2548) ที่ดำเนินการโดย รัดเกล้า พันธุอร่าม และคณะฯ 52
2.49 ตัวอย่างแผนที่ลมที่ระดับความสูง 100 เมตร ซึ่งดำเนินการโดย เกษมสันต์ มโณมัยพิบูลย์ และคณะฯ 53
2.50 ลมเหนือทะเลบอลติกในช่วงวันที่ 4 พฤษภาคม 1997 54
2.51 ความเร็วลมเฉลี่ยรายปีเหนือทะเลบอลติก ที่ระดับความสูง 48 เมตรเหนือผิวน้ำทะเล 55
2.52 ความเร็วลมนอกชายฝั่งในบริเวณทุ่งกังหันลม Nysted ทางตอนใต้ของเดนมาร์ก 56
2.53 ความเร็วลมนอกชายฝั่งทางตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศบราซิล ที่ระดับความสูง 80 เมตรเหนือระดับน้ำ 57
3.1 แผนภูมิแสดงกระบวนการจัดทำแผนที่ลมในประเทศไทยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 60
3.2 ตัวอย่างการแบ่งบรรยากาศเหนือประเทศไทยออกเป็นกริด (grid) ใน 3 มิติ...... 65
3.3 ขอบเขตโดเมนการคำนวณของภาคเหนือ 66
3.4 ขอบเขตโดเมนการคำนวณของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 66
3.5 ขอบเขตโดเมนการคำนวณของภาคกลาง 67
3.6 ขอบเขตโดเมนการคำนวณของภาคใต้ 67
3.7 โดเมนของการคำนวณและการทับซ้อนกันของแต่ละโดเมน 68
3.8 ตัวอย่างของข้อมูลสภาวะของบรรยากาศ (basic state atmospheric data) ที่จะเป็นอินพุทของแบบจำลอง 69
3.9 แผนที่ความหยาบของพื้นผิวของประเทศไทย 70
3.10 แผนที่ระดับความสูงของประเทศไทย 72
3.11 แผนภูมิแสดงการคำนวณความเร็วลมและตัวแปรอื่นๆ ของแบบจำลอง.......... 73
3.12 ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ NEC รุ่น SX8 ของศูนย์คอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรูห์ 75
3.13 ผู้วิจัยเข้าร่วมฝึกอบรมการใช้ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ที่สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรูห์ 75
3.14 การรวมความเร็วลมในแนว-เหนือใต้ (v_i) และแนวตะวันออก-ตะวันตก (u_i) เพื่อหาเวกเตอร์ลัพธ์ของความเร็ว (s_i).. 76

รูปที่		หน้า
3.15	ตัวอย่างผลการคำนวณลมระดับสเกลปานกลางที่เวลาต่างๆ ในวันที่ 23 สิงหาคม 2547	77
3.16	ตัวอย่างผลการคำนวณลมระดับสเกลปานกลางที่เวลาต่างๆ ในวันที่ 17 ธันวาคม 2544	78
3.17	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการเปรียบเทียบข้อมูลลมที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางและข้อมูลลมจากการวัด	80
3.18	สถานีวัดลมของกรมควบคุมมลพิษ	81
3.19	แผนภูมิสิ่งกีดขวางทางลมรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษ ที่มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่..................	82
3.20	แผนภูมิสิ่งกีดขวางทางลมรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษ ที่อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น......................................	83
3.21	แผนภูมิสิ่งกีดขวางทางลมรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษ ที่เขตจตุจักร กรุงเทพฯ...	84
3.22	แผนภูมิสิ่งกีดขวางทางลมรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษ ที่โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่จังหวัดสงขลา............	84
3.23	แผนที่ความหยาบ (Microscale roughness map) โดยรอบเสาวัดลม ของกรมควบคุมมลพิษที่มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ พื้นที่ส่วนใหญ่ในรูปเป็นพื้นที่เกษตรกรรมแบบเปิดโล่ง มีแหล่งชุมชนกระจายตัวอยู่ทั่วไปและมีอ่างเก็บน้ำหรือแหล่งน้ำบ้างเล็กน้อย (ตัวเลขที่ระบุ คือ ค่าความหยาบเป็นเซนติเมตร)..	85
3.23	แผนที่ความหยาบโดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่องค์การสื่อสารมวลชนแห่งประเทศไทย อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรมแบบเปิดโล่ง มีแนวแม่น้ำ และแหล่งน้ำพาดผ่านจากทิศใต้ถึงตะวันตกและทางตะวันออกเฉียงเหนือ มีแหล่งชุมชนกระจายตัวอยู่บ้างเล็กน้อย	86
3.25	แผนที่ความหยาบโดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่เขตจตุจักร กรุงเทพฯ พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นชุมชนเมือง มีแนวแม่น้ำและคลองประปาพาดผ่าน มีสวนสาธารณะ ซึ่งเป็นพื้นที่โล่งที่มีต้นไม้บ้างประปราย	86

รูปที่ หน้า

3.26 แผนที่ความหยาบโดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรมแบบเปิดโล่งมีแนวแม่น้ำพาดผ่านตรงกลางและทะเลสาบขนาดใหญ่ทางตอนเหนือ มีชุมชนขนาดเล็กและพื้นที่โล่งแบบมีแนวปิดล้อมทางทิศตะวันออกเฉียงใต้............................ 87

3.27 แผนที่ระดับความสูงโดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 88

3.28 แผนที่ระดับความสูงโดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่องค์การสื่อสารมวลชนแห่งประเทศไทย อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 88

3.29 แผนที่ระดับความสูงโดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่เขตจตุจักรกรุงเทพฯ 89

3.30 แผนที่ระดับความสูงโดยรอบเสาวัดลม ที่โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 89

3.31 การเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ของลมที่พัดผ่านจากพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่งซึ่งมีความหยาบต่างกัน 90

3.32 การเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ของลมที่พัดผ่านสิ่งกีดขวาง 91

3.33 เปอร์เซ็นต์การลดลงของความเร็วลมหลังสิ่งกีดขวาง 92

3.34 การเปลี่ยนแปลงของกระแสลมที่พัดผ่านเนินเขา 93

3.35 การวัดลมที่เนินเขาซึ่งมีความสูง 123 เมตรบนเกาะ South Uist ในสกอตแลนด์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมที่พัดผ่านเนินเขา 93

3.36 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมที่พัดผ่านเนินเขา Askervein ที่ความสูงจากพื้น 10 เมตร ทั้งผลจากการวัดและการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง 94

3.37 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลมที่พัดผ่านเนินเขา 94

3.38 การเปรียบเทียบความเร็วลมในสภาวะทั่วไปที่ระดับความสูง 100 เมตร ที่ได้จากแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง (V_{model}) กับความเร็วลมในสภาวะทั่วไปที่ได้จากข้อมูลจากการวัด (V_{meas}) เฉลี่ยรายเดือนจากสถานีวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่จังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา 96

3.39 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนมกราคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 98

3.40 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนกุมภาพันธ์ ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก....... 99

รูปที่		หน้า

3.41 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนมีนาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 100
3.42 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนเมษายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก.......... 101
3.43 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนพฤษภาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 102
3.44 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนมิถุนายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก......... 103
3.45 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนกรกฎาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก........ 104
3.46 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนสิงหาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 105
3.47 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนกันยายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก......... 106
3.48 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนตุลาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 107
3.49 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนพฤศจิกายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 108
3.50 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนธันวาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก......... 109
3.51 แผนที่ลมเฉลี่ยระยะยาวที่ระดับความสูง 90 เมตร 110
3.52 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับ
เดือนมกราคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 114
3.53 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับ
เดือนกุมภาพันธ์ ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 115
3.54 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับ
เดือนมีนาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 116
3.55 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับ
เดือนเมษายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 117
3.56 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับ
เดือนพฤษภาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 118
3.57 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับ
เดือนมิถุนายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 119
3.58 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับ
เดือนกรกฎาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก................ 120
3.59 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับ
เดือนสิงหาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 121
3.60 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับ
เดือนกันยายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 122

รูปที่ หน้า

3.61 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนตุลาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 123

3.62 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนพฤศจิกายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 124

3.63 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนธันวาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก 125

3.64 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยระยะยาวในประเทศไทยที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก............................... 126

3.65 แผนภูมิแสดงการหาพื้นที่ที่เหลือ เมื่อหักพื้นที่ตามเงื่อนไขต่างๆ ออก โดยใช้โปรแกรม ArcGIS 128

3.66 แผนที่แสดงพื้นที่ความเร็วลมที่ระดับความสูง 90 เมตรหลังจากหักพื้นที่เขตชุมชน เส้นทางคมนาคม แหล่งน้ำ พื้นที่ลุ่มน้ำ ป่าอนุรักษ์ อุทยานแห่งชาติและโบราณสถาน.. 129

3.67 แผนที่ในรูปของ shapefile ของความเร็วลมนอกชายฝั่งเฉลี่ยระยะยาว ที่ความสูง 90 เมตร 131

3.68 แผนที่ในรูป shapefile ของระดับความลึกของน้ำทะเล.......................... 132

3.69 แผนที่ในรูป shapefile ของตำแหน่งอุทยานธรรมชาติทางทะเล................. 133

3.70 แผนที่ในรูป shapefile ของตำแหน่งแท่นขุดเจาะก๊าซธรรมชาติและแนวท่อส่งก๊าซ 133

3.71 แผนที่ในรูป shapefile ของแผนที่เครือข่ายสายส่งในบริเวณชายฝั่ง 134

3.72 แผนที่ในรูป shapefile ของแหล่งชุมชนชายฝั่ง....................................... 135

3.73 แผนที่แสดงพื้นที่ความเร็วลมนอกชายฝั่งมากกว่า 5 m/s ที่ระดับความสูง 90 เมตรหลังจากหักพื้นที่ที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้............................ 136

3.74 การกระจายความเร็วลมบนเกาะพะลวยจากแผนที่ลมระดับสเกลปานกลาง...... 138

3.75 ความสูงต่ำของพื้นที่บนเกาะพะลวยในระดับไมโครสเกลความละเอียดเชิงพื้นที่ 90 x 90 ตารางเมตร................................ 139

3.76 ความหยาบของพื้นผิวบนเกาะพะลวยในระดับไมโครสเกลความละเอียดเชิงพื้นที่ 90 x 90 ตารางเมตร................................ 139

3.77 ความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนบนพื้นที่เกาะพะลวย ที่ระดับความสูง 50 เมตรเหนือพื้นดิน ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 90 x 90 เมตร^2 141

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

รูปที่		หน้า

3.78 ความเร็วลมเฉลี่ยระยะยาวบนพื้นที่เกาะพะลวยที่ระดับความสูง 50 เมตร เหนือพื้นดิน ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 90 x 90 เมตร^2 142

สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ค่าความหยาบของพื้นผิวลักษณะต่างๆ.. 11

3.1 สถานีวัดลมทั้ง 4 แห่งของกรมควบคุมมลพิษที่เลือกใช้สำหรับการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลอง........................... 81

3.2 ผลการคำนวณพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยสูงกว่า 6 m/s ที่ระดับความสูง 90 เมตร ซึ่งห่างจากสถานีไฟฟ้าย่อยไม่เกิน 10 กิโลเมตร และหักลบพื้นที่หวงห้ามต่างๆ ออกแล้ว.. 130

3.3 พื้นที่นอกชายฝั่งซึ่งมีความเร็วลมมากกว่า 5 m/s ที่ความสูง 90 เมตร เหนือผิวน้ำและไม่อยู่ในเขตหวงห้ามต่างๆ 137

สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) หลักของโลก ประเทศต่างๆ ทั่วโลกทำการติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าแล้วประมาณ 159,000 เมกะวัตต์ ส่วนใหญ่อยู่ในเขตละติจูดปานกลางและละติจูดสูง กล่าวคือ อยู่ในละติจูดสูงกว่า 30^{o}N (World Wind Energy Association, 2010) ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว โดยมีการผลิตกังหันลมในเชิงพาณิชย์ในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา เดนมาร์ก เยอรมัน อินเดีย และจีน เป็นต้น โดยทั่วไปพลังงานในกระแสลมแปรตามกำลังสามของความเร็วลม และความเร็วลมดังกล่าวแปรตามลักษณะภูมิประเทศและสภาวะทางอุตุนิยมวิทยา ดังนั้นโดยทั่วไปศักยภาพพลังงานลมของแต่ละพื้นที่จึงมีความแตกต่างกัน ในการเลือกพื้นที่สำหรับใช้พลังงานลมเพื่อผลิตไฟฟ้าหรือใช้พลังงานลมในรูปแบบอื่นๆ อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการกระจายตามพื้นที่ของความเร็วลมเฉลี่ยในรูปของแผนที่ลม

แผนที่ดังกล่าวจะสามารถใช้เป็นแนวทางในการหาบริเวณที่มีศักยภาพในการพัฒนาพลังงานลมเหมาะสมในการดำเนินการดังกล่าว ดังนั้นในประเทศต่างๆ ที่สนใจใช้ประโยชน์จากพลังงานลมจึงได้ทำการจัดทำแผนที่ลม ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ระดับประเทศหรือระดับภูมิภาค (Troen and Peterson, 1989; Mortensen et al., 2005; Khan and Iqbal, 2004) สำหรับกรณีประเทศไทยในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา หน่วยงานต่างๆได้ทำการศึกษาศักยภาพพลังงานลมและนำมาจัดแสดงในรูปแผนที่หลายครั้ง (Exell, 1981; Suwantrakul et al., 1984; กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2542) โดยที่แผนที่ลมในช่วงแรกจะใช้บอกแนวโน้มของความเร็วลมในพื้นที่ต่างๆ อย่างคร่าวๆ เท่านั้น ต่อมาภายหลังได้มีการใช้แบบจำลองบรรยากาศ (atmospheric model) มาคำนวณความเร็วลมและนำมาจัดแสดงในรูปแผนที่ แต่แผนที่เหล่านี้ได้จากการคำนวณความเร็วลมระยะสั้นเป็นเดือนๆ หรือคำนวณเพียง 1 ปีเท่านั้น เนื่องจากความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปีต่างๆ แผนที่ดังกล่าวจึงไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนสภาวะของความเร็วลมเฉลี่ยระยะยาวในประเทศไทยได้ ดังนั้นผู้วิจัยเสนอที่จะพัฒนาแผนที่ลมของประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง ซึ่งใช้ข้อมูลระยะยาว 15 ปี เพื่อให้ได้แผนที่ลมที่สามารถใช้บอกศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยได้ชัดเจนขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อคำนวณความเร็วลมในประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง
2) เพื่อสร้างแผนที่ลมของประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลลมที่คำนวณได้จากแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง
3) เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ซึ่งมีศักยภาพเหมาะสำหรับการส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากพลังงานลม

สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยศิลปากร

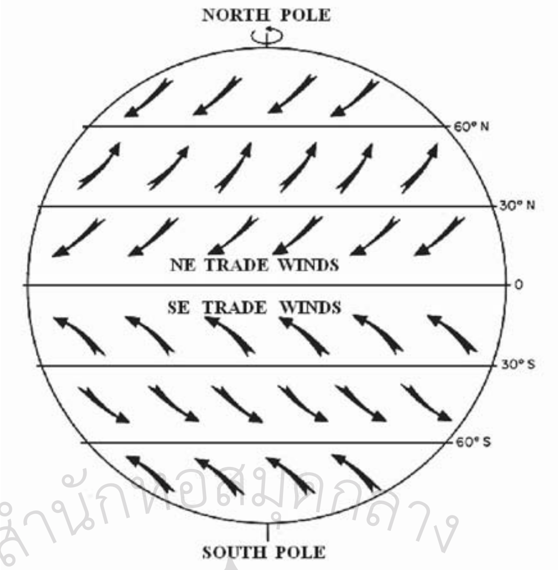
บทที่ 2
หลักทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดลม

ลม คือ การเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวราบ การเคลื่อนที่ดังกล่าวเกิดจากความแตกต่างของความดันบรรยากาศที่จุดต่างๆ ในบรรยากาศของโลก ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิของบรรยากาศที่แตกต่างกัน โดยบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง อากาศจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ความหนาแน่นของอากาศที่แตกต่างกันนี้ ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันบรรยากาศ ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลอากาศและเกิดลมพัดขึ้น โดยทั่วไปความแตกต่างของอุณหภูมิของบรรยากาศมีปัจจัยหลักมาจากความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบในบริเวณต่างๆ ของโลกไม่เท่ากัน และสมบัติในการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์และการเก็บกักความร้อนของพื้นผิวโลกที่แตกต่างกัน กระแสอากาศจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่ความดันสูงไปสู่บริเวณที่มีความดันต่ำ ในระหว่างการเคลื่อนที่อาจมีการเปลี่ยนความเร็วและทิศทางเนื่องมาจากสิ่งกีดขวางทางลม และแรงกระทำต่างๆ เช่น แรงเนื่องมาจากการหมุนของโลก (Coriolis force) เป็นต้น

2.1.1 ลมในระดับสเกลต่างๆ

บริเวณศูนย์สูตรของโลกจะได้รับรังสีดวงอาทิตย์ที่สูงกว่าบริเวณขั้วโลก ทำให้อากาศบริเวณศูนย์สูตรมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณขั้วโลกและลอยตัวสูงขึ้น อากาศดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณขั้วโลกและเย็นตัวลง แล้วเคลื่อนที่ลงมายังพื้นผิวโลก จากนั้นจะไหลเวียนกลับไปสู่บริเวณศูนย์สูตรอีกครั้ง เนื่องจากโลกหมุนจากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออก การหมุนนี้จะเสมือนมีแรงมากระทำกับกระแสอากาศที่เคลื่อนที่ในบรรยากาศของโลก เราเรียกแรงดังกล่าวว่า แรงเนื่องมาจากการหมุนของโลก (Coriolis force) โดยแรงนี้จะทำให้กระแสอากาศเคลื่อนที่จากศูนย์สูตรไปยังขั้วโลกทั้งสองเบี่ยงเบนไปทางทิศตะวันออก และกระแสอากาศที่เคลื่อนที่จากบริเวณขั้วโลกมายังศูนย์สูตรเบี่ยงเบนไปทางทิศตะวันตก ทำให้เกิดลมที่เรียกว่า “ลมสินค้า” (trade wind) สำหรับบริเวณเหนือเส้นละติจูดที่ 30°N และใต้ละติจูด 30°S จะมีการไหลของอากาศจากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออกตามทิศการหมุนของโลก การไหลของอากาศดังกล่าวข้างต้นนี้ทำให้เกิดลมในสเกลใหญ่ระดับโลก (planetary-scale motion) (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 การไหลเวียนของอากาศในบรรยากาศโลก

เมื่อลมในสเกลใหญ่ระดับโลกพัดผ่านบริเวณต่างๆ ของโลก จะได้รับอิทธิพลจากลักษณะพื้นผิวโลกและความแตกต่างของการกักเก็บความร้อนของพื้นดินและทะเล ทำให้ขนาดและทิศทางลมเปลี่ยนแปลงไป โดยจะทำให้เกิดลมที่มีขนาดสเกลที่เล็กลง ถ้าอิทธิพลดังกล่าวอยู่ในระดับหลายร้อยกิโลเมตรจนถึงพันกิโลเมตร จะเรียกลมที่อยู่ในสเกลดังกล่าวว่า ลมในระดับสเกลซินอบติก (synoptic-scale wind)

กรณีของลมที่ได้รับอิทธิพลในท้องถิ่นในระดับสิบกิโลเมตรถึงร้อยกิโลเมตร เช่น อิทธิพลจากภูเขาและทะเลสาบ เป็นต้น จะเรียกว่า ลมในระดับสเกลปานกลาง (meso-scale wind) สำหรับลมที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลในท้องถิ่นระดับเล็กๆ และมีการพัดในบริเวณแคบหรือระดับน้อยกว่าหนึ่งกิโลเมตร โดยลมดังกล่าวจะได้รับผลกระทบจากสิ่งกีดขวางต่างๆ ซึ่งมีขนาดเล็ก เช่น แนวต้นไม้ อาคาร สิ่งปลูกสร้าง ช่องเขา และหุบเขาแคบๆ จะเรียกลมนี้ว่าเป็นลมในระดับสเกลเล็ก (micro-scale wind)

2.1.2 การใช้ตัวบ่งชี้สภาวะลมทางธรรมชาติ

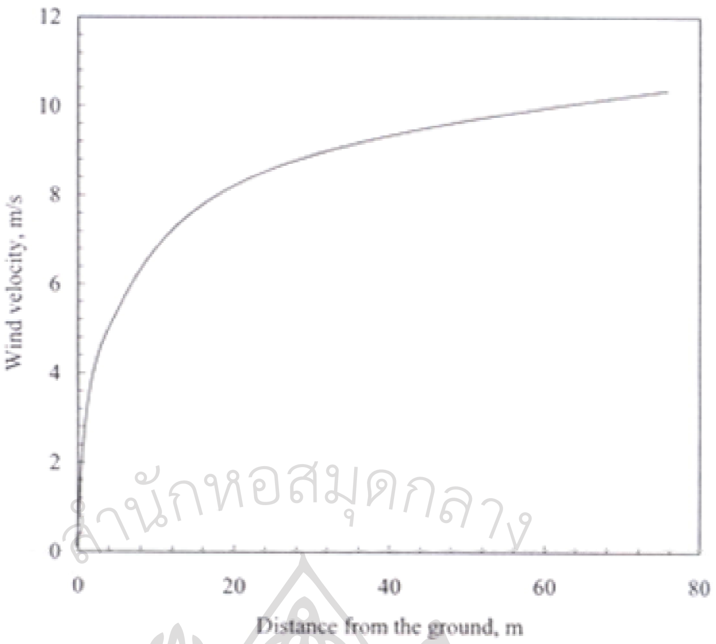
สภาพทางธรรมชาติสามารถบ่งบอกถึงสภาวะของลมในบริเวณนั้นๆได้ ว่ามีความแรงมากน้อยเพียงใด โดยการดูจากการก่อตัวของพื้นผิวตามธรรมชาติ ตัวอย่างเช่นการสังเกตเนินทราย เม็ดทรายจะถูกพัดพาโดยลมที่พัดผ่านและไปกองรวมในบริเวณที่ลมเคลื่อนที่ช้าลง ขนาดของเม็ดทรายและระยะทางที่ถูกพัดพาไปจะแสดงแนวโน้มความแรงของลมเฉลี่ยในบริเวณนั้น

นอกจากนี้เรายังสามารถสังเกตความแรงของลมจากสภาพของต้นไม้ในบริเวณที่มีกระแสลมแรงพัดผ่านอย่างต่อเนื่อง โดยลักษณะของกิ่งก้านจะลู่ไปตามลม ซึ่งแตกต่างจากต้นไม้ทั่วไป ดังนั้นหากเราสังเกตสภาพของต้นไม้ และเนินทราย จะสามารถบอกได้คร่าวๆ ว่าในบริเวณดังกล่าวน่าจะมีลมพัดผ่านอย่างไร

รูปที่ 2.2 ลักษณะของต้นไม้ ซึ่งอยู่ในบริเวณที่มีลมแรงพัดผ่านประจำ

2.1.3 การแปรค่าความเร็วลมตามความสูง

เนื่องจากกระแสลมที่พัดเหนือพื้นผิวโลกจะถูกหน่วงให้ช้าลงตามความเสียดทานของพื้นผิว และสิ่งที่ปกคลุมพื้นผิวโลก เช่น ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ทำให้ความเร็วลมที่แปรค่าตามความสูงจากพื้นผิวโลก มีลักษณะทั่วไปตามกราฟรูปที่ 2.3



สำนักหอสมุดกลาง

รูปที่ 2.3 การแปรค่าของความเร็วลมตามความสูงจากพื้นผิวโลก

การแปรค่าของความเร็วลมตามความสูงจะขึ้นกับความหยาบ (roughness) ของพื้นผิวโลกและความสูง ในกรณีของพื้นผิวที่ราบ และไม่คิดผลจากอุณหภูมิของพื้นผิว เราสามารถเขียนการแปรค่าของความเร็วลมตามความสูงในรูปสมการได้ ดังนี้

$$V(Z_R) = V(Z)\frac{\ln\frac{Z_R}{Z_0}}{\ln\frac{Z}{Z_0}} \tag{2.1}$$

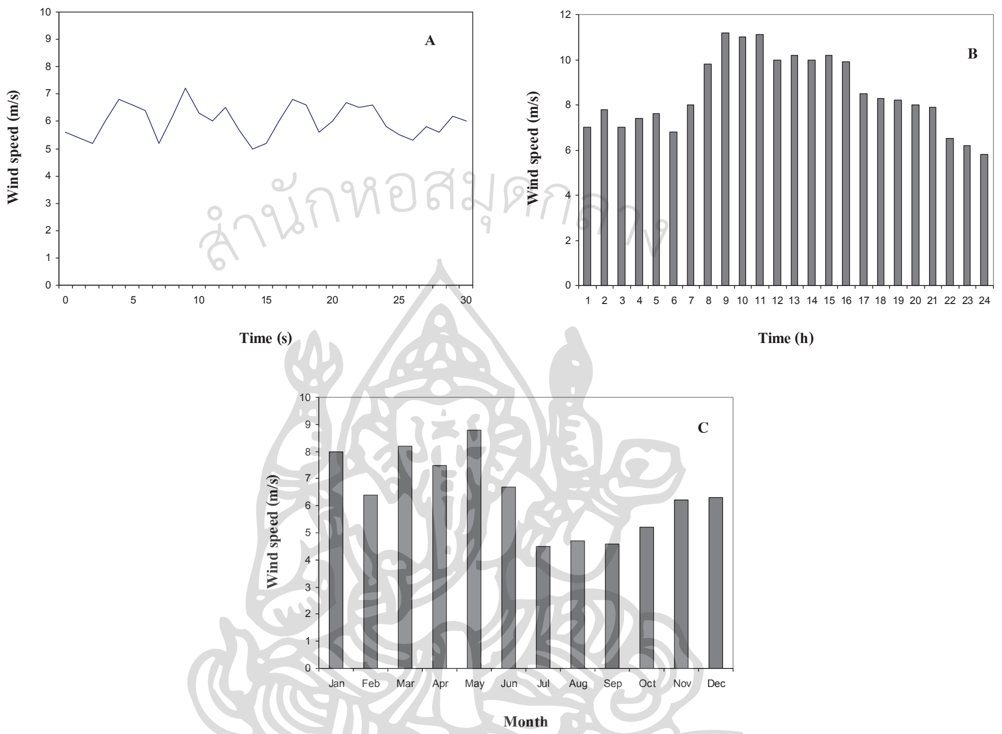
โดยที่ $V(Z_R)$ = ความเร็วลมที่ความสูง Z_R ซึ่งต้องการหา

$V(Z)$ = ความเร็วลมที่ความสูง Z ซึ่งทราบค่า

Z_0 = roughness height

2.1.4 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมตามเวลา

ความเร็วและทิศทางของลมจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งทำให้กำลังและพลังงานที่ได้จากลมเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ในช่วงเวลาหนึ่งของวัน หรือการเปลี่ยนแปลงในรอบวันและการเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล

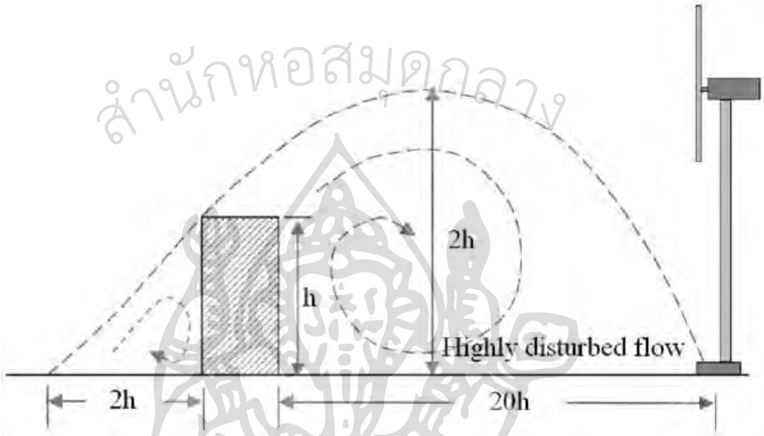


รูปที่ 2.4 การแปรค่าของความเร็วลมตามเวลา

รูปที่ 2.4(A) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในช่วงเวลา 30 วินาที ซึ่งจะสังเกตได้ว่าความเร็วลมจะมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 5.1 เมตรต่อวินาทีถึง 7.2 เมตรต่อวินาที ในช่วงเวลาเพียง 30 วินาที การเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมดังกล่าวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศอย่างรวดเร็ว สำหรับการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบวัน (diurnal variation) (รูปที่ 2.4 (B)) ส่วนใหญ่เกิดจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสองบริเวณอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในรอบวัน ในด้านของการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมตามฤดูกาล (รูปที่ 2.4 (C)) จะเป็นผลมาจากความแตกต่างของรังสีดวงอาทิตย์ที่บริเวณต่างๆ ของโลกได้รับ ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

2.1.5 ความปั่นป่วนของลม

ความเร็วและทิศทางของลมเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วเมื่อพัดผ่านพื้นผิวขรุขระ อาคาร ต้นไม้ และสิ่งกีดขวางต่างๆ การเปลี่ยนแปลงความเร็วและทิศทางของลมดังกล่าวเกิดมาจากความปั่นป่วน (turbulence) ของการไหล รูปที่ 2.5 แสดงเส้นทางการเกิดความปั่นป่วนในบริเวณเหนือลมและใต้ลมของสิ่งกีดขวาง การเกิดความปั่นป่วนนี้ไม่เพียงแต่จะลดกำลังในกระแสลมแต่ยังลดแรงกระทำต่อกังหันลมลงด้วย

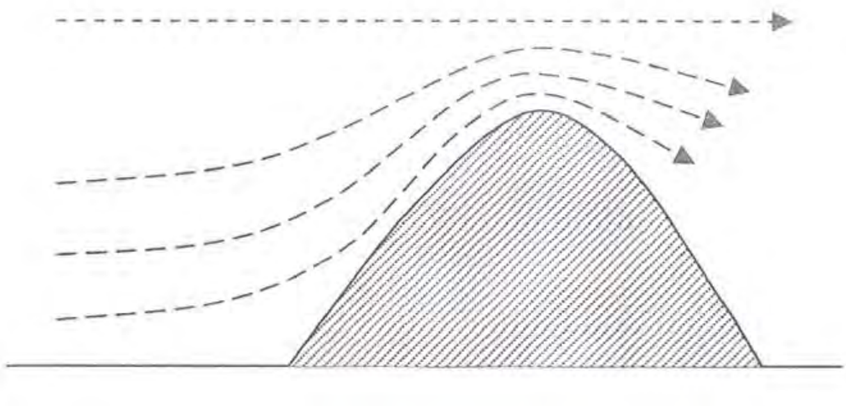


รูปที่ 2.5 การเกิดความปั่นป่วนของลมเมื่อผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆ

ความรุนแรงของความปั่นป่วนขึ้นอยู่กับขนาดและรูปทรงของสิ่งกีดขวาง ในทางธรรมชาติ บริเวณการเกิดความปั่นป่วนมีผลในแนวตั้งประมาณ 2 เท่าของความสูงของสิ่งกีดขวางและส่งผลในแนวราบ 10-20 เท่าทางด้านใต้ลม ดังนั้นก่อนทำการติดตั้งกังหันลม จะต้องมีการพิจารณาสิ่งกีดขวางต่างๆ รอบพื้นที่ที่จะทำการติดตั้งกังหันลม โดยพื้นที่ดังกล่าวควรจะอยู่ในตำแหน่งที่ปราศจากความปั่นป่วน

2.1.6 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลม

สิ่งกีดขวางที่โค้งมนจะเร่งกระแสลมที่พัดผ่าน (รูปที่ 2.6) การเร่งนี้เกิดจากการบีบอัดของอากาศเหนือส่วนโค้งนี้ ขนาดและทิศทางของความเร็วจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของส่วนโค้ง เราสามารถใช้ผลกระทบดังกล่าวในการช่วยเพิ่มพลังงานให้กับกังหัน พื้นลาดที่ทำมุมกับแนวราบ 6-16 องศา จะช่วยเพิ่มความเร็วลม สำหรับพื้นลาดที่ทำมุมมากกว่า 27 องศา หรือน้อยกว่า 3 องศา จะไม่ช่วยเร่งกระแสลม



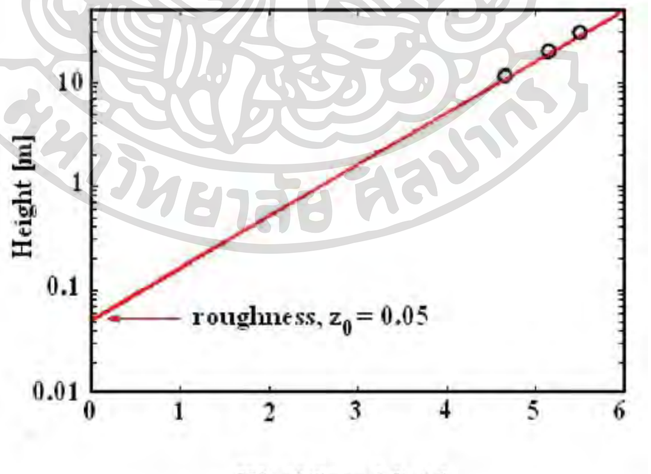
รูปที่ 2.6 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลม เมื่อพัดขึ้นเนินเขา

สำนักหอสมุดกลาง

2.2 ความหยาบของพื้นผิวโลก

ความหยาบ (roughness) ของพื้นผิวโลกจะบอกสภาพของสิ่งที่ปกคลุมพื้นผิวโลกที่เป็นของแข็ง เช่น พืช ต้นไม้ หมู่บ้าน ตัวเมือง และพื้นน้ำ เป็นต้น สภาพของสิ่งปกคลุมพื้นผิวโลกมีผลต่อความเร็วลมที่พัดผ่าน โดยทั่วไปจะเป็นตัวหน่วงให้ความเร็วลมต่ำลง โดยจะบอกปริมาณของความหยาบในรูปของ roughness length ซึ่งกำหนดขึ้นดังนี้

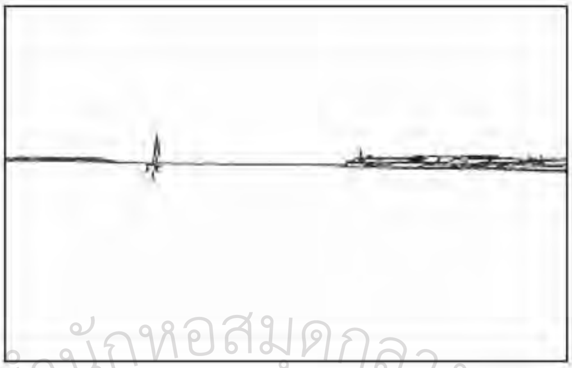
เมื่อมีลมพัดผ่านสิ่งปกคลุมพื้นผิวโลกชนิดหนึ่ง ความเร็วลมจะเปลี่ยนแปลงตามความสูงตามรูปที่ 2.7 (Troen and Petersen, 1989)



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมตามความสูง

หากลากเส้นกราฟตัดแกนตั้งจะได้ค่าความสูงที่ทำให้ความเร็วลมเป็นศูนย์ โดยจะเรียก ค่าความสูงนี้ว่า roughness length ซึ่งมีหน่วยเป็นเซนติเมตร จากการศึกษาของนักวิจัยต่างๆ พบว่า roughness length ของสิ่งปกคลุมพื้นผิวโลก สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 (Troen and Petersen,

1989) และมีการกำหนด class ของสิ่งปกคลุมพื้นผิวต่างๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.8-2.11 (Troen and Petersen, 1989)



รูปที่ 2.8 พื้นผิวน้ำ เช่น ทะเล มหาสมุทร อ่างเก็บน้ำ และทะเลสาบ มีความหยาบ (Z_0) เป็น 0.0002 เมตร และจัดอยู่ในความหยาบ class 0

รูปที่ 2.9 พื้นที่โล่งและเรียบ ไม่มีสิ่งกีดขวางทางลม เช่น ทุ่งนา จะมีความหยาบของพื้นผิวเท่ากับ 0.03 เมตร จัดอยู่ในความหยาบ class 1

รูปที่ 2.10 พื้นผิวที่เป็นไร่นา มีต้นไม้กระจายเล็กน้อย จะมีความหยาบเท่ากับ 0.10 เมตร จัดอยู่ในความหยาบ class 2

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

รูปที่ 2.11 พื้นผิวที่ซึ่งประกอบด้วยแนวไม้และพื้นที่โล่งสลับกัน โดยป่าไม้และตัวเมืองหรือหมู่บ้าน จะมีความหยาบ 0.40 เมตร จัดอยู่ในความหยาบ class 3

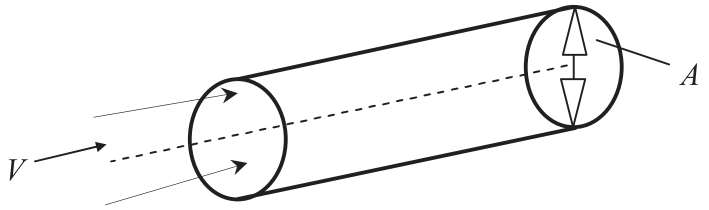
สำนักหอสมุดกลาง

ตารางที่ 2.1 ค่าความหยาบของพื้นผิวลักษณะต่างๆ (Troen and Petersen, 1989)

z_0 [m]	Terrain surface characteristics	Roughness class
1.00	city forest	
0.50	suburbs	3
0.30	shelter belts	
0.20	many trees and/or bushes	
0.10	farmland with closed appearance	2
0.05	farmland with open appearance	
0.03	farmland with very few buildings, trees *etc.* airport areas with buildings and trees	1
0.01	airport runway areas mown grass	
$5 \cdot 10^{-3}$	bare soil (smooth)	
10^{-3}	snow surfaces (smooth)	
$3 \cdot 10^{-4}$	sand surfaces (smooth)	0
10^{-4}	water areas (lakes, fjords, open sea)	

2.3 พลังงานของกระแสลม

ลมเป็นมวลของอากาศที่เคลื่อนที่ ดังนั้นลมจึงมีพลังงานจลน์ (kinetic energy) ถ้าพิจารณามวลของอากาศเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A ด้วยความเร็ว V ตามรูปที่ 2.12



สำนักหอสมุดกลาง

รูปที่ 2.12 แสดงมวลของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A ด้วยความเร็ว V

เราสามารถคำนวณค่าอัตราการไหลของมวลอากาศได้ดังสมการ

$$\dot{m} = \rho_a A V \tag{2.2}$$

เมื่อ $\dot{m}$ = อัตราการไหลของมวลอากาศ [kg/s]

ρ_a = ความหนาแน่นอากาศ [kg/m^3]

A = พื้นที่หน้าตัดที่มวลอากาศไหลผ่าน [m^2]

V = ความเร็วของมวลอากาศ [m/s]

เนื่องจากพลังงานจลน์ของมวล m ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V จะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}mV^2$ ดังนั้นพลังงานจลน์ที่เกิดจากมวลอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัด A จึงสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$P_K = \left[\frac{1}{2}(\rho AV)V^2\right] = \left[\frac{1}{2}(\rho AV^3)\right] \tag{2.3}$$

เมื่อ P_K = พลังงานจลน์ของอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A [W/m^2]

ถ้าพิจารณาสมการ (2.3) จะเห็นว่าพลังงานลมที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A ต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรือกำลังของลม (wind power, P) จะมีค่าแปรตามความเร็วลมยกกำลังสาม ดังนั้นค่าความเร็ว

ลมจึงมีผลต่อกำลังของลมมาก อาทิเช่น กรณีที่ค่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลม ±10 % จะทำให้ค่ากำลังลมเปลี่ยนแปลง ± 30 % หรือมากกว่า

2.4 เครื่องวัดความเร็วลม

เครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วลมจะเรียกว่า แอนนิโมมิเตอร์ (anemometer) ซึ่งแบ่งได้เป็นชนิดต่างๆ ดังนี้

2.4.1 แอนนิโมมิเตอร์แบบถ้วย

เครื่องวัดลมแบบถ้วย (cup anemometer) เป็นแบบที่แพร่หลายที่สุด โดยประกอบด้วยถ้วยรับลมรูปครึ่งทรงกลม 3-4 ใบ ยึดติดกับแกนหมุนซึ่งตั้งในแนวดิ่ง และเชื่อมต่อกับไดนาโม เมื่อมีลมพัดมาปะทะกับถ้วยดังกล่าวจะทำให้ถ้วยหมุน โดยแรงที่กระทำกับถ้วยจะหาได้จากสมการ

$$F = C\frac{1}{2}A_c\rho_a V^3 \tag{2.4}$$

โดยที่ F = แรงที่กระทำต่อถ้วย (drag force)

C = drag coefficient

A_c = พื้นที่ของถ้วยที่ลมปะทะ

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ

V = ความเร็วลม

ความถี่ในการหมุนจะเป็นปฏิภาคตรงกับความเร็วของลม เนื่องจากแกนหมุนต่อเชื่อมกับไดนาโมไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการหมุนได้ เราสามารถทำการแปลงค่ากระแสไฟฟ้าให้เป็นความเร็วลม โดยการสอบเทียบ

รูปที่ 2.13 แอนนิโมมิเตอร์แบบถ้วย

2.4.2 แอนนิโมมิเตอร์แบบกังหันลม

เครื่องวัดลมแบบกังหันลม (propeller anemometer) จะมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับแบบถ้วย แต่จะต่างตรงที่แกนหมุนของใบพัดจะอยู่ในแนวเดียวกับแนวการพัดของลม เนื่องจากทิศทางของลมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ จึงติดตั้งหางเสือลมเพื่อให้แอนนิโมมิเตอร์หมุนไปในแนวการพัดของลมได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14

รูปที่ 2.14 แอนนิโมมิเตอร์แบบกังหันลม

2.4.3 แอนนิโมมิเตอร์แบบแผ่นความดัน

เครื่องวัดลมแบบแผ่นความดัน (pressure plate anemometer) เป็นเครื่องวัดลมรุ่นแรกๆ จะมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมหรือแผ่นสี่เหลี่ยมวางขวางแนวการพัดของลม เมื่อมีลมมาปะทะก็จะสามารถบอกความแรงของลมจากมุมของแผ่นนี้เทียบกับแนวดิ่ง (รูปที่ 2.15) จากความดันจากลมที่กระทำกับแผ่นรับลม เราสามารถคำนวณหาความเร็วลมได้จากสมการ

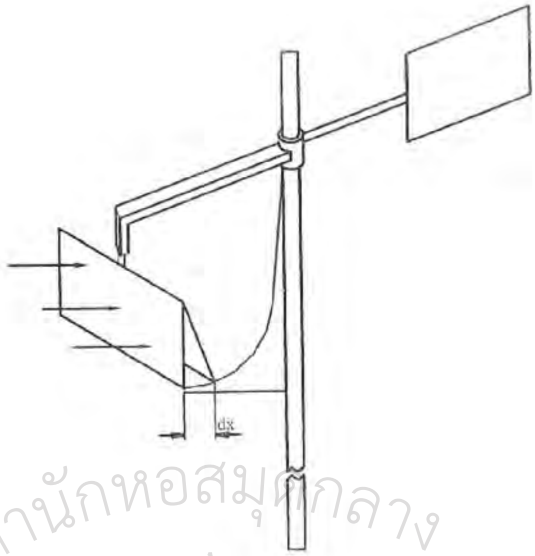
$$P = \frac{1}{2}\rho_a V^3 \qquad (2.5)$$

เมื่อ P = ความดัน

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ

V = ความเร็วลม

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

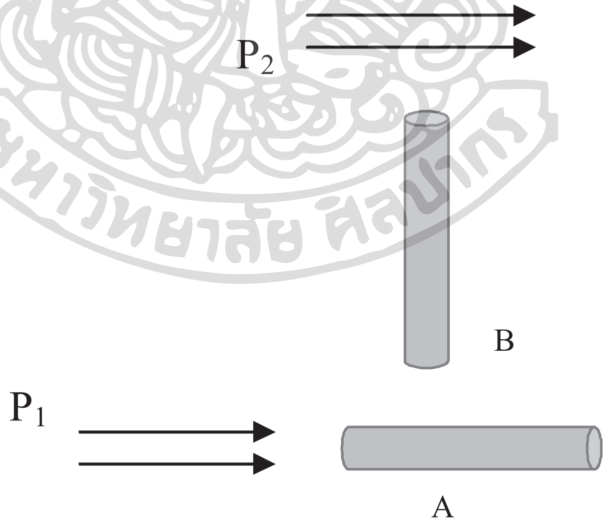


สำนักหอสมุดกลาง

รูปที่ 2.15 แอนนิโมมิเตอร์แบบแผ่นความดันสี่เหลี่ยม

2.4.4 แอนนิโมมิเตอร์แบบท่อความดัน

เครื่องวัดลมแบบท่อความดัน (pressure tube anemometer) ใช้หลักของความแตกต่างของความดันอากาศที่ไหลผ่านท่อ และอากาศที่ไหลตั้งฉากกับท่อ ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงหลักการทำงานของแอนนิโมมิเตอร์แบบท่อความดัน

จากรูปความดันของอากาศในท่อ A จะเท่ากับผลรวมของความดันบรรยากาศ และความดันจากลม หรือ

$$P_1 = P_A + C_1 \frac{1}{2} \rho_a V^3 \qquad (2.6)$$

เมื่อ P_1 = ความดัน

P_A = ความดันบรรยากาศ

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ

V = ความเร็วลม

C_1 = drag coefficient

กรณีของท่อ B ความดันของบรรยากาศภายในท่อจะหาได้จากสมการ

สำนักหอสมุดกลาง

$$P_2 = P_A - C_2 \frac{1}{2} \rho_a V^3 \qquad (2.7)$$

เมื่อ P_2 = ความดันในท่อ B

C_2 = drag coefficient

จากสมการทั้งสองสามารถหาค่า V ได้ดังนี้

$$V = \left[\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_a (C_1 + C_2)} \right]^{0.5} \qquad (2.8)$$

ความดัน P_1 และ P_2 สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวัดความดัน (manometer) ค่า C_1 และ C_2 จะให้มาพร้อมกับเครื่องมือ ดังนั้นเราจึงสามารถหาความเร็วลมได้ ข้อดีของแอนนิโมมิเตอร์แบบนี้ คือ ไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ (moving part) ทำให้ไม่มีปัญหาที่เกิดกลไกการหมุน แต่อาจมีปัญหาของการใช้เก็บข้อมูลระยะยาว อันเกิดจากความชื้น ฝน ใยแมงมุม และแมลงต่างๆ

รูปที่ 2.17 แอนนิโมมิเตอร์แบบท่อความดัน

2.4.5 แอนนิโมมิเตอร์แบบโซนิก

เครื่องวัดความเร็วลมแบบโซนิก (sonic anemometer) จะวัดความเร็วลม โดยการตรวจวัดความเร็วคลื่นเสียงในอากาศ เครื่องวัดจะประกอบด้วยอุปกรณ์ปล่อยและรับคลื่นเสียง ดังรูปที่ 2.18

รูปที่ 2.18 แอนนิโมมิเตอร์แบบโซนิก

ความเร็วของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ตามทิศทางของลมจะเท่ากับผลรวมของความเร็วเสียงในอากาศนิ่งบวกกับความเร็วลม หรือเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$V_1 = V_s + V \tag{2.9}$$

เมื่อ V_s = ความเร็วของเสียงในอากาศนิ่ง

V = ความเร็วลม

V_1 = ความเร็วเสียงที่เคลื่อนที่ตามลม

เมื่อเสียงเคลื่อนที่สวนทิศกับลม จะได้ว่า

สำนักหอสมุดกลาง

$$V_2 = V_s + V \tag{2.10}$$

เมื่อ V_2 = ความเร็วเสียงที่เคลื่อนที่สวนทางกับลม

จากสมการข้างต้น สามารถหาความเร็วลมได้จากสมการ

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{2.11}$$

เครื่องวัดความเร็วลมแบบโซนิก มีข้อดี คือไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ ซึ่งลดปัญหาด้านเครื่องกล และมีความละเอียดในการวัดสูง แต่ราคาค่อนข้างแพง

2.4.6 แอนนิโมมิเตอร์แบบลวดร้อน

เครื่องวัดลมแบบลวดร้อน (hot wire anemometer) จะใช้เส้นลวดเส้นเล็กๆในระดับไมครอน และทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าสภาพแวดล้อม เมื่อมีลมพัดผ่าน จะทำให้เกิด Cooling effect บนเส้นลวดนั้น กล่าวคือทำให้อุณหภูมิของเส้นลวดเปลี่ยนไป ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง ซึ่งจากค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลสืบเนื่องจากลมที่พัดผ่าน โดยทั่วไปแอนนิโมมิเตอร์ประเภทนี้แบ่งได้เป็นสามแบบคือ แบบที่ควบคุมให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (constant current anemometer; CCA) แบบที่ควบคุมให้ความต่างศักย์คงที่ (constant voltage anemometer; CVA) และ แบบที่ควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ (constant temperature anemometer; CTA) ซึ่งตัวแปรต่างๆเหล่านี้หากได้รับการสอบเทียบที่ดีจะนำมาหาค่าความเร็วลมได้

รูปที่ 2.19 แสดงแอนนิโมมิเตอร์แบบลวดร้อน ของบริษัท Omni-instruments

2.4.7 เครื่องวัดลมแบบโซดาร์ (Sodar)

Sodar ย่อมาจาก Sonic detection and ranging แรกเริ่มโซดาร์ (Sodar) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยทางด้านบรรยากาศและในด้านความปลอดภัยของอากาศยาน แต่ในปัจจุบันนี้มีการประยุกต์ใช้ในการศึกษาโปรไฟล์ของลมในแนวดิ่ง หลักการทำงานจะอาศัยการส่งผ่านคลื่นเสียงขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศและตรวจจับคลื่นเสียงที่กระเจิงจากมวลอากาศในชั้นบรรยากาศด้านบนและสะท้อนกลับมาที่เครื่องรับสัญญาณเสียงด้านล่าง การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความเข้มและความถี่ของคลื่นเสียงที่กระเจิงกลับมาจะสามารถบ่งบอกลักษณะความปั่นป่วนของมวลอากาศ ความเร็วลม และทิศทางลมที่ระดับความสูงต่างๆในแนวดิ่งได้ โซดาร์มีข้อได้เปรียบตรงที่สามารถวัดโปรไฟล์ของลมในแนวดิ่งได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งเสาวัดลมสูงๆ และโซดาร์ 1 เครื่องสามารถแสดงโปรไฟล์ของลมที่ระดับความสูงต่างๆเหนือพื้นดินได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งต่างกับกรณีของการติดตั้งแอนนิโมมิเตอร์จะบอกความเร็วลม ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งเท่านั้น ดังนั้นหากต้องการแสดงโปรไฟล์ของลมจำเป็นต้องทำการติดตั้งแอนนิโมมิเตอร์ที่ความสูงต่างๆหลายระดับ นอกจากนั้นโซดาร์ยังสามารถเคลื่อนย้ายไปที่ต่างๆได้ง่าย และไม่จำเป็นต้องทำการติดตั้งเสาสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงเรียกว่า miniSodar อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันระบบโซดาร์ หรือ miniSodar ยังมีราคาสูงมากจึงไม่นิยมนำมาใช้ในการวัดความเร็วและทิศทางลม ถึงแม้จะมีความแม่นยำสูงก็ตาม

รูปที่ 2.20 โซดาร์ รุ่น Triton ของบริษัท Second Wind

2.5 อุปกรณ์วัดทิศทางลม

ทิศทางลม (wind direction) เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่จำเป็นในการศึกษาศักยภาพพลังงานลม โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้ คือ เครื่องวัดทิศทางลม (wind vane) ซึ่งมีลักษณะคล้ายลูกศร โดยจะชี้ไปในทิศทางการพัดของลม ส่วนใหญ่การวัดความเร็วลมจะควบคู่ไปกับการวัดทิศทางลม ในบางรุ่นจึงมีอุปกรณ์วัดความเร็วและทิศทางลมยึดติดกัน (รูปที่ 2.21)

สำหรับเครื่องวัดทิศทางลมที่ใช้ในการศึกษาศักยภาพพลังงานลมที่น่าเชื่อถือจะต้องได้รับการสอบเทียบตามมาตรฐานของ MEASNET (Measuring Network of Wind Energy Institutes)

รูปที่ 2.21 ตัวอย่างเครื่องวัดทิศทางลม

2.6 สถานีวัดลม

สถานีวัดลม หมายถึง สถานที่ซึ่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วและทิศทางลมที่ทำการวัดอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำข้อมูลไปใช้งานด้านต่างๆ ตัวอย่างเช่น ด้านพลังงานลม ด้านอุตุนิยมวิทยา และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น อาจมีเพียงแห่งเดียวหรือมีหลายแห่งประกอบกันเป็นเครือข่าย โดยทั่วไปการวัดลมบนบกจะติดตั้งแอนนิโมมิเตอร์และอุปกรณ์วัดทิศทางลมไว้บนเสาวัดลมในที่โล่งแจ้ง ซึ่งมีสิ่งกีดขวางทางลมน้อย สำหรับการวัดลมในทะเล จะมีการติดตั้งเครื่องวัดลมไว้บนทุ่นลอย โดยสามารถส่งข้อมูลทางวิทยุมายังสถานีรับบนบกหรือบางชนิดต้องเดินทางไปรับข้อมูลเอง

2.6.1 เสาวัดลม

สำนักหอสมุดกลาง

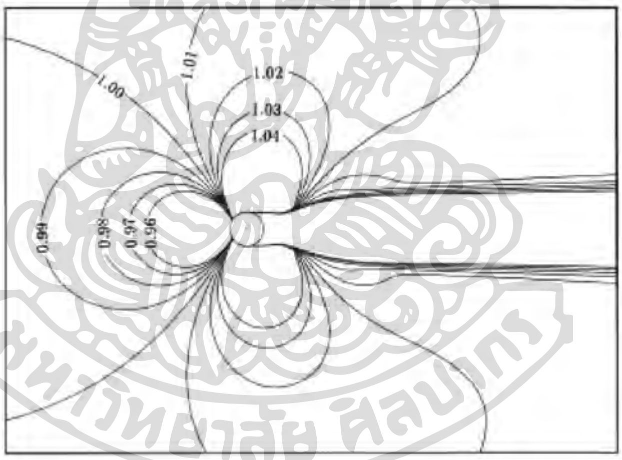
โดยทั่วไปแอนนิโมมิเตอร์และเครื่องวัดทิศทางลมต้องติดตั้งบนเสาวัดลม เพื่อให้อุปกรณ์ดังกล่าวอยู่ในระดับสูงจากพื้นดินและกระแสลมถูกรบกวนโดยสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด เสาวัดลมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เสาแบบทรงกระบอก (cylindrical mast) และเสาแบบโครงถัก (lattice mast) แต่ละแบบมีรายละเอียด ดังนี้

2.6.1.1 เสาแบบทรงกระบอก

เสาแบบนี้จะเป็นโลหะทรงกระบอกยึดด้านข้างด้วยลวดสลิง สามารถต่อแขน (boom) ออกจากเสา เพื่อติดตั้งเครื่องวัดลมที่ระดับต่างๆ จากการศึกษาการกระจายของความเร็วรอบเสา เมื่อเทียบความเร็วลมเมื่อไม่มีเสาอยู่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.22

จากกราฟในรูปที่ 2.23 จะเห็นว่าทางด้านข้างของเสาวัดลมจะถูกรบกวนโดยเสาน้อยกว่าทางด้านอื่น และด้านใต้ลมจะถูกรบกวนโดยเสามากที่สุด เสาวัดแบบทรงกระบอกมีข้อดีคือราคาไม่สูง แต่ทำการซ่อมบำรุงเครื่องวัดลมยาก นอกจากนี้ยังปรับระดับและทิศทางของเครื่องวัดลมยากด้วย

รูปที่ 2.22 เสาวัดลมแบบทรงกระบอก



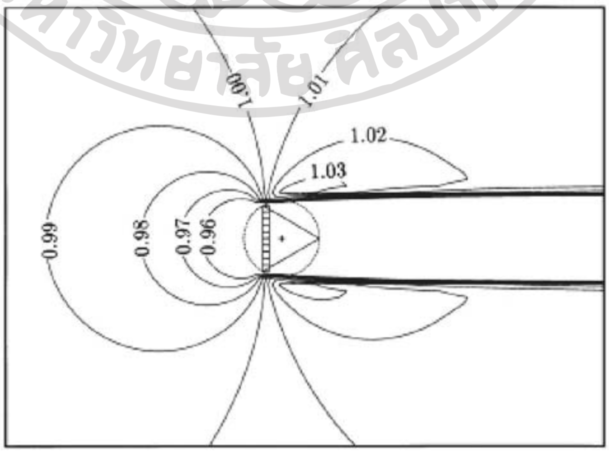
รูปที่ 2.23 กราฟแสดงเส้นระดับค่าความเร็วลมที่เท่ากัน (isovent) ของลมรอบเสาวัดลมแบบทรงกระบอก เมื่อมีลมพัดจากด้านซ้ายไปยังเสาวัดลม (ตัวเลขในรูปแสดงอัตราส่วนของความเร็วลม เมื่อมีเสาวัดลมอยู่ต่อค่าความเร็วลมกรณีที่กระแสลมไม่ถูกรบกวนโดยเสาวัดลม ถ้ามีค่าเป็น 1 แสดงว่า ณ ตำแหน่งนั้น กระแสลมไม่ถูกรบกวนโดยเสาวัดลม

2.6.1.2 เสาแบบโครงถัก

เสาวัดลมแบบดังกล่าวจะประกอบด้วยเสาโลหะ 3 เสา หรือ 4 เสา และมีโครงถักโลหะยึดเสาเข้าด้วยกัน โดยยึดด้านข้างด้วยลวดสลิง ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.24

รูปที่ 2.24 เสาวัดลมแบบโครงถัก

จากการศึกษาการไหลของอากาศผ่านเสาแบบโครงถัก พบว่าการกระจายของความเร็วลมรอบเสาวัดลมมีลักษณะ ดังรูปที่ 2.25



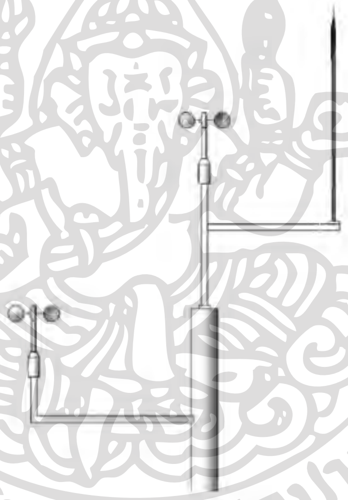
รูปที่ 2.25 กราฟแสดงเส้นระดับค่าความเร็วลมที่เท่ากันรอบเสาวัดลมแบบโครงถัก เมื่อลมพัดจากด้านซ้ายไปทางขวา

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

เช่นเดียวกับกรณีเสาวัดลมแบบทรงกระบอก คือบริเวณที่กระแสลมถูกรบกวนมากที่สุดคือทางด้านใต้ลม และทิศที่ถูกรบกวนน้อยที่สุด จะอยู่ในแนวประมาณ 45° กับทิศการพัดของลม ข้อดีของเสาวัดลมแบบนี้คือผู้ใช้สามารถปีนขึ้นไปติดตั้งปรับระดับ และซ่อมบำรุงเครื่องวัดลมได้สะดวก แต่เป็นเสาที่มีราคาค่อนข้างแพง

2.6.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดลม

การติดตั้งเครื่องวัดลมที่ดี ต้องให้เครื่องวัดลมอยู่ในตำแหน่งที่กระแสลมถูกรบกวนน้อยที่สุด โดยตำแหน่งของยอดเสาจะเป็นตำแหน่งที่ถูกรบกวนน้อย หากไม่สามารถติดบนยอดเสาจำเป็นต้องต่อแขนยื่นออกไปจากเสาวัดลม (boom) โดยแขนจะต้องมีความยาวอย่างน้อย 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาวัดลม (Peterson et al., 1997) ทั้งนี้เพื่อให้เครื่องวัดลมถูกรบกวน โดยเสาวัดลมน้อยที่สุด



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างของการติดตั้งอุปกรณ์วัดลมที่ดี

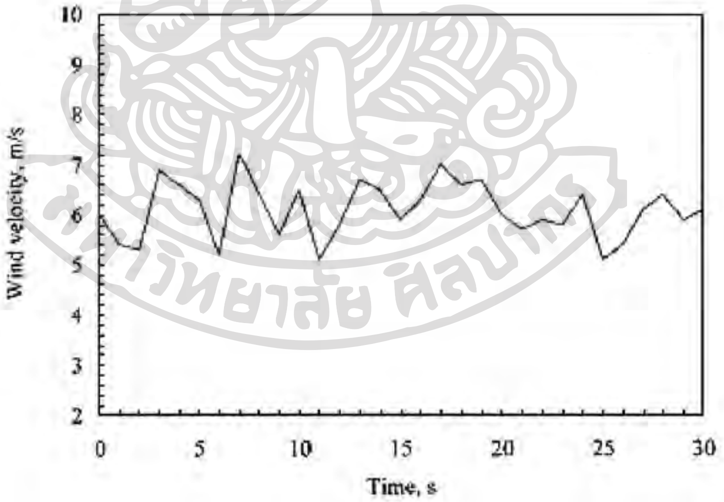
2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลลม

2.7.1 คุณภาพของข้อมูลลม

ข้อมูลลม จะหมายถึงข้อมูลความเร็วและทิศทางลมซึ่งได้จากการวัดจากเครือข่ายสถานีวัดลมที่จัดตั้งขึ้นเพื่อใช้งานด้านพลังงานลม หรือจากเครื่องวัดลมของสถานีอุตุนิยมวิทยาต่างๆ ข้อมูลที่ได้มานี้ก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์จำเป็นต้องทราบรายละเอียดที่มาของข้อมูล ที่สำคัญได้แก่ ระดับความสูงของการวัด สมรรถนะของเครื่องวัด วิธีบันทึกข้อมูล สภาพแวดล้อมของเสาวัดลมและการดูแลซ่อมบำรุงเครื่องวัดลม ถ้าเครื่องวัดลมตั้งอยู่ในบริเวณที่มีสิ่งกีดขวางทางลมมากข้อมูลที่ได้ไม่

สามารถใช้เป็นตัวแทนศักยภาพของลมในบริเวณนั้นได้ สำหรับเครื่องวัดที่ขาดการดูแลซ่อมบำรุง ข้อมูลที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนมาก กรณีของเครื่องวัดหรือระบบบันทึกข้อมูลที่ขัดข้องบ่อยจะทำให้ข้อมูลขาดหายไม่ครบถ้วน ข้อมูลที่ได้จะไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนทางสถิติของบริเวณที่วัดได้ ข้อมูลที่ดีควรได้จากเครื่องวัดที่มีความละเอียดถูกต้องซึ่งติดตั้งอยู่บนเสาวัดลมที่มีสิ่งกีดขวางทางลมน้อย และมีระบบการบันทึกข้อมูลที่ดี มีข้อมูลครบถ้วนไม่น้อยกว่า 80% ของข้อมูลตลอดทั้งปี ข้อมูลที่ขาดหายไม่ควรอยู่ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง แต่ควรกระจายสม่ำเสมอในรอบปี สำหรับในบริเวณที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมระหว่างปีต่างๆ สูง (inter-annual variation) ข้อมูลที่สามารถใช้เป็นตัวแทนทางสถิติของบริเวณที่วัดได้จะต้องครอบคลุมช่วงเวลาการแปรค่าระหว่างปีประมาณ 5 ปี (Justus, 1988; Landberg et al., 2003)

โดยทั่วไปความเร็วลมจะมีการเปลี่ยนแปลงระยะสั้นในระดับของวินาที (รูปที่ 2.27) เนื่องจากผลของสิ่งแวดล้อมรอบเครื่องวัดลมหรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางอุตุนิยมวิทยา ดังนั้นเครื่องวัดลมจึงควรทำการวัดทุกๆ 1 หรือ 2 วินาที และทำการเฉลี่ยทุก 10 นาที แล้วจึงนำค่าเฉลี่ยมาทำการวิเคราะห์ การใช้ข้อมูลที่วัดลมเฉพาะขณะ (instantaneous measurement) ที่มีอัตราการวัดห่างกันมาก เช่น 1 ชั่วโมงต่อครั้ง ข้อมูลที่ได้ไม่สามารถแทนสภาวะของลมในชั่วโมงดังกล่าวได้



รูปที่ 2.27 แสดงการเปลี่ยนแปลงระยะสั้นของความเร็วลม

2.7.2 การหาค่าความเร็วลมเฉลี่ย

ข้อมูลที่สำคัญที่สุดของลมคือ ความเร็วเฉลี่ยของลม เนื่องจากความเร็วลมมิได้มีการแจกแจงทางสถิติแบบปกติ (normal distribution) และพลังงานลมแปรตามกำลังสามของความเร็วลม ดังนั้นการหาค่าความเร็วลมเฉลี่ยจะใช้สมการต่อไปนี้

$$V_m = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} V_i^{\,3} \right)^{\frac{1}{3}} \qquad (2.12)$$

เมื่อ V_m = ความเร็วลมเฉลี่ย

V_i = ข้อมูลความเร็วลมที่วัดได้ครั้งที่ i

n = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

2.7.3 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เนื่องจากความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการบอกสภาวะของลมด้วยค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอ จำเป็นต้องรู้ระดับการแปรค่าของความเร็วลมด้วย โดยในทางสถิติจะบอกด้วยค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (V_i - V_m)^2}{n}} \qquad (2.13)$$

เมื่อ σ_v = ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

V_i = ความเร็วลมที่วัดได้ครั้งที่ i

V_m = ความเร็วลมเฉลี่ย

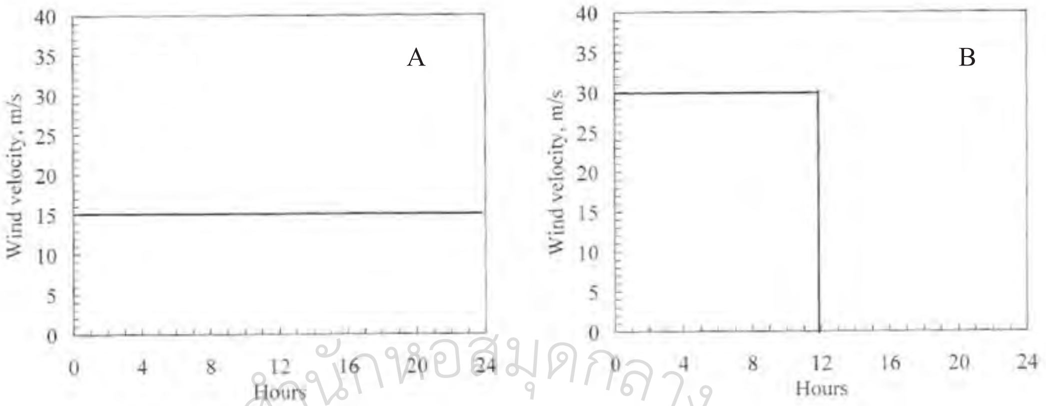
n = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ถ้า σ_v มีค่ามากแสดงว่าความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเฉลี่ยมาก ซึ่งโดยทั่วไปมักไม่เป็นผลดีต่อกังหันลม เนื่องจากกังหันลมต้องทำงานที่ความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา พลังงานที่ได้จึงไม่สม่ำเสมอ

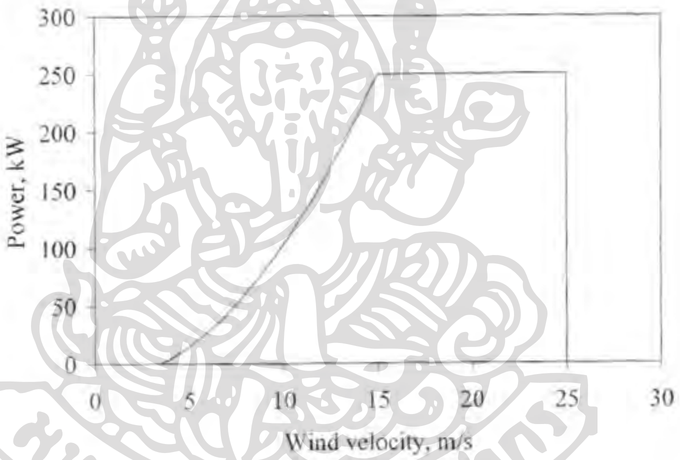
2.7.4 การแจกแจงทางสถิติของความเร็วลม

นอกจากค่าเฉลี่ยของความเร็วลมแล้ว การแจกแจงทางสถิติของความเร็วลมยังมีความสำคัญต่อการประเมินศักยภาพของลมที่ได้จากการวัด ทั้งนี้เพราะการใช้ค่าเฉลี่ยของความเร็วลมเพียงอย่างเดียวอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการบอกศักยภาพของลมได้ ตัวอย่างเช่น ถ้ามี

ข้อมูลการแปรค่าของความเร็วลมจากสถานที่ 2 แห่ง A และ B ตามรูปที่ 2.28 และกังหันลมมี power curve ตามรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.28 แสดงตัวอย่างการแปรค่าของความเร็วลมจากสถานีวัด 2 แห่ง



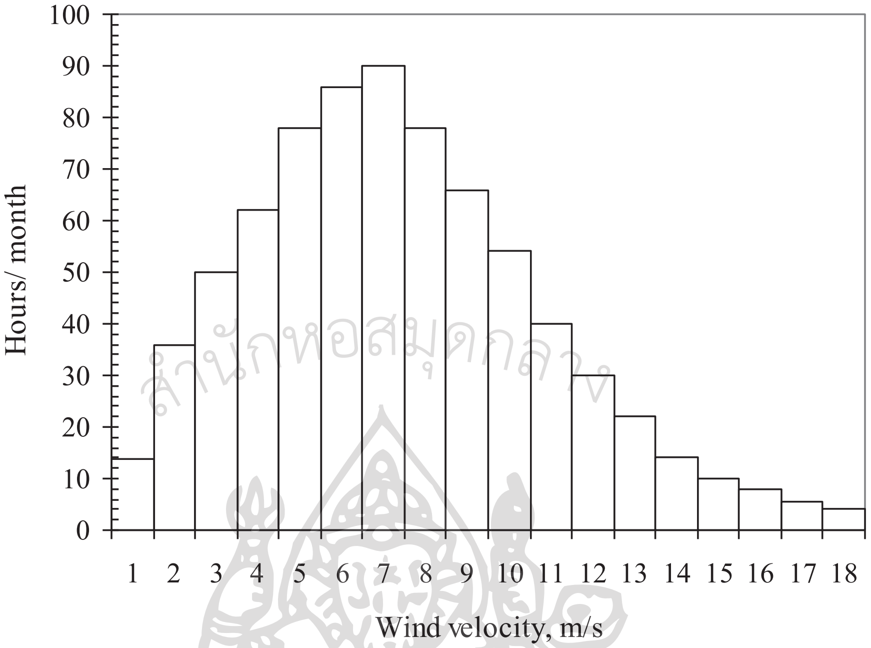
รูปที่ 2.29 ตัวอย่าง power curve ของกังหันลม

จากรูปที่ 2.29 ความเร็วลมเฉลี่ยของทั้งสองสถานีเท่ากันคือ 15 m/s แต่การแจกแจงความเร็วลมต่างกัน ถ้านำกังหันลมที่มี power curve ตามรูปที่ 2.30 ไปติดตั้งที่สถานี A จะได้พลังงานไฟฟ้า 6,000 kWh แต่ถ้าติดตั้งสถานี B กังหันลมนี้จะไม่ทำงาน เนื่องจากความเร็วลมมีค่ามากกว่า 25 เมตร/วินาที ซึ่งสูงกว่า cut off speed ของกังหันลม จึงทำให้ได้พลังงานไฟฟ้าเป็นศูนย์ทั้งที่สถานีทั้งสองมีความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากัน ดังนั้นการแจกแจงทางสถิติของความเร็วลมจึงมีความสำคัญต่อการคำนวณพลังงานที่จะได้จากกังหันลม

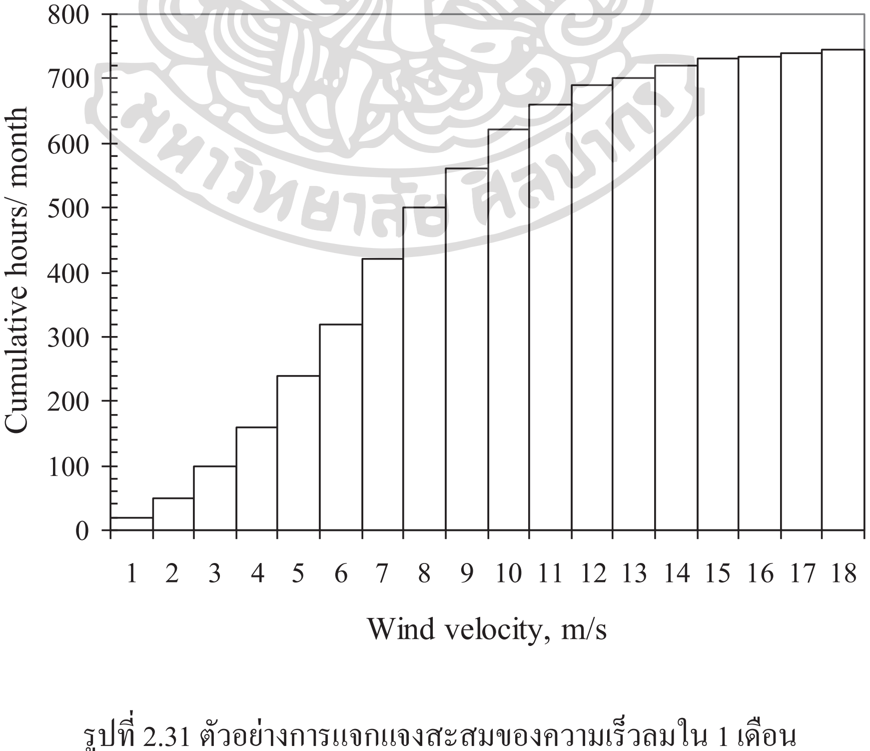
การแจกแจงความเร็วลมมี 2 ลักษณะ คือ การแจกแจงความถี่ของความเร็วลม และการแจกแจงความถี่สะสม (cumulative distribution) การแจกแจงทั้งสองลักษณะมักทำเป็นรายเดือนหรือราย

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปี โดยจะต้องนำข้อมูลมาแบ่งเป็นช่วงและนับจำนวนข้อมูลในแต่ละช่วง แล้วนำมาเขียนกราฟการแจกแจงทั่วไปและการแจกแจงสะสมได้ตามรูปที่ 2.30 และ 2.31 ตามลำดับ



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างการแจกแจงของความเร็วลมใน 1 เดือน



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างการแจกแจงสะสมของความเร็วลมใน 1 เดือน

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

ในกรณีที่เรารู้การแจกแจงของความเร็วลม จะทำให้สามารถหาค่าความเร็วลมเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานได้ละเอียดยิ่งขึ้น โดยอาศัยสมการต่อไปนี้

$$V_m = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{n} f_i V_i^3}{\sum_{i=1}^{n} f_i} \right\}^{1/3} \qquad (2.14)$$

และ

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} f_i (V_i - V_m)^2}{\sum_{i=1}^{n} f_i}} \qquad (2.15)$$

เมื่อ V_m = ความเร็วลมเฉลี่ย

σ_v = ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

f_i = ความน่าจะเป็น (probability) ที่ความเร็วลมมีค่า V_i

2.7.5 แบบจำลองทางสถิติของการแจกแจงความเร็วลมของ Weibull

จากการวิเคราะห์ความเร็วลมที่ได้จากสถานีวัดต่างๆ จำนวนมาก นักวิทยาศาสตร์พบว่าความเร็วลมมีการแจกแจงอย่างเป็นระบบซึ่งสอดคล้องกับการแจกแจงทางสถิติของ Weibull การแจกแจงของ Weibull ความเร็วลมเขียนในรูปของฟังก์ชันของความน่าจะเป็น (probability density function) ได้ดังนี้

$$f(V) = \frac{k}{A}\left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} e^{-(V/A)^k} \qquad (2.16)$$

เมื่อ f(V) = probability density function

V = ความเร็วลม

k = shape factor

A = scale factor

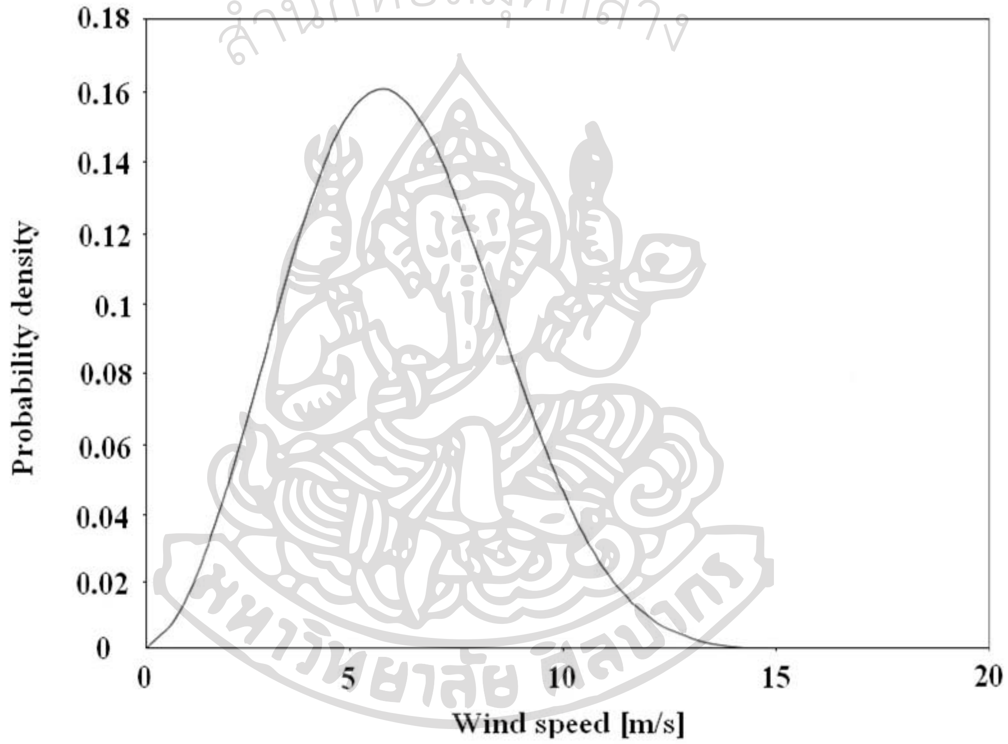
ฟังก์ชัน f(V) จะเป็นตัวบอกสัดส่วนของเวลา (fraction of time) เมื่อเทียบกับเวลาทั้งหมดหรือความน่าจะเป็น (probability) ที่ลมจะมีความเร็ว V การแจกแจงของ Weibull สามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันของการแจกแจงสะสม (cumulative distribution function) โดยการอินทิเกรตฟังก์ชันของความน่าจะเป็น ดังนี้

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

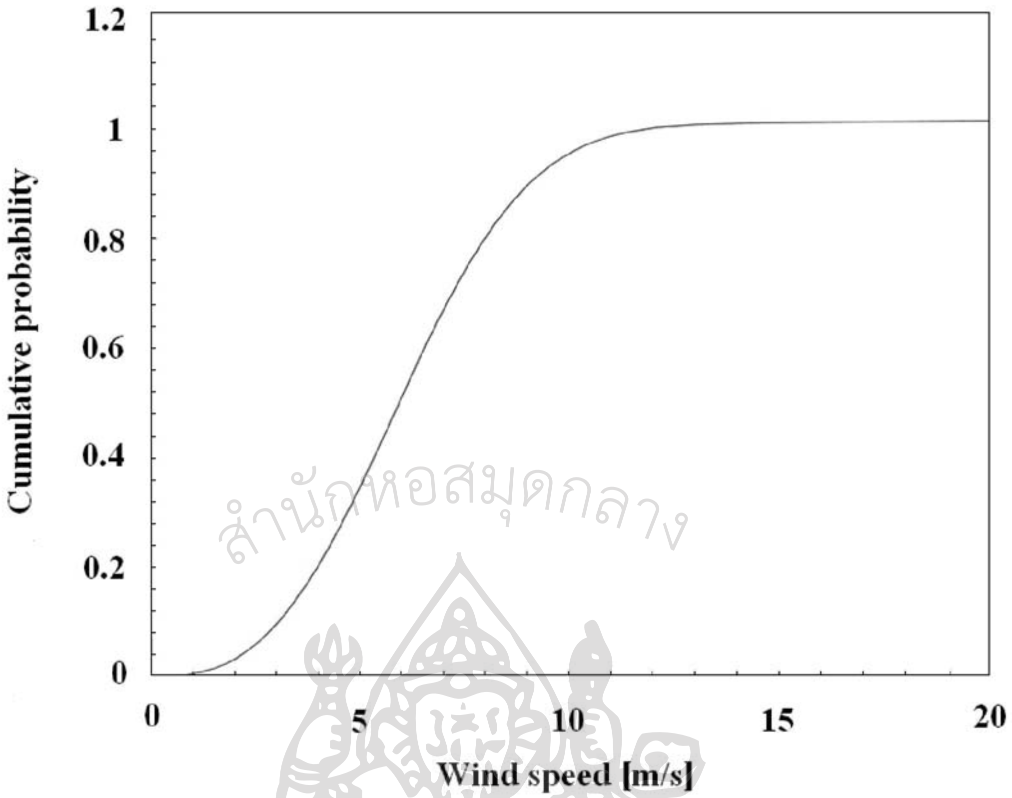
$$F(V)=\int_0^V f(V)dV=1-e^{-(V/A)^k} \tag{2.17}$$

เมื่อ F(V) = cumulative distribution function

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (F(V)) จะเป็นตัวบอกสัดส่วนของเวลาหรือความน่าจะเป็น (probability) ที่ความเร็วลมจะมีค่าเท่ากับหรือต่ำกว่า V โดยฟังก์ชันความน่าจะเป็น f(V) และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม F(V) ของ Weibull จะขึ้นกับความเร็วลมตามกราฟในรูปที่ 2.32 และ 2.33 ตามลำดับ



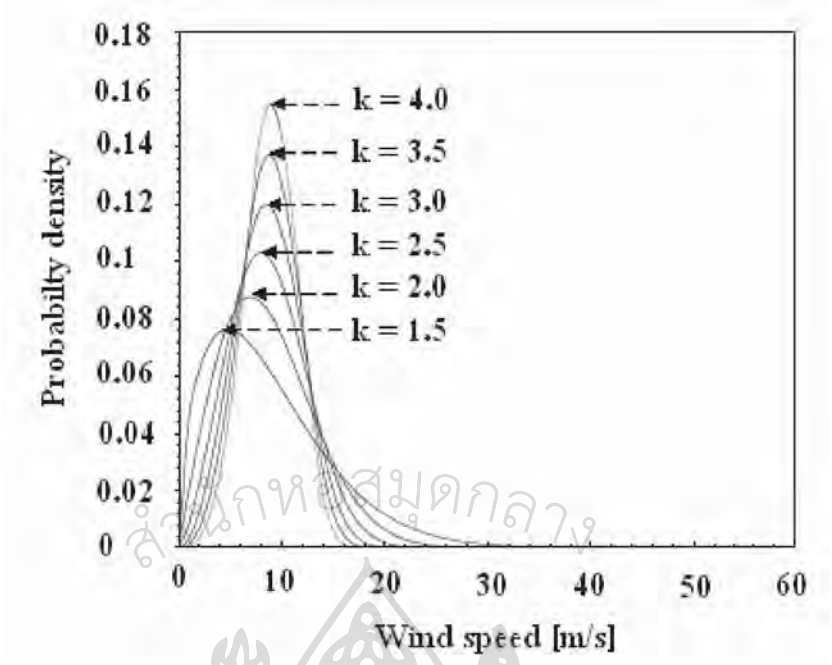
รูปที่ 2.32 แสดงการแจกแจงของ Weibull ในรูปของฟังก์ชันความน่าจะเป็น



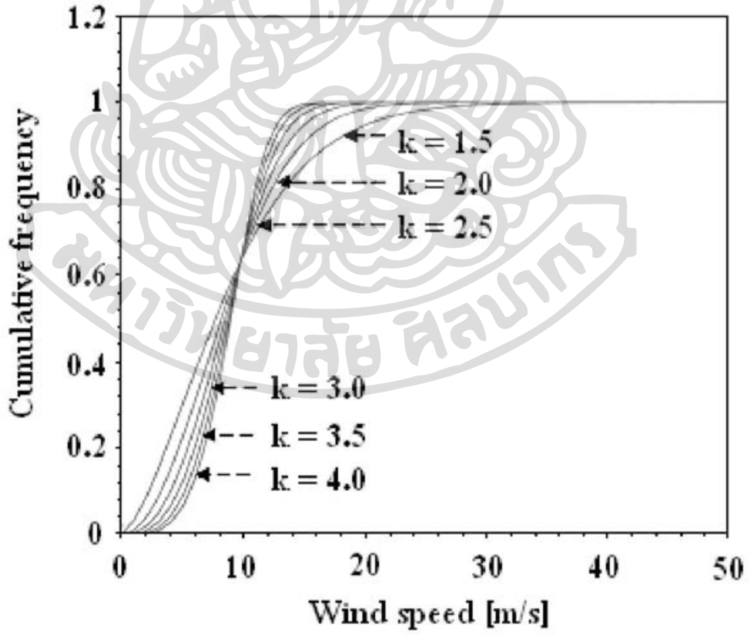
รูปที่ 2.33 แสดงการแจกแจงสะสมของ Weibull

พารามิเตอร์ที่สำคัญของการแจกแจงของ Weibull คือ shape factor (k) ทั้งนี้เพราะจะเป็นตัวบอกความสม่ำเสมอของความเร็วลม ถ้า k มีค่ามากความเร็วลมจะแปรอยู่ในช่วงแคบๆ ดังตัวอย่างในกราฟรูปที่ 2.34 และ 2.35

จากรูป กรณี k = 1.5 ความเร็วลมจะแปรในช่วง 0- 20 m/s คิดเป็น 95% ของเวลาทั้งหมด ถ้าเป็นกรณีของ k = 4 จะได้ว่า 95% ของเวลาทั้งหมด ลมจะแปรค่าในช่วง 0-13 m/s ซึ่งเป็นช่วงการแปรค่าที่แคบกว่ากรณีแรก



รูปที่ 2.34 การแจกแจงความเร็วลมของ Weibull ที่ shape factor (k) ค่าต่างๆ



รูปที่ 2.35 การแจกแจงสะสมของ Weibull ที่ shape factor (k) ค่าต่างๆ

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

2.7.6 การคำนวณความเร็วลมเฉลี่ย และความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากแบบจำลองของ Weibull

ตามหลักทางสถิติ ถ้าเราทราบฟังก์ชันการแจกแจงของตัวแปรหนึ่งเราสามารถนำฟังก์ชันนั้นมาคำนวณค่าเฉลี่ยของตัวแปรนั้นได้ ในกรณีของความเร็วลมซึ่งมีการแจกแจงตามแบบจำลองของ Weibull เราสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้หาค่าความเร็วเฉลี่ยได้ดังนี้

$$V_m = \int_0^\infty V f(V) dV \qquad (2.18)$$

เมื่อ V_m = ความเร็วลมเฉลี่ย

$f(V)$ = Weibull probability density function

สำนักหอสมุดกลาง

แทน f(V) จากสมการ (2.16) ลงในสมการ (2.18) จะได้

$$V_m = \int_0^\infty V \frac{k}{A}\left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} e^{-(V/A)^k} dV \qquad (2.19)$$

$$= k\int_0^\infty (\frac{V}{A})^{k-1} e^{-(V/A)^k} \frac{V}{A} dV$$

ให้ $x = (\frac{V}{A})^k$ จะได้ $dV = \frac{A}{k} x^{(\frac{1}{k}-1)} dx$ (2.20)

แทน $\left(\frac{V}{A}\right)^k$ และ dV จากสมการ (2.20) ในสมการ (2.19) จะได้

$$V_m = C\int_0^\infty e^{-x} x^{1/x} dx \qquad (2.21)$$

สมการ (2.21) เป็นรูปแบบมาตรฐานของฟังก์ชันแกมมา (gamma function) ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-x} x^{n-1} dx \qquad (2.22)$$

สมการ (2.21) จึงเขียนในรูปของฟังก์ชันแกมมาได้ดังนี้

$$V_m = A\Gamma(1 + \frac{1}{k}) \qquad (2.23)$$

ดังนั้นถ้าเรารู้ค่า A และ k ของข้อมูลจากการวัดชุดหนึ่ง เราสามารถหาค่าเฉลี่ย (V_m) ได้โดยสมการ (2.23)

ในทำนองเดียวกัน เราสามารถใช้ฟังก์ชันการแจกแจงของ Weibull คำนวณความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, σ_v) ได้ดังนี้

$$\sigma_v = (M_2 - V_m^2)^{1/2} \tag{2.24}$$

เมื่อ σ_v = ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

V_m = ความเร็วลมเฉลี่ย

M_2 = second moment of the population

สำนักหอสมุดกลาง

M_2 หาได้จากสมการ

$$M_2 = \int_0^{\infty} V^2 f(V) dV \tag{2.25}$$

แทน f(V) จากสมการ (2.16) และเปลี่ยนตัวแปรจาก V เป็น x โดยอาศัยสมการ (2.20) จะได้ M_2 ดังนี้

$$M_2 = A^2 \Gamma(1 + \frac{2}{k}) \tag{2.26}$$

แทน M_2 จากสมการ (2.26) และ V_m จากสมการ (2.23) ลงในสมการ (2.24) จะได้

$$\sigma_v = A\left[\Gamma(1 + \frac{2}{k}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{k})\right]^{1/2} \tag{2.27}$$

จากสมการ (2.27) ถ้าเราทราบค่าของ A และ k ก็จะสามารถคำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานได้

2.7.7 การหาค่าของ shape factor และ scale factor

เนื่องจาก shape factor (k) และ scale factor (A) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของฟังก์ชันการแจกแจงของ Weibull และจำเป็นต้องใช้ในการคำนวณความเร็วลมเฉลี่ยและพลังงานลม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาพารามิเตอร์ดังกล่าว ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1) วิธีการใช้กราฟ

จากสมการการแจกแจงสะสมของความเร็วลมของ Weibull เราสามารถเขียนได้ในรูปของสมการ

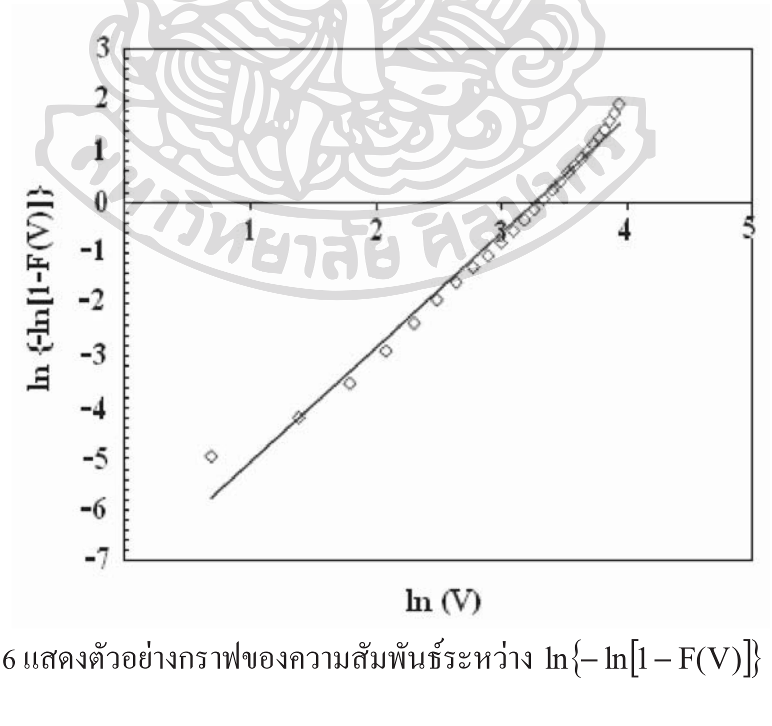
$$1 - F(V) = e^{-(V/A)^k} \tag{2.28}$$

หาค่า logarithm ของเทอมทั้งสองด้านของสมการ (2.28) จะได้

$$\ln\{-\ln[1 - F(V)]\} = k\ln(V) - k\ln A \tag{2.29}$$

เมื่อนำค่า $\ln\{-\ln[1 - F(V)]\}$ มาเขียนกราฟกับค่า ln(V) โดยใช้ค่าความเร็วลม v จากการวัดจะได้กราฟเส้นตรงตามตัวอย่างในรูปที่ 2.36

จากกราฟเราสามารถอ่านค่าความชันของกราฟซึ่งจะเป็นค่า k และอ่านค่าจุดตัดแกน ซึ่งจะเป็นค่า k ln A เมื่อแทนค่า k จะได้ค่าของ A



รูปที่ 2.36 แสดงตัวอย่างกราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\{-\ln[1 - F(V)]\}$ กับ ln(V)

2) วิธีการคำนวณจากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ย

จากสมการของค่าเฉลี่ยความเร็วลมและสมการของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน เราสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับค่ากำลังสองของอัตราส่วนความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่อค่าเฉลี่ยของความเร็วลมได้ดังสมการ

$$\left(\frac{\sigma_v}{V_m}\right)^2 = \frac{\Gamma(1+\frac{2}{k})}{\Gamma^2(1+\frac{1}{k})} - 1 \qquad (2.30)$$

เนื่องจากค่า σ_v และ V_m สามารถคำนวณได้จากข้อมูลที่ได้จากการวัด ดังนั้นเราจึงสามารถใช้วิธีเชิงตัวเลข (numerical method) คำนวณค่า k จากสมการ (2.30) ได้ จากนั้นจะคำนวณค่า A จากสมการ

$$A = \frac{V_m}{\Gamma(1+\frac{1}{k})} \qquad (2.31)$$

นอกจากนี้เรายังสามารถคำนวณค่า k และค่า A โดยประมาณจากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ยความเร็วลมจากสมการ

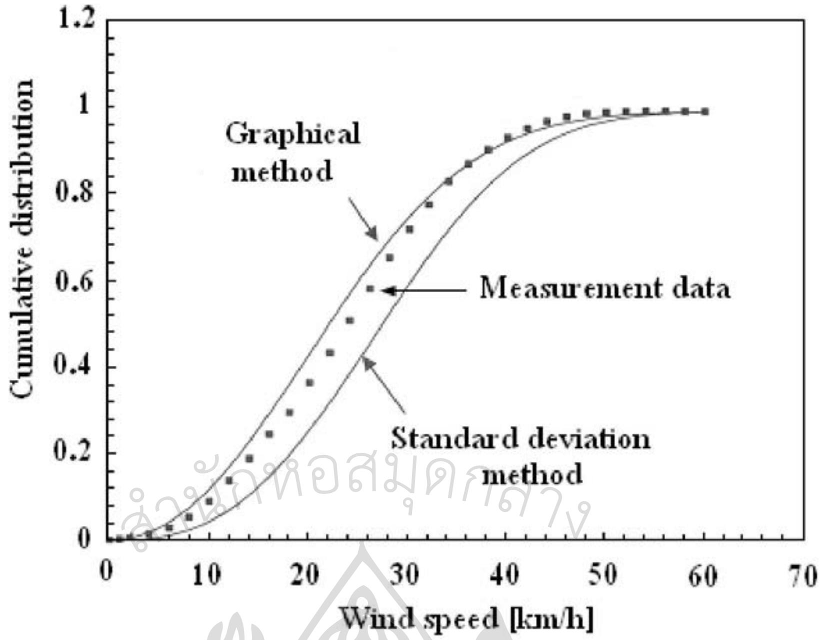
$$k = \left(\frac{\sigma_v}{V_m}\right)^{-1.090} \qquad (2.32)$$

และ

$$A = \frac{2V_m}{\sqrt{\pi}} \qquad (2.33)$$

เมื่อเปรียบเทียบค่า k และค่า A ด้วยวิธีการใช้กราฟและวิธีใช้ความเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ย (รูปที่ 2.37) จะพบว่าการใช้กราฟให้ผลที่ละเอียดถูกต้องกว่า

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร



รูปที่ 2.37 การเปรียบเทียบกราฟการแจกแจงสะสมซึ่งได้จากค่า k และ A ที่หาจากวิธีการใช้กราฟ

2.7.8 การหาความเร็วลมที่มีค่าของความน่าจะเป็นสูงสุด

ความเร็วลมที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและโอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะพบความเร็วลมที่ค่าต่างๆ จะแตกต่างกัน เราสามารถคำนวณค่าความเร็วลมที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดสูงสุดได้จากการแจกแจงของความเร็วลมของ Weibull เราสามารถจัดเทอมใหม่ได้ดังสมการ

$$f(V)=\frac{k}{A^k}V^{k-1}e^{-(V/A)^k} \tag{2.34}$$

ความน่าจะเป็นของความเร็วลมสูงสุดจะหาได้จากการ differentiate f(V) เทียบกับ V หรือ $f'(V)$ และให้ค่า $f'(V)$ เป็นศูนย์ ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$\frac{k}{A^k}e^{-(V/A)^k}\left[-\frac{k}{A^k}V^{2(k-1)}+(k-1)V^{(k-2)}\right]=0 \tag{2.35}$$

จากสมการ (2.35) เราสามารถหาค่า V ซึ่งเป็นค่าความเร็วลมสูงสุด ($V_{F,Max}$) ได้ดังสมการ

$$V_{F,Max} = V = A\left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k} \tag{2.36}$$

ดังนั้นถ้าเรารู้ค่า k และ A จากข้อมูลที่ได้จากการวัด เราจะสามารถคำนวณค่าความเร็วลมที่มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นสูงสุดได้โดยอาศัยสมการ (2.36)

2.7.9 การหาความเร็วลมที่มีความน่าจะเป็นในการให้พลังงานสูงสุด

โดยทั่วไปความเร็วลมที่มีความน่าจะเป็นหรือมีโอกาสเกิดสูงสุดไม่จำเป็นต้องเป็นความเร็วลมซึ่งมีโอกาสในการให้พลังงานสูงสุด ทั้งนี้เพราะพลังงานในกระแสลมแปรตามค่ากำลังสามของความเร็วลม การหาความเร็วลมที่มีโอกาสให้พลังงานสูงสุดหาได้ดังนี้

ค่า energy flux (E_v) ของลมซึ่งเป็นพลังงานต่อเวลาต่อพื้นที่ที่ลมพัดผ่าน เมื่อพิจารณาในรูปของความน่าจะเป็น (probability) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_v = P_v f(V) \tag{2.37}$$

เมื่อ P_v = พลังงานต่อเวลาหรือกำลังของกระแสลม

f(V) = Weibull probability density function

ค่า P_v หาได้จากสมการ

$$P_v = \frac{1}{2}\rho_a V^3 \tag{2.38}$$

เมื่อ ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ

V = ความเร็วลม

แทน P_v และ f(V) ลงในสมการของ E_v (สมการ 2.37) จะได้

$$E_v = \frac{\rho_a V^3}{2}\frac{k}{A^k}(V)^{k-1} e^{-(V/A)^k} \tag{2.39}$$

กำหนด B ให้เป็นพารามิเตอร์ใหม่ตามสมการ

$$B = \frac{\rho_a}{2}\frac{k}{A^k} \tag{2.40}$$

แทน B ลงในสมการ (2.39) จะได้

$$E_v = BV^{k+2} e^{-(V/A)^k} \tag{2.41}$$

ค่าความเร็วลม ($V_{E,Max}$) จะทำให้ความน่าจะเป็นในการเกิดพลังงานสูงสุดจะหาได้โดยการ differentiate E_v เทียบกับ V หรือ E'_v และกำหนดให้ $E'_v = 0$ ดังสมการ

$$B\left[-e^{-(V/A)^k}\frac{k}{A^k}V^{(2k+1)} + e^{-(V/A)^k}(k+2)V^{(k+1)}\right] = 0 \tag{2.42}$$

จากสมการ (2.41) เราสามารถหา V ซึ่งจะเป็น $E_{v,Max}$ ได้ดังสมการ

$$V_{E,Max} = V = \frac{A(k+2)^{1/k}}{k^{1/k}} \tag{2.43}$$

จากค่า k และ A เราสามารถคำนวณ $V_{E,Max}$ ได้โดยใช้สมการ (2.43) เนื่องจากกังหันลมตัวหนึ่งจะมีการออกแบบให้ทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วลมค่าหนึ่ง (V_d) ดังนั้นในการเลือกกังหันลมมาใช้งานในสถานที่หนึ่ง ควรเลือกค่า V_d ให้ใกล้เคียงกับค่า $V_{E,Max}$ ที่สุด ซึ่งจะทำให้กังหันลมใช้ประโยชน์จากพลังงานในกระแสลมได้สูงสุด

2.8 แผนที่ลม

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งการเคลื่อนที่ของมวลอากาศซึ่งทำให้เกิดลมได้เป็น 3 สเกลได้แก่ ระดับสเกลใหญ่ (large scale) สเกลปานกลาง (mesoscale) และสเกลเล็ก (microscale) โดยลมระดับสเกลใหญ่ (> 2,000 กิโลเมตร) เป็นลมซึ่งเป็นผลจากการไหลเวียนของอากาศที่เกิดจากความแตกต่างของความดันบรรยากาศในระดับประเทศหรือภูมิภาค ลมระดับสเกลใหญ่จะได้รับผลกระทบจากภูมิประเทศระดับสเกลใหญ่ เช่น เทือกเขา ทะเล หรือมหาสมุทร สำหรับลมระดับสเกลปานกลาง (2-2,000 กิโลเมตร) จะเป็นลมระดับท้องถิ่น ลมดังกล่าวจะได้รับผลกระทบจากลักษณะภูมิประเทศที่มีขนาดเล็กลงมา เช่น เนินเขา ทะเลสาบ และตัวเมือง เป็นต้น กรณีของลมระดับสเกลเล็ก (< 2 กิโลเมตร) จะได้รับผลกระทบจากสิ่งกีดขวางทางลมเล็กๆ เช่น ต้นไม้ อาคาร สิ่งปลูกสร้าง

เนื่องจากลมระดับสเกลใหญ่ขึ้นกับความแตกต่างของความดันบรรยากาศในระดับประเทศหรือภูมิภาค ดังนั้นจึงสามารถคำนวณ ได้จากข้อมูลความดันบรรยากาศในแผนที่อากาศซึ่งใช้ในงานพยากรณ์อากาศ ข้อมูลดังกล่าว หน่วยงานอุตุนิยมวิทยาของยุโรปและสหรัฐอเมริกาได้ทำการเก็บรวบรวมไว้โดยมีข้อมูลครอบคลุมทั่วโลกย้อนหลัง 40-50 ปี แผนที่ลมระดับสเกลใหญ่ที่สร้างจากข้อมูลดังกล่าวจะบอกแนวโน้มของความเร็วในภูมิภาคต่างๆ ของโลกเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ในงานด้านพลังงานลมได้โดยตรง อย่างไรก็ตามข้อมูลลมระดับสเกลใหญ่สามารถใช้เป็นข้อมูลอินพุท (input) ของแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง เพื่อคำนวณลมระดับสเกลปานกลางได้

สำหรับลมในระดับสเกลเล็ก (microscale wind) เราสามารถจัดทำแผนที่ได้ก็ต่อเมื่อมีข้อมูลสิ่งกีดขวางทางลมอย่างละเอียด เช่น อาคาร สิ่งปลูกสร้าง และต้นไม้ เป็นต้น จึงเป็นการยากที่จะทำแผนที่ลมระดับสเกลเล็กครอบคลุมพื้นที่กว้างใหญ่ระดับประเทศ โดยทั่วไปจะเลือกทำแผนที่ลมในระดับสเกลเล็กในบริเวณที่สนใจเท่านั้น เพื่อทำการศึกษาความเหมาะสมในการจัดตั้งกังหันลม (micro-siting)

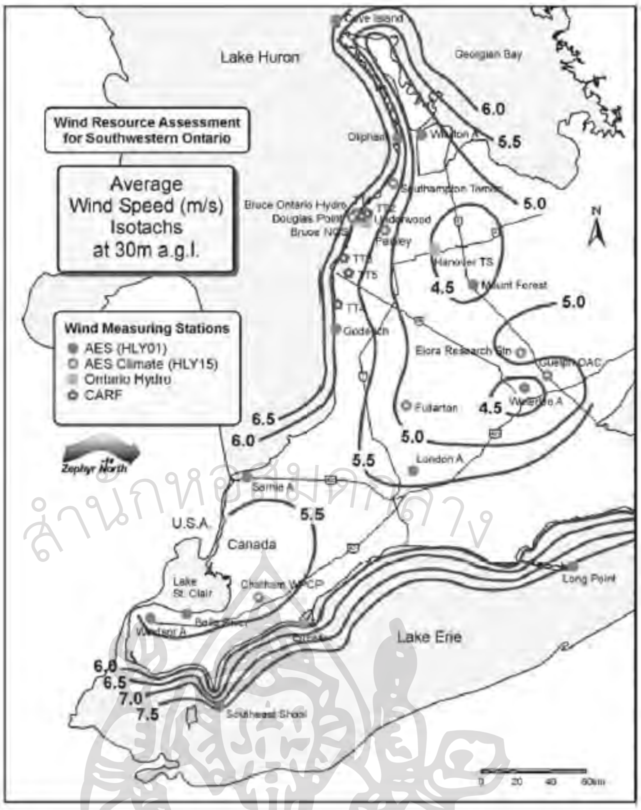
แผนที่ศักยภาพของพลังงานลมของประเทศใดประเทศหนึ่งจะหมายถึงแผนที่แสดงการกระจายตามพื้นที่ของความเร็วลม หรือพลังงานลมในระดับสเกลปานกลาง (mesoscale wind) โดยคำนึงถึงผลของภูมิประเทศโดยภาพรวม เช่น ภูเขา หรือทะเล เป็นต้น แต่จะไม่ลงรายละเอียดถึงผลของสิ่งกีดขวางทางลมระดับอาคาร หรือสิ่งปลูกสร้าง ในอดีตที่ผ่านมามีการจัดทำแผนที่ลมในระดับประเทศ หรือระดับภูมิภาค ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

2.8.1 การสร้างแผนที่ลมโดยอาศัยข้อมูลความเร็วลมจากเครือข่ายสถานีวัดลม

ก) การใช้ข้อมูลลมจากการวัดร่วมกับการคาดคะเนแนวโน้ม (extrapolation)

วิธีการนี้จะทำการรวบรวมข้อมูลความเร็วลมจากเครือข่ายสถานีวัดลม แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยรายเดือนหรือรายปี จากนั้นจะนำมาแสดงผลในรูปแผนที่ กรณีบริเวณที่ไม่มีการวัด จะหาค่าความเร็วลมจากการคาดคะเนแนวโน้มจากสถานีวัดข้างเคียง หลังจากนั้นจะทำการลากเส้นผ่านตำแหน่งที่ความเร็วเท่ากัน โดยการคาดคะเนแนวโน้มที่ดีต้องใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีหลายวิธี โดยบางวิธีอาจมีการนำลักษณะภูมิประเทศ หรือความสูงต่ำของพื้นที่มาเป็นตัวถ่วงน้ำหนักของการคาดคะเนแนวโน้มด้วย วิธีการนี้จะใช้ได้ผลดีก็ต่อเมื่อพื้นที่นั้นๆ มีความหนาแน่นของสถานีวัดลมค่อนข้างสูง มีข้อมูลวัดที่ละเอียดถูกต้องยาวนานหลายปี และลักษณะของพื้นที่ (orography) ไม่สลับซับซ้อน ตัวอย่างของการจัดทำแผนที่ลม โดยวิธีดังกล่าวได้แก่ แผนที่ลมของภาคตะวันตกเฉียงใต้ของมลรัฐออนตาริโอ (Southwestern Ontario) ประเทศแคนาดา ซึ่งดำเนินการโดยบริษัท Zephyr North (รูปที่ 3.38)

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร



รูปที่ 2.38 แผนที่ลมของภาคตะวันตกเฉียงใต้ของมลรัฐออนตาริโอ ประเทศแคนาดา

ข) การใช้ข้อมูลความเร็วลมร่วมกับการใช้แบบจำลองของความเร็วลมรอบสถานีวัดและการคาดคะเนแนวโน้ม

วิธีการดังกล่าวจะอาศัยข้อมูลลมที่ได้จากสถานีวัด และแบบจำลองการไหลของกระแสอากาศ (flow model) ทำการแก้ค่าของความเร็วลมซึ่งเป็นผลมาจากสิ่งกีดขวางทางลม (obstacle) ความหยาบของพื้นผิวโลก (roughness) และลักษณะสูงต่ำของพื้นที่ (orography) จากนั้นจะนำค่าความเร็วลมที่แก้ไขแล้วไปคำนวณความเร็วที่จุดอื่นๆ รอบสถานีวัด ทำให้ได้ข้อมูลการกระจายของความเร็วลมตามพื้นที่รอบสถานีวัดในพื้นที่ประมาณ 10x10 ตารางกิโลเมตร จากนั้นจะใช้การคาดคะเนแนวโน้มช่วยหาความเร็วลมบริเวณพื้นที่ระหว่างสถานีวัด เพื่อสร้างแผนที่ลมทั่วประเทศหรือแผนที่ลมระดับภูมิภาค วิธีการนี้จะใช้ได้ผลดีก็ต่อเมื่อมีเครือข่ายสถานีวัดลมที่กระจายกันอย่างหนาแน่นครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศหรือทั่วภูมิภาค ตัวอย่างแผนที่ลมที่สร้างโดยวิธีนี้ ได้แก่ แผนที่ลมของสหภาพยุโรป (Troen and Petersen, 1989) รูปที่ 2.39

สำนักหอสมุดกลาง

Wind resources[1] at 50 metres above ground level for five different topographic conditions										
	Sheltered terrain[2]		Open plain[3]		At a sea coast[4]		Open sea[5]		Hills and ridges[6]	
	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}
	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

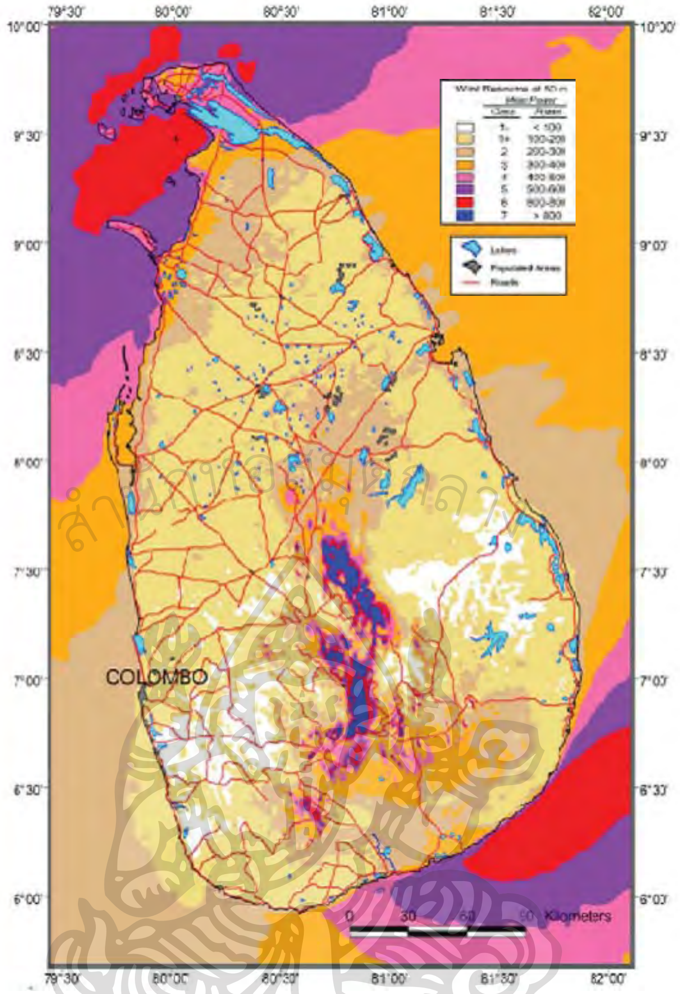
รูปที่ 2.39 แผนที่ลมของสหภาพยุโรป

2.8.2 การสร้างแผนที่ลมโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศ

เนื่องจากในบางประเทศไม่มีเครือข่ายสถานีวัดลม หรือมีเครือข่ายแต่ระยะระหว่างสถานีห่างกันมาก หรือข้อมูลที่ได้มีคุณภาพต่ำ เช่น ข้อมูลขาดหายมาก ไม่สามารถนำมาใช้ในการสร้างแผนที่ลมตามวิธีข้างต้นได้ ดังนั้นในช่วงประมาณ 15 ปี ที่ผ่านมา จึงได้มีการพัฒนาวิธีการหาความเร็วลม โดยใช้แบบจำลองบรรยากาศ (atmospheric model) แบบจำลองดังกล่าวจะประกอบด้วยสมการการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum conservation) สมการการอนุรักษ์ของมวล (continuity equation) และสมการการอนุรักษ์ของพลังงาน จากนั้นจะทำการแก้สมการโดยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) โดยแบ่งบรรยากาศเป็นกริดใน 3 มิติ ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศ และใช้ข้อมูลความเร็วลมระดับสเกลใหญ่ และลักษณะของพื้นผิวโลก เป็นข้อมูลอินพุทของแบบจำลอง เมื่อได้ค่าความเร็วลมทั่วประเทศแล้ว จะนำมาแสดงในรูปแผนที่ โดยความละเอียดถูกต้องของผลที่ได้ขึ้นกับสมรรถนะของแบบจำลอง วิธีการแก้สมการของแบบจำลอง ความละเอียดถูกต้องของ

ข้อมูลอินพุท และคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณ แบบจำลองบรรยากาศที่ใช้ในการจัดทำแผนที่ลมโดยทั่วไปจะเป็นแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง (atmospheric mesoscale model) โดยสมการของแบบจำลองที่นักวิจัยต่างๆ ใช้จะแตกต่างกันที่รายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ถ้าเป็นแบบจำลองที่คำนึงถึงรายละเอียดมากก็จะให้ความละเอียดถูกต้องสูง แต่ต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่หรือซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ในกรณีที่ใช้แบบจำลองที่ดัดแปลงให้ง่ายขึ้น จะทำให้การคำนวณรวดเร็วขึ้น ซึ่งสามารถใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (personal computer, PC) คำนวณได้ แต่ความละเอียดถูกต้องของผลการคำนวณก็จะลดลง ในด้านของข้อมูลอินพุท (input data) โดยทั่วไปจะเป็นข้อมูลสภาวะของบรรยากาศย้อนหลังเป็นเวลาหลายปี ถ้าทำการคำนวณโดยใช้ข้อมูลอินพุทในช่วงสั้นๆ หรือสุ่มเลือกเพียงปีใดปีหนึ่งจากข้อมูลระยะยาวจะสามารถคำนวณได้เร็ว แต่ก็มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้มากเพราะความเร็วลมจะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละปี แต่ถ้าทำการคำนวณโดยตรงจากข้อมูลอินพุททุกชั่วโมงและเป็นข้อมูลย้อนหลังยาวนาน 10-15 ปี ก็จะได้ผลที่ละเอียดถูกต้องมาก แต่ต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูง ดังนั้นการเลือกใช้แบบจำลองและข้อมูลอินพุทขึ้นอยู่กับความละเอียดถูกต้องที่ต้องการและทรัพยากรด้านคอมพิวเตอร์ บุคลากร และงบประมาณที่มีอยู่ ตัวอย่างแผนที่ลมที่สร้างโดยแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง แสดงไว้ในรูปที่ 2.40

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร



รูปที่ 2.40 แผนที่ลมของประเทศศรีลังกาที่สร้างโดยการใช้แบบจำลองบรรยากาศ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

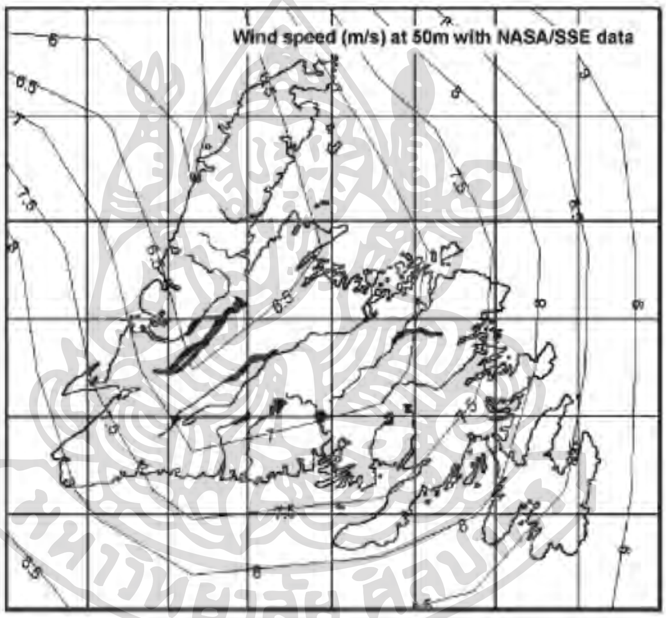
2.9.1 ลมบนบก

เนื่องจากพลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย แต่การประยุกต์ใช้พลังงานลมขึ้นกับศักยภาพพลังงานลมในพื้นที่นั้น โดยการหาศักยภาพพลังงานลมอาจทำเฉพาะพื้นที่ หรือจัดทำในรูปของแผนที่ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศ ดังนั้นในอดีตที่ผ่านมาจึงได้มีนักวิจัยในหลายประเทศได้ทำการศึกษาศักยภาพพลังงานลมในประเทศต่างๆ ซึ่งงานที่สำคัญมีดังนี้

Troen และ Petersen (1989) ได้ทำการจัดทำแผนที่ลมของยุโรป โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลความเร็วและทิศทางลมที่วัดตามสถานีอุตุนิยมวิทยาของประเทศต่างๆ ในยุโรป จากนั้นได้ใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์คำนวณแก้ผลจากสิ่งกีดขวางทางลม และความสูงต่ำของสภาพพื้นผิว เพื่อทำ

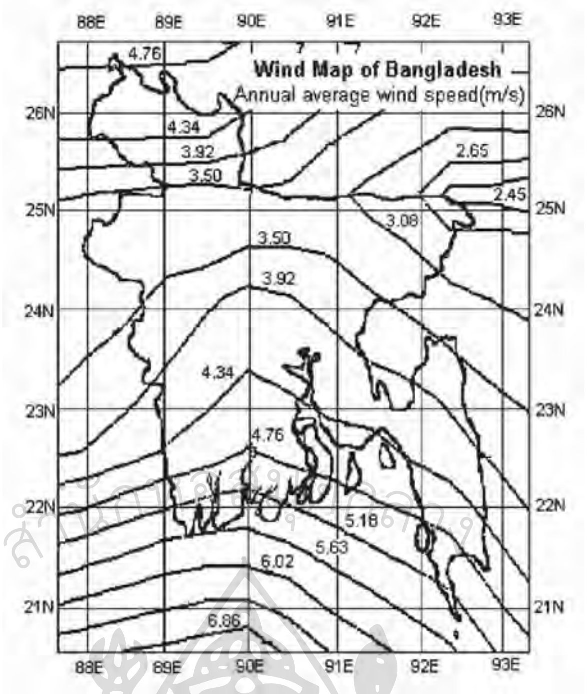
การหาความเร็วลมทั่วไป (generalized wind speed) โดยความเร็วดังกล่าวจะเป็นค่าของความเร็วที่คำนวณแก้ผลจากความสูงต่ำของพื้นที่และสิ่งกีดขวางทางลมโดยผลที่ได้เป็นค่าของความเร็วลมบนพื้นราบที่ระดับความสูงและความหยาบ (roughness) ของพื้นผิวระดับต่างๆ ในบริเวณสถานีวัดลม หลังจากนั้นได้ทำการคาดคะเนแนวโน้มค่าความเร็วลมระหว่างสถานีวัด แล้วนำข้อมูลลมที่ได้มาจัดทำเป็นแผนที่ลมของยุโรป (European wind atlas)

Khan และ Iqbal (2004) ทำการสร้างแผนที่ลมของรัฐ Newfoundland ประเทศแคนาดา โดยการนำข้อมูลลมระดับสเกลใหญ่ (large scale wind) มาทำการคำนวณความเร็วและทิศทางลมที่ความสูงจากพื้นที่ระดับต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาจัดแสดงแผนที่ในลักษณะของเส้นแสดงระดับความเร็วลมที่เท่ากัน (isovent) ครอบคลุมพื้นที่ที่ทำการศึกษา



รูปที่ 2.41 แผนที่ลมที่ระดับ 50 เมตรของรัฐ Newfoundland ประเทศแคนาดา

Khan และคณะ (2004) ได้ทำการจัดทำแผนที่ลมของประเทศบังคลาเทศ โดยใช้แบบจำลองบรรยากาศ (atmospheric model) เพื่อทำการคำนวณความเร็วลมที่ระดับความสูง 30 เมตร ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศบังคลาเทศ และนำมาจัดแสดงในรูปของแผนที่ ดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 แผนที่ลมที่ระดับ 30 เมตรของประเทศบังคลาเทศ

เนื่องจากวิธีการจัดทำแผนที่ลมของ Troen และ Petersen (1989) จำเป็นต้องใช้ข้อมูลคุณภาพดีจากเครือข่ายสถานีวัดลม ซึ่งบางประเทศไม่สามารถจัดหาข้อมูลดังกล่าวได้ ดังนั้น Mortensen และคณะ (2005) จึงได้พัฒนาวิธีการจัดทำแผนที่ลมโดยใช้วิธีคำนวณจากแบบ จำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง (atmospheric mesoscale model) จากนั้นได้นำวิธีดังกล่าวไปจัดทำแผนที่ลมของประเทศอียิปต์ ดังรูปที่ 2.43

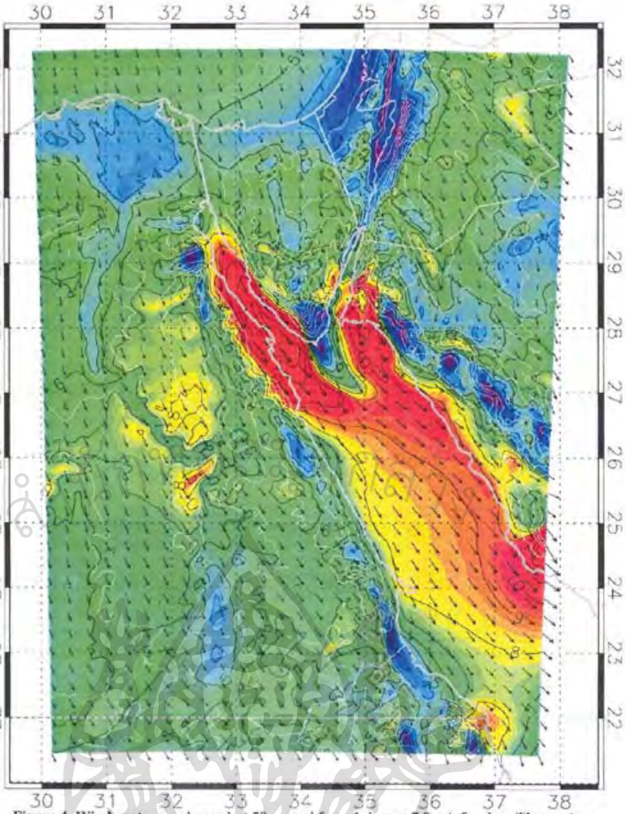
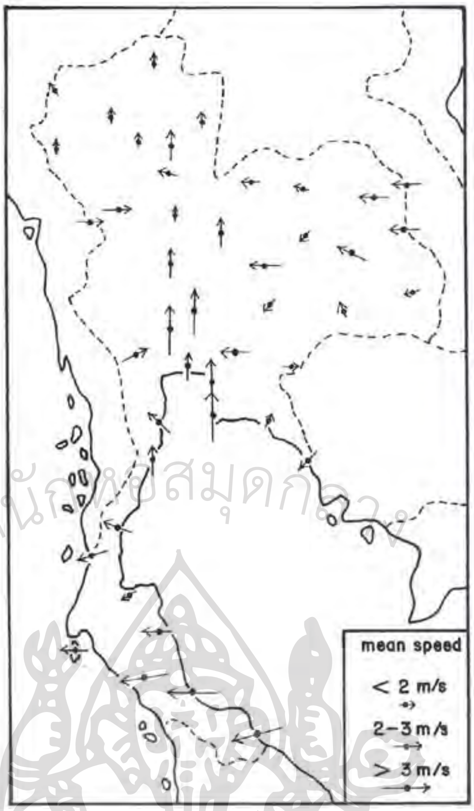


Figure 4. Wind vectors and speed at 50 m a.g.l for a 1 degree 7.0 m/s forcing. The contour interval is 1 m/s.

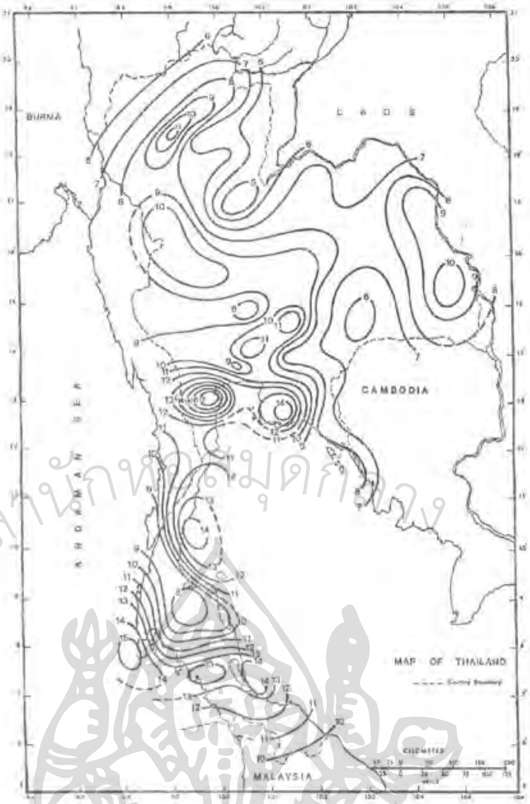
รูปที่ 2.43 แผนที่ลมของประเทศอียิปต์

สำหรับกรณีประเทศไทย การจัดทำแผนที่ลมครั้งแรกดำเนินการโดย Exell และคณะ (1981) แห่งสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) แผนที่ดังกล่าวได้จากการนำข้อมูลลมจากสถานีอุตุนิยมวิทยามาหาค่าเฉลี่ยและนำค่าไปเขียนลงในแผนที่ประเทศไทยโดยตรง ตัวอย่างแผนที่ของความเร็วและทิศทางลมเฉลี่ยในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายน แสดงไว้ในรูปที่ 2.44



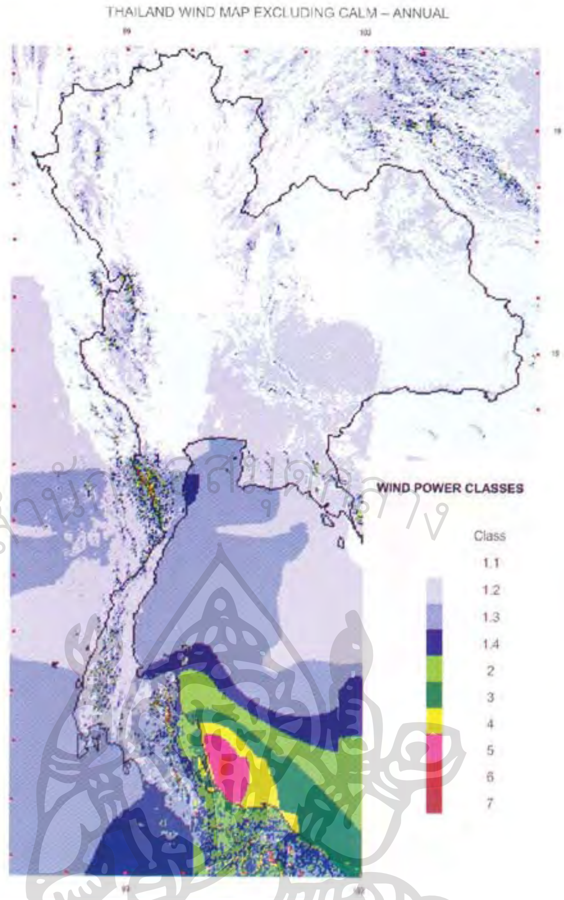
รูปที่ 2.44 แผนที่ลมเฉลี่ยของเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ของ Exell และคณะฯ

ต่อมา Suwantragul และคณะ (1984) แห่งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีได้จัดทำแผนที่ลมอีกครั้งหนึ่ง โดยใช้ข้อมูลจากสถานีวัดลมมาหาค่าเฉลี่ยรายเดือน และนำค่าที่ได้มาทำการคาดคะเนแนวโน้ม (extrapolation) จากนั้นจัดแสดงผลในรูปของเส้นระดับค่าความเร็วลมดังรูปที่ 2.45



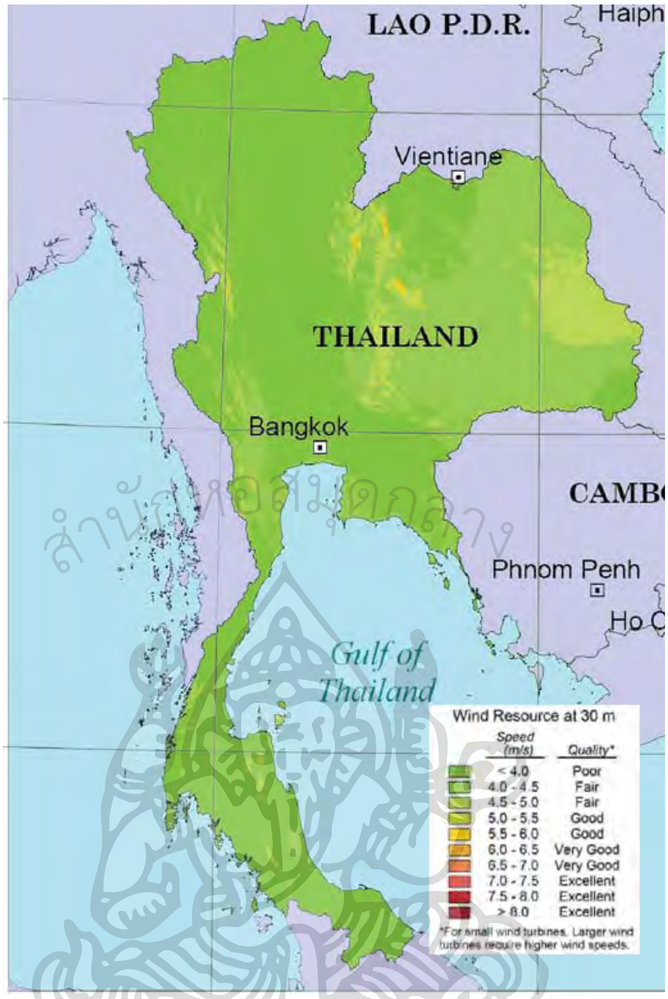
รูปที่ 2.45 แผนที่ลมที่พัฒนาโดย Suwantragul และคณะฯ

ในระหว่างปี พ.ศ. 2542 – 2544 กรมพัฒนาพลังงานและส่งเสริมพลังงาน ได้จัดทำแผนที่ลมสำหรับประเทศไทยโดยใช้โปรแกรม Wind Map ร่วมกับข้อมูลจากสถานีวัดลมที่ระดับ 10 เมตร ของกรมอุตุนิยมวิทยาประกอบกับข้อมูลลมอื่นๆ เป็นอินพุทของโปรแกรม โดยโปรแกรมจะทำการคำนวณความเร็วลมในแนวราบและในแนวดิ่ง แล้วนำผลที่ได้มาจัดแสดงในรูปแผนที่ (รูปที่ 2.46) (กรมพัฒนาพลังงานและส่งเสริมพลังงานม 2544)



รูปที่ 2.46 แผนที่ลมของประเทศไทย ของกรมพัฒนาพลังงานและส่งเสริมพลังงาน

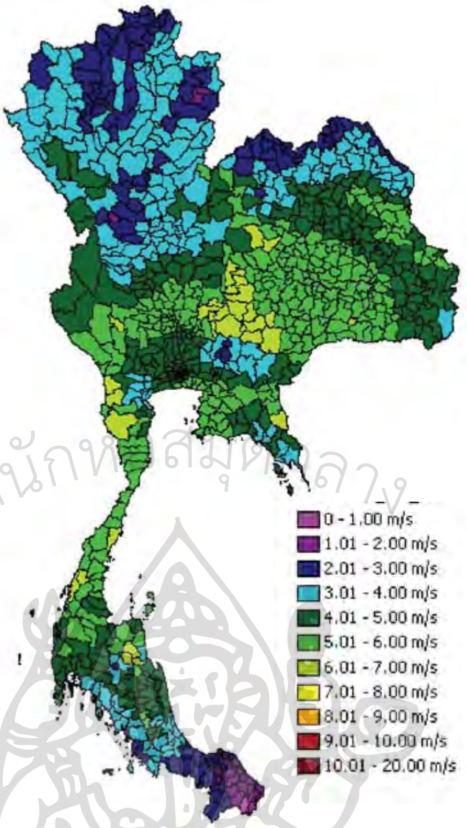
ในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ธนาคารโลก (World Bank, 2001) ภายใต้โครงการ Asia Alternative Energy Program ได้จัดทำแผนที่ลมครอบคลุมพื้นที่ประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ เวียดนาม ลาว กัมพูชา และไทย โดยใช้โปรแกรม MesoMap ช่วยในการคำนวณ โปรแกรมดังกล่าวจะคำนวณลมด้วยแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง แต่เนื่องจากการคำนวณลมทุกวันต้องใช้เวลาคำนวณมาก หรือต้องใช้คอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ ดังนั้นผู้ดำเนินโครงการดังกล่าวจึงเลือกคำนวณเพียง 1 ปี หรือ 365 วัน ซึ่งกำหนดให้เป็นตัวแทนของลมจากข้อมูล 15-20 ปี แล้วนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อจัดแสดงในแผนที่ (รูปที่ 2.47) อย่างไรก็ตามการเลือกคำนวณเฉพาะบางวันโดยกำหนดให้เป็นตัวแทนของลมในปีนั้นๆ ไม่สามารถที่จะพิสูจน์ว่าเป็นลมตัวแทนที่แท้จริง ทั้งนี้เพราะความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละปี



รูปที่ 2.47 แผนที่ลมของ World Bank

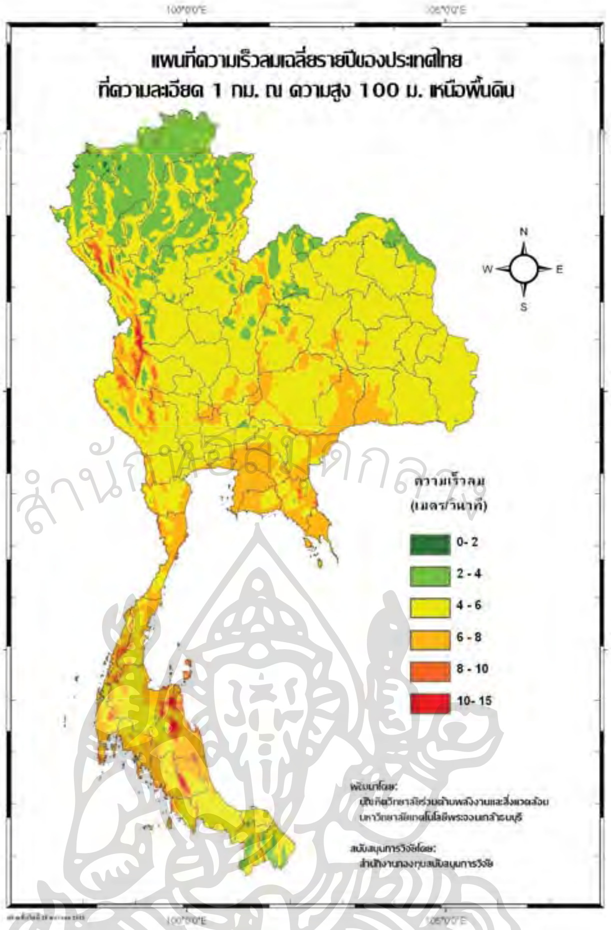
สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

หลังจากนั้น รัดเกล้า พันธุอร่าม และคณะ (2551) ได้ดำเนินการคำนวณความเร็วลมในประเทศไทย โดยใช้โปรแกรม RAMS ช่วยในการคำนวณลม จากนั้นทำการคำนวณความเร็วลมเป็นเดือนๆ จำนวน 30 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2548 จนถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2550 ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่เท่ากับ 10 x 10 ตารางกิโลเมตร และที่ระดับความสูง 50 เมตร และ 100 เมตร แล้วนำมาจัดแสดงในรูปแผนที่รายเดือน จำนวน 30 เดือน เนื่องจากผลที่ได้แสดงในรูปแผนที่ลมเป็นเดือนๆ แผนที่ดังกล่าวจึงใช้บอกศักยภาพของพลังงานลมในเดือนนั้นๆ เท่านั้น



รูปที่ 2.48 ตัวอย่างแผนที่ลม (เดือนมิถุนายน 2548) ที่ดำเนินการโดย รัดเกล้า พันธุอร่าม และคณะฯ

ในช่วงปี พ.ศ. 2550 ถึง 2552 เกษมสันต์ มโนมัยพิบูลย์ และคณะ (2553) ได้ทำการพัฒนาแผนที่ลม โดยใช้แบบจำลองบรรยากาศระดับสเกลปานกลาง MM5 ร่วมกับแบบจำลองบรรยากาศ CALMET โดยคณะวิจัยดังกล่าวนี้ได้ทำการวิเคราะห์ลมจากแหล่งข้อมูลต่างๆ ในช่วงปี พ.ศ. 2547 ถึง 2551 และกำหนดให้ปี พ.ศ. 2549 เป็นปีตัวแทนของข้อมูลลมในช่วงดังกล่าวของประเทศไทย จากนั้นได้ใช้แบบจำลองดังกล่าวข้างต้นทำการคำนวณความเร็วลมในปี พ.ศ. 2549 ที่ระดับความสูง 20 เมตร จนถึง 100 เมตร จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับข้อมูลจากการวัดของหน่วยงานต่างๆ พบว่าความเร็วลมที่ได้มีแนวโน้มสูงกว่าการวัด



รูปที่ 2.49 ตัวอย่างแผนที่ลมที่ระดับความสูง 100 เมตร ซึ่งดำเนินการโดย เกษมสันต์ มโณมัยพิบูลย์ และคณะฯ

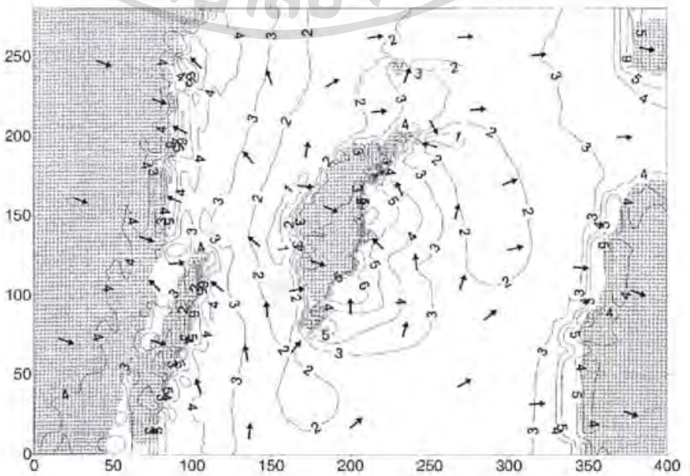
จากผลการดำเนินการจัดทำแผนที่ลมของประเทศไทยที่ผ่านมาจะเห็นว่าการดำเนินการในช่วงแรก (พ.ศ. 2524-2542) เป็นการใช้ข้อมูลวัดจากกรมอุตุนิยมวิทยาเป็นหลัก ผลที่ได้มีความละเอียดถูกต้องค่อนข้างน้อย สำหรับการดำเนินงานในช่วงหลังเป็นการหาความเร็วลมโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศ ถึงแม้ว่าวิธีการเหล่านี้จะเหมาะสมสำหรับประเทศไทยซึ่งมีข้อมูลลมที่ละเอียดถูกต้องจากการวัดค่อนข้างจำกัด แต่ทว่างานที่ดำเนินการไปแล้วเหล่านั้นล้วนใช้ข้อมูลระยะสั้น (1 ถึง 2.5 ปี) ไม่สามารถใช้บ่งชี้ศักยภาพพลังงานลมบนบกของประเทศได้อย่างชัดเจน

2.9.2 ลมนอกชายฝั่ง

ถึงแม้ว่าพลังงานลมจะเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจมากขึ้นในปัจจุบัน แต่การติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่ในบางพื้นที่กลับประสบปัญหาในหลายๆด้าน อาทิเช่น ปัญหาการบดบังทัศนียภาพ และปัญหามลพิษทางเสียง ตลอดจนพื้นที่ซึ่งเป็นแหล่งลมดีแต่อยู่ในเขตหวงห้ามไม่สามารถติดตั้งกังหันลมได้ ด้วยปัญหาต่างๆ เหล่านี้ส่งผลให้พื้นที่ที่สามารถใช้ประโยชน์ในการติดตั้งกังหันลมบนบกมีข้อจำกัดมาก ดังนั้นการหาแหล่งลมดีนอกชายฝั่งเพื่อใช้ประโยชน์ในการติดตั้งกังหันลมจึงได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน

การหาพื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานลมสามารถทำได้โดยการติดตั้งเครื่องวัดลมเป็นเครือข่ายครอบคลุมพื้นที่ที่สนใจ แต่ข้อมูลวัดลมนอกชายฝั่งหรือในทะเลมีจำกัดและส่วนใหญ่อุปกรณ์วัดจะติดตั้งอยู่บนทุ่นลอย ซึ่งวัดลมที่ระดับความสูงใกล้พื้นผิวน้ำทะเล ดังนั้นการประเมินศักยภาพด้วยแบบจำลองจึงเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการศึกษาศักยภาพพลังงานลมนอกชายฝั่ง ในอดีตที่ผ่านมาจึงได้มีนักวิจัยในหลายประเทศได้ทำการศึกษาศักยภาพพลังงานลมนอกชายฝั่งของประเทศต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

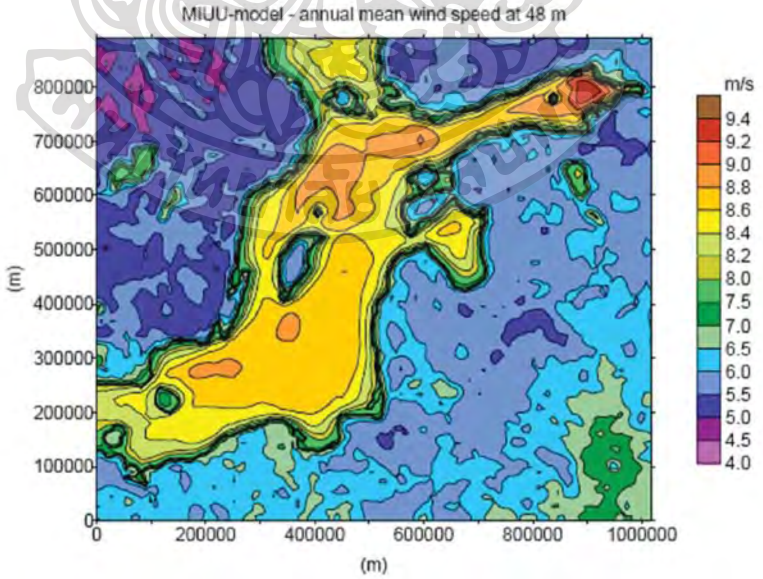
Kallstrand และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาสภาวะของลมเหนือทะเลบอลติก (Baltic sea) ในช่วงระหว่าง วันที่ 3 – 4 พฤษภาคม ค.ศ. 1997 จากการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าลมในระดับสเกลปานกลางเหนือทะเลบอลติกของทั้งสองวันมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้สืบเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นน้ำและพื้นดิน ดังนั้นในการศึกษาสภาวะของลมในระดับสเกลปานกลางจำเป็นต้องให้ความสำคัญต่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นน้ำและพื้นดิน จากการศึกษาดังกล่าว Kallstrand และคณะได้แสดงการกระจายตัวของลมเหนือทะเลบอลติก ของวันที่ 4 พฤษภาคม ค.ศ. 1997 โดยการลากเส้นคอนทัวร์(contour) ดังรูปที่ 2.50



รูปที่ 2.50 ลมเหนือทะเลบอลติกในช่วงวันที่ 4 พฤษภาคม 1997

G. Li (2000) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการติดตั้งทุ่งกังหันลมขนาดใหญ่ นอกชายฝั่งฮ่องกง โดยเริ่มจากการหาศักยภาพพลังงานลมนอกชายฝั่ง แต่เนื่องจากเป็นการศึกษาในบริเวณแคบๆ และเกาะฮ่องกงมีข้อมูลวัดที่ดีพอ ผู้วิจัยจึงใช้ข้อมูลวัดเป็นหลักในการศึกษาศักยภาพ และพบว่าความเร็วลมโดยเฉลี่ยต่อปีของฮ่องกงมีค่า 6.6 m/s หรือเทียบเท่าเป็น power density เป็น 310 W/m^2 สำหรับการเลือกบริเวณที่เหมาะสำหรับการติดตั้งทุ่งกังหันลม ผู้วิจัยได้พิจารณาจากการใช้พื้นที่น้ำทะเลเป็นหลักเนื่องจากฮ่องกงเป็นท่าเรือที่สำคัญของภูมิภาคนี้ จึงจำเป็นต้องกันพื้นที่ที่เป็นเส้นทางเดินเรือออกไป นอกจากนั้นในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้คำนึงถึงเรื่องของลมพายุ ลักษณะของคลื่นทะเล ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของลมในแต่ละฤดูกาล และท้ายสุดได้มีการวิเคราะห์ถึงต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม และชี้ให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ในทางเศรษฐกิจที่จะลงทุนจัดตั้งทุ่งกังหันลมในทางตะวันออกของเกาะฮ่องกง

ในปีถัดมา Bergstrom (2001) จากมหาวิทยาลัย Uppsala ประเทศสวีเดน ได้ทำการศึกษาสภาวะของลมนอกชายฝั่งในแถบทะเลบอลติกเช่นเดียวกันโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง MIUU และอาศัยข้อมูลลมจีโอสโทรปิก ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นทะเลและพื้นดิน ลักษณะพื้นผิวโลก (topography) ตลอดจนความหยาบของพื้นผิวโลก (roughness) เป็นข้อมูลอินพุทของแบบจำลอง ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองในระดับสเกลปานกลาง MIUU สามารถใช้ศึกษาสภาวะของลมนอกชายฝั่งได้



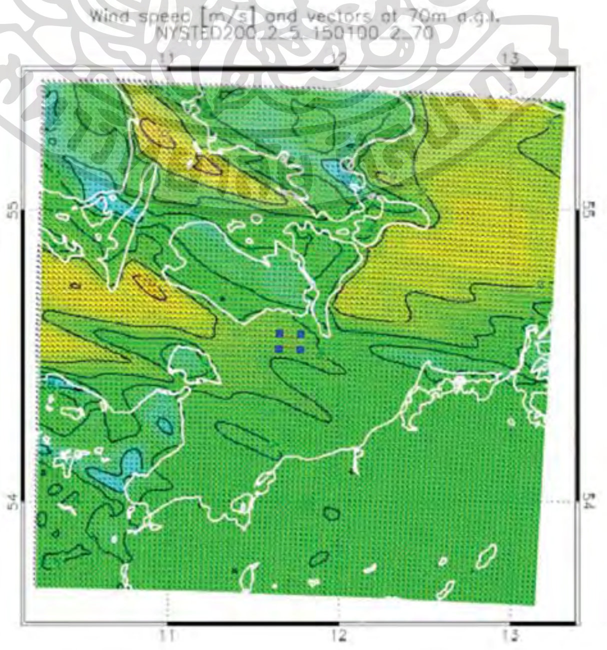
รูปที่ 2.51 ความเร็วลมเฉลี่ยรายปีเหนือทะเลบอลติก ที่ระดับความสูง 48 เมตรเหนือผิวน้ำทะเล

ในปีเดียวกันนี้ Jorgensen และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาสภาวะของลมโดยอาศัยเทคนิคของแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง และเทคนิคของภาพถ่ายดาวเทียม SAR ในบริเวณทุ่งกังหันลมนอกชายฝั่ง Horns Rev ซึ่งเป็นทุ่งกังหันลมขนาดใหญ่ที่มีกังหันลม 80 ตัว และมีกำลังการผลิต 160 MW จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าสภาวะของลมที่คำนวณได้จากเทคนิคทั้งสองนี้ ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน

Pantaleo และคณะ (2005) ได้ศึกษาความเป็นไปได้และการประยุกต์ใช้ทุ่งกังหันลมนอกชายฝั่งของจังหวัด Puglia ประเทศอิตาลี โดยในการศึกษานี้จะเป็นการศึกษาทางด้านเทคนิค และทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาบริเวณที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งทุ่งกังหันลม นอกจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลจากการใช้กังหันลมแบบต่างๆในบริเวณที่เหมาะสมที่สุด พบว่าในบริเวณดังกล่าวเมื่อเพิ่มขนาดของกังหันลมจะทำให้ต้นทุนต่อหน่วยการผลิตกระแสไฟฟ้าลดลง

Ozerdem และคณะ (2006) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการจัดตั้งทุ่งกังหันลมที่เมือง Izmir ประเทศตุรกี โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นที่การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ โดยผลการวิจัยสรุปว่า ยิ่งค่า installed capacity มีค่าสูง ราคาไฟฟ้าต่อหน่วยจะมีค่าต่ำลง

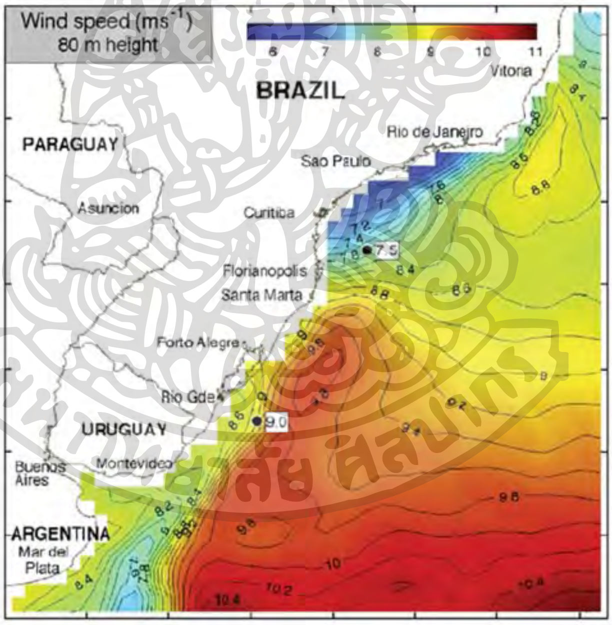
Badger และคณะ (2006) ใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางในการคำนวณสภาวะลมนอกชายฝั่ง ในบริเวณทุ่งกังหันลม Nysted ทางตอนใต้ของเดนมาร์ก พบว่าอุณหภูมิของผิวน้ำทะเลและผิวดินมีอิทธิพลสำคัญต่อการคำนวณ และพบว่าแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางยังแสดงให้เห็นผลของช่องแคบต่างๆ ที่มีต่อการพัดของลม ดังรูปที่ 2.52



รูปที่ 2.52 ความเร็วลมนอกชายฝั่งในบริเวณทุ่งกังหันลม Nysted ทางตอนใต้ของเดนมาร์ก

Dahnju และคณะ (2007) นำเสนอกระบวนการในการประมาณศักยภาพพลังงานลมและค่ากระแสไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้จากทุ่งกังหันลมนอกชายฝั่ง โดยกระบวนการดังกล่าวนี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการคัดสรรพื้นที่ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากความลึกของน้ำทะเลและเทคโนโลยีของเสากังหันลมที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่นั้นๆ ขั้นตอนที่สองคือการคำนวณปริมาณการผลิตของพื้นที่ที่คัดสรรได้ ขั้นตอนที่สามเป็นการคำนวณทางเศรษฐกิจ โดยงานวิจัยนี้ได้ยกตัวอย่างการคำนวณของมลรัฐ Delaware ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าได้กำลังการผลิตเฉลี่ยทั้งปีกว่า 5200 MW ซึ่งมีค่าประมาณ 4 เท่าของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดในมลรัฐ Delaware

Pimenta และคณะ (2008) ใช้ข้อมูลลมที่วัดจากแท่นขุดเจาะน้ำมันและทุ่นลอยร่วมกับข้อมูลดาวเทียม QuikSCAT ในการสร้างแผนที่ลมนอกชายฝั่งทางตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศบราซิล (รูปที่ 2.53) พบว่าพื้นที่เลียบชายฝั่งระหว่างละติจูด 28–33 องศาใต้มีศักยภาพสูง โดยมีกำลังการติดตั้งกังหันลมได้ 102 GW ซึ่งสามารถให้บริการไฟฟ้าแก่ประชากรทั่วทั้งประเทศได้



รูปที่ 2.53 ความเร็วลมนอกชายฝั่งทางตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศบราซิล ที่ระดับความสูง 80 เมตรเหนือระดับน้ำ

จากการศึกษาของ Sempreviva และคณะ (2008) ในเรื่องเทคนิคของการประเมินศักยภาพพลังงานลมนอกชายฝั่งในทะเลยุโรป ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการประเมินศักยภาพลมนอกชายฝั่ง โดยยกตัวอย่างกรณีของทะเลบอลติก ซึ่งผลการคำนวณที่ระดับ 50 เมตรสอดคล้องกับข้อมูลวัด

นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยของ Snyder และ Kaiser ซึ่งทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบต่อระบบนิเวศน์และการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของทุ่งกังหันลมนอกชายฝั่ง (offshore) โดยการเปรียบเทียบกับทุ่งกังหันลมบนฝั่ง (onshore) งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์และการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของทุ่งกังหันลมทั้ง 2 ประเภทไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้โดยตรง เนื่องจากความแตกต่างของพื้นที่และองค์ประกอบอื่นๆ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอปัจจัยต่างๆที่ควรพิจารณาเกี่ยวกับระบบนิเวศน์และการประเมินทางเศรษฐศาสตร์

จอมภพ และคณะ (พ.ศ. 2551) ได้การประเมินศักยภาพของพลังงานลมเฉพาะพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งเป็นการศึกษาบนพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทั้งสิ้นยังไม่ครอบคลุมถึงพื้นที่นอกชายฝั่ง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเสนอที่จะจัดทำแผนที่ลมครอบคลุมทั้งพื้นที่บนแผ่นดินและพื้นที่นอกชายฝั่งของประเทศไทย พร้อมทั้งวิเคราะห์หาพื้นที่ที่มีศักยภาพเหมาะสำหรับพัฒนาและส่งเสริมด้านพลังงานลมสำหรับประเทศไทย

สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 3
วิธีวิจัยและผล

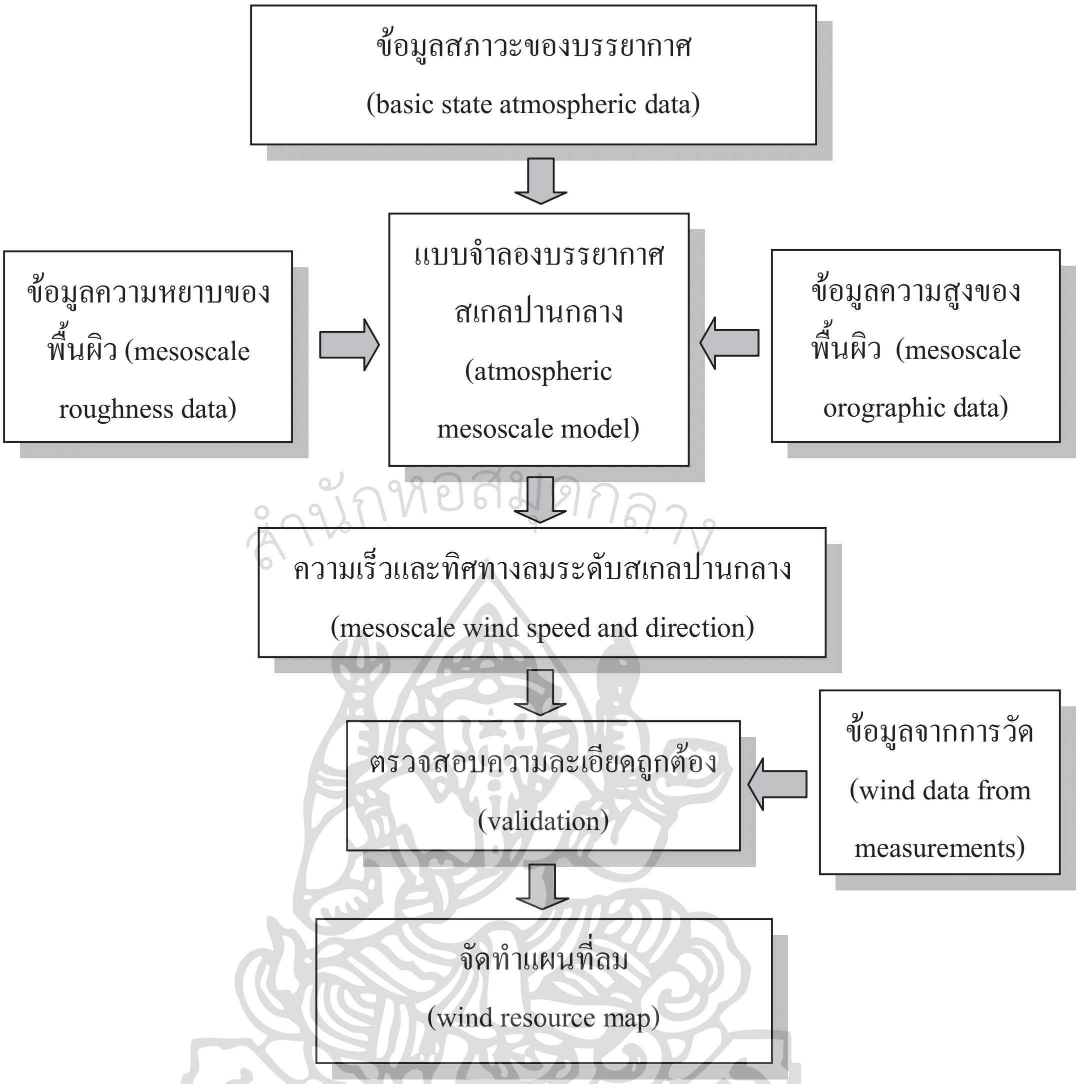
กระบวนการจัดทำแผนที่ลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ (รูปที่ 3.1) ได้แก่ การคัดเลือกแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง (atmospheric mesoscale model) การจัดหาข้อมูลสภาวะของบรรยากาศ (basic state atmospheric data) ข้อมูลลักษณะของพื้นผิว การคำนวณความเร็วและทิศทางลม การตรวจสอบความละเอียดถูกต้องของผลการคำนวณ และการจัดทำแผนที่ลม โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน มีดังนี้

สำนักหอสมุดกลาง

3.1 แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง (atmospheric mesoscale model)

3.1.1 การคัดเลือกแบบจำลอง

แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางที่พัฒนาในประเทศต่างๆ มีหลายแบบจำลอง แต่ละแบบจำลองจะมีสมการพื้นฐานในแบบจำลองคล้ายคลึงกัน แต่มีรายละเอียดในการหาค่าตัวแปร และใช้วิธีการแก้สมการของแบบจำลองที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง KAMM (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model) ซึ่งพัฒนาโดยคณะนักวิจัยของสถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรูห์ (Karlsruhe Institute of Technology) ประเทศสหพันธรัฐเยอรมันนี เพื่อทำการคำนวณความเร็วและทิศทางลมในประเทศไทย ทั้งนี้เพราะเป็นแบบจำลองที่คำนึงถึงผลของตัวแปรทางฟิสิกส์ของบรรยากาศอย่างละเอียด โดยสถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรูห์นำไปใช้ได้ผลดีในการศึกษาศักยภาพพลังงานลมบริเวณภาคใต้ของสหพันธรัฐเยอรมันนี (Karlthoff et al., 2003) และที่ประเทศชิลี (Kalthoff et al., 2002) นอกจากนี้ RISO National Laboratory ประเทศเดนมาร์กได้นำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการจัดทำแผนที่ลมได้ผลดีในหลายประเทศ เช่น เดนมาร์ก ไอร์แลนด์ ตุรกี สเปน โปรตุเกส อียิปต์ บังคลาเทศ และเนปาล เป็นต้น (Frank et al., 2001; Mortensen, 2005; Hussain et al., 2007)



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงกระบวนการจัดทำแผนที่ลมในประเทศไทยที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

นอกจากนั้น เพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางสามารถใช้กับประเทศในเขตศูนย์สูตรได้ ผู้วิจัยได้ทดลองใช้แบบจำลองดังกล่าวในการคำนวณความเร็วลมสำหรับประเทศกัมพูชา ซึ่งผลการคำนวณพบว่าแบบจำลองดังกล่าวนี้สามารถปรับให้ใช้ได้กับประเทศในแถบศูนย์สูตร ทั้งนี้ผลการคำนวณสำหรับประเทศกัมพูชาได้แสดงไว้ในภาคผนวกที่ 1

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้แบบจำลอง KAMM เพื่อคำนวณความเร็วลมสำหรับประเทศไทย รายละเอียดของแบบจำลองนี้จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.1.2 หลักการของแบบจำลอง KAMM (Adrian and Fiedler, 1991)

ลมในระดับสเกลใหญ่หรือลมจีโอสโทรปิค (geostrophic wind) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ และแรงคอริโอลิส (coriolis force) ตามสมการ

$$\frac{\partial \pi_G}{\partial x} = \frac{f v_G}{c_p \theta_G} \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial \pi_G}{\partial y} = \frac{f u_G}{c_p \theta_G} \tag{3.2}$$

$$\frac{\partial \pi_G}{\partial z} = -\frac{g}{c_p \theta_G} \tag{3.3}$$

เมื่อ u_G = เป็นองค์ประกอบของความเร็วลมจีโอสโทรปิคในแนวแกน x

v_G = เป็นองค์ประกอบของความเร็วลมจีโอสโทรปิคในแนวแกน y

θ_G = potential temperature

π_G = Exner function

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

f = แรงคอริโอลิส

โดยที่

$$\theta_G = \frac{T}{\pi_G} \tag{3.4}$$

เมื่อ T = อุณหภูมิของอากาศ

Exner function กำหนดขึ้นตามสมการ

$$\pi_G = \left(\frac{p}{p_o}\right)^{R/c_p} \tag{3.5}$$

เมื่อ p = ความดันบรรยากาศที่ความสูงใดๆ

p_o = ความดันบรรยากาศที่พื้นผิวโลก

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)

c_p = ความร้อนจำเพาะของอากาศ

จากการแก้สมการ (3.1)-(3.3) จะทำให้ทราบค่าความเร็วลม ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิในระดับสเกลใหญ่ ข้อมูลดังกล่าวจะใช้ในการหาความเร็วลม ความดัน และอุณหภูมิในระดับสเกลปานกลาง (mesoscale) โดยความเร็วลมในสเกลปานกลางจะเป็นไปตามสมการของ Reynolds ดังนี้

$$\frac{du}{dt} = -c_p\theta\frac{\partial}{\partial x}(\pi_d^* + \pi_h^*) + f(v - v_G\frac{\theta}{\theta_G}) - \frac{\partial}{\partial x}(\overline{u'u'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{u'w'}) \quad (3.6)$$

$$\frac{dv}{dt} = -c_p\theta\frac{\partial}{\partial y}(\pi_d^* + \pi_h^*) - f(u - u_G\frac{\theta}{\theta_G}) - \frac{\partial}{\partial x}(\overline{v'u'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\overline{v'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{v'w'}) \quad (3.7)$$

$$\frac{dw}{dt} = -c_p\theta\frac{\partial}{\partial z}\pi_d^* - \frac{\partial}{\partial x}(\overline{w'u'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\overline{w'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{w'w'}) \quad (3.8)$$

เมื่อ u = ความเร็วลมสเกลปานกลาง (mesoscale wind) ในแนวแกน x

v = ความเร็วลมสเกลปานกลาง (mesoscale wind) ในแนวแกน y

w = ความเร็วลมสเกลปานกลาง (mesoscale wind) ในแนวแกน z

θ = potential temperature ในสเกลปานกลาง

โดยที่

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.9)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (3.10)$$

$$w = \overline{w} + w' \quad (3.11)$$

$$\theta = \overline{\theta} + \theta' \quad (3.12)$$

$$\pi = \pi_G + \pi^* \quad (3.13)$$

และ

$$\pi^* = \pi_d^* + \pi_h^* \quad (3.14)$$

เมื่อ $\bar{u}$ = ความเร็วลมเฉลี่ยในแนวแกน x

$\bar{v}$ = ความเร็วลมเฉลี่ยในแนวแกน y

$\overline{w}$ = ความเร็วลมเฉลี่ยในแนวแกน z

$\overline{\theta}$ = ค่าเฉลี่ยของ potential temperature

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

π = Exner function ในสเกลปานกลาง

u' = turbulent deviation ของความเร็วลมในแนวแกน x

v' = turbulent deviation ของความเร็วลมในแนวแกน y

w' = turbulent deviation ของความเร็วลมในแนวแกน z

θ' = turbulent deviation ของ potential temperature

π_G = Exner function ในสเกลใหญ่

π_d^* = dynamic part ของ mesoscale pressure

π_h^* = thermal part ของ mesoscale pressure

สำหรับสมการของ potential temperature ในสเกลปานกลาง เขียนได้ดังนี้

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\partial}{\partial z}(\overline{\theta' u'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\overline{\theta' v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{\theta' w'}) + \frac{Q}{c_p \pi} \tag{3.15}$$

เมื่อ Q = heat source $= -\frac{1}{\rho c_p}\frac{\partial \overline{R}}{\partial z}$

โดยที่ $\partial \overline{R} / \partial z$ คือ grid-volume-averaged vertical gradient of absorbed irradiance

กรณีสมการของความชื้น (moisture) เขียนได้ดังนี้

$$\frac{dS}{dt} + U_i \frac{\partial S}{\partial x_i} = \frac{\partial (\overline{S'U'})}{\partial x_i} \tag{3.16}$$

เมื่อ S = ความชื้น

S' = turbulent deviation ของความชื้น

ในด้านของสมการความต่อเนื่องของมวลหรือสมการอนุรักษ์มวล (continuity equation) จะเขียนได้ดังนี้

$$\nabla . V = 0 \tag{3.17}$$

เมื่อ V เป็นเวกเตอร์ของความเร็วลม

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

สมการของความดันบรรยากาศ (pressure equation) เขียนได้ดังนี้

$$\nabla(C_p\theta.\nabla\pi_d^*) = \nabla.(\mathbf{-A+P_H+C+D}) \qquad (3.18)$$

เมื่อ A = advection term

P_H = pressure acceleration

C = Coriolis acceleration

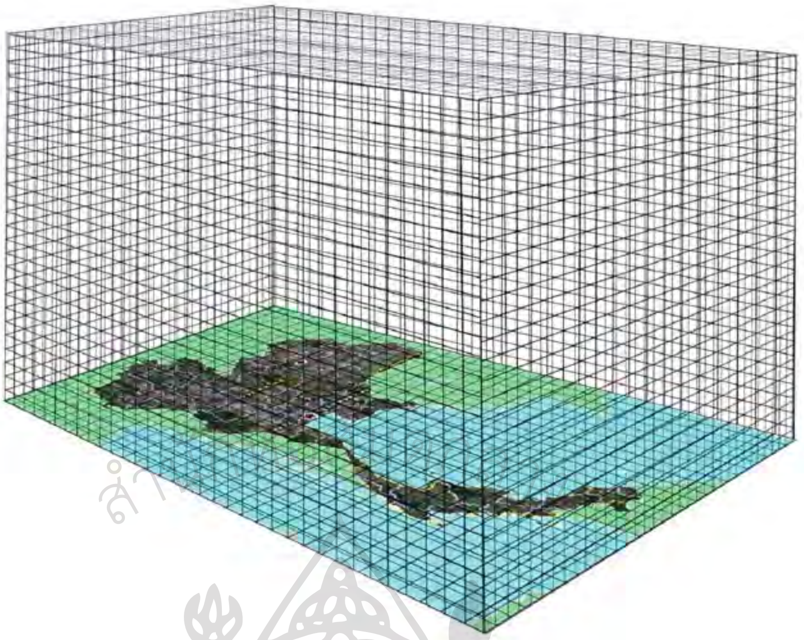
D = divergence turbulent momentum flux

เราจะเรียกสมการ (3.6)-(3.18) ว่าเป็นแบบจำลองของบรรยากาศในสเกลปานกลาง (atmospheric mesoscale model)

3.1.3 วิธีเชิงตัวเลขสำหรับใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลอง KAMM (Adrian and Fiedler, 1991)

เนื่องจากสมการ (3.6)-(3.18) เป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์ (partial differential equation) ซึ่งไม่สามารถแก้สมการโดยวิธีวิเคราะห์ได้ (analytical method) ดังนั้นจำเป็นต้องแก้สมการโดยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) แบบจำลอง KAMM จะใช้วิธี centered finite difference โดยจะทำการแบ่งบรรยากาศของประเทศไทยออกเป็นกริด (grid) ใน 3 มิติ โดยแต่ละกริดมีขนาดพื้นที่ฐาน 3 x 3 ตารางกิโลเมตร และมีความสูงแปรตามความสูงของพื้นที่ โดยจะแบ่งละเอียดบริเวณใกล้พื้นผิวโลก

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร



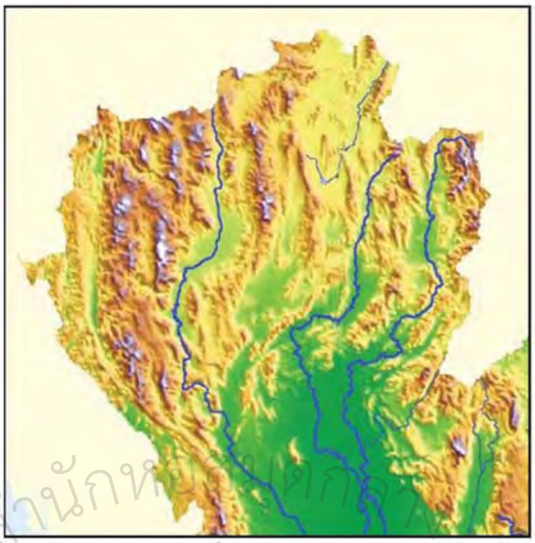
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการแบ่งบรรยากาศเหนือประเทศไทยออกเป็นกริด (grid) ใน 3 มิติ

จากนั้นจะแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองให้อยู่ในรูป finite difference ซึ่งมีรูปแบบทั่วไป ดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\frac{v(t+\Delta t)-v(t)}{\Delta t} &= -c_p\theta\left(\frac{\pi_d^*(y+\Delta y)-\pi_d^*(y)}{\Delta y}+\frac{\pi_h^*(y+\Delta y)-\pi_h^*(y)}{\Delta y}\right)\\ &\quad -f\left(u-u_G\frac{\theta}{\theta_G}\right)-\left(\frac{\overline{v'u'}(x+\Delta x)-\overline{v'u'}(x)}{\Delta x}\right)\\ &\quad -\left(\frac{\overline{v'v'}(y+\Delta y)-\overline{v'v'}(y)}{\Delta y}\right)-\left(\frac{\overline{v'w'}(z+\Delta z)-\overline{v'w'}(z)}{\Delta z}\right)\end{aligned} \tag{3.19}$$

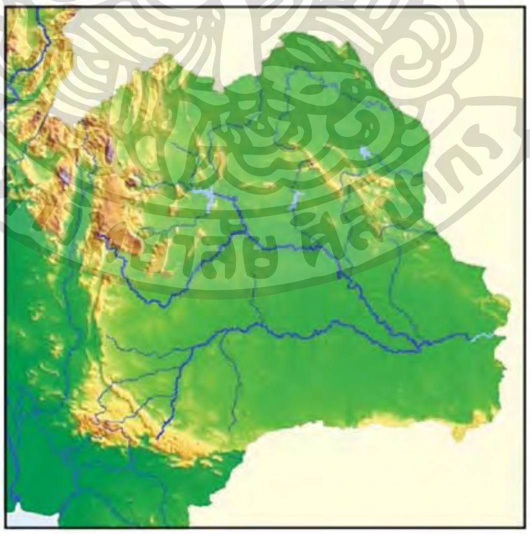
3.1.4 การแบ่งพื้นที่ในการคำนวณ

เนื่องจากในการใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางคำนวณความเร็วลมและตัวแปรต่างๆ จะต้องดำเนินการที่ทุกตำแหน่งของกริดจำนวนนับล้านกริดทุกๆ ชั่วโมง ต่อเนื่องกันตลอดช่วงเวลา 15 ปี ซึ่งเป็นภาระงานการคำนวณค่อนข้างสูง ถึงแม้จะใช้ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ดังนั้น ผู้วิจัยจะทำการแบ่งพื้นที่ประเทศไทยออกเป็นขอบเขตพื้นที่การคำนวณหรือโดเมน (domain) โดยพิจารณาความเหมาะสมของลักษณะภูมิประเทศ จากแผนที่ความสูงจะเห็นว่าภาคเหนือของประเทศไทย ประกอบด้วยแนวเขาต่างๆ ซึ่งมีลักษณะแตกต่างไปจากภูมิภาคอื่นๆ ดังนั้นจึงแบ่งการคำนวณเป็น 1 โดเมนสำหรับภูมิภาคนี้ (รูปที่ 3.3)



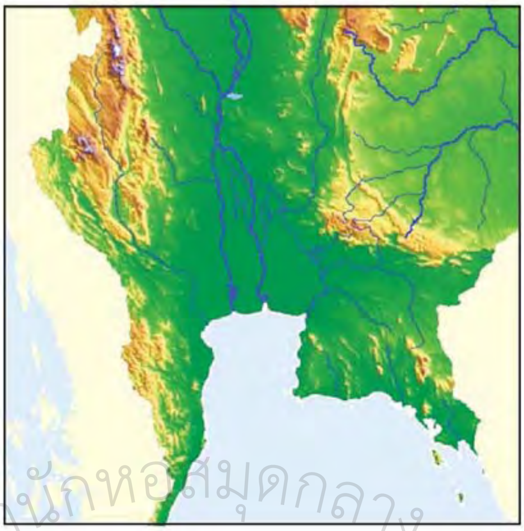
รูปที่ 3.3 ขอบเขตโดเมนการคำนวณของภาคเหนือ

กรณีของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีลักษณะเป็นที่ราบสูงมีแนวเขาทางตะวันตกและทางตอนใต้ ซึ่งแบ่งแยกภาคตะวันออกเฉียงเหนือจากพื้นที่ภาคกลางอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงแบ่งการคำนวณออกเป็น 1 โดเมน สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 ขอบเขตโดเมนการคำนวณของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

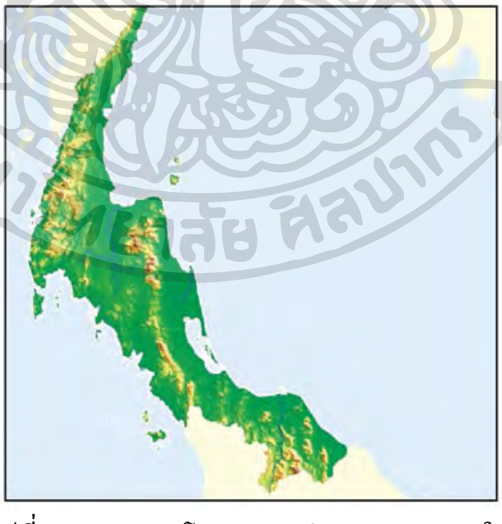
สำหรับภาคกลาง พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นที่ราบ โดยมีเทือกเขาทางด้านตะวันตก เป็นลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดจากภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ดังนั้นจึงแบ่งการคำนวณเป็นอีก 1 โดเมน สำหรับภาคกลาง (รูปที่ 3.5)



สำนักหอสมุดกลาง

รูปที่ 3.5 ขอบเขตโดเมนการคำนวณของภาคกลาง

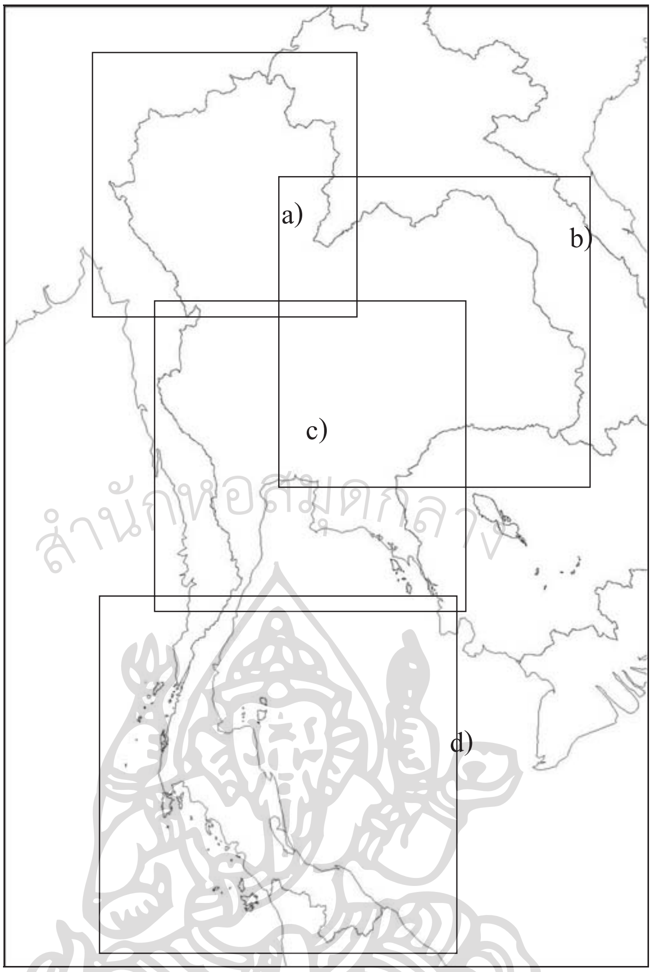
สำหรับภาคใต้ มีลักษณะเป็นแหลมยื่นเข้าไปในทะเลโดยฝั่งตะวันออกเป็นอ่าวไทย และฝั่งตะวันตกเป็นทะเลอันดามัน มีทิวเขาทางด้านตะวันตก และบริเวณตอนล่างของภาค ลักษณะภูมิประเทศดังกล่าวแตกต่างไปจากภาคอื่นๆ จึงแบ่งพื้นที่การคำนวณเป็น 1 โดเมนสำหรับภาคใต้ (รูปที่ 3.6)



มหาวิทยาลัยศิลปากร

รูปที่ 3.6 ขอบเขตโดเมนการคำนวณของภาคใต้

ทั้งนี้การแบ่งพื้นที่ของแต่ละโดเมนจำเป็นต้องให้มีส่วนซ้อนทับกันเพื่อให้ผลการคำนวณบริเวณรอยต่อของโดเมนมีความต่อเนื่องและสอดคล้องกัน ตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โดเมนของการคำนวณและการทับซ้อนกันของแต่ละโดเมน a) โดเมนภาคเหนือ b) โดเมนภาคตะวันออกเฉียงเหนือ c) โดเมนภาคกลาง d) โดเมนภาคใต้

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

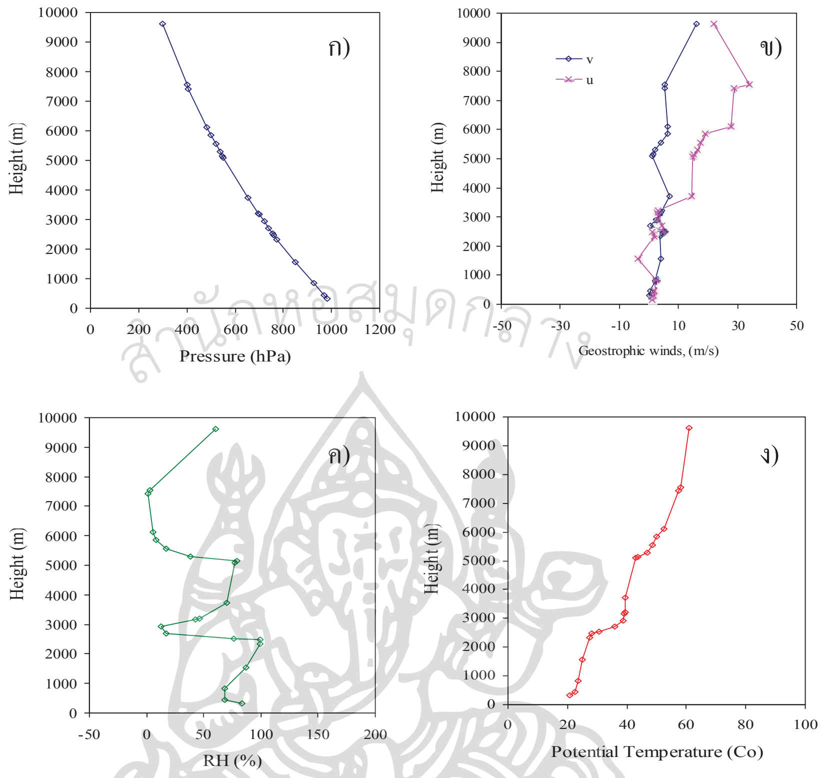
3.1.5 ข้อมูลอินพุทของแบบจำลอง

แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง KAMM ต้องใช้ข้อมูลอินพุทหลักต่อไปนี้

1) ข้อมูลสภาวะของบรรยากาศ (basic state atmospheric data)

ในการคำนวณความเร็วและทิศทางลมของแบบจำลอง KAMM จำเป็นต้องใช้ข้อมูลสภาวะของบรรยากาศตั้งต้นภายในโดเมนที่คำนวณในรูปของโปรไฟล์ (profile) ตามความสูงของความดันบรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ ข้อมูลเหล่านี้สามารถคำนวณจากข้อมูลสภาวะของบรรยากาศระดับสเกลใหญ่หรือจากข้อมูลจากบัลลูนตรวจอากาศชั้นบน (radiosonde data) ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ข้อมูลจากทั้งสองแหล่งร่วมกัน เป็นข้อมูลรายวันจำนวน 15 ปี (ค.ศ. 1995-2009) โดยตัวอย่างของข้อมูลดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 3.8 เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวมีจำนวนมาก และต้องแปลงข้อมูลดิบที่ได้รับมาให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เขียน

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นภาษา IDL (Interaction Data Language) เพื่อช่วยในการจัดรูปแบบข้อมูลและควบคุมคุณภาพของข้อมูล

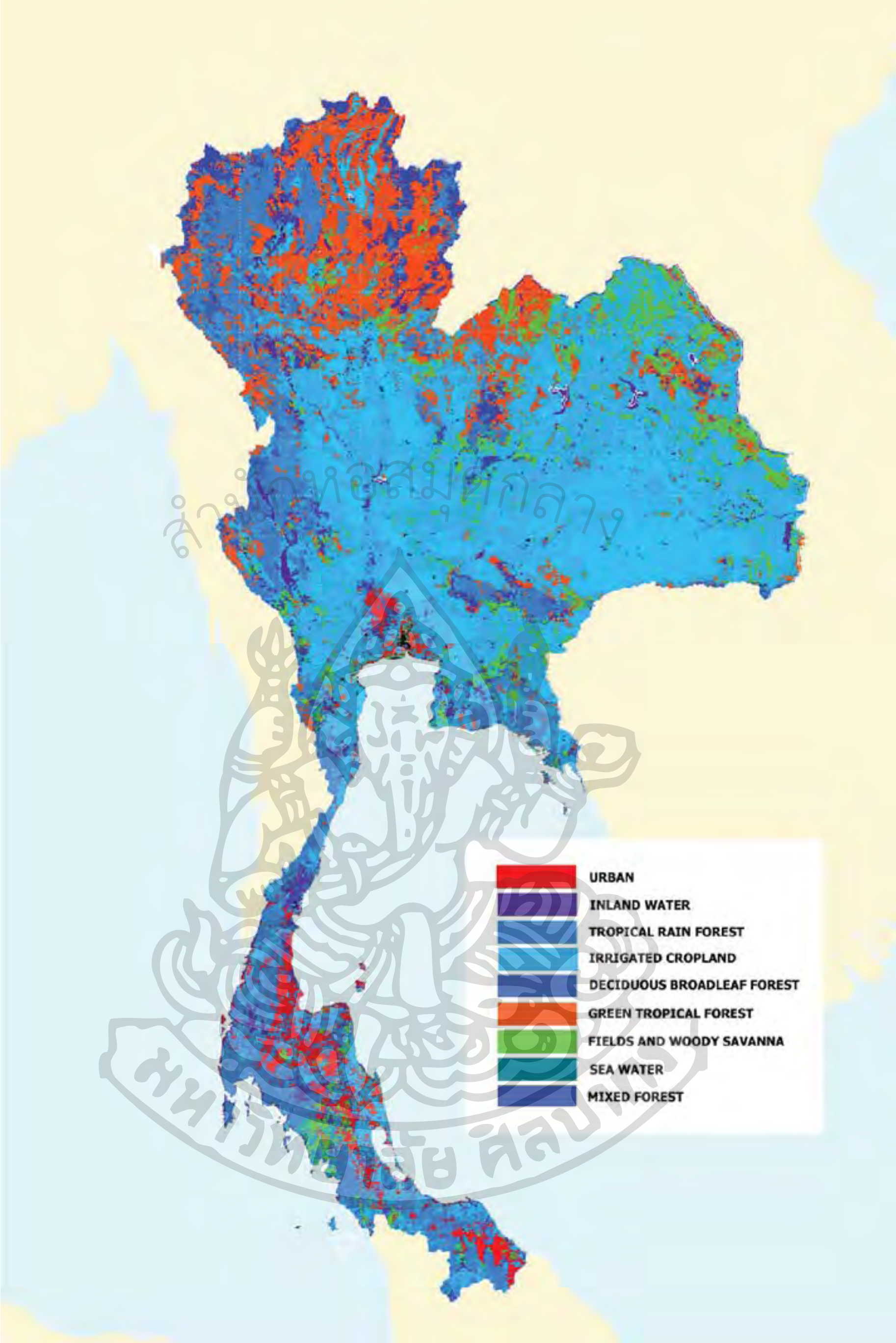


รูปที่ 3.8 ตัวอย่างของข้อมูลสภาวะของบรรยากาศ (basic state atmospheric data) ที่จะเป็นอินพุทของแบบจำลอง ก) ความดันบรรยากาศ ข) ลมจีโอสโทรปิค ค) ความชื้นสัมพัทธ์ และ ง) อุณหภูมิ

2) ข้อมูลความหยาบ (roughness) ของพื้นผิว

ความหยาบของพื้นผิวมีผลต่อความเร็วลม ในการคำนวณความเร็วและทิศทางลมตามแบบจำลอง KAMM จำเป็นต้องรู้ค่าความหยาบของพื้นผิวของพื้นที่ที่ต้องการคำนวณ ในการหาค่าความหยาบของสิ่งปกคลุมพื้นผิวโลกในระดับประเทศ โดยทั่วไปจะอาศัยภาพถ่ายจากดาวเทียมสำรวจทรัพยากร ซึ่งถ่ายภาพสิ่งปกคลุมพื้นผิวโลก แล้วนำมาเปรียบเทียบกับตารางของค่าความหยาบและแสดงในรูปแผนที่ความหยาบของพื้นผิวโลกบริเวณนั้นๆ

สำหรับในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้จัดหาข้อมูลความหยาบของพื้นผิวโลกของประเทศไทยจากข้อมูลของสมาคมสำรวจทางภูมิศาสตร์ของประเทศสหรัฐอเมริกา ข้อมูลดังกล่าวได้มาจากการแปลงข้อมูลแผนที่การใช้พื้นที่ (land-use map) ให้เป็นข้อมูลแผนที่ของความหยาบของพื้นผิว โดยอาศัยตารางสอบเทียบมาตรฐาน แผนที่ความหยาบของพื้นผิวของประเทศไทย แสดงไว้ในรูปที่ 3.9



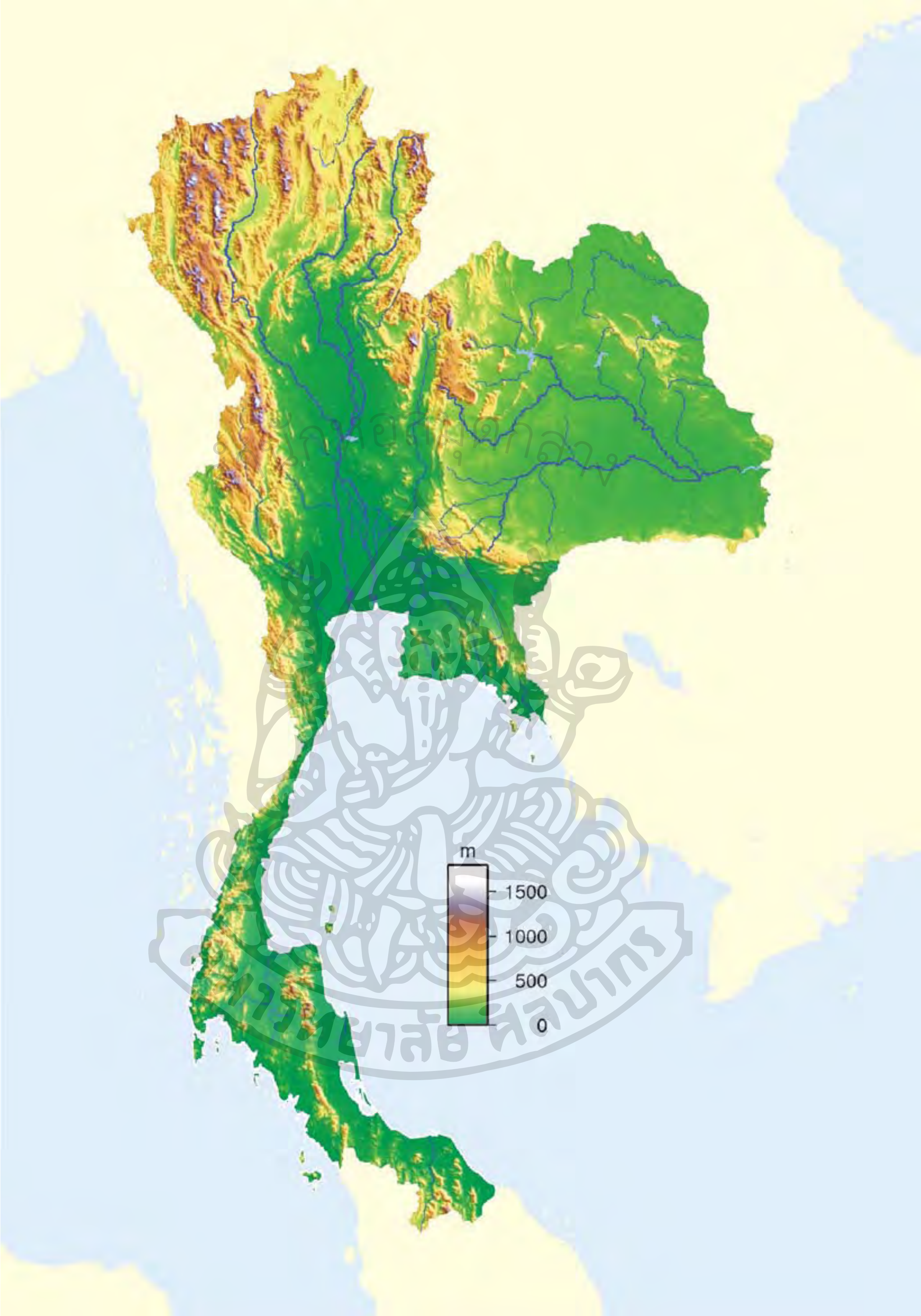
รูปที่ 3.9 แผนที่ความหยาบของพื้นผิวของประเทศไทย

3) ข้อมูลระดับความสูงของพื้นผิวโลก (elevation data)

เป็นที่ทราบกันดีว่า ระดับความสูงของพื้นผิวโลกมีอิทธิพลต่อความเร็วลม สามารถช่วยเร่งหรือหน่วงความเร็วลมได้ ดังนั้นข้อมูลระดับความสูงของพื้นที่จึงเป็นข้อมูลสำคัญต่อการคำนวณความเร็วลมด้วยเช่นเดียวกัน โดยทั่วไปการวัดความสูงของพื้นที่สามารถทำการวัดได้ด้วยเครื่องวัดความสูง (altimeter) โดยอาศัยการวัดความดันบรรยากาศและแปลงให้เป็นความสูงเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง (mean sea level) โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อย่างไรก็ตาม การวัดความสูงด้วยอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถกระทำได้เพียงแต่ละตำแหน่งเท่านั้น ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงได้พัฒนาอุปกรณ์วัดความสูงจากอวกาศ โดยติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวไปกับดาวเทียมหรือยานอวกาศต่างๆ อุปกรณ์เหล่านั้นจะส่งสัญญาณเรดาร์ลงมาที่พื้นผิวโลกและรับสัญญาณที่สะท้อนกลับ แล้วนำไปประมวลผลเป็นข้อมูลความสูงเชิงตัวเลขเพื่อใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้จัดหาข้อมูลระดับความสูงจากองค์การ NASA ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นข้อมูลที่ทำการวัดด้วยอุปกรณ์เรดาร์ที่ติดตั้งบนกระสวยอวกาศ (space shuttle) ข้อมูลที่ได้มีความละเอียดเชิงมุม 30 ฟิลิปดา เมื่อสังเกตการณ์จากกระสวยอวกาศ หรือประมาณ 1x1 ตารางกิโลเมตร ดังนั้นผู้วิจัยต้องทำการเฉลี่ยข้อมูลดังกล่าวเพื่อแปลงให้เป็นกริด (grid) ที่เท่ากับขนาดของกริดที่ใช้ในแบบจำลอง (3x3 ตารางกิโลเมตร) และแสดงในรูปแผนที่ดังรูปที่ 3.10

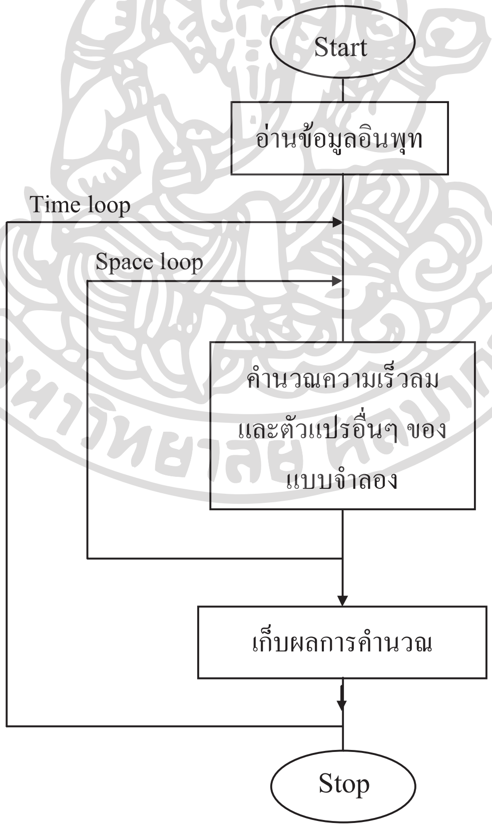
สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร



รูปที่ 3.10 แผนที่ระดับความสูงของประเทศไทย

3.1.6 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในการคำนวณ

เนื่องจากแบบจำลองจะต้องคำนวณความเร็วลมและตัวแปรอื่นๆสำหรับทุกๆชั่วโมง ของแบบจำลองที่ทุกตำแหน่งของกริดที่แบ่งไว้นับล้านจุด คณะนักวิจัยที่พัฒนาแบบจำลอง KAMM จึงได้เขียนโปรแกรมเป็นภาษาฟอร์แทรน เพื่อช่วยในการคำนวณ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าวประกอบด้วยโปรแกรมหลัก (main program) และโปรแกรมย่อย (subroutine) จำนวนกว่า 50 โปรแกรม โปรแกรมหลักรับเงื่อนไขตั้งต้น (initial condition) จากอินพุทของโปรแกรม จากนั้นจะคำนวณค่าความเร็วลมและตัวแปรอื่นๆ ของแบบจำลองของชั่วโมงแรกที่ทุกกริดที่แบ่งไว้จนครบทุกกริด และใช้ค่าที่คำนวณได้เป็นเงื่อนไขตั้งต้นของชั่วโมงถัดไปจนครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นโปรแกรมจะรับค่าข้อมูลสภาวะพื้นฐานของบรรยากาศ (basic state data) ซึ่งเป็นอินพุทชุดใหม่ เพื่อคำนวณความเร็วลมในวันถัดไป และทำซ้ำเช่นนี้ตลอดช่วงเวลา 15 ปีที่สนใจ โดยโปรแกรมจะให้ผลเอาท์พุทเป็นความเร็วลมและตัวแปรอื่นๆ ที่คำนวณได้ทุกๆ ชั่วโมง ซึ่งผู้วิจัยจะต้องนำมาประมวลผลในขั้นตอนถัดไป ลักษณะโครงสร้างของโปรแกรมสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนภูมิแสดงการคำนวณความเร็วลมและตัวแปรอื่นๆ ของแบบจำลอง

3.1.7 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

เนื่องจากโปรแกรมของแบบจำลองต้องทำการคำนวณค่าความเร็วลมและตัวแปรอื่นที่ทุกกริดซึ่งมีจำนวนนับล้านกริด การคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะต้องใช้เวลานานมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีการทำความร่วมมือกับศูนย์คอมพิวเตอร์ของสถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรูห์ ประเทศสหพันธรัฐเยอรมันนี เพื่อขอใช้ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ NEC รุ่น SX8 ของศูนย์คอมพิวเตอร์ดังกล่าว เพื่อประมวลผลแบบจำลอง ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์รุ่นดังกล่าวนี้มีสมรรถนะและรายละเอียดดังนี้

SX8 (Vectorparallel Computer NEC)

- Two nodes
- 8 vector processors, each archiving 36 GFlops/s peak
- 256 GB shared memory

Local disk space for the system

- 2 GFS filesystems: 16 TBte for $WORK
- 8 TByte for special applications
- a very small $HOME area (quota 100 MByte)
- the transfer-rate to the $WORK filesystem is limited to 600 MByte/s.

Front ends

- 2 Intel IA32 CPUs
- 8 GB Memory
- connection to the GFS file system

Operating system

- Linux
- standard-login-shell: SSH Secure Shell

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

รูปที่ 3.12 ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ NEC รุ่น SX8 ของศูนย์คอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรูห์

รูปที่ 3.13 ผู้วิจัยเข้าร่วมฝึกอบรมการใช้ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ที่สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรูห์

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.1.8 การประมวลผลข้อมูลที่คำนวณได้จากแบบจำลอง

ข้อมูลหลักที่ได้จากการรันโปรแกรมจะเป็นความเร็วลมในแนวเหนือใต้ (v) และแนวตะวันออกตะวันตก (u) ที่ทุกกริด (grid) 3 มิติตั้งแต่ระดับพื้นผิวโลกจนถึงที่ระดับความสูงประมาณ 5 กิโลเมตร โดยเป็นค่ารายชั่วโมงที่แต่ละกริด ผู้วิจัยจะต้องนำค่า u และ v มาหาขนาดและทิศทางของเวกเตอร์ของความเร็วลัพธ์ ตามสมการ

$$s_i = \sqrt{u_i^2 + v_i^2} \qquad (3.20)$$

และ

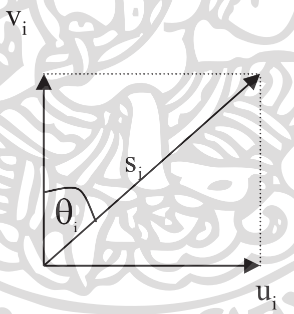
$$\theta_i = \tan^{-1}\frac{u_i}{v_i} \qquad (3.21)$$

เมื่อ s_i = ความเร็วลัพธ์ชั่วโมงที่ i

u_i = ความเร็วลมในแนวตะวันออกตะวันตก ชั่วโมงที่ i

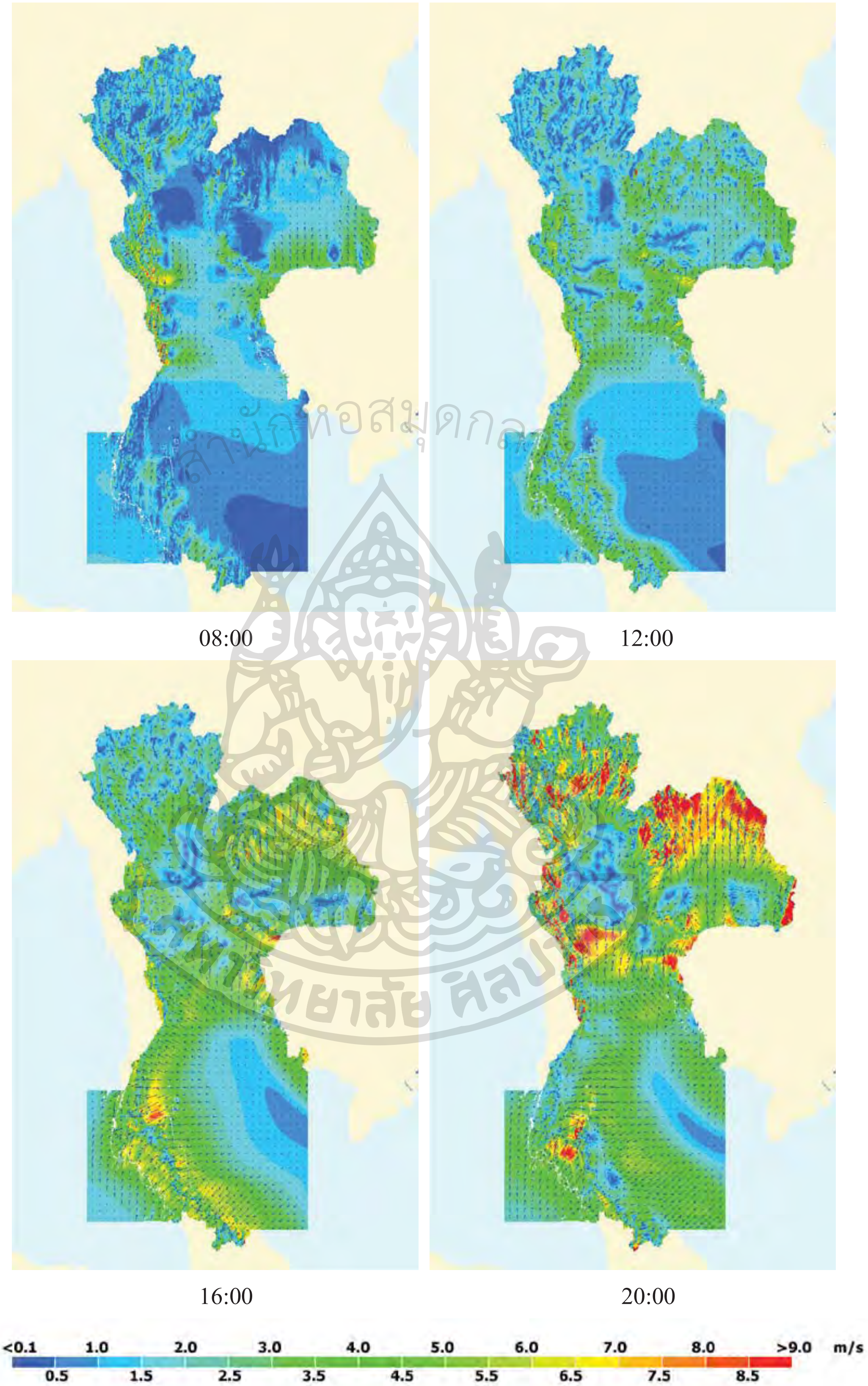
v_i = ความเร็วลมในแนวเหนือใต้ ชั่วโมงที่ i

θ_i = ทิศทางของเวกเตอร์ของความเร็วลมลัพธ์ (ในการรายงานผลจะแปลงค่าทิศทางนี้ให้เป็นทิศทางลมอีกครั้งหนึ่ง)

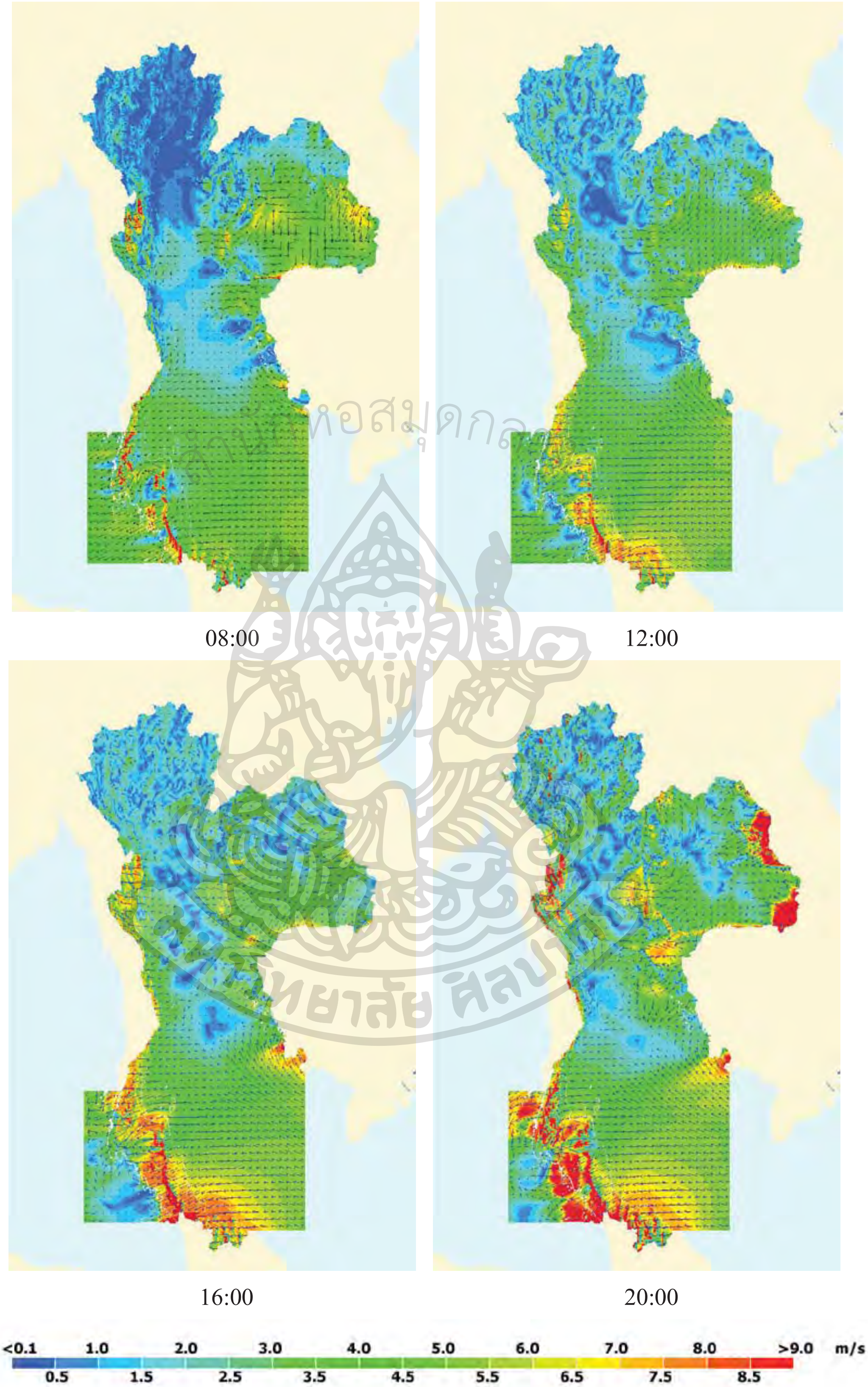


รูปที่ 3.14 การรวมความเร็วลมในแนว-เหนือใต้ (v_i) และแนวตะวันออก-ตะวันตก ($\mathbf{u}_i$) เพื่อหาเวกเตอร์ลัพธ์ของความเร็ว ($\mathbf{s}_i$)

รูปที่ 3.15 เป็นตัวอย่างผลการคำนวณของ วันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ. 2547 ซึ่งเป็นช่วงมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะเห็นว่าที่เวลา 8.00 น. และ 12.00 น. ความเร็วลมมีค่าค่อนข้างต่ำทั่วประเทศ และความเร็วลมจะมีค่าสูงขึ้นในช่วงเย็น สำหรับรูปที่ 3.16 เป็นตัวอย่างผลการคำนวณของ 17 ธันวาคม พ.ศ. 2544 ซึ่งอยู่ในช่วงมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ จะพบบริเวณที่มีความเร็วลมสูงอยู่ในบริเวณแนวเขาทางภาคใต้ ด้านตะวันตกของภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือเกือบตลอดทั้งวัน โดยภาพรวมแล้วความเร็วลมในช่วงบ่ายจะมีค่าสูงกว่าความเร็วลมในช่วงเช้าของทุกๆวัน



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างผลการคำนวณลมระดับสเกลปานกลางที่เวลาต่างๆ ในวันที่ 23 สิงหาคม 2547



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างผลการคำนวณลมระดับสเกลปานกลางที่เวลาต่างๆ ในวันที่ 17 ธันวาคม 2544

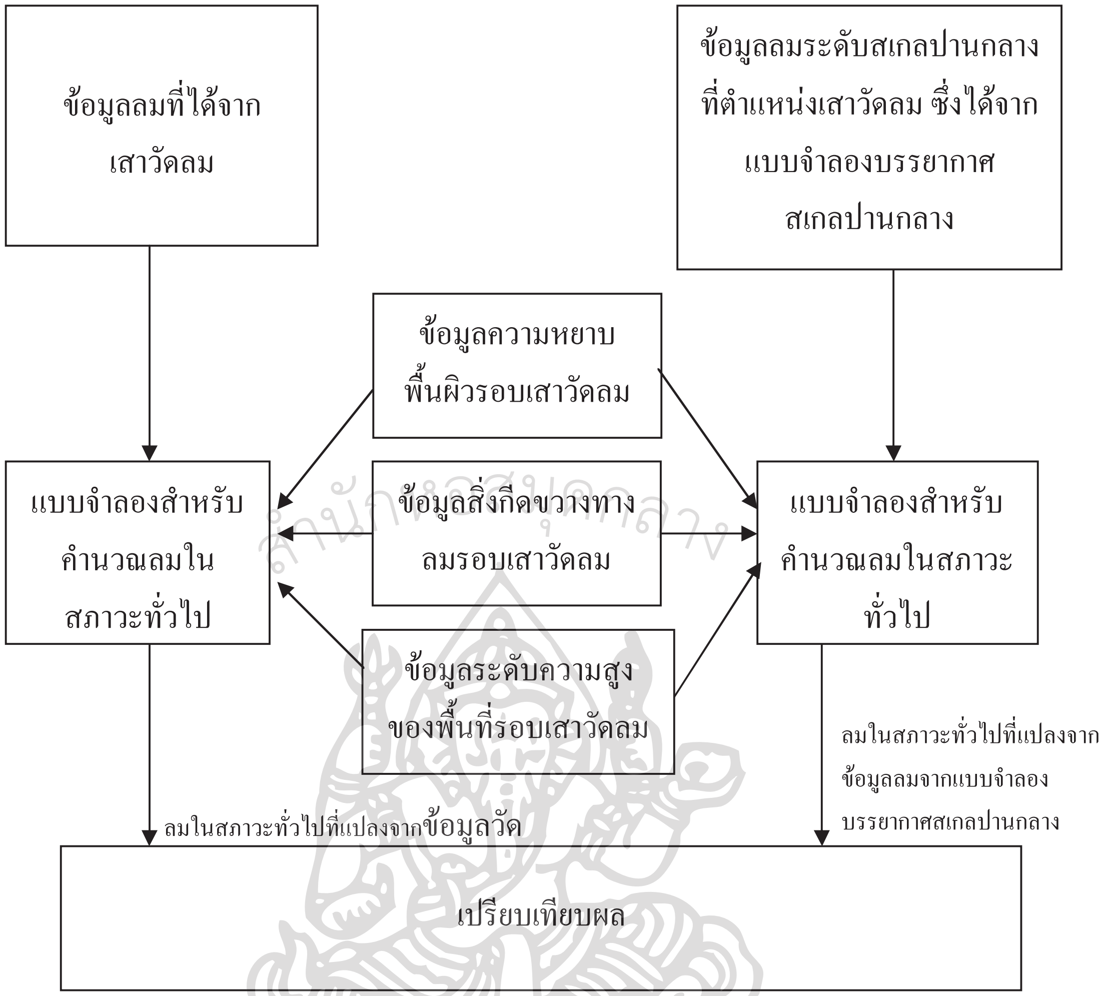
3.2 การทดสอบผลการคำนวณกับข้อมูลวัด

ถึงแม้ว่าความเร็วและทิศทางลมที่คำนวณได้จะใช้แบบจำลองที่คำนึงถึงกระบวนการทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศอย่างละเอียดและใช้ข้อมูลอินพุทที่ได้มาตรฐานสากลแล้วก็ตาม แต่ก็จำเป็นต้องตรวจสอบผลการคำนวณโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลวัด

ข้อมูลลมที่ได้จากการคำนวณเป็นความเร็วลมในระดับสเกลปานกลาง (mesoscale wind) ซึ่งมีความละเอียดเชิงพื้นที่ 3x3 ตารางกิโลเมตร ข้อมูลลมดังกล่าวจะไม่สามารถแสดงผลของสิ่งกีดขวางทางลมที่เล็กกว่า 3x3 ตารางกิโลเมตรได้ ในขณะที่ข้อมูลลมที่ได้จากเสาวัดลมจะเป็นลมในระดับสเกลเล็ก (microscale wind) ซึ่งจะได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมรอบเสาวัดลม เช่น ต้นไม้หรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ การเปรียบเทียบกันโดยตรงของข้อมูลทั้งสองชุดจึงไม่เหมาะสมนัก ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจะใช้วิธีของ RISO National Laboratory ประเทศเดนมาร์ก (Mortensen et al., 2005) กล่าวคือ ก่อนทำการเปรียบเทียบผลของลมทั้งสองสเกล ผู้วิจัยจะแปลงลมทั้งสองสเกลให้เป็นลมในสภาวะทั่วไป (generalized wind) ก่อน แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกัน

ลมในสภาวะทั่วไป หมายถึงลมที่พัดอยู่บนพื้นราบที่ระดับความสูง และความหยาบของพื้นผิวค่าต่างๆ ตามที่กำหนด ลมดังกล่าวจะกำจัดอิทธิพลของสิ่งกีดขวางทางลมออกไป ดังนั้นลมในสภาวะทั่วไปซึ่งแปลงมาจากลมสเกลปานกลาง และลมสภาวะทั่วไปที่แปลงจากลมระดับสเกลเล็กซึ่งได้จากการวัดจึงสามารถเปรียบเทียบกันได้ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะดำเนินการเปรียบเทียบดังกล่าวตามแผนภูมิในรูปที่ 3.17 และมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

ในการคำนวณข้อมูลลม ผู้วิจัยได้แบ่งพื้นที่ประเทศไทยออกเป็น 4 โดเมน ได้แก่ โดเมนภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ โดยแต่ละโดเมนจะทำการคำนวณแยกกัน ผู้วิจัยจะทำการทดสอบความละเอียดถูกต้องของการคำนวณของแต่ละโดเมนโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลลมที่ได้จากการวัดโดเมนละ 1 แห่ง



รูปที่ 3.17 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการเปรียบเทียบข้อมูลลมที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางและข้อมูลลมจากการวัด

จากการเดินทางไปสำรวจสถานีวัดลมของหน่วยงานต่างๆ ทั่วประเทศ ผู้วิจัยพบว่าสถานีของกรมควบคุมมลพิษมีความเหมาะสมในการนำข้อมูลมาใช้ในการตรวจสอบความละเอียดถูกต้องของแบบจำลอง (รูปที่ 3.18) ทั้งนี้เพราะใช้เสาวัดลมสูง 100 เมตร ทำให้ถูกรบกวนจากต้นไม้และอาคารสิ่งก่อสร้างน้อย นอกจากนี้เครื่องมือวัดลมเป็นแบบโซนิค ซึ่งมีความละเอียดถูกต้องสูง โดยมีการสอบเทียบสม่ำเสมอ อีกทั้งยังเป็นข้อมูลที่ยาวนาน 12 ปี โดยมีช่วงข้อมูลขาดหายค่อนข้างน้อย รายละเอียดการวัดและข้อมูลแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สถานีวัดลมทั้ง 4 แห่งของกรมควบคุมมลพิษที่เลือกใช้สำหรับการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลอง

โดเมน	ที่ตั้ง	ละติจูด	ลองจิจูด	ช่วงเวลาข้อมูล	ระดับความสูงที่วัด
1.ภาคเหนือ	อ.สันทราย จ. เชียงใหม่	18.89 $^{\circ}$N	99.02 $^{\circ}$E	1997-2009	100 เมตร
2.ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	อ.เมือง จ. ขอนแก่น	16.45 $^{\circ}$N	102.95 $^{\circ}$E	1997-2009	100 เมตร
3.ภาคกลาง	เขตจตุจักร กรุงเทพฯ	13.83 $^{\circ}$N	100.55 $^{\circ}$E	1997-2009	100 เมตร
4.ภาคใต้	อ.หาดใหญ่ จ. สงขลา	7.11 $^{\circ}$N	100.50 $^{\circ}$E	1997-2009	100 เมตร

รูปที่ 3.18 สถานีวัดลมของกรมควบคุมมลพิษ

3.2.1 ข้อมูลรอบเสาวัดลม

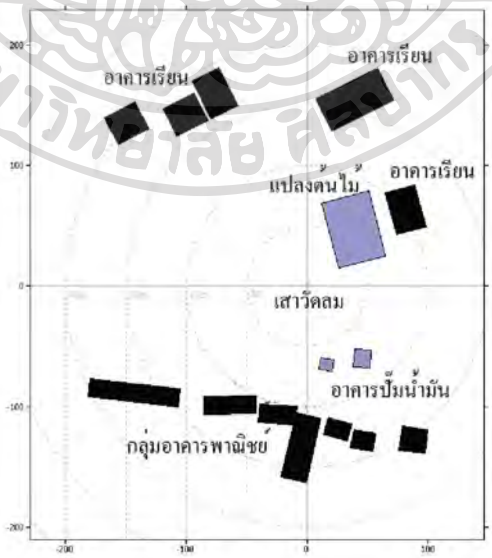
ในการแปลงข้อมูลลมจากเสาวัดลมให้เป็นข้อมูลลมในสภาวะทั่วไปจำเป็นต้องใช้ข้อมูลสิ่งกีดขวางทางลม ข้อมูลความหยาบของพื้นผิว และข้อมูลระดับความสูงของพื้นที่รอบเสาวัดลม โดยผู้วิจัยได้ทำการจัดหาข้อมูลดังกล่าว ดังนี้

3.2.1.1 ข้อมูลสิ่งกีดขวางทางลมรอบเสาวัดลม

สิ่งกีดขวางทางลม (obstacle) โดยทั่วไป ได้แก่ อาคาร สิ่งปลูกสร้าง และต้นไม้ สิ่งกีดขวางทางลมรอบเสาวัดลมเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบอย่างมากต่อลมในบริเวณนั้นๆ ผู้วิจัยได้เดินทางไปตรวจสอบสภาพโดยรอบเสาวัดลมทั้ง 4 แห่ง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจ ได้แก่ เข็มทิศ ตลับเมตรสำหรับวัดระยะทาง และเครื่องบอกพิกัดจากสัญญาณดาวเทียม (GPS) ในการสำรวจจะทำการวัดระยะทางของสิ่งกีดขวางทางลมจากเสาวัดลม วัดทิศทางของสิ่งกีดขวางทางลม เมื่อเทียบกับเสาวัดลม พร้อมทั้งวัดขนาดของสิ่งกีดขวางทางลมดังกล่าวด้วย จากนั้นจะนำมาแสดงในรูปแผนภูมิสิ่งกีดขวางทางลมที่สถานีต่างๆ ดังนี้

1) สถานีเชียงใหม่

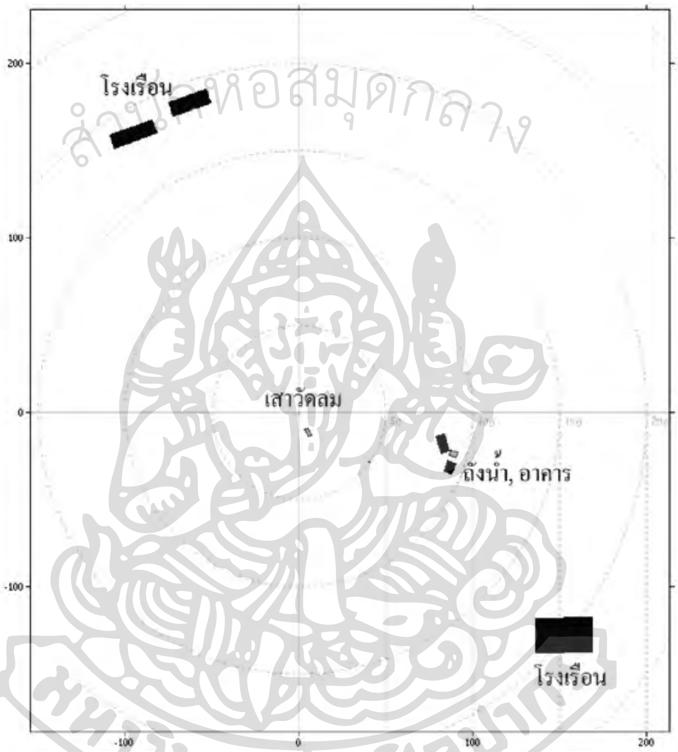
เสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยแม่โจ้ใกล้ประตูทางเข้าด้านทิศใต้ของมหาวิทยาลัย โดยอยู่ในบริเวณแปลงทดลองทางการเกษตร โคนเสามีต้นไม้ที่สูงประมาณ 5 เมตร สิ่งกีดขวางทางลมส่วนใหญ่เป็นอาคารเรียนทางด้านทิศเหนือและอาคารพาณิชย์นอกมหาวิทยาลัยทางด้านทิศใต้ ซึ่งมีความสูงประมาณ 20 เมตร แผนภูมิที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แผนภูมิสิ่งกีดขวางทางลมรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษ ที่มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่

2) สถานีขอนแก่น

เสาวัดลมของสถานีขอนแก่น ตั้งอยู่ที่บริเวณสำนักงานขององค์การสื่อสารมวลชนแห่งประเทศไทย อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น จากการสำรวจเสาวัดลมดังกล่าว พบว่ามีสิ่งกีดขวางทางลมค่อนข้างน้อย โดยเสาวัดลมจะตั้งอยู่ในบริเวณที่โล่งกว้าง มีอาคารโรงเรือนขนาดใหญ่ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือและตะวันออกเฉียงใต้ เยื้องไปจากทางตะวันออกเล็กน้อยมีถังน้ำประปาและอาคารขนาดเล็ก แผนภูมิที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.20

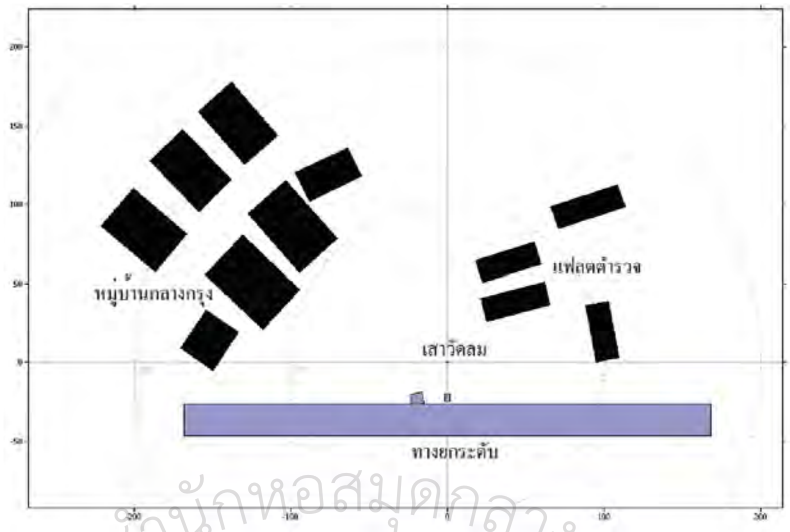


รูปที่ 3.20 แผนภูมิสิ่งกีดขวางทางลมรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษ ที่องค์การสื่อสารมวลชนแห่งประเทศไทย อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น

สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยศิลปากร

3) สถานีกรุงเทพ

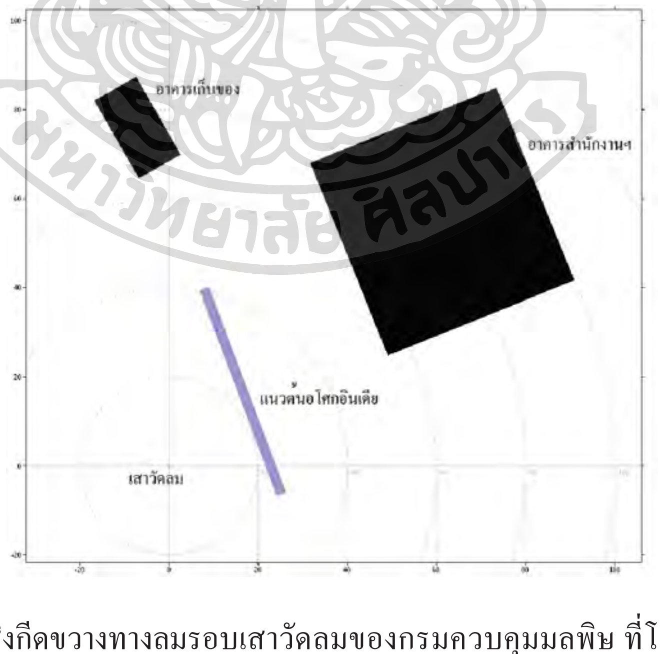
เสาวัดลมของสถานีกรุงเทพตั้งอยู่ติดทางยกระดับ ซึ่งพาดผ่านตามแนวตะวันตก-ตะวันออกสูงประมาณ 12 เมตร และมีอาคารที่พักอาศัยทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือและตะวันตกเฉียงเหนือสูงประมาณ 15 เมตร



รูปที่ 3.21 แผนภูมิสิ่งกีดขวางทางลมรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษ ที่เขตจตุจักร กรุงเทพฯ

4) สถานีสงขลา

เสาวัดลมของสถานีสงขลาตั้งอยู่ที่บริเวณ โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา บริเวณโดยรอบของเสาวัดลมแห่งนี้ค่อนข้างโล่ง มีเพียงแนวต้นอโศกอินเดีย อาคารสำนักงานของเทศบาลและอาคารเก็บของทางทิศเหนือ ทางทิศใต้และทิศตะวันตกเป็นพื้นที่โล่ง



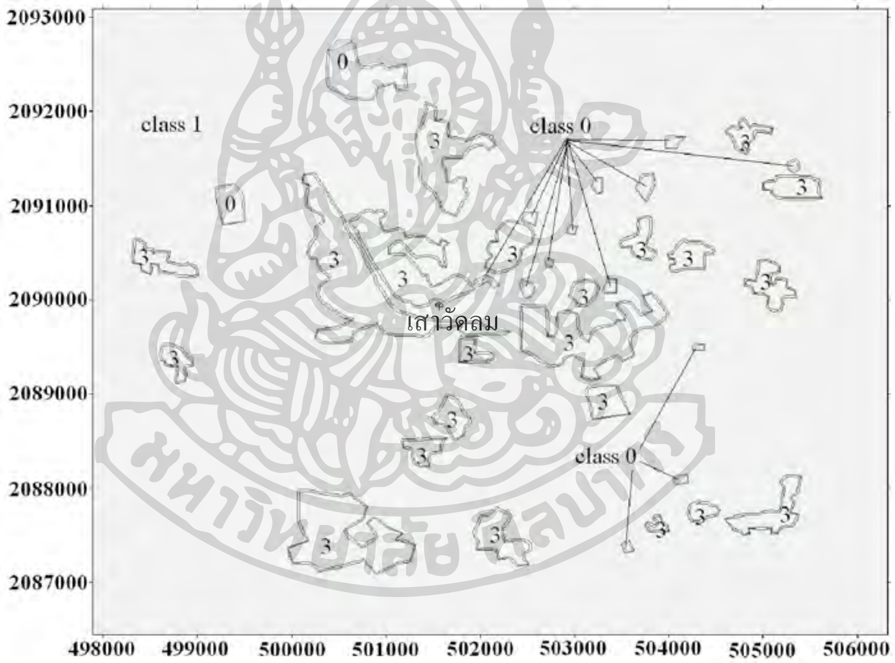
รูปที่ 3.22 แผนภูมิสิ่งกีดขวางทางลมรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษ ที่โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่จังหวัดสงขลา

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

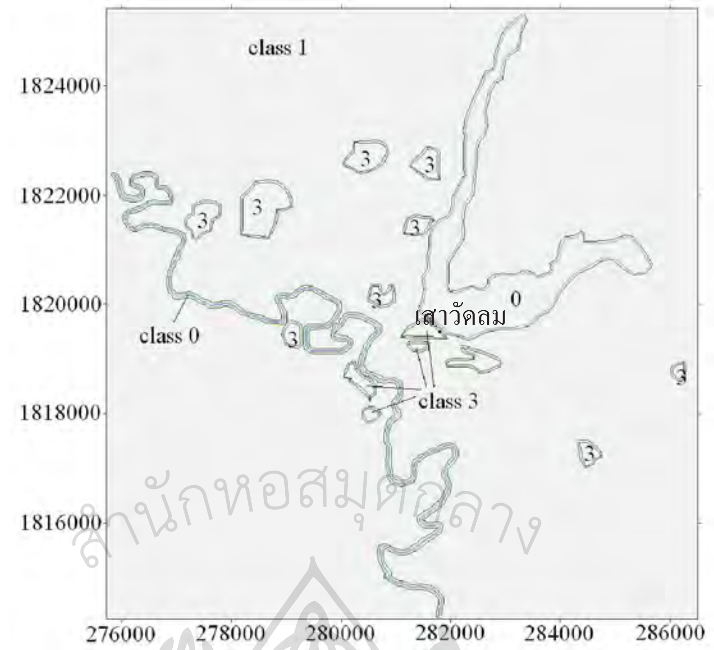
3.2.1.2 การจัดทำแผนที่ความหยาบของพื้นผิวระดับสเกลเล็กรอบเสาวัดลม

ความหยาบของสิ่งปกคลุมพื้นผิว (roughness) หมายถึง สภาวะของสิ่งปกคลุมพื้นผิวโลก โดยอาจเกิดจากสิ่งปกคลุมพื้นผิวโลกตามธรรมชาติ เช่น ป่าไม้ และพื้นน้ำ เป็นต้น หรืออาจเกิดจากสิ่งปกคลุมพื้นผิวที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น หมู่บ้าน ตัวเมือง สวน และไร่นา เป็นต้น ความหยาบของพื้นผิวมีผลต่อความเร็วลม เนื่องจากในการคำนวณความเร็วลมในสภาวะทั่วไป (generalized wind) จำเป็นต้องใช้แผนที่ความหยาบของพื้นผิวระดับสเกลเล็ก (microscale roughness map) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้จัดหาภาพถ่ายทางอากาศบริเวณสถานีวัดลมเป้าหมาย 4 แห่ง หลังจากนั้นจะนำภาพถ่ายดังกล่าวมาทำการแปลงให้เป็นแผนที่ความหยาบ โดยใช้ตารางความหยาบของ RISO (ตารางที่ 2.1) (Troen and Petersen, 1989) เป็นมาตรฐานอ้างอิง แผนที่ความหยาบของทั้ง 4 สถานีแสดงไว้ในรูปที่ 3.23 – 3.26

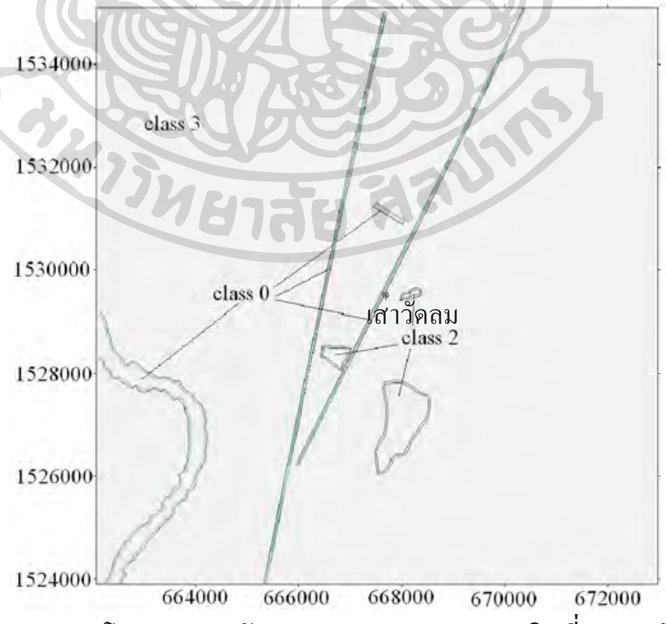
สำนักหอสมุดกลาง



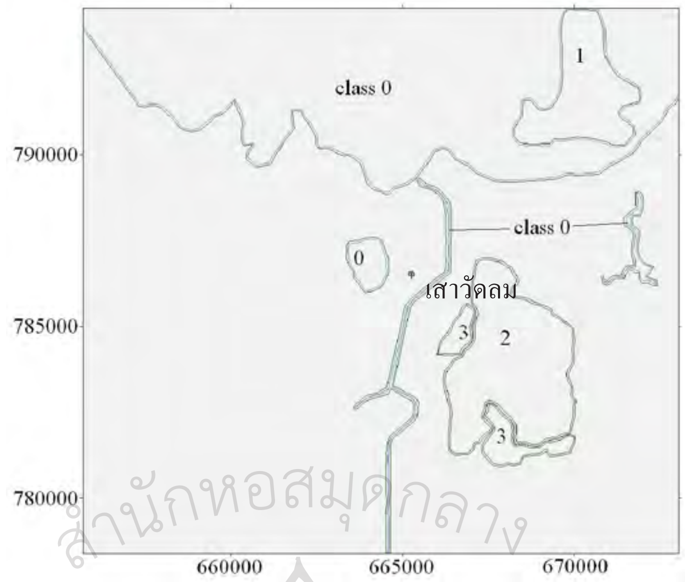
รูปที่ 3.23 แผนที่ความหยาบ (Microscale roughness map) โดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ พื้นที่ส่วนใหญ่ในรูปเป็นพื้นที่เกษตรกรรมแบบเปิดโล่ง มีแหล่งชุมชนกระจายตัวอยู่ทั่วไป และมีอ่างเก็บน้ำหรือแหล่งน้ำบ้างเล็กน้อย (ตัวเลขที่ระบุ คือ ค่าความหยาบเป็นเซนติเมตร)



รูปที่ 3.24 แผนที่ความหยาบ โดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่องค์การสื่อสารมวลชนแห่งประเทศไทย อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรมแบบเปิดโล่ง มีแนวแม่น้ำ และแหล่งน้ำพาดผ่านจากทิศใต้ถึงตะวันตกและทางตะวันออกเฉียงเหนือ มีแหล่งชุมชนกระจายตัวอยู่บ้างเล็กน้อย



รูปที่ 3.25 แผนที่ความหยาบโดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่เขตจตุจักร กรุงเทพฯ พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นชุมชนเมือง มีแนวแม่น้ำและคลองประปาพาดผ่าน มีสวนสาธารณะ ซึ่งเป็นพื้นที่โล่งที่มีต้นไม้บ้างประปราย

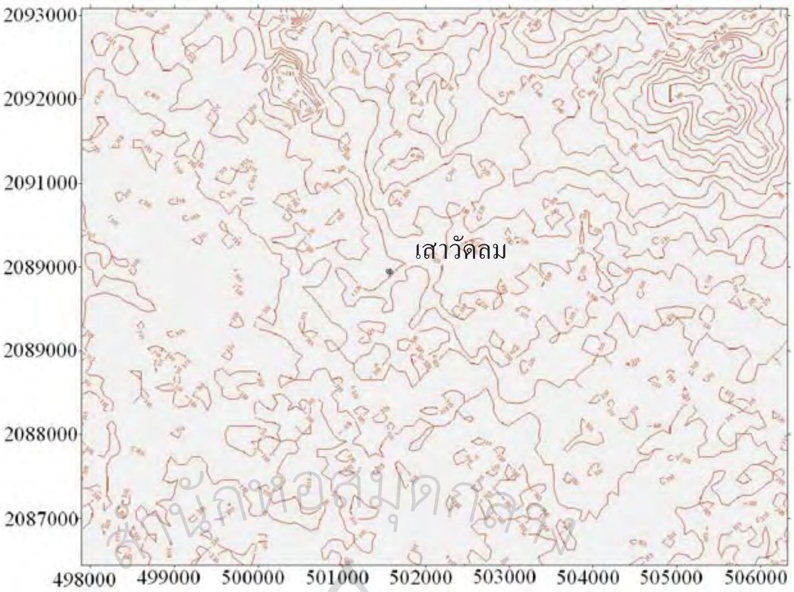


รูปที่ 3.26 แผนที่ความหยาบโดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ เทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรมแบบเปิดโล่งมี แนวแม่น้ำพาดผ่านตรงกลางและทะเลสาบขนาดใหญ่ทางตอนเหนือ มีชุมชนขนาดเล็ก และพื้นที่โล่งแบบมีแนวปิดล้อมทางทิศตะวันออกเฉียงใต้

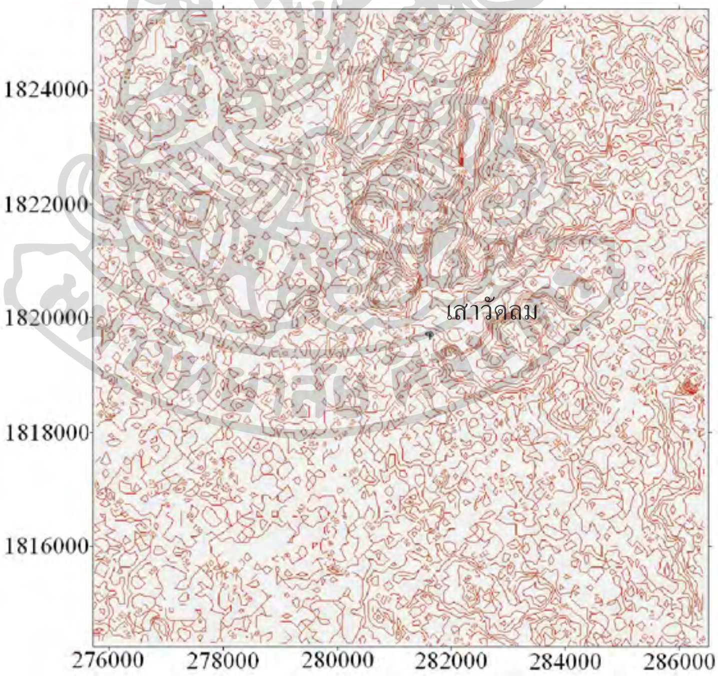
3.2.1.3 การจัดเตรียมแผนที่ระดับความสูงของพื้นที่ระดับสเกลเล็ก (microscale elevation map) รอบเสาวัดลม

ระดับความสูงของพื้นที่มีความสำคัญต่อความเร็วและทิศทางลม ในการคำนวณลมในสภาวะทั่วไปจำเป็นต้องใช้แผนที่ระดับความสูงของพื้นที่รอบเสาวัดลม ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้จัดหาแผนที่ดิจิตอลระดับความสูงระดับสเกลเล็ก ซึ่งได้จากการวัดจากกระสวยอวกาศ (space shuttle mission) ขององค์การนาซา (NASA) ประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงไว้ในรูปที่ 3.27-3.30

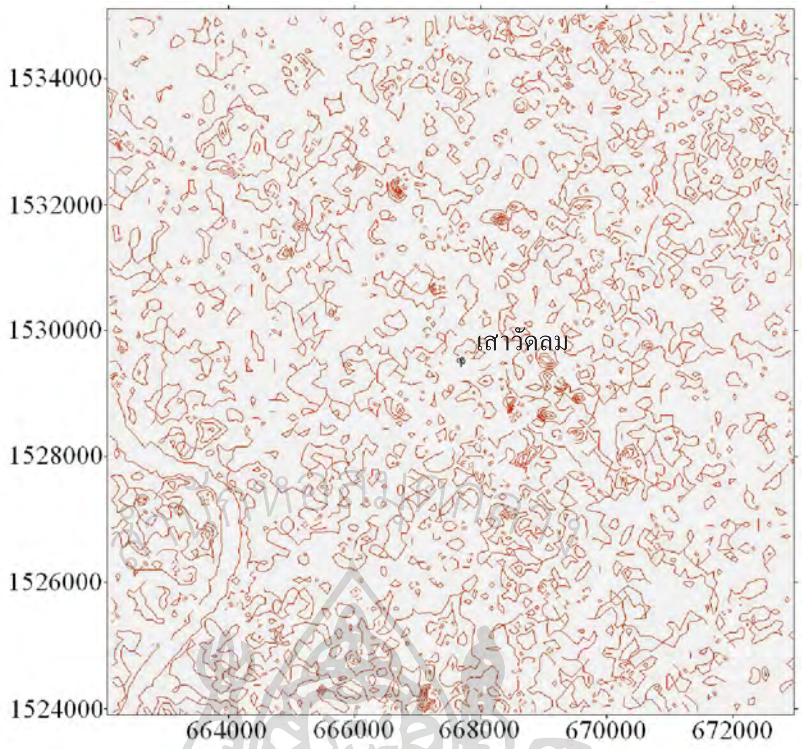
สำนักหอสมุดกลาง



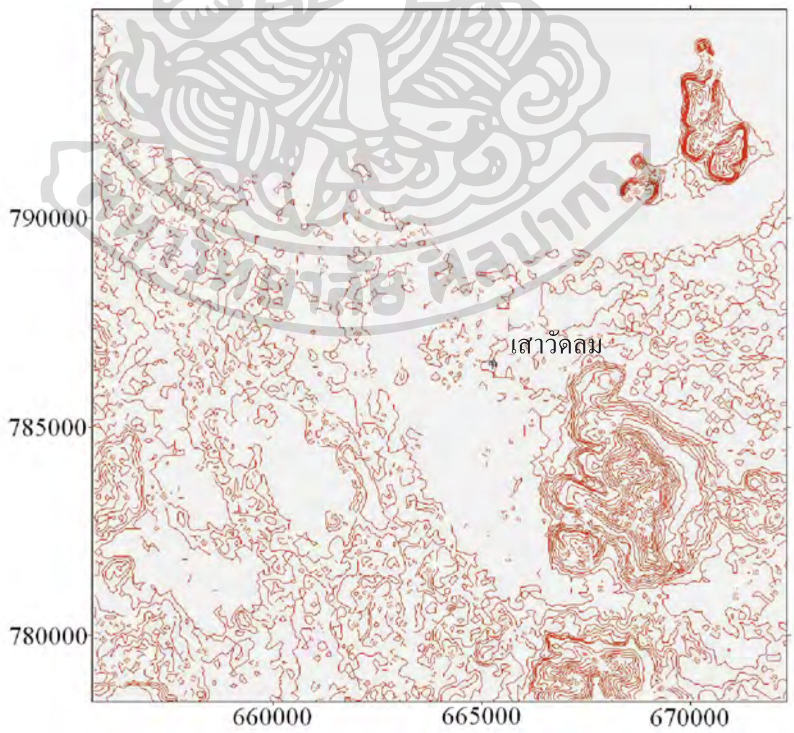
รูปที่ 3.27 แผนที่ระดับความสูงโดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 3.28 แผนที่ระดับความสูงโดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่องค์การสื่อสาร มวลชนแห่งประเทศไทย อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น



รูปที่ 3.29 แผนที่ระดับความสูงโดยรอบเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่เขตจตุจักร กรุงเทพฯ



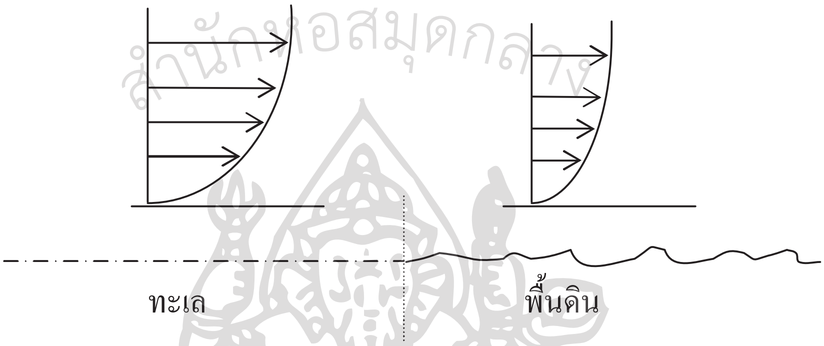
รูปที่ 3.30 แผนที่ระดับความสูงโดยรอบเสาวัดลม ที่โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

3.2.2 แบบจำลองที่ใช้ในการแปลงข้อมูลลมที่วัดให้เป็นลมในสภาวะทั่วไป

ในการแปลงข้อมูลที่วัดให้เป็นลมในสภาวะทั่วไป ผู้วิจัยจะใช้แบบจำลองที่พัฒนาโดย RISO National Laboratory ตามรายละเอียดดังนี้

1) ความหยาบของพื้นผิว

เมื่อกระแสลมพัดจากพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่งซึ่งมีความหยาบแตกต่างกันโปรไฟล์ของความเร็วลมในแนวดิ่งจะเปลี่ยนไป ตัวอย่างเช่น ลมที่พัดจากทะเลไปยังพื้นดินซึ่งมีความหยาบต่างกัน จะมีการเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ของลมตามรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 การเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ของลมที่พัดผ่านจากพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่งซึ่งมีความหยาบต่างกัน

เมื่อลมพัดผ่านพื้นผิวโลกที่มีความหยาบของพื้นผิวเปลี่ยนแปลงจากค่าหนึ่งไปอีกค่าหนึ่ง จะมีผลทำให้ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงด้วย โดยความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถหาได้จากสมการ (Mortensen et al., 2005)

$$U(Z) = U'' + (U' - U'')\frac{\ln(Z/c_2h)}{\ln(c_1/c_2)} \quad (3.22)$$

โดย

$$U' = \frac{U_{*1}}{k_1}\frac{\ln(Z/Z_{01})}{\ln(c_1h/Z_{01})} \quad (3.23)$$

$$U'' = \frac{U_{*2}}{k_2}\frac{\ln(Z/Z_{02})}{\ln(c_2h/Z_{02})} \quad (3.24)$$

เมื่อ U_{*1} = friction velocity ขณะที่ลมอยู่บนพื้นผิวที่มี roughness ค่าที่ 1

U_{*2} = friction velocity ขณะที่ลมอยู่บนพื้นผิวที่มี roughness ค่าที่ 2

Z = ความสูงจากพื้นผิว

Z_{01} = roughness length ค่าที่ 1

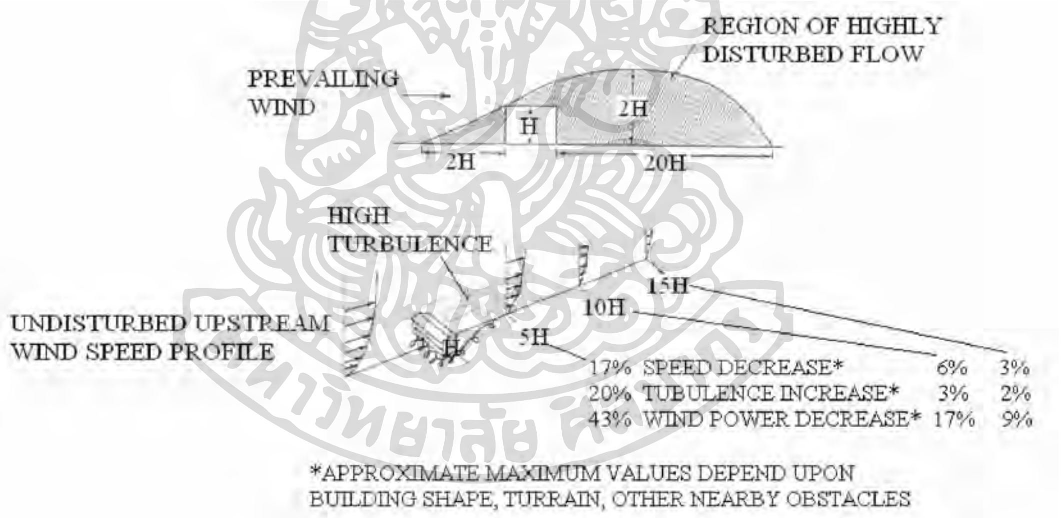
Z_{02} = roughness length ค่าที่ 2

h = ความสูง boundary layer ที่เปลี่ยนแปลง หลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงความหยาบ

k_1, k_2, c_1 และ c_2 เป็นค่าคงที่

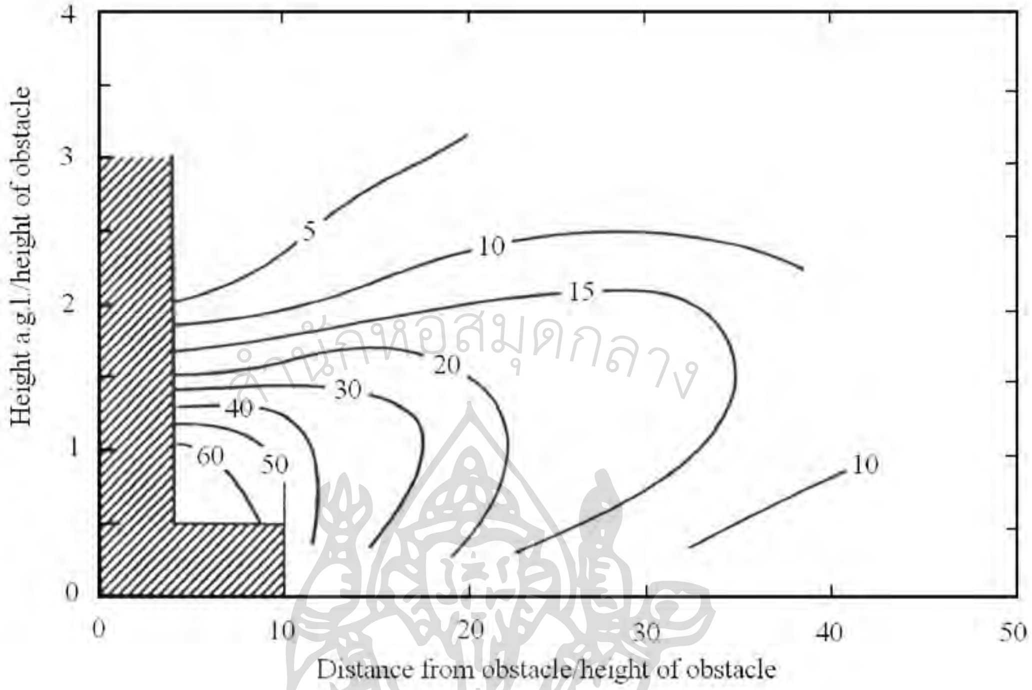
2) สิ่งกีดขวางทางลม

สิ่งกีดขวางทางลม (obstacle) อาจเป็นสิ่งปลูกสร้าง เช่น อาคารและกำแพง หรืออาจเป็นสิ่งกีดขวางตามธรรมชาติ เช่น แนวต้นไม้ เป็นต้น เมื่อมีกระแสลมพัดผ่านสิ่งกีดขวางเหล่านี้โปรไฟล์ของความเร็วลมจะเริ่มเปลี่ยนแปลงก่อนที่จะมาถึงสิ่งกีดขวางและหลังสิ่งกีดขวางเหล่านั้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 การเปลี่ยนแปลงโปรไฟล์ของลมที่พัดผ่านสิ่งกีดขวาง

จากการศึกษาของ Perera (1981) พบว่ากระแสลมที่พัดผ่านสิ่งกีดขวางทางลมจะทำให้ความเร็วลมหลังสิ่งกีดขวางลดลงเป็นเปอร์เซ็นต์ ตามรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 เปอร์เซ็นต์การลดลงของความเร็วลมหลังสิ่งกีดขวาง

ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของความเร็วลมหลังสิ่งกีดขวางสามารถหาได้จากสมการ

$$R = \begin{cases} (1+0.2\dfrac{x}{L})^{-1} & \text{เมื่อ} \quad \dfrac{L}{x} \geq 0.3 \\ 2\dfrac{L}{2} & \text{เมื่อ} \quad \dfrac{L}{x} \leq 0.3 \end{cases} \qquad (3.25)$$

เมื่อ R = เปอร์เซ็นต์การลดลงของความเร็วลม

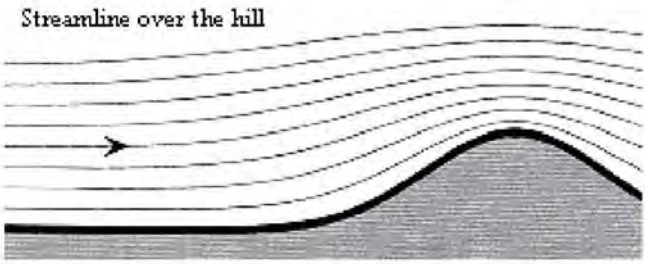
L = ความสูงของสิ่งกีดขวาง

X = ระยะห่างจากสิ่งกีดขวาง

3) ความสูงของพื้นผิวโลก

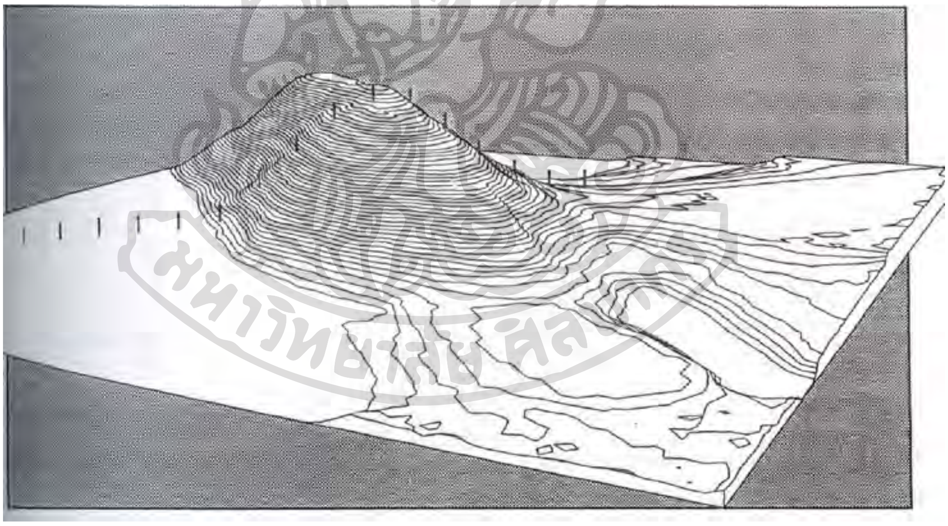
พื้นผิวโลกอาจมีความราบเรียบหรือมีความสูงต่ำของเนินและหุบเขาต่างๆ ซึ่งมีผลต่อโปรไฟล์ของกระแสลมที่พัดผ่าน ตัวอย่างเช่น กระแสลมที่พัดผ่านเนินเขาเตี้ยๆ จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.34 โดยความเร็วลมจะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ยอดเขา

สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยศิลปากร

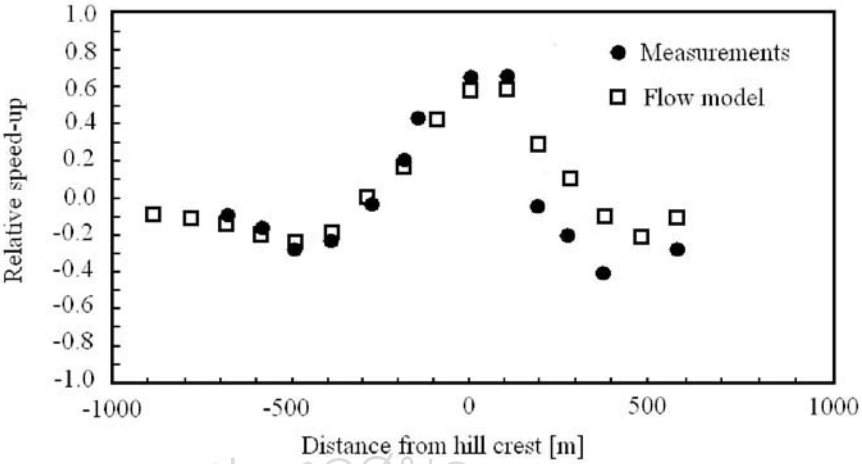


รูปที่ 3.34 การเปลี่ยนแปลงของกระแสลมที่พัดผ่านเนินเขา

Salmon และคณะ (1987) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมที่พัดผ่านเนินเขา Askervein ที่เกาะ South Uist สกอตแลนด์ โดยการติดตั้งเครื่องวัดลมทุกๆ 100 เมตร จากเชิงเขาผ่านยอดเขา จนถึงเชิงเขาอีกด้านหนึ่งตามรูปที่ 3.35 ผลการศึกษาพบว่าความเร็วลมที่พัดผ่านเนินเขาดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงตามกราฟในรูปที่ 3.36 โดยความเร็วลมที่ยอดเขาจะเพิ่มขึ้น 80% การทดลองดังกล่าวนี้ชี้ให้เห็นถึงผลของลักษณะพื้นผิวโลกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 3.35 การวัดลมที่เนินเขาซึ่งมีความสูง 123 เมตรบนเกาะ South Uist ในสกอตแลนด์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมที่พัดผ่านเนินเขา



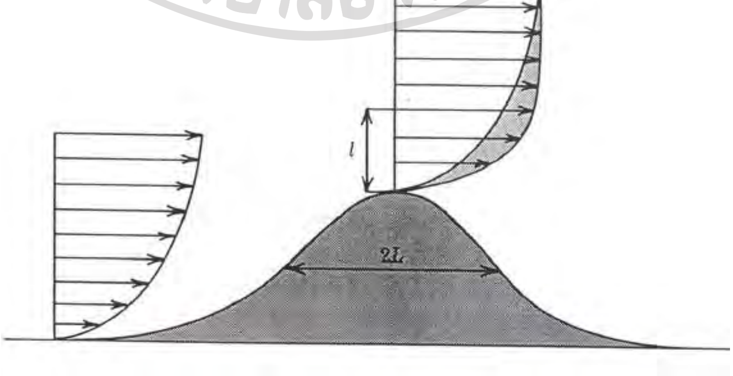
รูปที่ 3.36 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมที่พัดผ่านเนินเขา Askervein ที่ความสูงจากพื้น 10 เมตร ทั้งผลจากการวัดและการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง

ทั้งนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมบนยอดเขากับความเร็วลมตรงเชิงเขาด้านที่ลมพัดเข้าหา เป็นไปตามสมการ

$$\Delta s \approx 2\frac{h}{L} \tag{3.26}$$

เมื่อ h = ความสูงของเนินเขา

L = เป็น characteristic length โดยเป็นความกว้างของภูเขาตรงตำแหน่งที่ระดับความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูง (รูปที่ 3.37)



รูปที่ 3.37 การเพิ่มขึ้นของความเร็วลมที่พัดผ่านเนินเขา

ค่า Δs จะกำหนดตามสมการ

$$\Delta s = \frac{u_2 - u_1}{u_1} \tag{3.27}$$

โดย u_1 = ความเร็วลมที่เชิงเขาด้านที่ลมพัดเข้าหา
u_2 = ความเร็วลมที่ยอดเขา

3.2.3 การเปรียบเทียบความเร็วลมในสภาวะทั่วไป ที่ได้จากแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางกับความเร็วลมในสภาวะทั่วไปที่ได้จากข้อมูลวัด

ในการเปรียบเทียบข้อมูลลมในสภาวะทั่วไปที่แปลงมาจากข้อมูลวัดและที่แปลงมาจากข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง ผู้วิจัยจะบอกความแตกต่างทางสถิติในรูป root mean square difference (RMSD) และ mean bias difference (MBD) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$RMSD = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(V_{model,i} - V_{meas,i})^2}{N}}}{\overline{V}_{meas}} \times 100\% \tag{3.28}$$

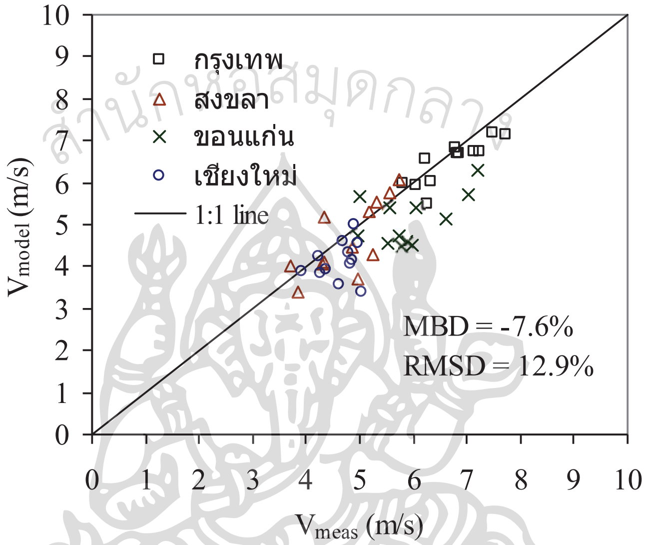
$$MBD = \frac{\sum_{i=1}^{N}(V_{model,i} - V_{meas,i})}{\overline{V}_{meas}} \times 100\% \tag{3.29}$$

เมื่อ V_{model} = ความเร็วลมในสภาวะทั่วไปที่ได้จากแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง
V_{meas} = ความเร็วลมในสภาวะทั่วไปที่ได้จากข้อมูลวัด
$\overline{V}_{meas}$ = ความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้จากการวัด
N = จำนวนข้อมูล
i = ลำดับของข้อมูล

ค่า RMSD จะบอกความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างข้อมูลจากการคำนวณ และข้อมูลจากการวัด สำหรับค่า MBD จะบอกความแตกต่างระหว่างข้อมูลทั้ง 2 ชุด โดยสามารถบอกได้ว่าข้อมูลชุดใดมี

แนวโน้มมากกว่า ถ้าค่า MBD มีค่าเป็นบวกแสดงว่าข้อมูลจากการคำนวณส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าข้อมูลจากการวัด

ผู้วิจัยจะนำความเร็วลมในสภาวะทั่วไปเฉลี่ยรายเดือนที่ได้จากแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางมาเขียนกราฟกับความเร็วลมในสภาวะทั่วไปที่ได้จากการวัดที่สถานีเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพ และสงขลา ที่ระดับความสูง 100 เมตร โดยพิจารณาที่ความหยาบของพื้นผิว 3 เซนติเมตร ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.38



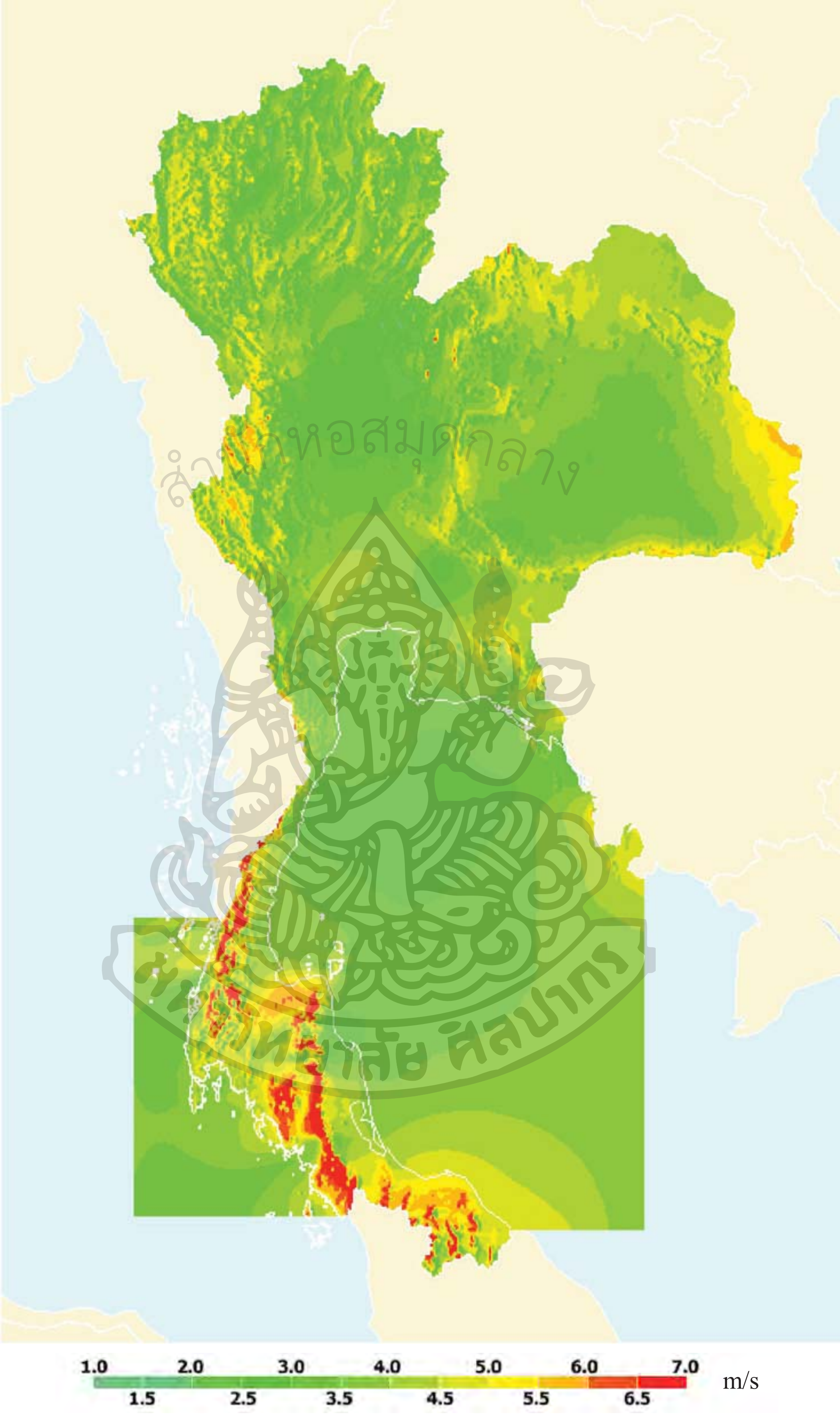
รูปที่ 3.38 การเปรียบเทียบความเร็วลมในสภาวะทั่วไปที่ระดับความสูง 100 เมตร ที่ได้จากแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง (V_{model}) กับความเร็วลมในสภาวะทั่วไปที่ได้จากข้อมูลจากการวัด (V_{meas}) เฉลี่ยรายเดือนจากสถานีวัดลมของกรมควบคุมมลพิษที่จังหวัดเชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพฯ และสงขลา

จากรูปที่ 3.38 จะเห็นว่าจุดกราฟกระจายตามเส้นทแยงมุม โดยมีค่า root mean square difference (RMSD) เท่ากับ 12.9% และค่า mean bias difference (MBD) เท่ากับ -7.6% จากค่า MBD ซึ่งมีค่าเป็นลบ แสดงว่าค่าความเร็วลมจากการวัดมีแนวโน้มสูงกว่าค่าจากการคำนวณเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะค่าจากการวัดจะเป็นความเร็วลมทั้งในสภาพอากาศปกติและในช่วงที่เกิดพายุต่างๆด้วย ซึ่งในแบบจำลองจะไม่ได้นำพายุต่างๆ เข้าไปคำนวณ ทำให้ผลการวัดสูงกว่าการคำนวณ อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาค่า RMSD และ MBD ร่วมกัน จะพบว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่อเทียบกับการจัดทำแผนที่ลมของประเทศอื่นๆ (Mortensen et al., 2005; Kalthoff et al., 2002)

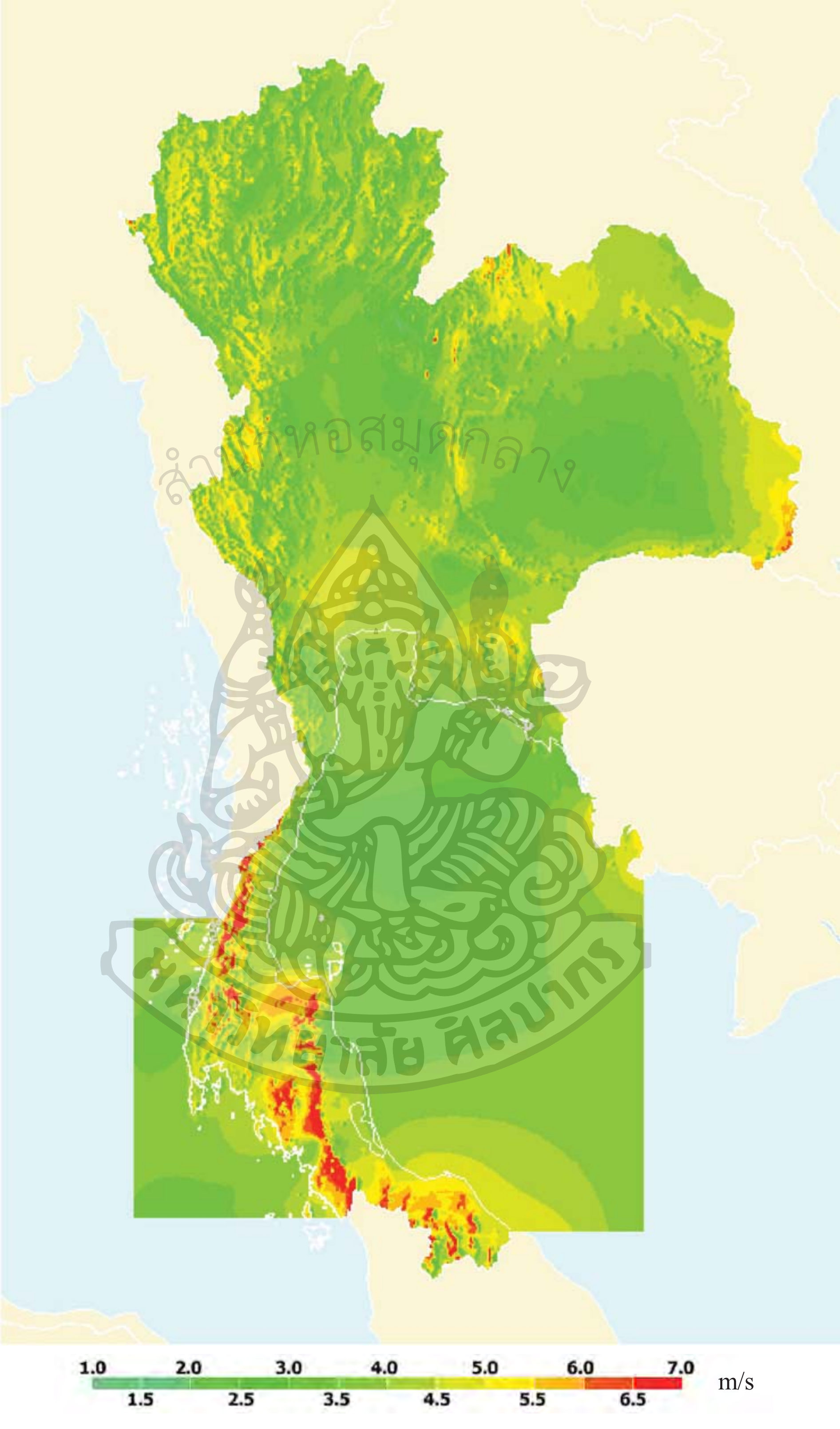
3.3 การจัดทำแผนที่ลม

หลังจากที่ทำการทดสอบแบบจำลองแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณความเร็วและทิศทางลมทั่วประเทศทุกชั่วโมงเป็นระยะเวลา 15 ปี และนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยรายเดือนและค่าเฉลี่ยรายปี จากนั้นจะนำมาจัดแสดงในรูปแผนที่ลมรายเดือนที่ระดับ 90 เมตร (รูปที่ 3.39-3.50) และแผนที่ลมรายปี (รูปที่ 3.51)

สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยศิลปากร

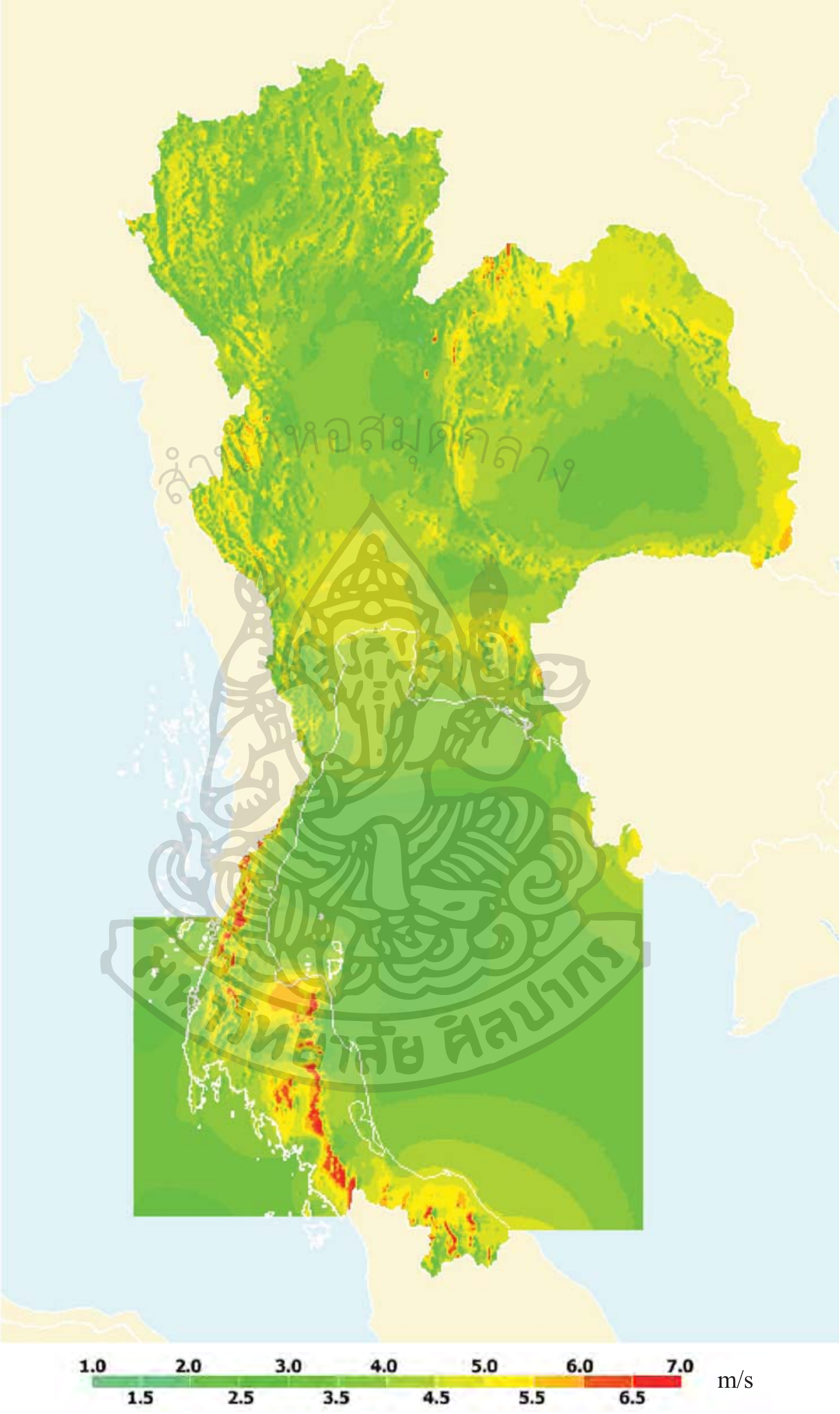


รูปที่ 3.39 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนมกราคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

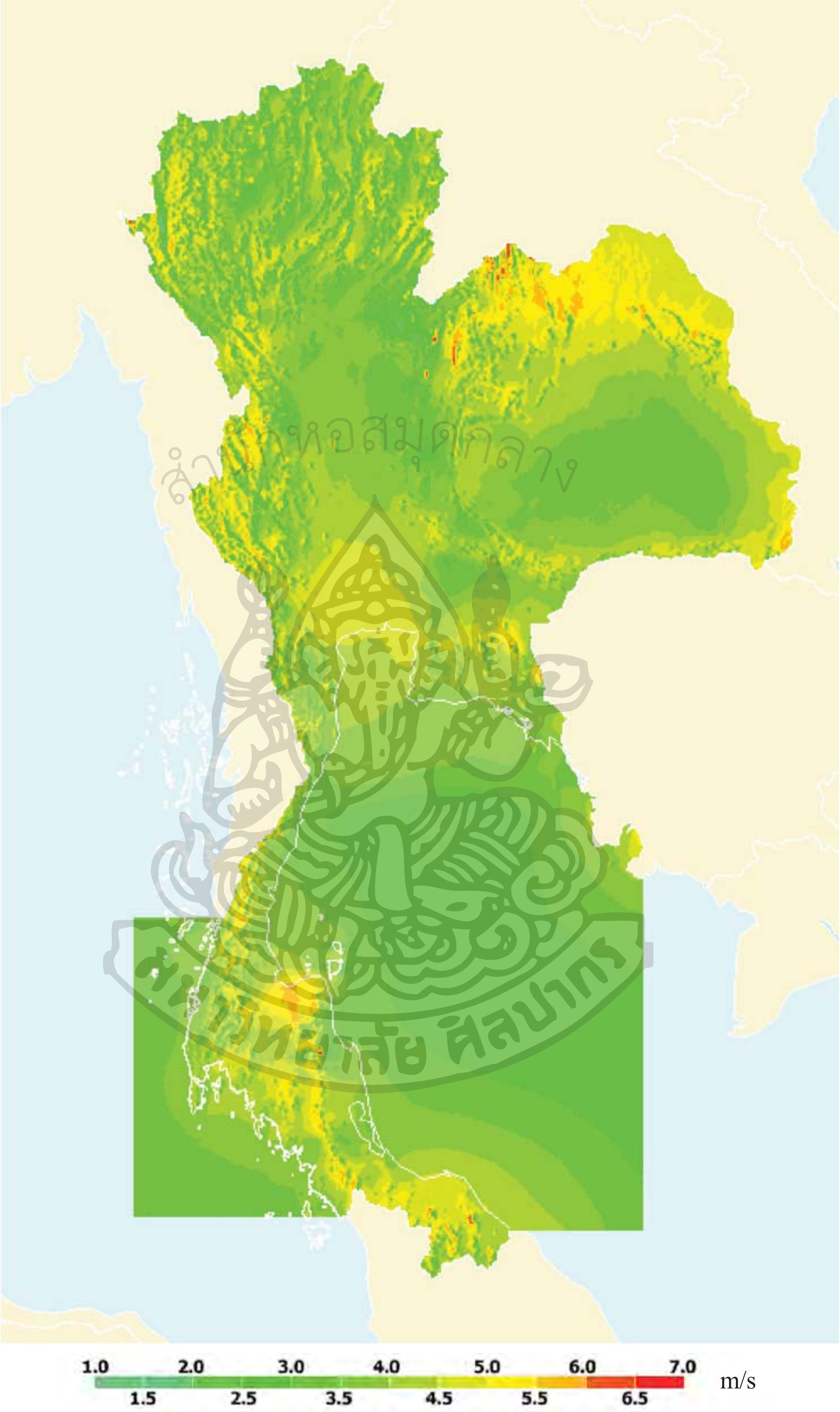


รูปที่ 3.40 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนกุมภาพันธ์ ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

รูปที่ 3.41 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนมีนาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

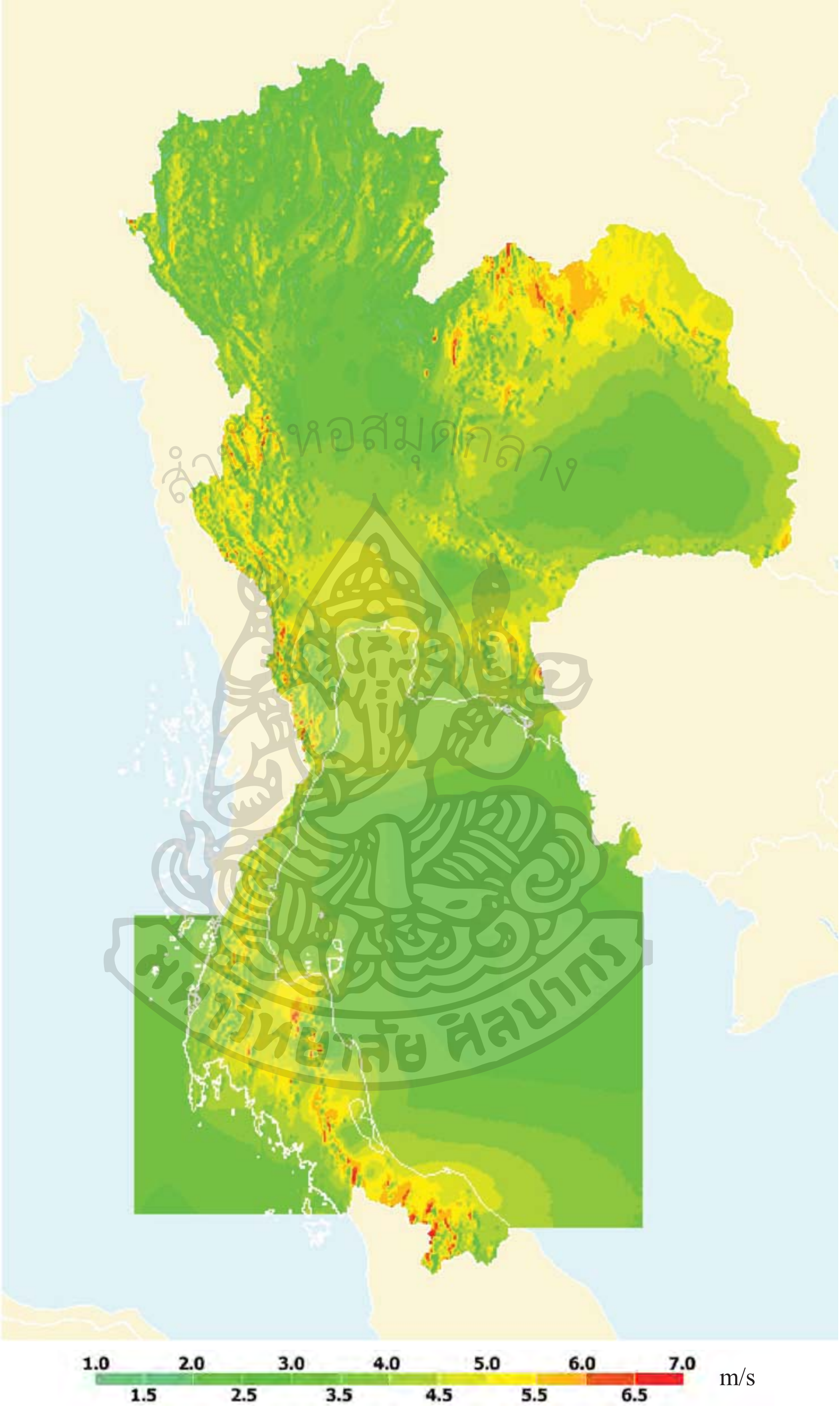


รูปที่ 3.41 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนมีนาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก



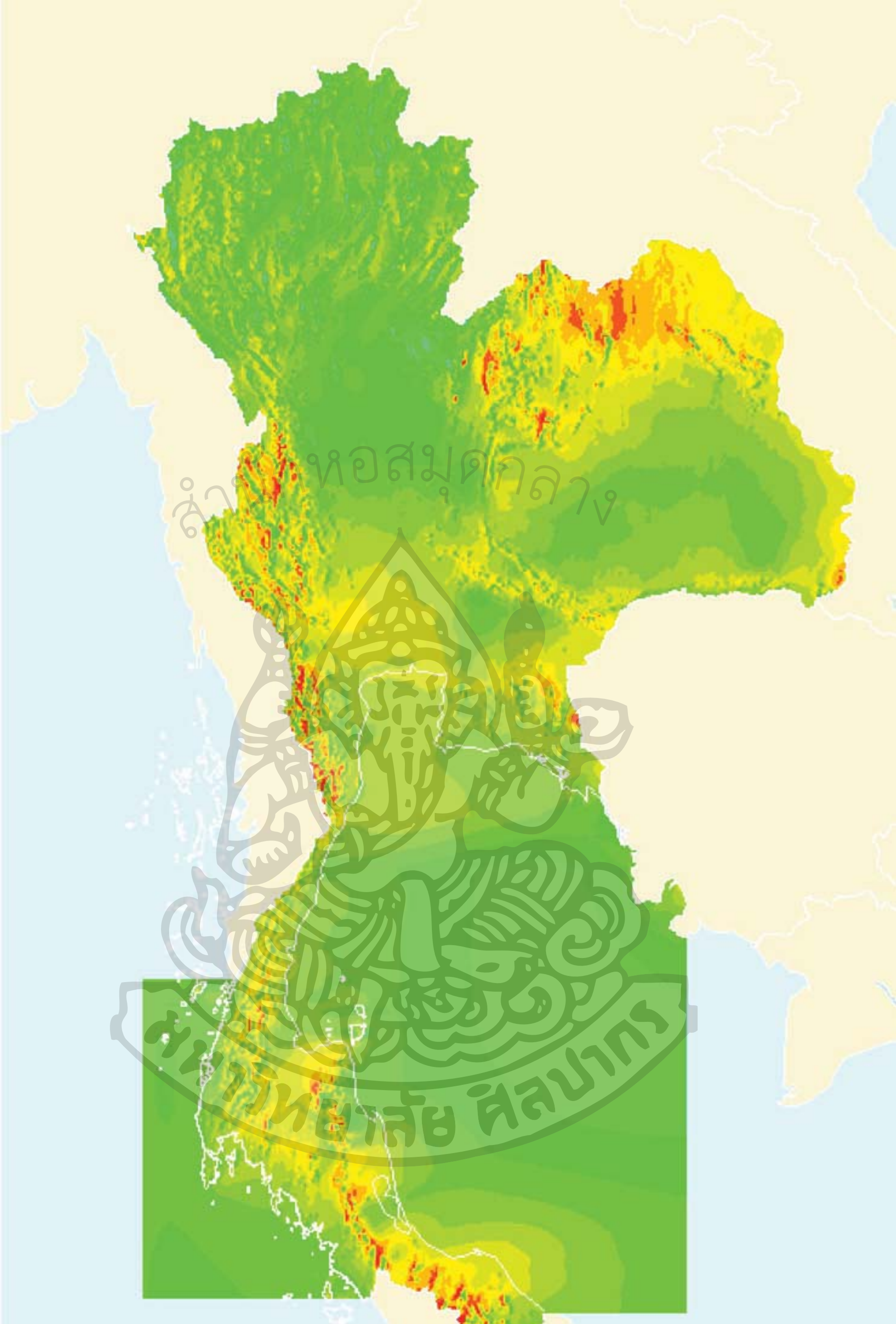
สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยศิลปากร

รูปที่ 3.42 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนเมษายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

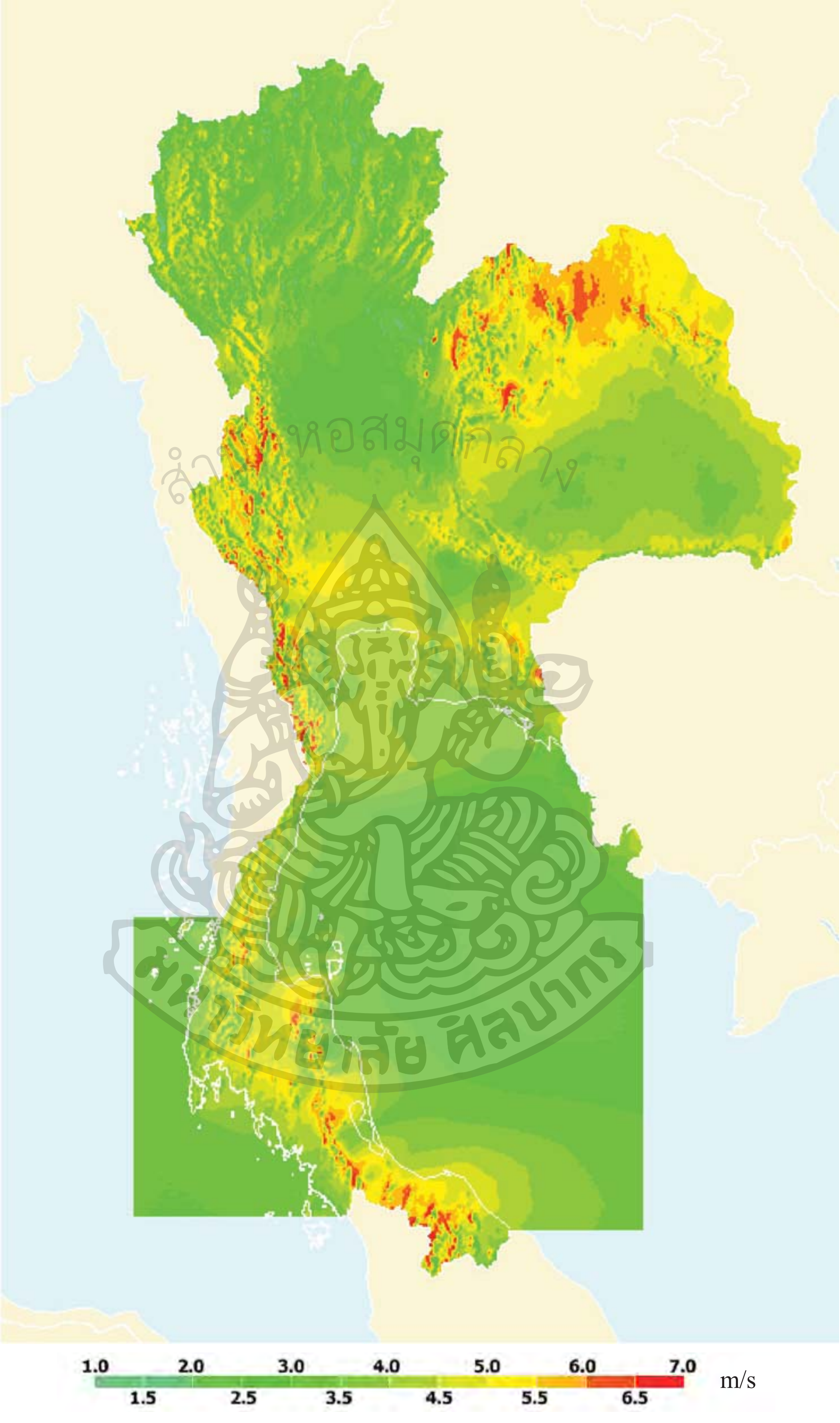


สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

รูปที่ 3.43 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนพฤษภาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก



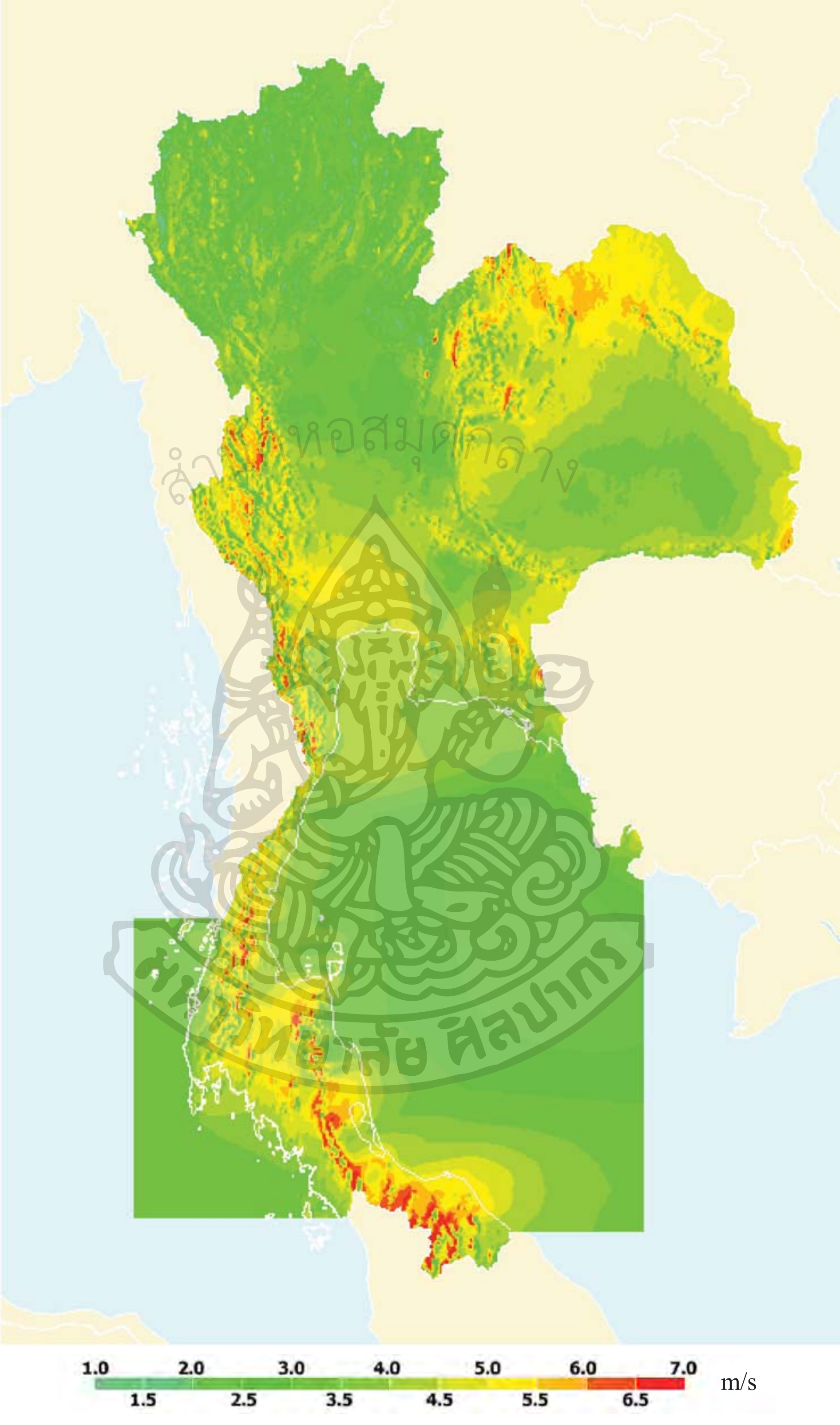
รูปที่ 3.44 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนมิถุนายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก



รูปที่ 3.45 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนกรกฎาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

รูปที่ 3.46 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนสิงหาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

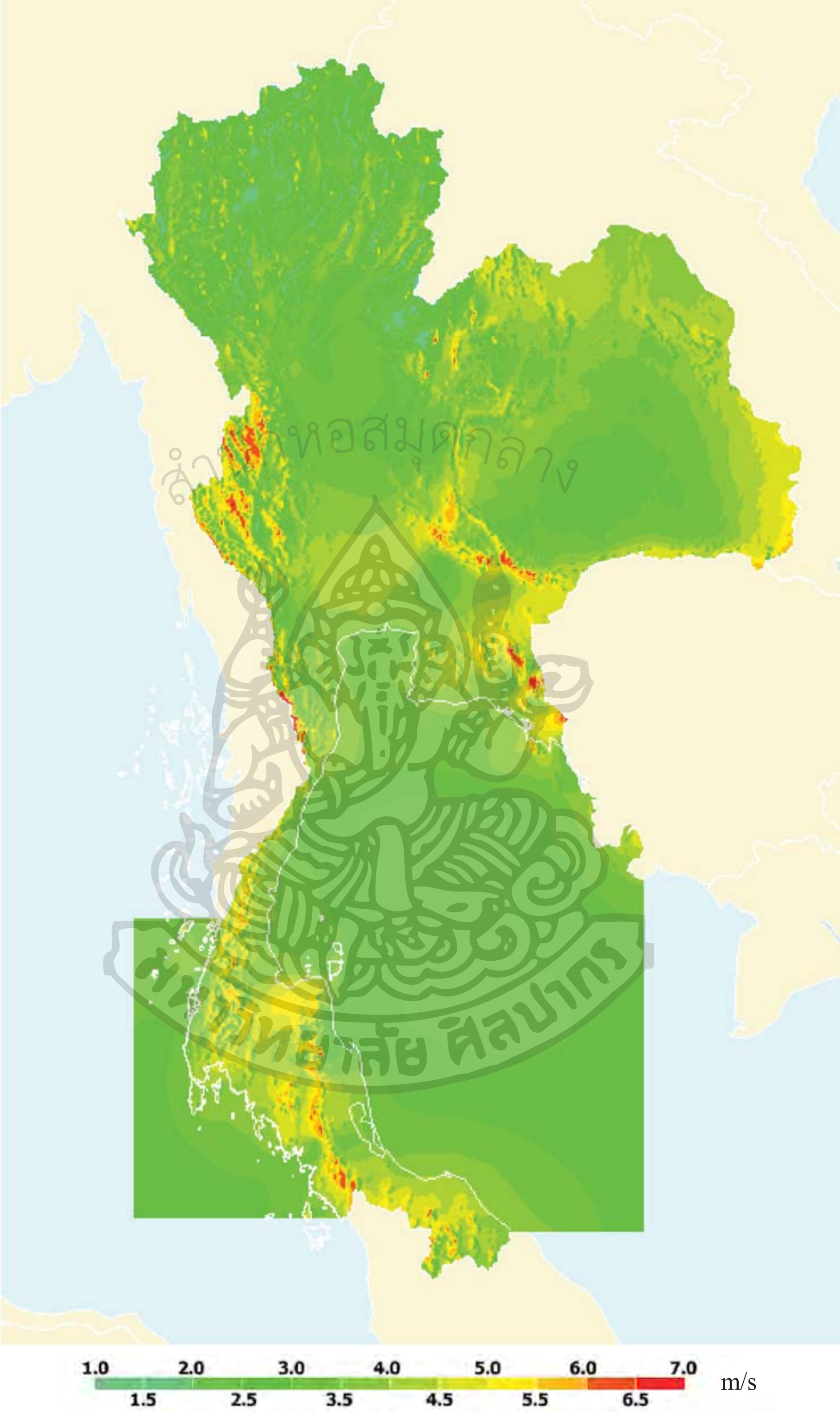


รูปที่ 3.46 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนสิงหาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

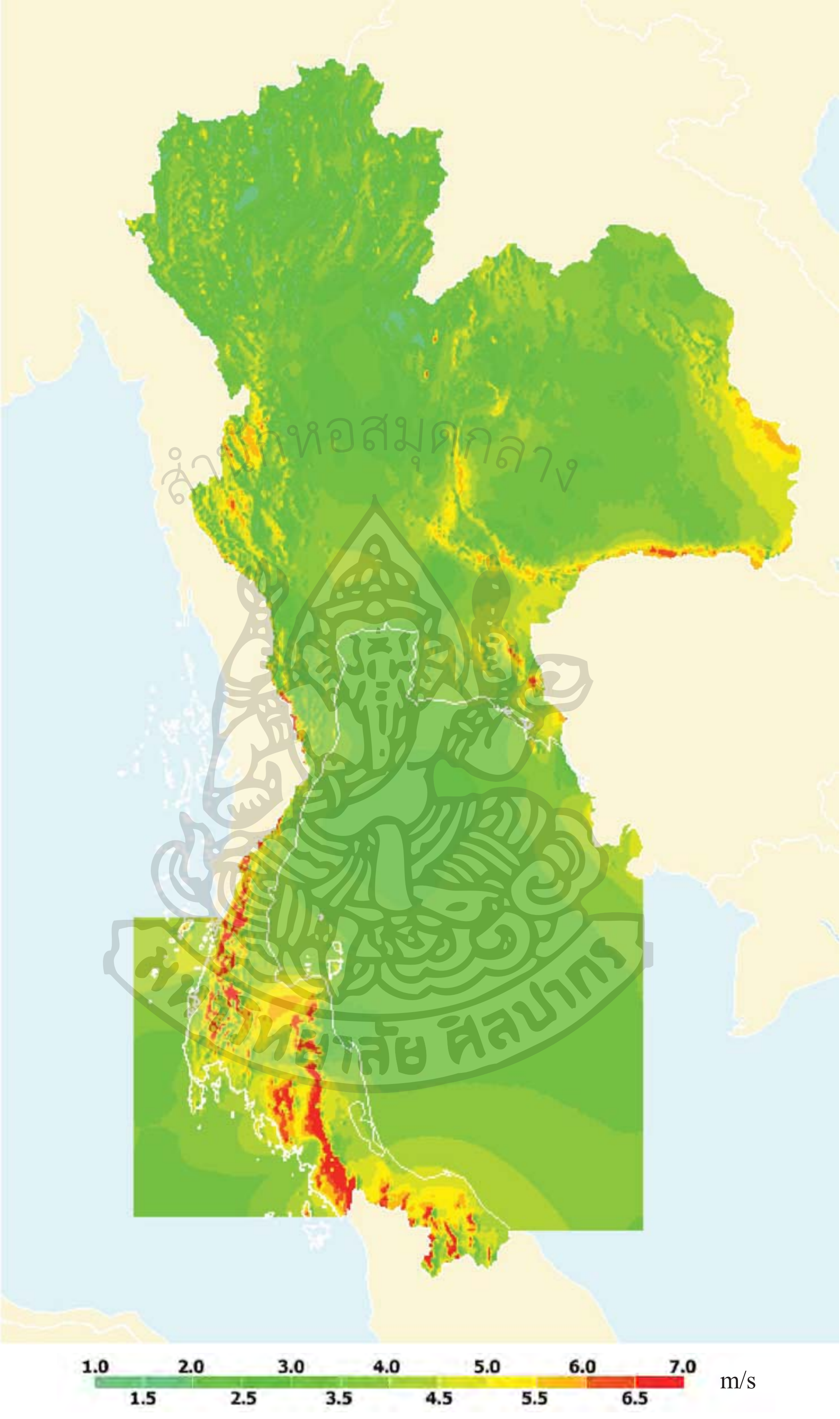
รูปที่ 3.47 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนกันยายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

รูปที่ 3.47 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนกันยายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

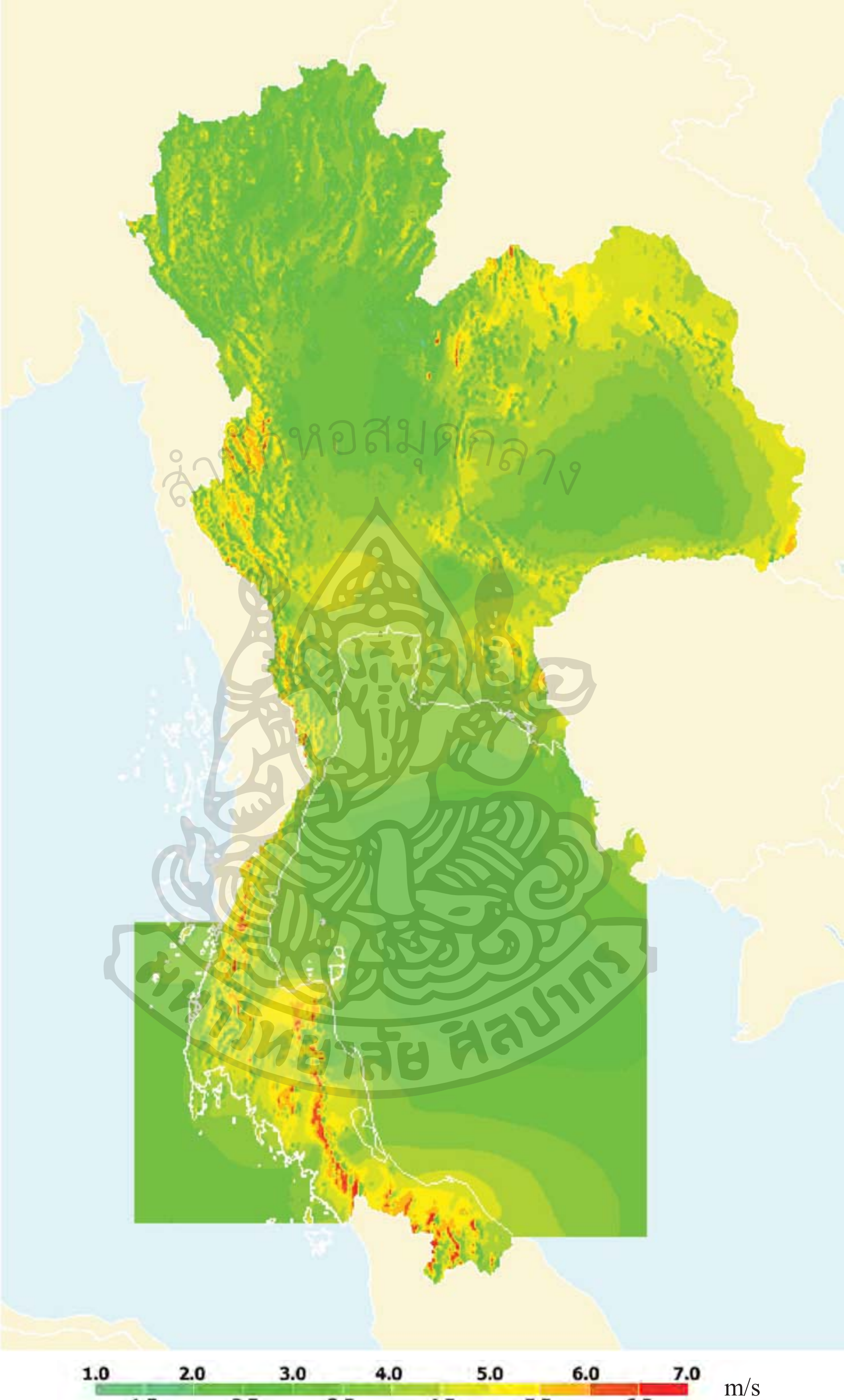
รูปที่ 3.48 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนตุลาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก



รูปที่ 3.49 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนพฤศจิกายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก



รูปที่ 3.50 แผนที่ลมเฉลี่ยเดือนธันวาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก



รูปที่ 3.51 แผนที่ลมเฉลี่ยระยะยาวที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

3.3.1 ลมบนบก

จากรูปที่ 3.39 – 3.50 ซึ่งแสดงการกระจายของความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนที่ระดับความสูง 90 เมตร จะเห็นว่าในเดือนมกราคม บริเวณพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีความเร็วลม 3-4 m/s บริเวณที่มีความเร็วลมสูงกว่า 5 m/s จะอยู่ในบริเวณภูเขาในภาคเหนือ ด้านตะวันตกของภาคกลาง แนวเขาที่อยู่ระหว่างภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลาง ด้านเหนือและด้านตะวันออกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สำหรับบริเวณที่ความเร็วลมสูง 6-7 m/s จะอยู่ตามแนวเขาในภาคใต้และด้านตะวันออกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ลักษณะการกระจายของความเร็วลมดังกล่าวมีสาเหตุมาจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลักษณะสูงต่ำของพื้นที่ โดยในภาคใต้ ลมมรสุมจะพัดผ่านพื้นน้ำในอ่าวไทย ซึ่งไม่มีสิ่งกีดขวางทางลม เมื่อมาปะทะแนวเขาและลาดเขาจะทำให้ความเร็วลมสูงขึ้น

ในเดือนกุมภาพันธ์ ประเทศไทยยังคงอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยมีกำลังอ่อนลง ลักษณะการกระจายตามพื้นที่ของความเร็วยังคงมีลักษณะคล้ายคลึงกับเดือนมกราคม กล่าวคือจะมีบริเวณที่ความเร็วลมสูง 6-7 m/s ชัดเจนตามบริเวณภูเขาในภาคใต้ และบริเวณพื้นที่แคบทางด้านเหนือและด้านตะวันออกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

สำหรับเดือนมีนาคมและเมษายนจะเป็นช่วงปลอดจากลมมรสุม ลมที่พัดเกิดจากอิทธิพลภายในท้องถิ่น เช่น ลมบกลมทะเล ลมภูเขา ลมหุบเขา หรือพายุฟ้าคะนอง พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศมีความเร็วลมต่ำกว่า 5 m/s ยกเว้นบริเวณแนวเขาในภาคใต้ ซึ่งยังมีบางพื้นที่ในเดือนมีนาคมยังมีความเร็วลมสูงกว่า 6 m/s

โดยทั่วไปกลางเดือนพฤษภาคม ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะเริ่มพัดจากทะเลอันดามันเข้าสู่ประเทศไทย ทำให้บริเวณแนวเขาในภาคใต้ ด้านตะวันตกของภาคกลางและด้านบนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีความเร็วลมเพิ่มขึ้น จากนั้นลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะมีกำลังแรงมากขึ้นในเดือนมิถุนายน กรกฎาคม และสิงหาคม ในเดือนกันยายนลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะเริ่มอ่อนกำลังลง ทำให้บริเวณที่ความเร็วลมสูงกว่า 6 m/s เหลือเฉพาะพื้นที่ตามแนวเขาในภาคใต้และด้านตะวันตกของภาคกลาง

ตามปกติเดือนตุลาคมจะเป็นช่วงเปลี่ยนจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ไปเป็นลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ความเร็วลมในพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศจึงต่ำกว่า 5 m/s ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะมีกำลังแรงมากขึ้นจากเดือนพฤศจิกายนจนถึงเดือนธันวาคม ซึ่งจะสังเกตได้ชัดเจนในบริเวณแนวเขาในภาคใต้ ซึ่งมีความเร็วลมในเดือนธันวาคมอยู่ในช่วง 6-7 m/s

เมื่อพิจารณาแผนที่ลมเฉลี่ยรายปีที่ความสูง 90 เมตร ซึ่งเป็นแนวโน้มความสูงของกังหันลมสมัยใหม่ จากรูปที่ 3.51 จะเห็นว่าพื้นที่ภาคใต้จะมีบริเวณที่ความเร็วลมสูงกว่า 5 m/s กระจายอยู่

ทั่วไป และมีบริเวณที่ความเร็วลมในช่วง 6-7 m/s อยู่บริเวณแนวเขาตั้งแต่ภาคใต้ตอนล่างและด้านตะวันตกของภาคใต้ตอนบน โดยภาคใต้จะมีบริเวณที่มีความเร็วลมค่อนข้างสูงเด่นชัดกว่าภาคอื่นๆ ทั้งนี้เพราะภาคใต้ได้รับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ซึ่งพัดจากทะเลอันดามันและได้รับลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งพัดผ่านอ่าวไทยเข้ามาโดยตรง โดยมีสิ่งกีดขวางทางลมน้อย จากการได้รับลมมรสุมเต็มที่นี้ทำให้ความเร็วลมเฉลี่ยต่อปีมีค่าสูงกว่าภาคอื่นๆ สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะได้รับลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือค่อนข้างดี แต่จะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้น้อยเพราะเป็นบริเวณที่ห่างไกลจากทะเลอันดามันมาก โดยในตอนกลางและตอนล่างของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นที่ราบสูงจะเป็นบริเวณลมสงบ ยกเว้นบริเวณที่มีเนินเขาที่ช่วยเพิ่มความเร็วลม สำหรับบริเวณภูเขาซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และด้านบนและด้านตะวันออกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จะมีบริเวณที่มีความเร็วลมเฉลี่ยต่อปีในช่วง 6-7 m/s อยู่ในบริเวณแคบ ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะภูมิประเทศเฉพาะท้องถิ่น เช่น ช่องเขา เนินเขา หรือยอดเขา ซึ่งช่วยเพิ่มความเร็วลม หรือรับลมได้ดีขึ้น

ในกรณีของภาคเหนือซึ่งส่วนใหญ่เป็นภูเขาจะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมทั้งสองค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับภาคอื่นๆ โดยบริเวณยอดเขาจะมีพื้นที่แคบๆ ที่รับลมมรสุมทั้งสองได้เต็มที่ ซึ่งสามารถพบบริเวณที่มีความเร็วลม 5 m/s ได้ เนื่องจากเป็นบริเวณภูเขาดังนั้นในบางพื้นที่ของภาคเหนือจะมีลมภูเขาและลมหุบเขาด้วย

สำหรับในบริเวณภาคกลาง ทางด้านตะวันตกจะได้รับอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ได้เต็มที่ เนื่องจากอยู่ใกล้ทะเลอันดามัน ดังนั้นจึงพบบริเวณความเร็วลมสูง 5-7 m/s เป็นบริเวณแคบๆ ตามแนวเขา ซึ่งคล้ายกับกรณีของแนวเขาทางด้านตะวันตกของภาคกลาง สำหรับส่วนอื่นของภาคกลางจะเป็นที่ราบลุ่ม ซึ่งเป็นบริเวณลมสงบตลอดทั้งปี เนื่องจากได้รับอิทธิพลของลมมรสุมทั้งสองน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

3.3.2 ลมนอกชายฝั่ง

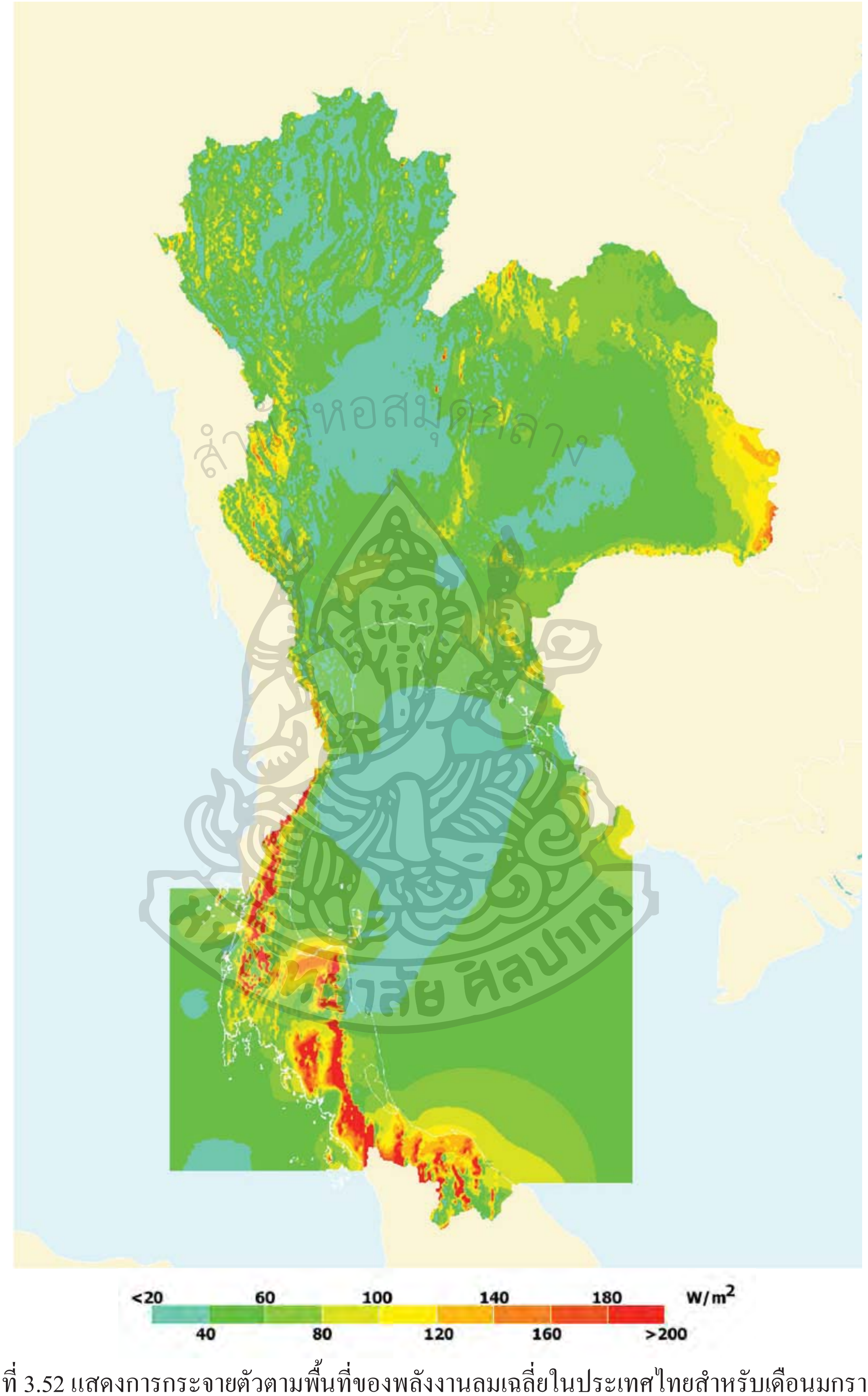
จากรูปแผนที่ลมเฉลี่ยรายเดือน (รูปที่ 3.39-3.50) หากพิจารณาเฉพาะลมนอกชายฝั่งสำหรับช่วงเดือนมกราคม ประเทศไทยอยู่ในช่วงของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ จะเห็นว่า พื้นที่นอกชายฝั่งที่ความเร็วลมสูง (5-6 m/s) จะพบในอ่าวไทยมากกว่าทางฝั่งอันดามัน สำหรับเดือนกุมภาพันธ์ประเทศไทยยังคงอยู่ภายใต้อิทธิพลของมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ แต่เริ่มออ่นกำลังลง แต่ยังพบว่าทางฝั่งอ่าวไทยลมค่อนข้างแรงกว่าทางฝั่งอันดามัน ในช่วงระหว่างเดือนเมษายนถึงเดือนกลางพฤษภาคม เป็นช่วงเปลี่ยนมรสุม ความเร็วลมนอกชายฝั่งส่วนใหญ่จึงมีค่าลดลง

โดยทั่วไปมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะเริ่มพัดเข้าสู่ประเทศไทยในช่วงกลางเดือนพฤษภาคม และมีกำลังลมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากเดือนพฤษภาคมจนถึงเดือนสิงหาคม ซึ่งจะเห็นได้จากแผนที่ลมของเดือนมิถุนายน กรกฎาคม และสิงหาคม โดยพื้นที่นอกชายฝั่งที่มีความเร็วลมสูงจะขยายตัวจากฝั่งเป็นบริเวณกว้างมากขึ้น ในเดือนกันยายนลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะอ่อนกำลังลง โดยพื้นที่ที่มีความเร็วลมสูง ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในบริเวณเดิมแต่แคบลง สำหรับเดือนตุลาคมจะเป็นช่วงเปลี่ยนลมมรสุม โดยลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะเริ่มพัดเข้าสู่ประเทศไทย และมีกำลังแรงขึ้นจากเดือนตุลาคมจนถึงเดือนธันวาคมส่งผลให้บริเวณนอกชายฝั่งที่มีลมแรงแผ่ขยายออกจากฝั่งมากขึ้น และ บริเวณทางอ่าวไทยมีความเร็วลมเฉลี่ยสูงกว่าทางฝั่งอันดามันอย่างชัดเจน

ทำนองเดียวกัน จากแผนที่ความเร็วเฉลี่ยระยะยาว (รูปที่ 3.51) พบว่าความเร็วลมนอกชายฝั่งในบริเวณอ่าวไทยจะมีค่าสูงกว่าความเร็วลมนอกชายฝั่งทางฝั่งอันดามัน โดยจะพบบริเวณที่มีความเร็วลมสูง 5-6 m/s ตรงอ่าวบ้านดอนบริเวณชายฝั่งจังหวัดสุราษฎร์ธานี ตั้งแต่ อ.ท่าฉาง ไปถึง อ.กาญจนดิษฐ์ และบริเวณชายฝั่งของจังหวัดปัตตานี ในเขต อ.หนองจิก อ่าวปัตตานี ไปถึงแหลมตาชี สำหรับทางฝั่งอันดามัน ถึงแม้ความเร็วลมเฉลี่ยโดยรวมจะต่ำกว่าทางฝั่งอ่าวไทยแต่ยังคงพบบริเวณที่มีลมแรงกว่าบริเวณอื่นๆบ้าง ได้แก่ ตามแนวชายฝั่งจังหวัดภูเก็ตด้านอ่าวพังงาเรื่อยลงไปถึงชายฝั่งจังหวัดกระบี่และบางส่วนของจังหวัดตรัง ตลอดจนชายฝั่งจังหวัดสตูลซึ่งติดกับประเทศมาเลเซีย

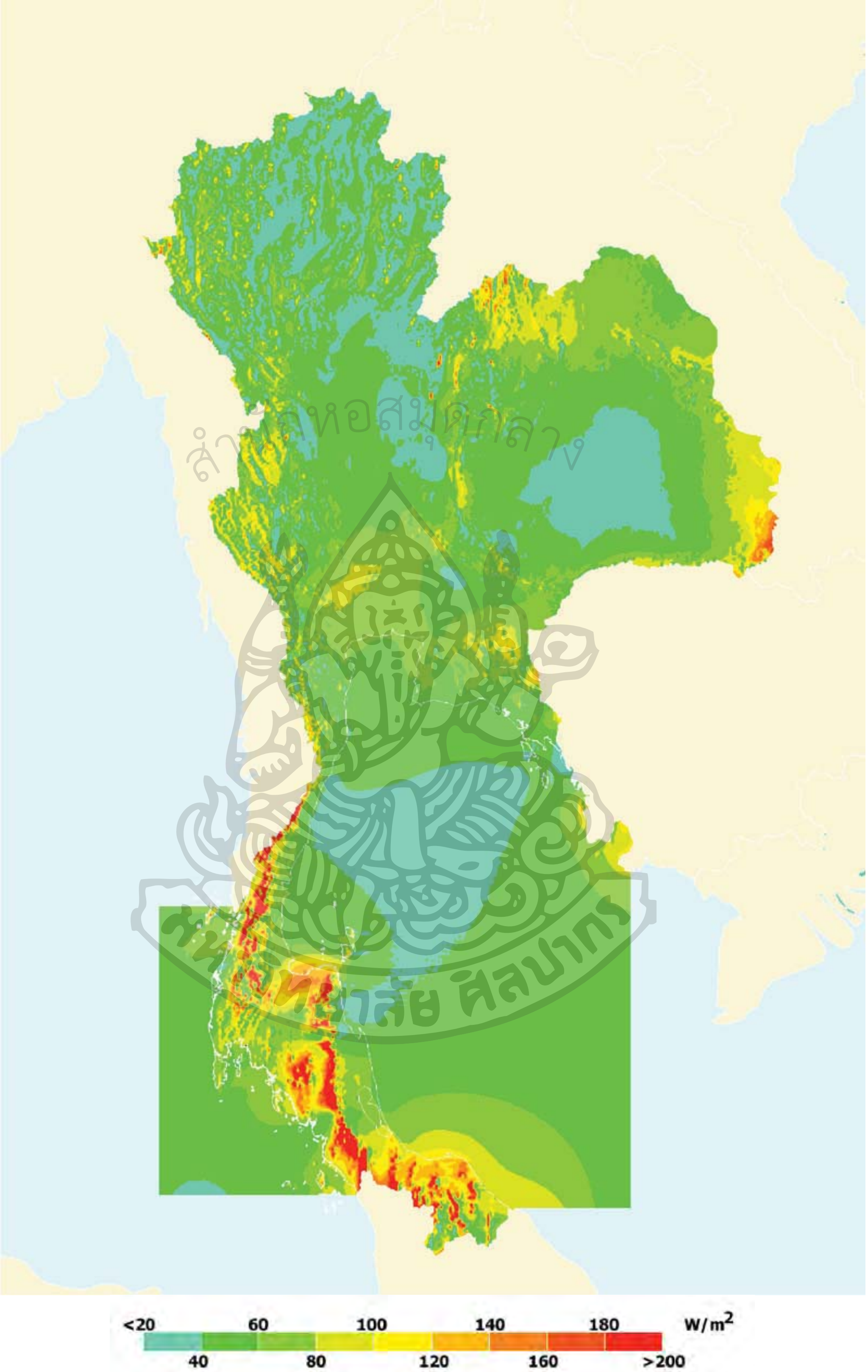
3.3.3 การกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลม

จากผลการคำนวณความเร็วลมที่ได้ นอกจากแผนที่ลมเฉลี่ยรายเดือนและแผนที่ลมเฉลี่ยระยะยาวแล้ว ผู้วิจัยได้แปลงความเร็วลมที่ได้ให้อยู่ในรูปของพลังงานลมในหน่วย วัตต์/เมตร^2 และจัดแสดงในรูปแผนที่เพื่อแสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมทั่วประเทศไทยดังรูปที่ 3.52-3.64 จากแผนที่ดังกล่าวเหล่านี้ รูปแบบการกระจายตัวของพลังงานลมยังคงคล้ายคลึงกับรูปแบบการกระจายความเร็วลม ทั้งนี้เพราะกำลังลมแปรผันตรงกับกำลังสามของความเร็วลม ณ จุดนั้นๆ



รูปที่ 3.52 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนมกราคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

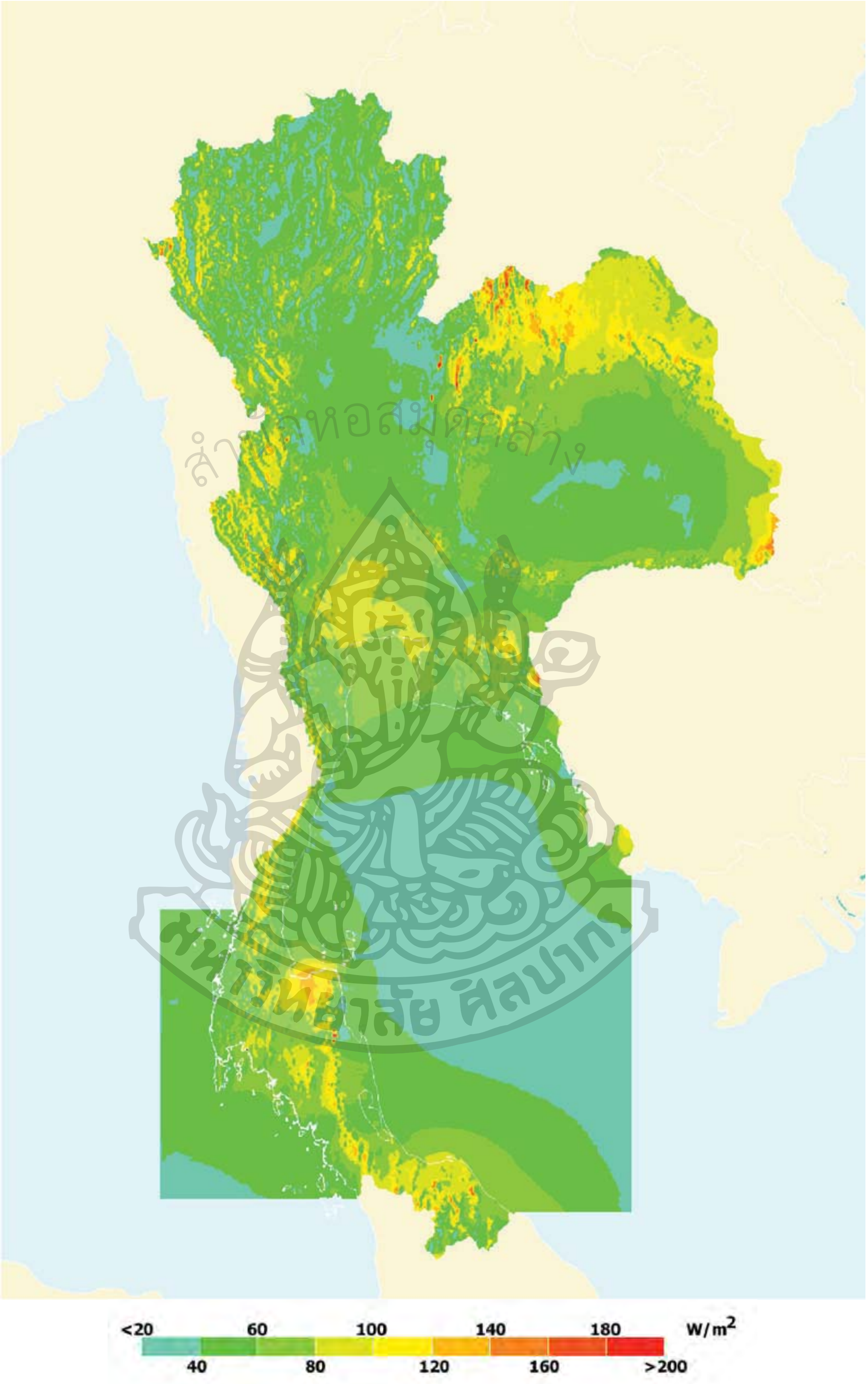
รูปที่ 3.53 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือน
กุมภาพันธ์ ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก



รูปที่ 3.53 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือน
กุมภาพันธ์ ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

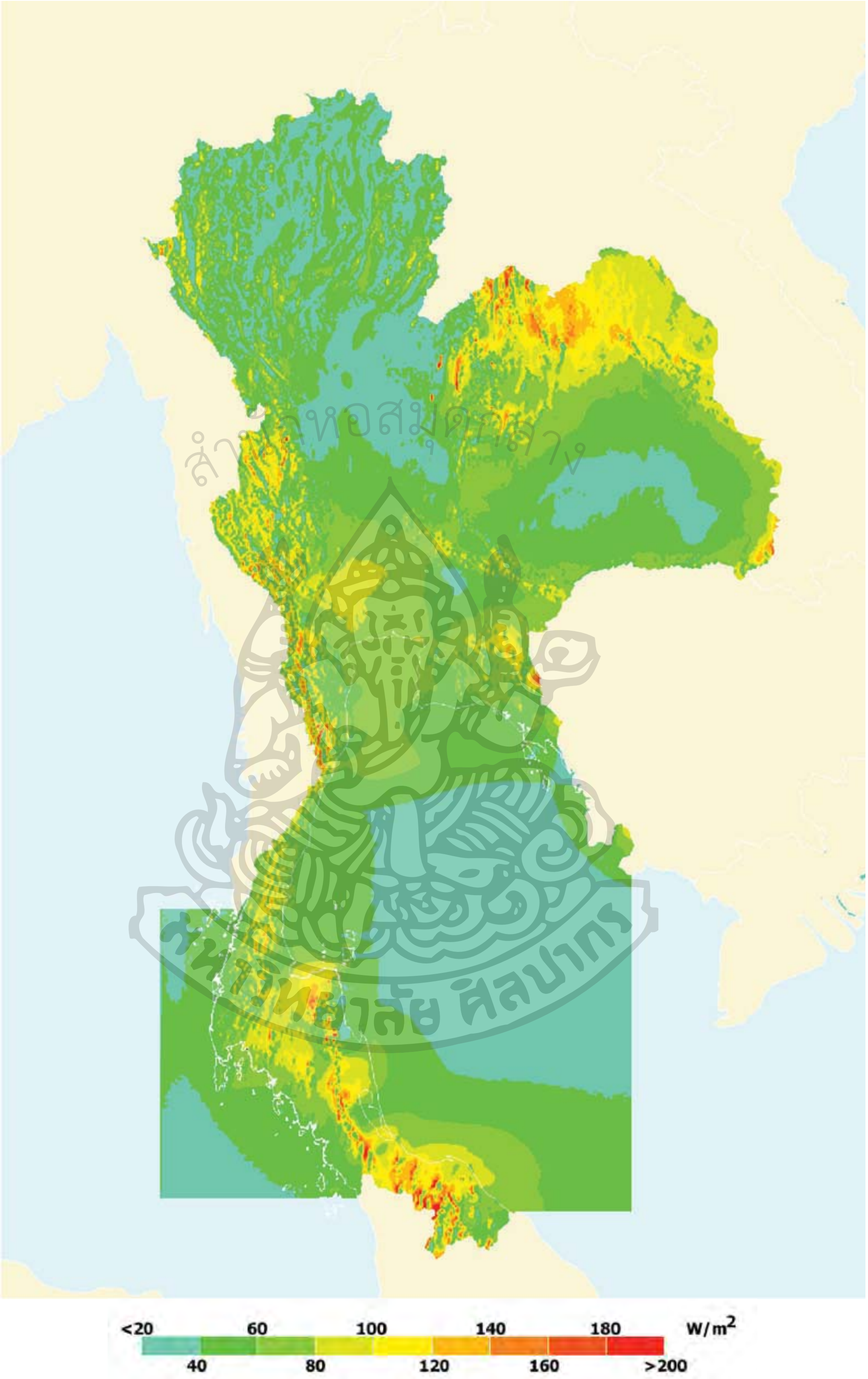
รูปที่ 3.54 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนมีนาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

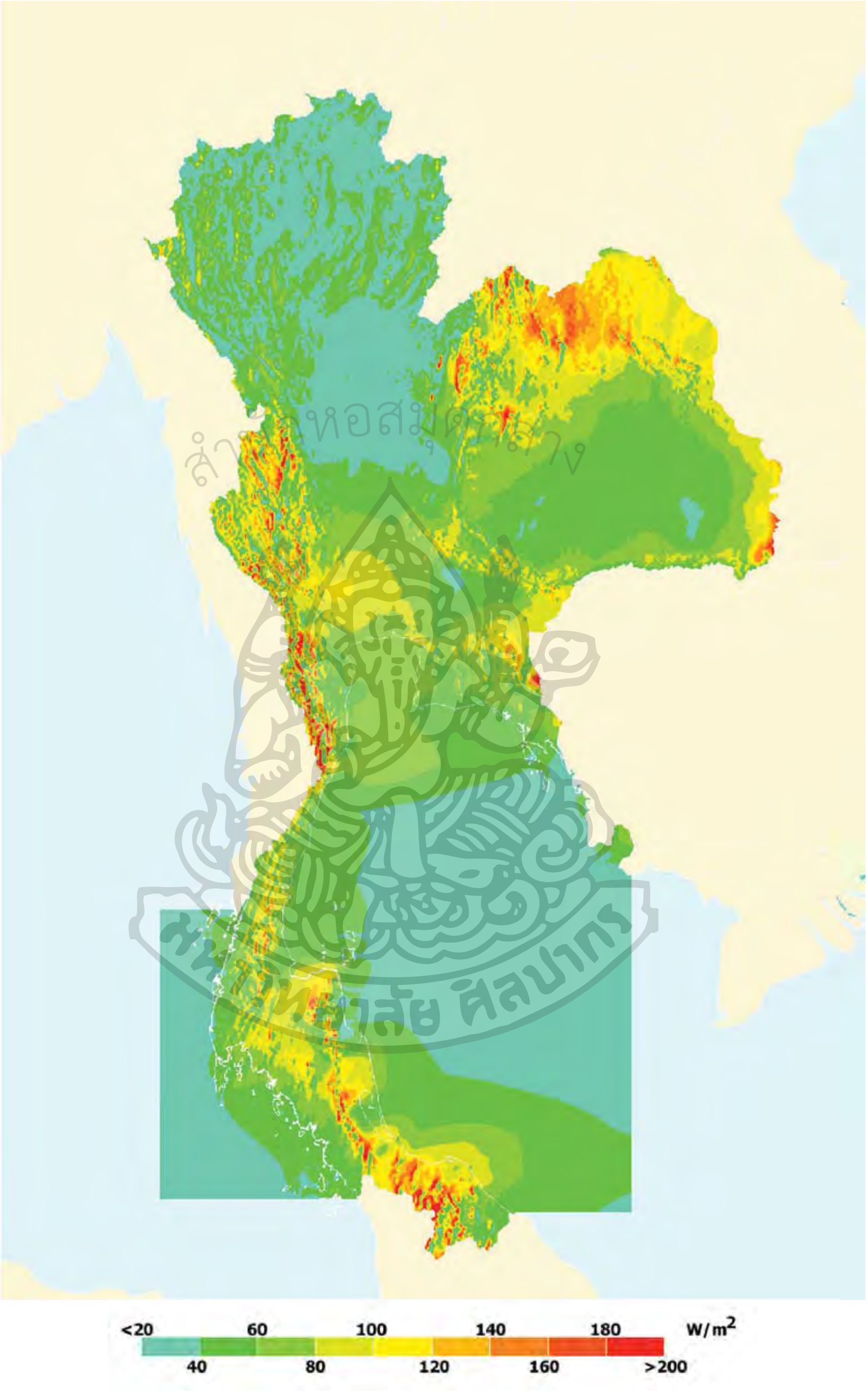
สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร



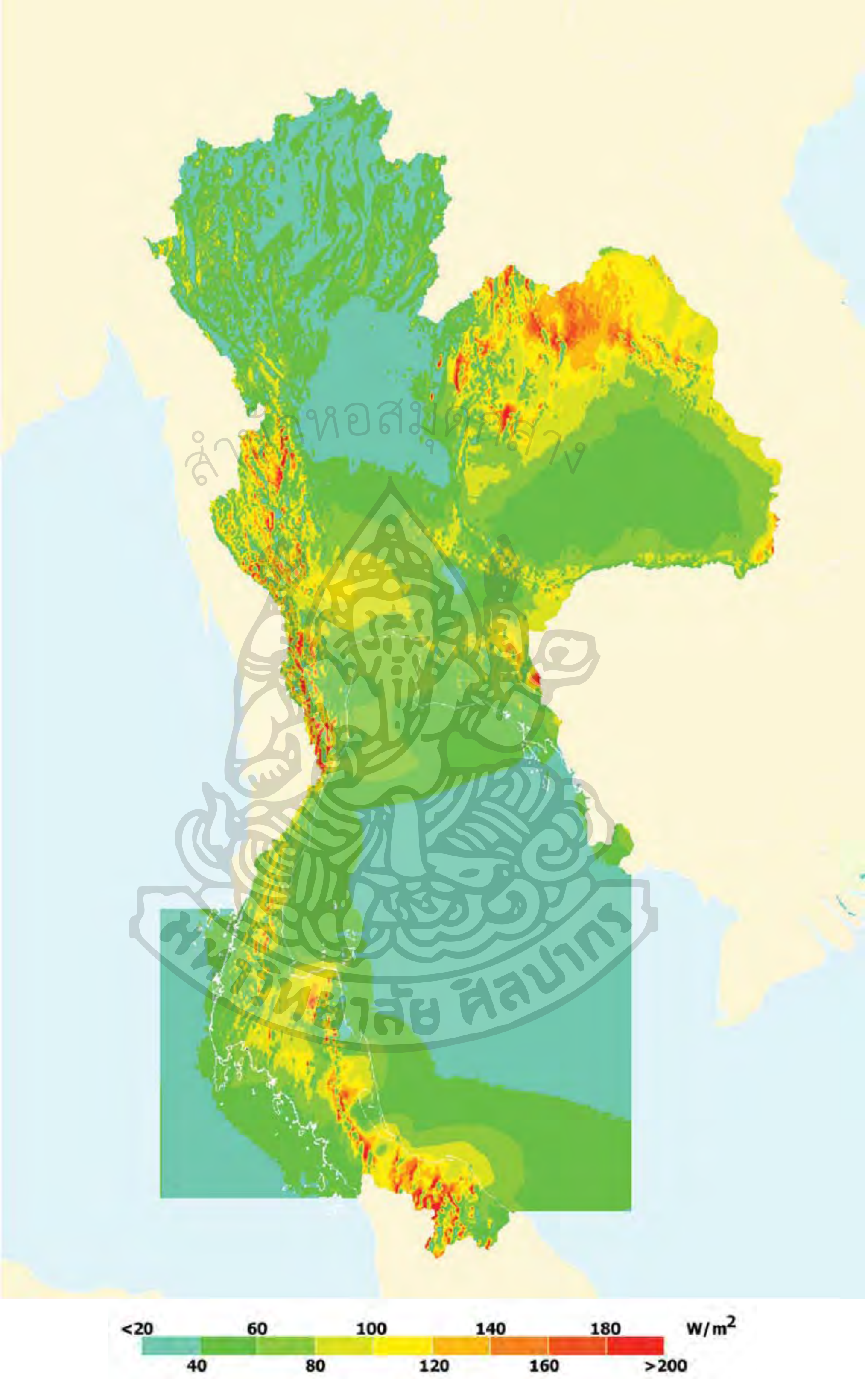
รูปที่ 3.55 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนเมษายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

รูปที่ 3.56 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือน พฤษภาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

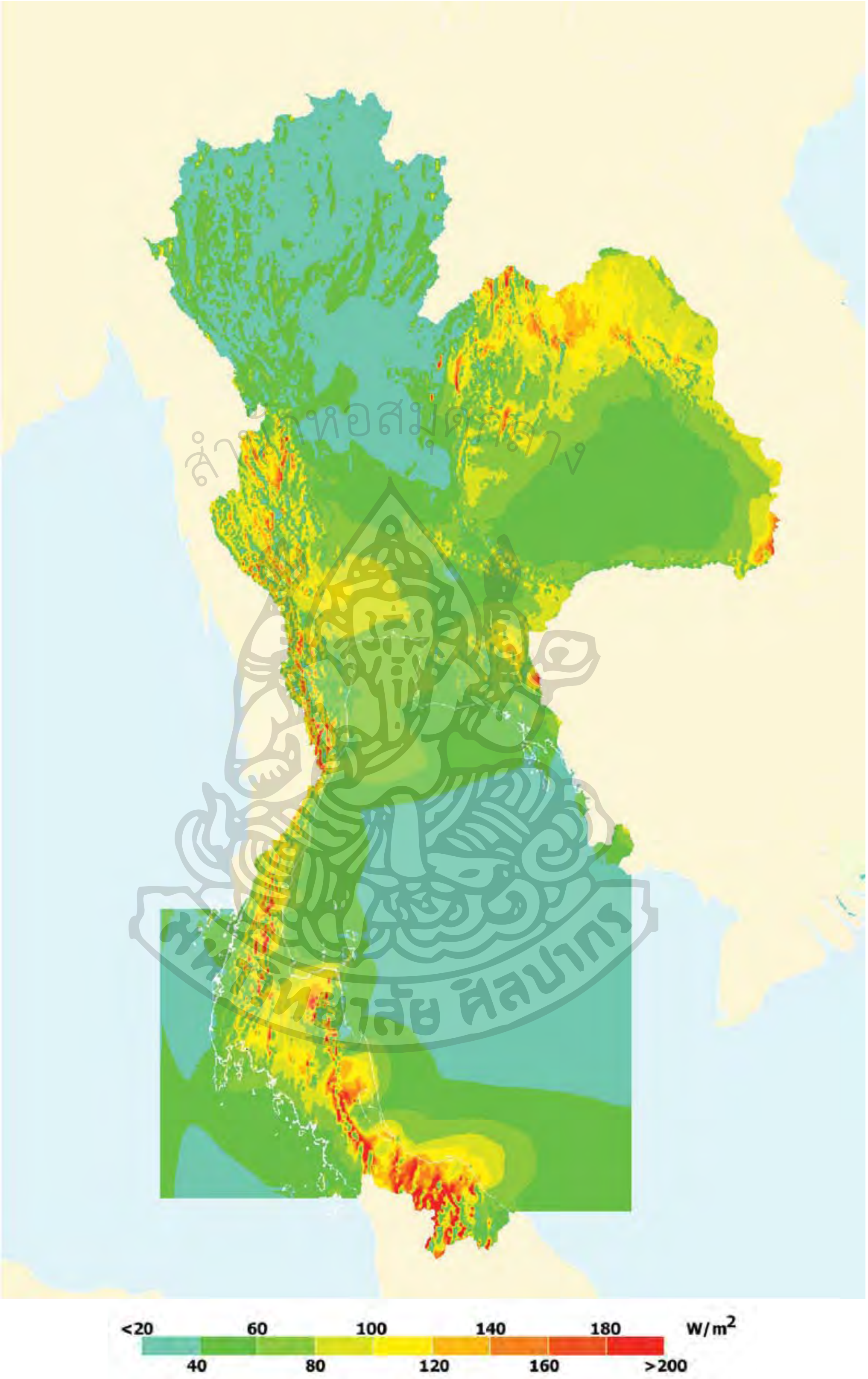




รูปที่ 3.57 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนมิถุนายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

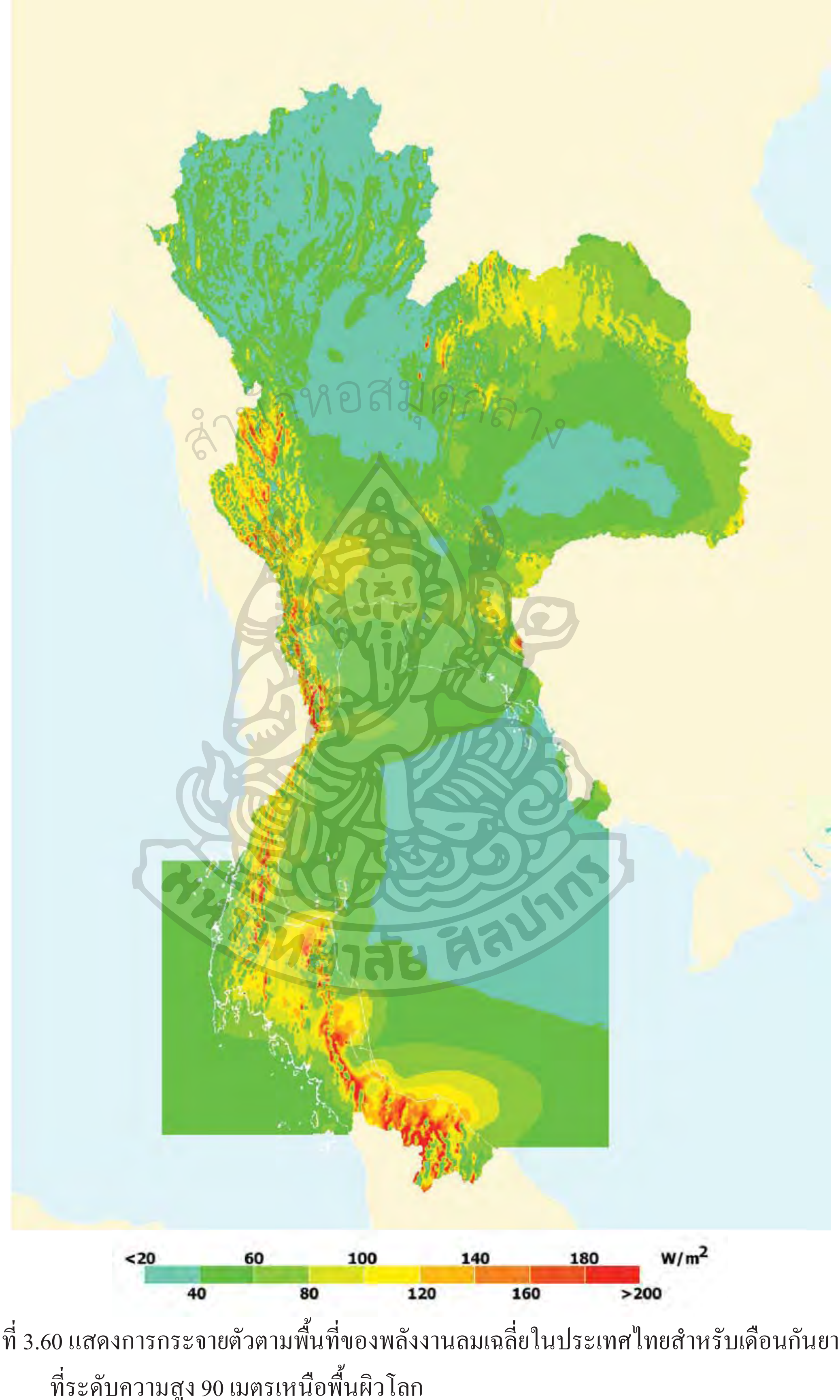


รูปที่ 3.58 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนกรกฎาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก



รูปที่ 3.59 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนสิงหาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

รูปที่ 3.60 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนกันยายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

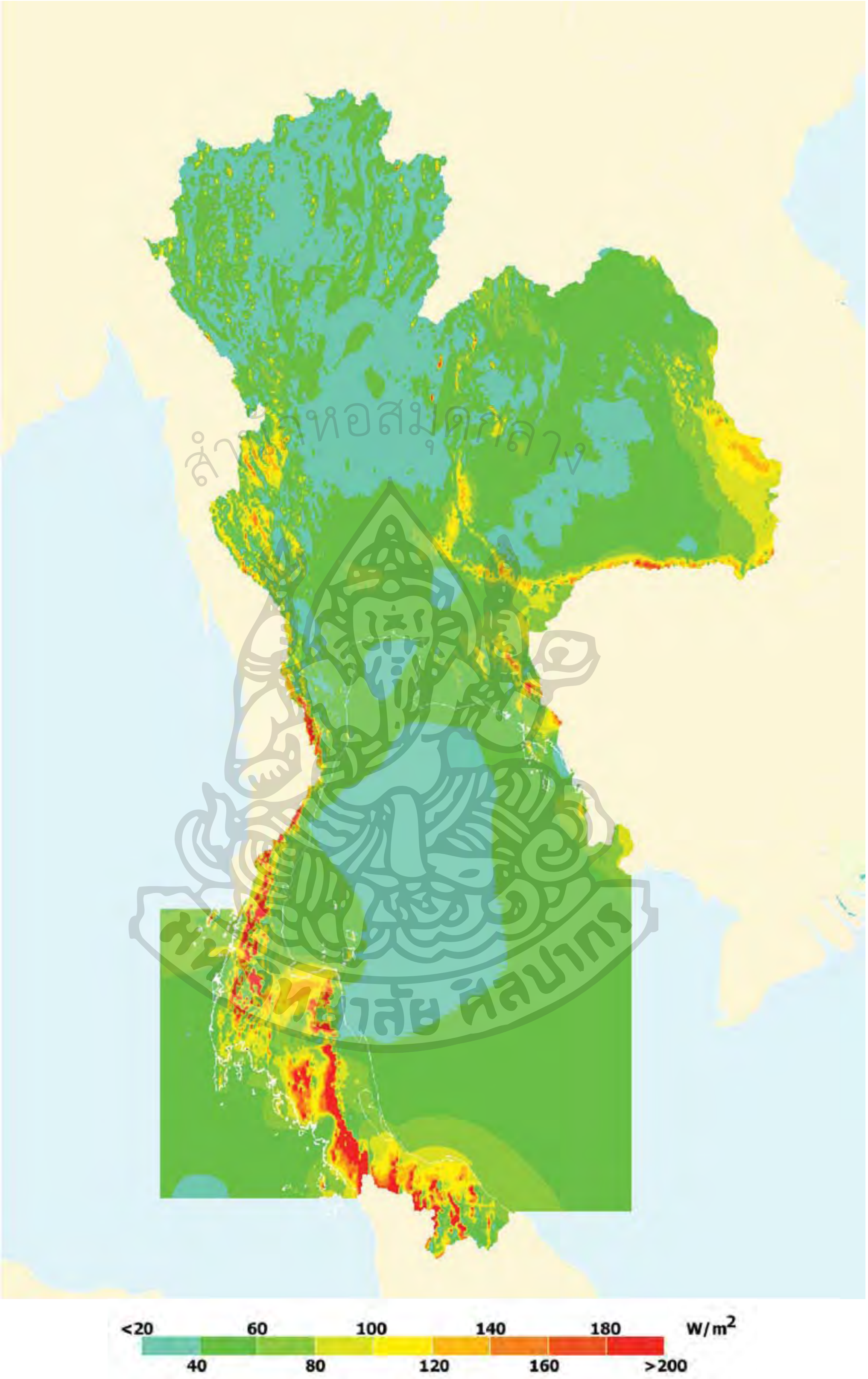


รูปที่ 3.60 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนกันยายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

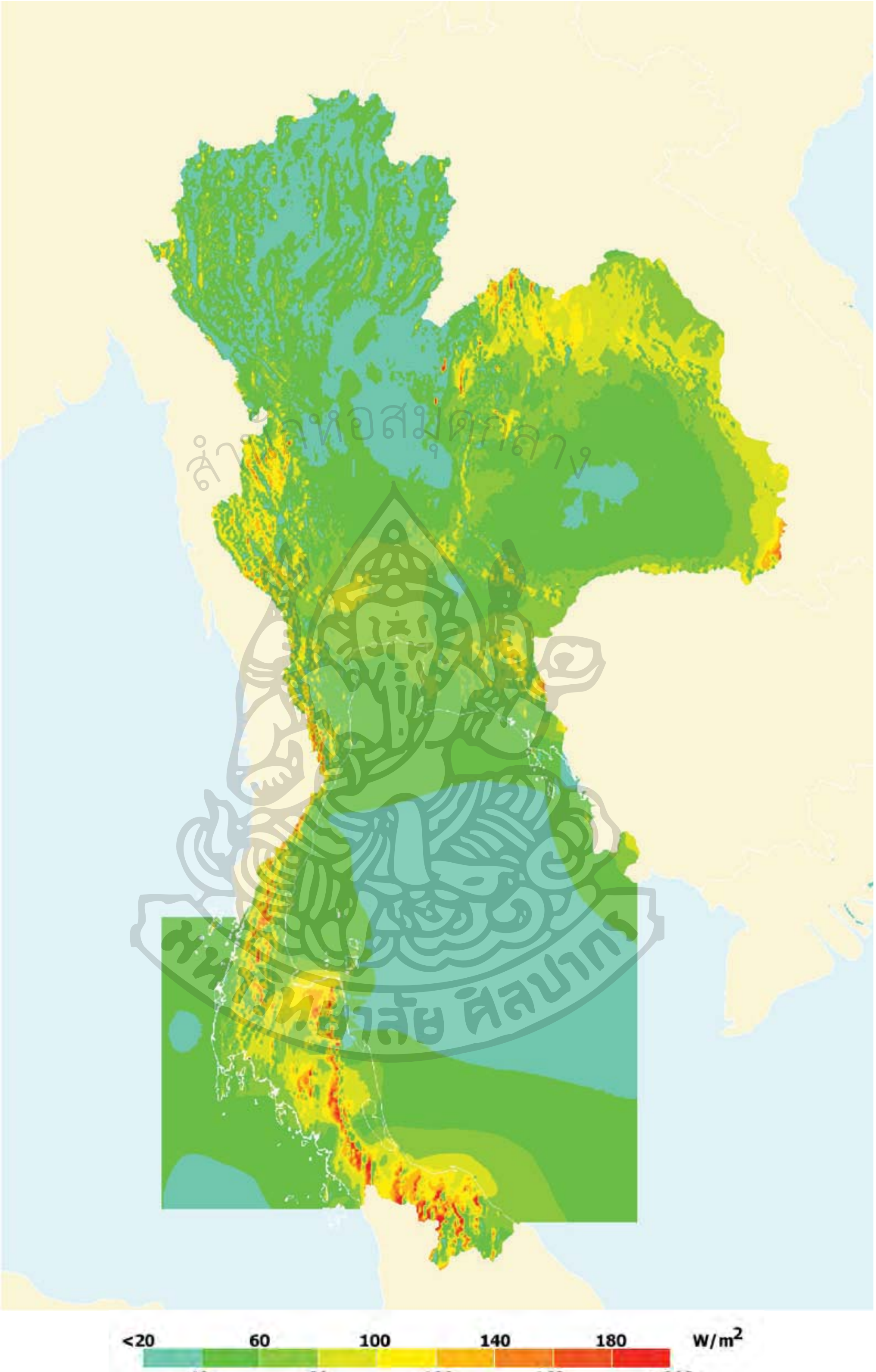
รูปที่ 3.61 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนตุลาคม
ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

สำนักหอสมุดกลาง

รูปที่ 3.62 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนพฤศจิกายน ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก



รูปที่ 3.63 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยในประเทศไทยสำหรับเดือนธันวาคม ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก



รูปที่ 3.64 แสดงการกระจายตัวตามพื้นที่ของพลังงานลมเฉลี่ยระยะยาวในประเทศไทย ที่ระดับความสูง 90 เมตรเหนือพื้นผิวโลก

3.4 การประยุกต์ใช้แผนที่ลมระดับสเกลปานกลาง

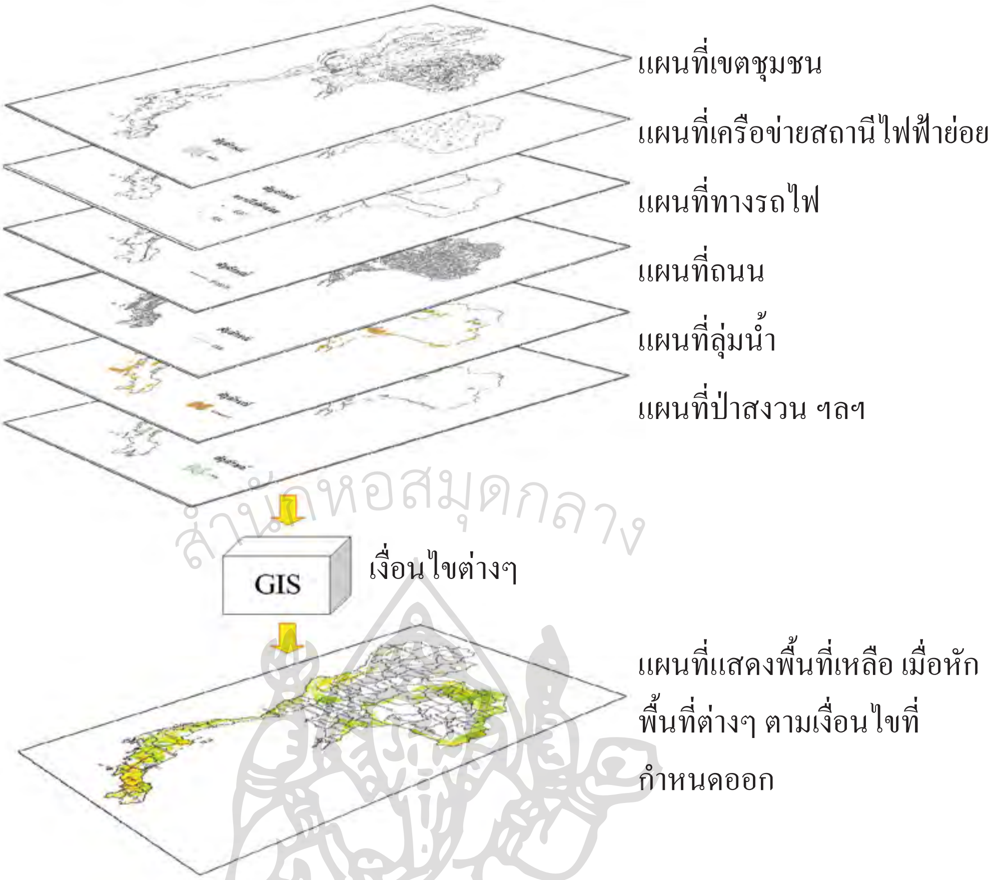
3.4.1 การใช้ประโยชน์แผนที่ลมระดับสเกลปานกลางในการหาพื้นที่ซึ่งมีศักยภาพพลังงานลม

3.4.1.1 พื้นที่บนบก

เนื่องจากพื้นที่ที่มีลมดีอาจอยู่ในพื้นที่หวงห้ามต่างๆ เช่น เขตอุทยานธรรมชาติ หรือแหล่งต้นน้ำลำธาร ซึ่งไม่สามารถเข้าไปติดตั้งกังหันลมได้ ในการประเมินศักยภาพพลังงานลมจำเป็นต้องหักพื้นที่เหล่านี้ออก ในการดำเนินการผู้วิจัยจะใช้กระบวนการภูมิศาสตร์สารสนเทศ (Geographic Information Systems, GIS) โดยอาศัยโปรแกรม ArcGIS Version 9.3 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่พัฒนาโดยบริษัท ESRI ประเทศสหรัฐอเมริกา มาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์

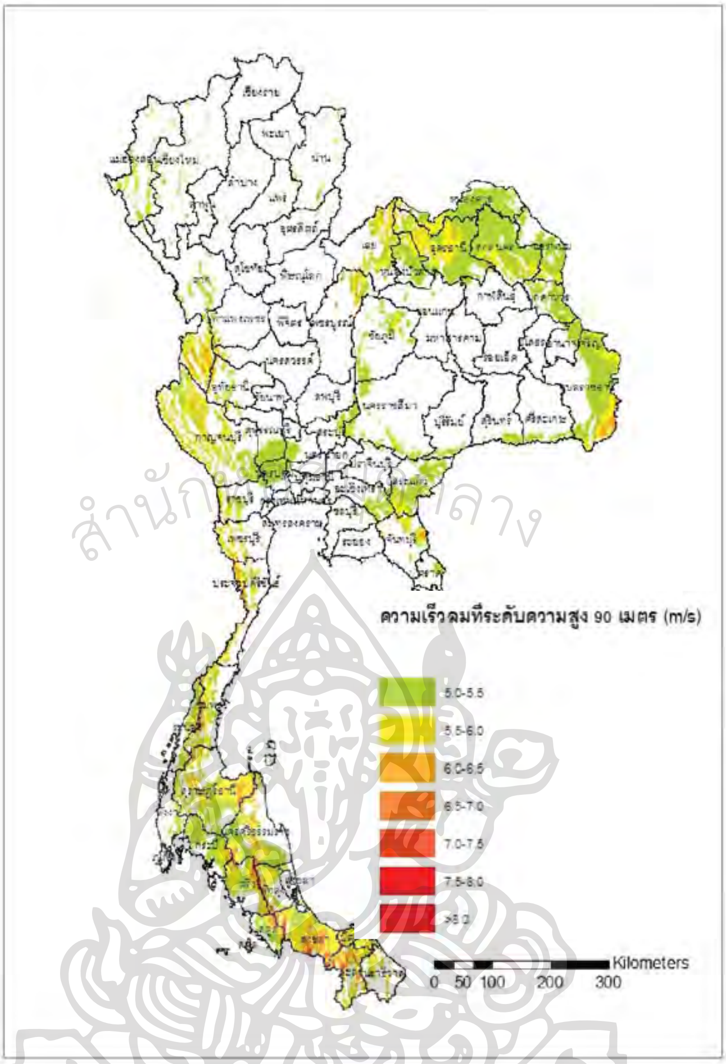
ผู้วิจัยจะทำการจัดเตรียมไฟล์ชั้นข้อมูลต่างๆ ในรูปของแผนที่เชิงภูมิศาสตร์ (shapefile) ได้แก่ พื้นที่อาณาเขตตำบล อำเภอ จังหวัด ชั้นลุ่มน้ำ 1A และ 1B พื้นที่ป่าสงวน อุทยานแห่งชาติ เครือข่ายสถานีไฟฟ้าย่อย (substation) พื้นที่แนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง แม่น้ำ ถนน ทางรถไฟและเขตชุมชน ข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลแบบดิจิตอลที่ระบุพิกัดเชิงภูมิศาสตร์และคำอธิบายข้อมูล (metadata) ไว้ภายใน ซึ่งสามารถนำมาแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ในรูปของแผนที่ ทั้งนี้ผู้ใช้สามารถนำชั้นข้อมูลดังกล่าวมาซ้อนทับกัน เพื่อคำนวณหาพื้นที่รวม ตามเงื่อนไขที่กำหนดดังแผนภูมิในรูปที่ 3.65

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร



รูปที่ 3.65 แผนภูมิแสดงการหาพื้นที่ที่เหลือ เมื่อหักพื้นที่ตามเงื่อนไขต่างๆ ออก โดยใช้โปรแกรม ArcGIS

หลังจากที่เตรียมข้อมูลในรูป shapefile ของพื้นที่ต่างๆแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการป้อนข้อมูลดังกล่าวลงในโปรแกรม ArcGIS และตั้งเงื่อนไขต่างๆ (scenario) ที่คำนึงถึงการหักลบพื้นที่ซึ่งไม่สามารถใช้ในการจัดตั้งกังหันลมได้ ได้แก่ เขตชุมชน แนวเส้นทางคมนาคม ตำแหน่งของโบราณสถาน พื้นที่ของป่าอนุรักษ์ อุทยานแห่งชาติ พื้นที่ลุ่มน้ำ 1A 1B เขื่อนและแหล่งเก็บน้ำต่างๆ จากนั้นจึงทำการคำนวณพื้นที่แนวกันออก (buffer zone) จากแนวขอบถนน ทางรถไฟ แม่น้ำ ลำคลอง และสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นระยะห่าง 500 เมตร และกันพื้นที่รอบเขตชุมชนเป็นระยะห่าง 2 กิโลเมตรออก หลังจากนั้นจึงให้โปรแกรม ArcGIS ทำการคำนวณพื้นที่ที่มีคุณสมบัติสอดคล้องตามเงื่อนไขดังกล่าว ตัวอย่างผลความเร็วลมที่ระดับความสูง 90 เมตร หลังจากผ่านกระบวนการหักลบพื้นที่ด้วยโปรแกรม ArcGIS แล้วแสดงดังรูปที่ 3.66



รูปที่ 3.66 แผนที่แสดงพื้นที่ความเร็วลมที่ระดับความสูง 90 เมตรหลังจากหักพื้นที่เขตชุมชน เส้นทางคมนาคม แหล่งน้ำ พื้นที่ลุ่มน้ำ ป่าอนุรักษ์ อุทยานแห่งชาติ และโบราณสถาน

ผู้วิจัยได้นำผลการหักลบพื้นที่ที่ได้มาทำการประเมินหาพื้นที่ศักยภาพของการจัดตั้งกังหันลมสำหรับกรณีกังหันลมที่มีกำลังการผลิตขนาด 1MW และทำการคำนวณค่ากำลังการติดตั้ง (installed capacity) ทั่วประเทศ โดยใช้การประมาณค่าการใช้พื้นที่ของกังหันลม 1 ตัวตามกฎ 5D Thumb of Spacing ซึ่งเป็นการคิดพื้นที่รอบเสาวัดลมเป็นระยะ 5 เท่าจากเส้นผ่านศูนย์กลางของการกวาดของใบกังหันลม เนื่องจากกังหันลมขนาด 1MW โดยทั่วไปจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของการกวาดประมาณ 55 เมตร และมีความสูงของ hub อยู่ที่ประมาณ 70 - 90 เมตร ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ข้อมูลความเร็วลมที่ได้จากแผนที่ความเร็วลมที่ระดับความสูง 90 เมตร เหนือพื้นดินมาเป็นอินพุทในการคำนวณพื้นที่ศักยภาพ โดยทำการพิจารณาเฉพาะช่วงความเร็วลมที่มีค่ามากกว่า 6 m/s ขึ้นไป

และพิจารณาพื้นที่ที่มีระยะห่างไม่เกิน 10 กิโลเมตร จากตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย (substation) พื้นที่ตามเงื่อนไขดังกล่าวทั่วประเทศจะเหลือเพียง 82.6 ตารางกิโลเมตร โดยพื้นที่ดังกล่าวอยู่ในจังหวัดต่างๆ ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลการคำนวณพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยสูงกว่า 6 m/s ที่ระดับความสูง 90 เมตร ซึ่งห่างจากสถานีไฟฟ้าย่อยไม่เกิน 10 กิโลเมตร และหักลบพื้นที่หวงห้ามต่างๆ ออกแล้ว

จังหวัด	พื้นที่ (ตาราง กม.)
เพชรบูรณ์	18.5
กาญจนบุรี	3.2
ระนอง	2.3
สุราษฎร์ธานี	9.0
พัทลุง	0.7
สงขลา	3.3
ยะลา	45.6
รวม	82.6

สำนักหอสมุดกลาง

3.4.1.2 พื้นที่นอกชายฝั่ง

ทำนองเดียวกันกับการหาพื้นที่ที่มีศักยภาพในการพัฒนาพลังงานลมบนบกที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น ในการเลือกสถานที่ซึ่งเหมาะสมกับการติดตั้งกังหันลมนอกชายฝั่งไม่ได้ขึ้นกับความเร็วลมอย่างเดียว หากยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ที่สำคัญได้แก่ ความลึกของระดับน้ำทะเล ตำแหน่งของพื้นที่หวงห้ามในทะเล ระยะห่างจากเครือข่ายสายส่งไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธี Geographic Information System (GIS) Approach ทั้งนี้เพราะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการหาตำแหน่งหรือพื้นที่ที่เหมาะสมในงานด้านต่างๆ เช่น การเกษตร ผังเมือง และพลังงาน เป็นต้น ในการใช้วิธี GIS เราจะต้องนำข้อมูลทุกๆ อย่างที่เกี่ยวข้องมาจัดแสดงในรูปแผนที่ แล้วใช้โปรแกรม GIS นำข้อมูลดังกล่าวมาซ้อนทับเป็นชั้นข้อมูล โดยกำหนดเงื่อนไขต่างๆตามเหมาะสม เพื่อให้ได้พื้นที่ที่เหมาะสมและสอดคล้องกับเงื่อนไขต่างๆที่กำหนดขึ้น ในลักษณะเดียวกับกรณีของลมบนบกตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา

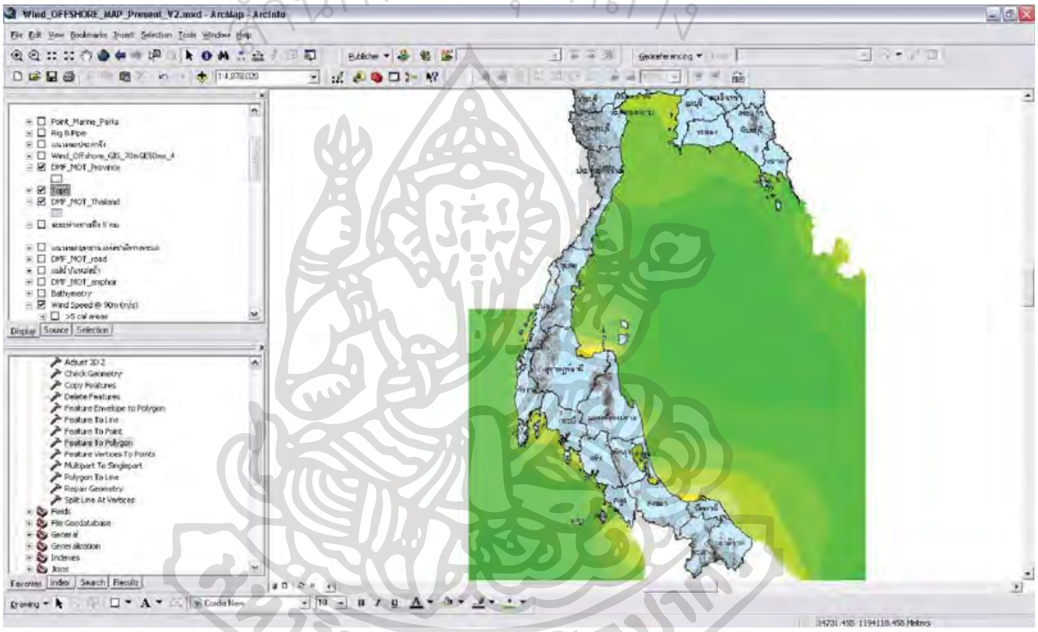
สำหรับการหาบริเวณที่เหมาะสมสำหรับทุ่งกังหันลมนอกชายฝั่งโดยอาศัยกระบวนการ GIS ผู้วิจัยจะจัดทำ shapefiles ของข้อมูลต่างๆ เพื่อใช้ประกอบในกระบวนการ GIS สำหรับคัด

กรองหาบริเวณที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งทุ่งกังหันลมนอกชายฝั่ง ข้อมูลต่างๆเหล่านั้นได้แก่ ข้อมูลการกระจายตามพื้นที่ของความเร็วลมนอกชายฝั่งของประเทศไทย ข้อมูลความลึกของน้ำทะเล ข้อมูลการใช้พื้นที่ทางทะเล ข้อมูลเครือข่ายสายส่งไฟฟ้าบนฝั่ง และข้อมูลแหล่งชุมชนตามแนวชายฝั่ง ตามรายละเอียดดังนี้

1) ข้อมูลการกระจายตามพื้นที่ของความเร็วลมนอกชายฝั่งของประเทศไทย

ผู้วิจัยนำแผนที่ลมบริเวณนอกชายฝั่ง ทั้งทางด้านอ่าวไทย และด้านทะเลอันดามันที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางมาแปลงให้อยู่ในรูป shapefile ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.67

สำนักหอสมุดกลาง

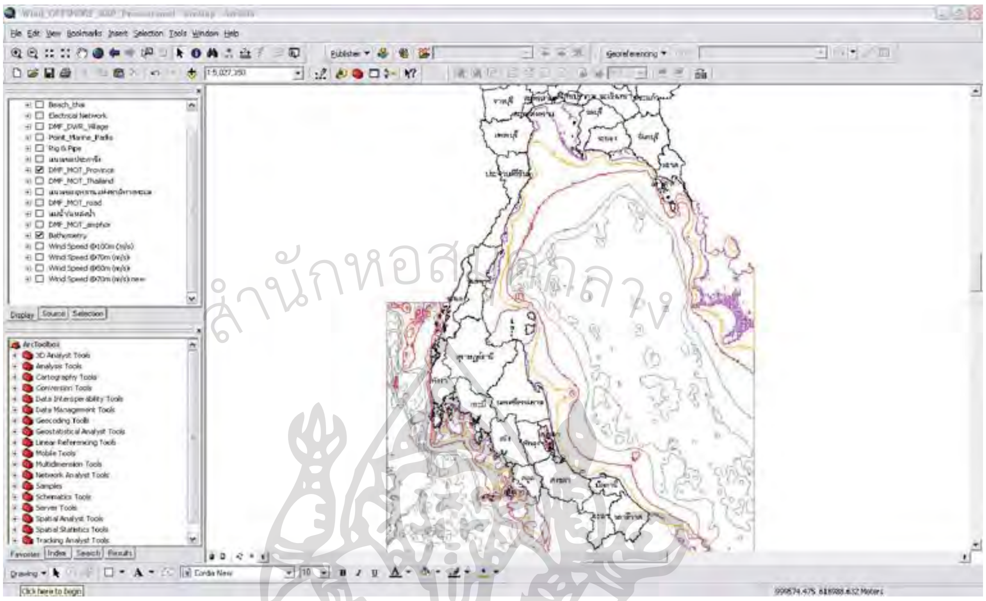


รูปที่ 3.67 แผนที่ในรูปของ shapefile ของความเร็วลมนอกชายฝั่งเฉลี่ยระยะยาว ที่ความสูง 90 เมตร เหนือผิวน้ำทะเล

2) แผนที่ความลึกของน้ำทะเล

ความลึกของน้ำทะเลเป็นอีกปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการวิเคราะห์หาบริเวณที่มีศักยภาพพลังงานลมนอกชายฝั่ง ทั้งนี้สืบเนื่องจากการติดตั้งกังหันลมในบริเวณที่น้ำทะเลลึกมากเกินไปอาจต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงสำหรับฐานรากของกังหันลม ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้จัดหาแผนที่ความลึกของน้ำทะเลและทำการแปลงให้อยู่ในรูปของ shapefile (รูปที่ 3.68) เพื่อให้เหมาะแก่การใช้งานในการวิเคราะห์หาบริเวณที่มีศักยภาพพลังงานลมนอกชายฝั่งด้วยกระบวนการ GIS โดยรวมแล้วน้ำทะเลทางฝั่งอ่าวไทยมีความลึกน้อยกว่าทางฝั่งอันดามัน ทางฝั่งอ่าวไทย น้ำทะเลค่อนข้างตื้นใน

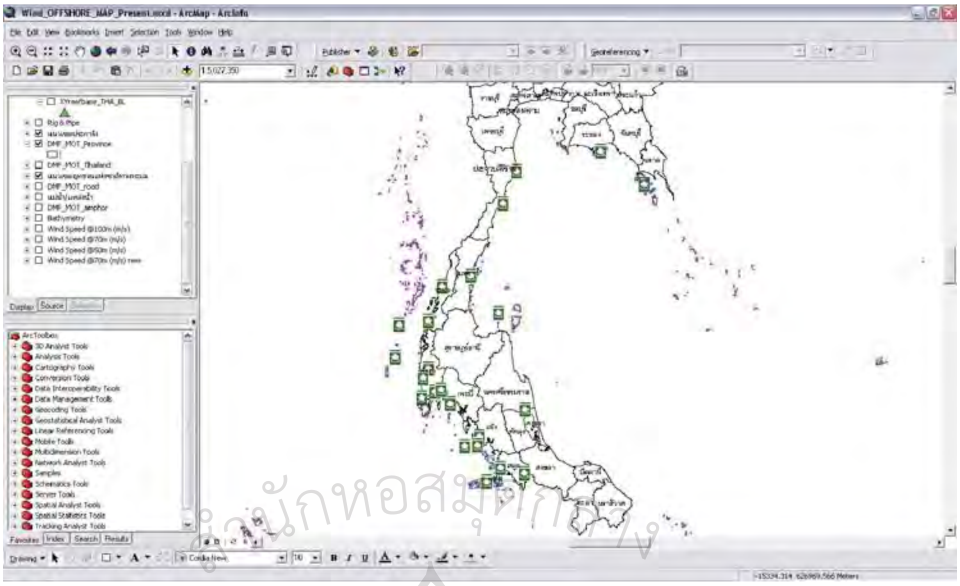
บริเวณใกล้ฝั่ง แต่อย่างไรก็ตามไกลจากฝั่งออกไปน้ำทะเลก็ยังตื้นกว่าทางฝั่งอันดามัน ดังจะเห็นได้จากแผนที่ความลึกของน้ำทะเลทางฝั่งอ่าวไทยน้ำทะเลมีความลึกไม่เกิน 100 เมตร ในขณะที่ทางฝั่งอันดามันความลึกของน้ำทะเลบางแห่งมีค่ามากถึง 200 เมตร



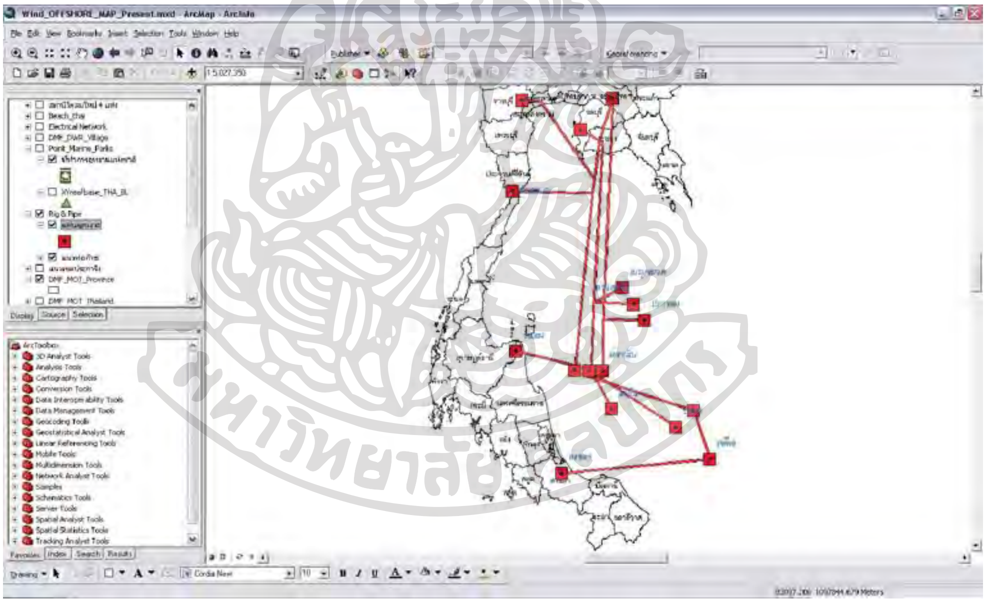
รูปที่ 3.68 แผนที่ในรูป shapefile ของระดับความลึกของน้ำทะเล

3) แผนที่การใช้พื้นที่ทางทะเล

พื้นที่ในทะเล ถึงแม้จะเป็นบริเวณที่มีลมดี แต่ไม่จำเป็นว่าจะสามารถใช้พื้นที่นั้นจัดตั้งกังหันลมได้เสมอไป เพราะในทะเลมีพื้นที่หวงห้ามต่างๆ ที่สำคัญได้แก่ พื้นที่อุทยานธรรมชาติทางทะเล แนวท่อก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ในการประเมินศักยภาพพลังงานลมนอกชายฝั่งจะต้องหักพื้นที่เหล่านี้ออก ผู้วิจัยจะจัดหาข้อมูลดังกล่าวในรูปแผนที่แล้วนำมาแปลงให้เป็น shapefile เพื่อใช้ในโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3.69 – 3.70



รูปที่ 3.69 แผนที่ในรูป shapefile ของตำแหน่งอุทยานธรรมชาติทางทะเล

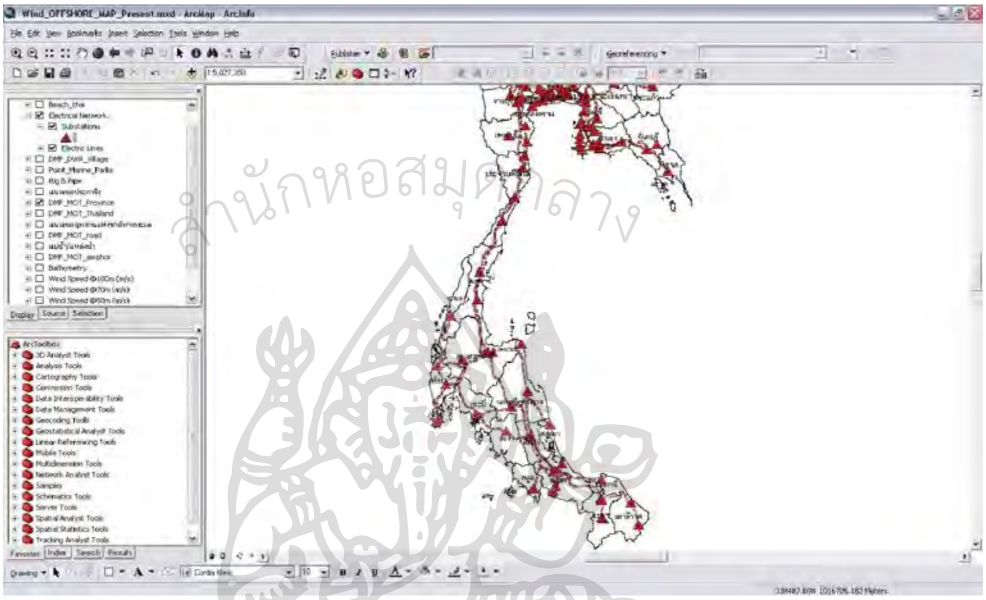


รูปที่ 3.70 แผนที่ในรูป shapefile ของตำแหน่งแท่นขุดเจาะก๊าซธรรมชาติและแนวท่อส่งก๊าซ

4) แผนที่เครือข่ายสายส่งบริเวณชายฝั่ง

เครือข่ายสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จัดเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการวิเคราะห์หาบริเวณที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งทุ่งกังหันลม เพื่อความสะดวกในการเชื่อมต่อและป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังนั้นในการเลือกบริเวณที่เหมาะสมสำหรับจัดตั้งกังหันลมนอกชายฝั่งจึงจำเป็นต้องพิจารณาความเป็นไปได้ในการเชื่อมต่อไฟฟ้าที่ผลิตได้กับ

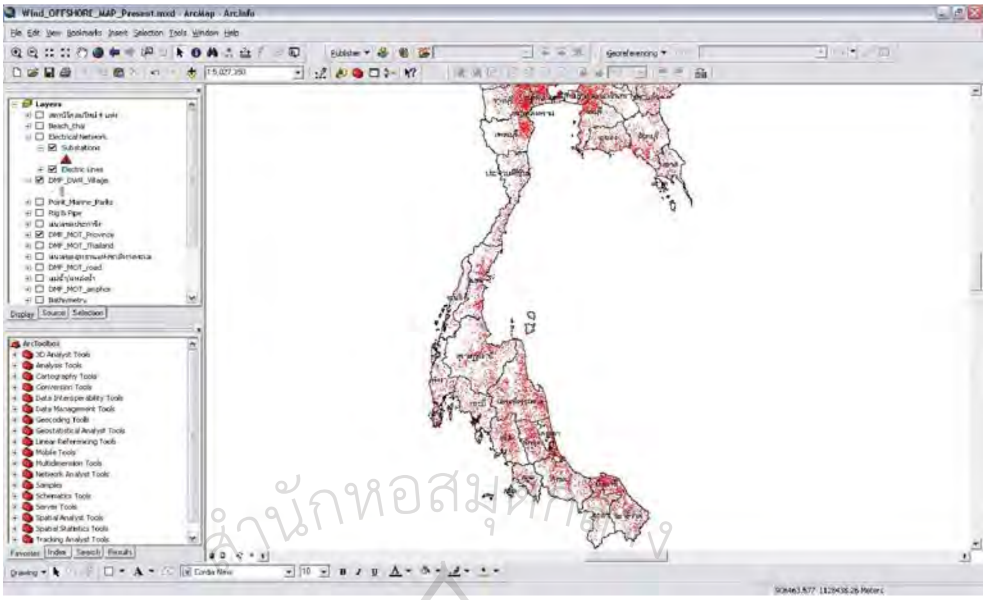
สายส่งที่ชายฝั่ง ทั้งนี้หากแหล่งลมดีอยู่ห่างจากสายส่งมากๆ ต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้น สืบเนื่องจากการที่ต้องเดินสายส่งไฟฟ้าเพิ่มเติม ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้จัดหาข้อมูลเครือข่ายสายส่งไฟฟ้าบริเวณชายฝั่งของประเทศไทยในรูปของ shapefile เพื่อนำมาประกอบในการพิจารณาคัดเลือกพื้นที่ด้วยโปรแกรม ArcGIS เครือข่ายสายส่งไฟฟ้าของประเทศไทยตามแนวชายฝั่งแสดงในรูปที่ 3.71



รูปที่ 3.71 แผนที่ในรูป shapefile ของแผนที่เครือข่ายสายส่งในบริเวณชายฝั่ง

5) แผนที่แหล่งชุมชนชายฝั่ง

แหล่งชุมชน หรือ ผู้ใช้พลังงานเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ควรพิจารณาในการพัฒนาทุ่งกังหันลมนอกชายฝั่ง การติดตั้งทุ่งกังหันลมไม่ไกลจากชุมชนในบริเวณชายฝั่งเพื่อให้ไฟฟ้าที่ส่งไปถึงสูญเสียพลังงานในสายส่งน้อย โดยทั่วไปจึงนิยมติดตั้งกังหันลมนอกชายฝั่งในบริเวณที่ใกล้กับชุมชนซึ่งเป็นผู้บริโภคหลัก อันได้แก่เขตชุมชนหรือเขตอุตสาหกรรมตามแนวชายฝั่งทะเล (Dvorak et al, 2007) ในการวิเคราะห์หาบริเวณที่เหมาะสมในการจัดตั้งกังหันลมนอกชายฝั่ง ผู้วิจัยได้หาข้อมูลของชุมชนตามชายฝั่ง และจัดแสดงในรูปของ shapefile เพื่อใช้ร่วมกับข้อมูลอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.73



สำนักหอสมุดกลาง

รูปที่ 3.72 แผนที่ในรูป shapefile ของแหล่งชุมชนชายฝั่ง

ในการวิเคราะห์หาบริเวณที่มีศักยภาพพลังงานลมนอกชายฝั่ง โดยใช้โปรแกรม ArcGIS ผู้วิจัยได้ทำการป้อนข้อมูลต่างๆ เหล่านั้นในโปรแกรมดังกล่าว และตั้งเงื่อนไขต่างๆ (scenario) ที่กำหนด โดยจะกำหนดให้พื้นที่ที่เหมาะสมจะต้องมีความเร็วลมมากกว่า 5 m/s ที่ระดับ 90 เมตรเหนือพื้นผิวน้ำ ไม่อยู่ในพื้นที่หวงห้ามต่างๆ และอยู่ห่างจากชุมชนชายฝั่งไม่เกิน 100 กิโลเมตร ห่างสถานีไฟฟ้าย่อยไม่เกิน 20 กิโลเมตร จากนั้นทำการคำนวณหาพื้นที่ที่มีคุณสมบัติสอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นผ่านโปรแกรม ArcGIS ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.73

รูปที่ 3.73 แผนที่แสดงพื้นที่ความเร็วลมนอกชายฝั่งมากกว่า 5 m/s ที่ระดับความสูง 90 เมตร หลังจากหักพื้นที่ที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

จากรูปที่ 3.73 จะเห็นว่าพื้นที่นอกชายฝั่งซึ่งมีความเร็วลมมากกว่า 5 m/s ที่ระดับความสูง 90 เมตร เหนือผิวน้ำ และไม่อยู่ในพื้นที่หวงห้ามต่างๆ มีอยู่ 3 แห่ง ได้แก่ บริเวณอ่าวบ้านดอน จังหวัด สุราษฎร์ธานี บริเวณอ่าวปัตตานีในเขตจังหวัดสงขลาและปัตตานี และบริเวณทะเลสาบสงขลา จังหวัดสงขลา โดยพื้นที่รวมของแต่ละบริเวณแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พื้นที่นอกชายฝั่งซึ่งมีความเร็วลมมากกว่า 5 m/s ที่ความสูง 90 เมตร เหนือผิวน้ำ และไม่อยู่ในเขตหวงห้ามต่างๆ

สถานที่	พื้นที่ (km^2)
อ่าวบ้านดอน	579
ทะเลสาบสงขลา	119
อ่าวปัตตานี	435

3.4.2 การประยุกต์ใช้ประโยชน์จากแผนที่ลมระดับสเกลปานกลางในการสร้างแผนที่ลมระดับไมโครสเกล

แผนที่ลมที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 3x3 km^2 สามารถบอกการกระจายตัวของความเร็วลมในภาพรวมของทั้งประเทศ แต่ไม่สามารถบอกอิทธิพลของสิ่งกีดขวางทางลมที่มีขนาดเล็กได้ อย่างไรก็ตามข้อมูลลมที่ได้จากแผนที่ลมดังกล่าวนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลอินพุทสำหรับสร้างแผนที่ลมระดับไมโครสเกล ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่มากขึ้นสำหรับบริเวณที่ไม่มีข้อมูลลมจากเสาวัดลม ในหัวข้อนี้จะใช้กรณีของเกาะพะลวยเป็นกรณีศึกษา เพื่อสร้างแผนที่ลมระดับไมโครสเกล จากผลการคำนวณความเร็วลมในระดับสเกลปานกลาง เพื่อดูการกระจายความเร็วลมบนเกาะดังกล่าวนี้

เกาะพะลวย (9° 31’ 35.54” N 99° 41’ 4.04” E) เป็นเกาะเล็กๆในหมู่เกาะอ่างทอง ที่กระทรวงพลังงานคัดเลือกเป็นเกาะต้นแบบพลังงานสะอาด (Green Island) ตามโครงการลดโลกร้อนถวายพ่อ เนื่องในวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวเจริญพระชนมายุครบ 84 พรรษา หากพิจารณาจากแผนที่ลมระดับสเกลปานกลางที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ (รูปที 3.75) จะไม่สามารถบอกถึงการกระจายความเร็วลมบนเกาะพะลวยได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทดลองใช้ข้อมูลลมที่คำนวณได้จากแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางเพื่อสร้างแผนที่ลมระดับไมโครสเกลบนเกาะพะลวยที่ระดับความสูง 50 เมตร เหนือพื้นดิน และมีความละเอียดเชิงพื้นที่เป็น 90 x 90 ตารางเมตร เพื่อศึกษาการกระจายความเร็วลมบนเกาะแห่งนี้

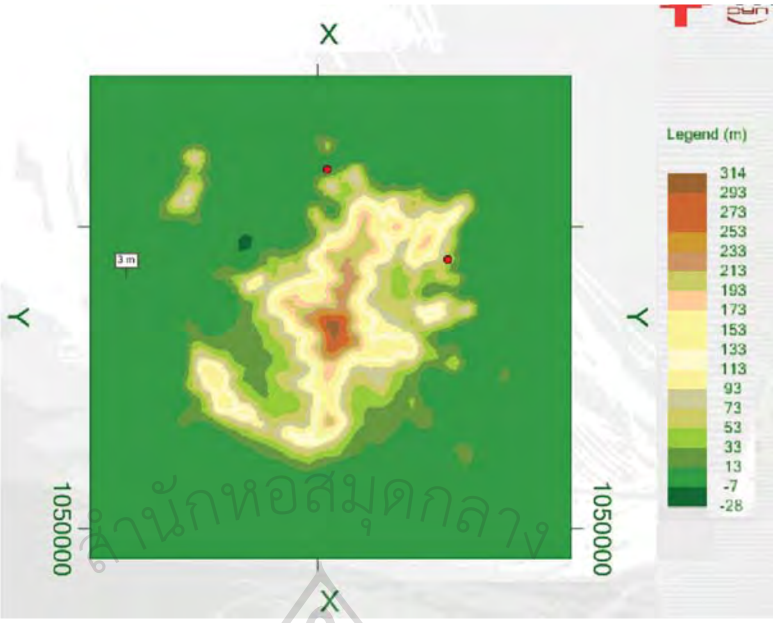
รูปที่ 3.74 การกระจายความเร็วลมบนเกาะพะลวยจากแผนที่ลมระดับสเกลปานกลาง

แบบจำลองระดับไมโครสเกลที่เลือกใช้ เป็นแบบจำลอง Computational Fluid Dynamics (CFD) ซึ่งเขียนในรูปของ software ชื่อ Meteodyn WT แบบจำลองดังกล่าวต้องใช้ข้อมูลอินพุทเป็นความเร็วลมระดับสเกลปานกลาง และข้อมูลระดับความสูงของพื้นที่พร้อมทั้งข้อมูลความหยาบของพื้นที่ ในการดำเนินงานผู้วิจัยจะจัดเตรียมข้อมูลต่างๆดังนี้

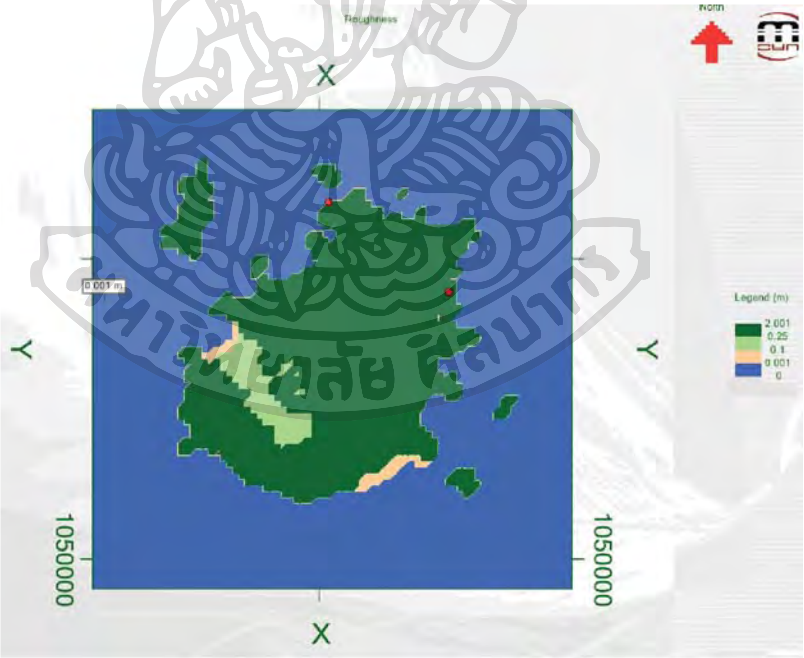
1) ลมสเกลปานกลาง ณ ตำแหน่งเกาะพะลวย (9° 31’ 35.54” N 99° 41’ 4.04” E) จากการคำนวณด้วยแบบจำลองระดับสเกลปานกลางที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้

2) ข้อมูลระดับความสูงของพื้นที่ ของโดเมนขนาด 6x6 km^2 ครอบคลุมพื้นที่เกาะทั้งหมด ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จาก NASA’s Shuttle Radar Topography Mission (STRM) ที่ความละเอียด 90 เมตร โดยผู้วิจัยต้องทำการแปลงค่าให้อยู่ในความละเอียด 90 x 90 ตารางเมตร เพื่อให้สอดคล้องกับค่าความละเอียดในการคำนวณ

3) ข้อมูลความหยาบของพื้นผิว ครอบคลุมพื้นที่ตลอดโดเมน ซึ่งได้จาก United States Geological Survey (USGS) Global Land Cover Classification และทำการแปลงค่าโดยอาศัย look-up table เพื่อให้สอดคล้องกับ Meteodyn WT



รูปที่ 3.75 แสดงความสูงต่ำของพื้นที่บนเกาะพะลวยในระดับไมโครสเกล (ความละเอียดเชิงพื้นที่ 90 x 90 เมตร^2)



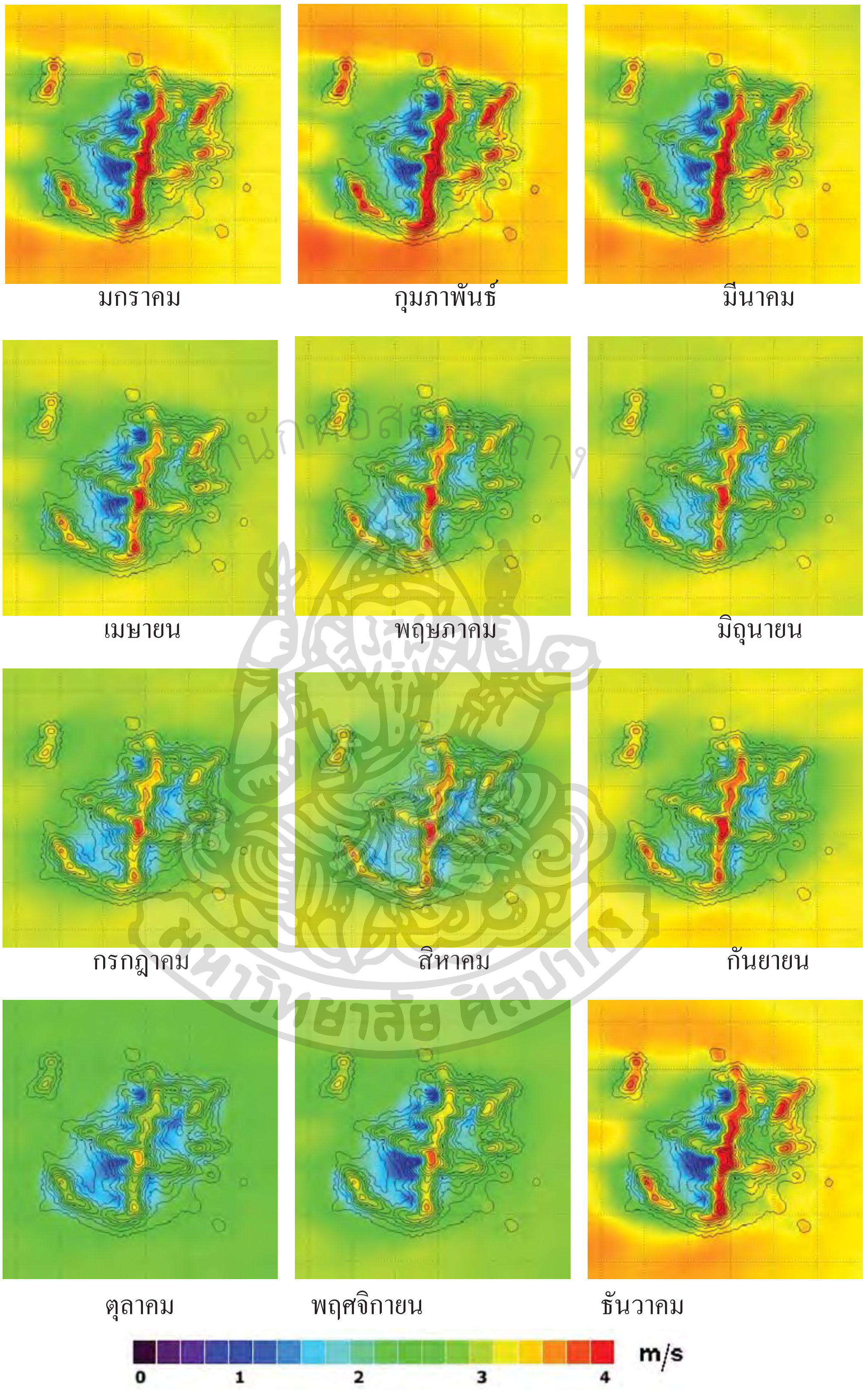
รูปที่ 3.76 แสดงความหยาบของพื้นผิวบนเกาะพะลวยในระดับไมโครสเกล (ความละเอียดเชิงพื้นที่ 90 x 90 เมตร^2)

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

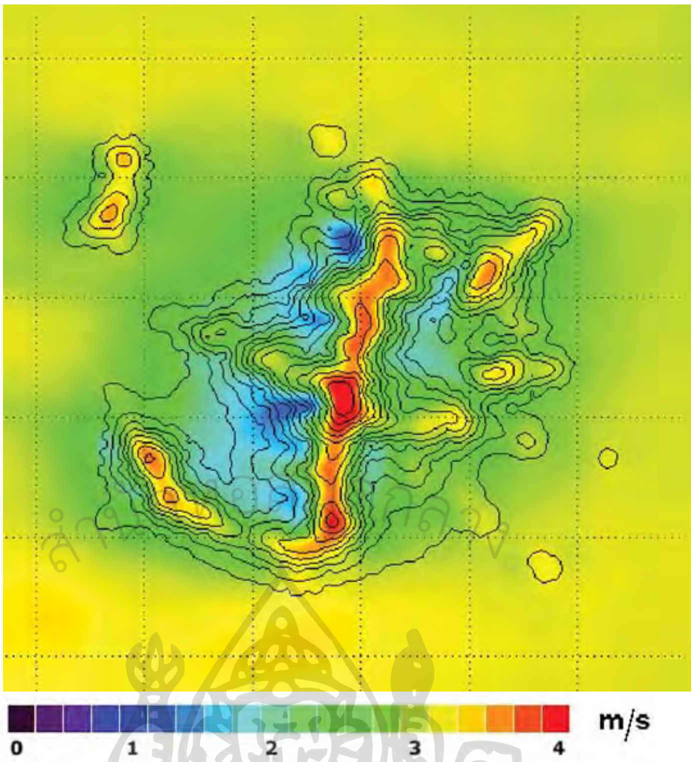
ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยจะทำการคำนวณความเร็วลมระดับไมโครสเกลที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ขนาด 90 x 90 ตารางเมตร ที่ระดับความสูง 50 เมตรเหนือพื้นดินโดยใช้โปรแกรม Meteodyn WT และอาศัยความเร็วลมระดับสเกลปานกลางรายชั่วโมงเป็นอินพุท โดยผู้วิจัยได้ทำการคำนวณความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนและรายปี และจัดแสดงผลที่ได้ในรูปของแผนที่ลมระดับไมโครสเกล แสดงการกระจายตัวของความเร็วลมครอบคลุมพื้นที่เกาะพะลวย ดังแสดงในรูปที่ 3.77 และ 3.78

รูปที่ 3.77 แสดงการกระจายความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลได้อย่างชัดเจน ในช่วงเดือนธันวาคม – มีนาคม เป็นช่วงที่ประเทศไทยได้รับอิทธิพลของมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความเร็วสูงกว่าในช่วงเดือนอื่นๆ แต่ในช่วงของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (เมษายน – กันยายน) การกระจายความเร็วลมบนเกาะพะลวยโดยรวมมีค่าต่ำกว่าในช่วงของมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ทั้งนี้เนื่องจากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะพัดผ่านแผ่นดินซึ่งมีแนวเทือกเขาภูเก็ตและเทือกเขานครศรีธรรมราชขวางอยู่จึงทำให้ความเร็วลมบนเกาะพะลวยในช่วงดังกล่าวนี้มีค่าต่ำกว่าความเร็วลมในช่วงมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ อย่างไรก็ตามรูปแบบของบริเวณที่มีความเร็วสูงของทุกเดือนยังคงเป็นตามแนวเขาที่พาดผ่านจากทางตอนเหนือลงสู่ทางตอนใต้ของเกาะ แม้แต่ในช่วงเปลี่ยนมรสุมจากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้เป็นมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ตุลาคม – พฤศจิกายน) ตามแนวเขาดังกล่าวยังคงมีความเร็วลมสูงกว่าบริเวณอื่นๆบนเกาะ

จากแผนที่เฉลี่ยระยะยาว (รูปที่ 3.78) แสดงให้เห็นว่าความเร็วลมจะมีค่าสูงตามแนวสันเขา โดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวเขาที่พาดผ่านเกาะจากทางทิศเหนือลงมาทางใต้ จากแผนที่ลมในระดับไมโครสเกลนี้ ชี้ให้เห็นว่าลักษณะทางภูมิศาสตร์ของแต่พื้นที่ล้วนมีอิทธิพลต่อความเร็วในบริเวณดังกล่าวเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.77 ความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนบนพื้นที่เกาะพะลวย ที่ระดับความสูง 50 เมตรเหนือพื้นดิน ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 90 x 90 เมตร^2



รูปที่ 3.78 ความเร็วลมเฉลี่ยระยะยาวบนพื้นที่เกาะพะลวยที่ระดับความสูง 50 เมตรเหนือพื้นดิน ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 90 x 90 เมตร^2

บทที่ 4
สรุป

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณความเร็วลมโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง KAMM (Karlsruhe atmospheric mesoscale model) โดยในขั้นตอนแรก ผู้วิจัยได้ทำการจัดหาข้อมูลสภาวะของบรรยากาศ (atmospheric basic state) จากการตรวจอากาศชั้นบน และข้อมูลบรรยากาศระดับสเกลใหญ่ย้อนหลัง 10 ปี (ค.ศ. 2001-2009) เพื่อใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นของแบบจำลอง พร้อมทั้งทำการจัดหาข้อมูลความหยาบของพื้นผิว (roughness) และข้อมูลระดับความสูงของพื้นที่ซึ่งต้องการใช้ในแบบจำลอง จากนั้นได้แบ่งพื้นที่ประเทศไทยออกเป็น 4 โดเมน ได้แก่ โดเมนภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ โดยแต่ละโดเมนจะแบ่งบรรยากาศออกเป็นกริด (grid) ใน 3 มิติ โดยแต่ละกริดจะมีพื้นที่ฐาน 3x3 ตารางกิโลเมตร และมีความสูงแปรตามลักษณะภูมิประเทศ

ในขั้นตอนถัดไปจะทำการคำนวณความเร็วลมรายชั่วโมงของทุกกริดที่แบ่งไว้ เป็นเวลาต่อเนื่องกัน 15 ปี โดยใช้ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นผู้วิจัยจะทำการตรวจสอบความละเอียดถูกต้องของผลการคำนวณโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลความเร็วลมจากสถานีวัดในแต่ละโดเมน ซึ่งเป็นข้อมูลลมที่มีความน่าเชื่อถือ ได้แก่ข้อมูลลมที่ระดับความสูง 100 เมตร จากเสาวัดลมของกรมควบคุมมลพิษ ทั้ง 5 แห่ง ได้แก่ เสาวัดลมที่อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ สำหรับโดเมนภาคเหนือ เสาวัดลมที่อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น สำหรับโดเมนภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เสาวัดลมที่เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร สำหรับโดเมนภาคกลาง และเสาวัดลมที่อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา สำหรับโดเมนภาคใต้

เนื่องจากข้อมูลความเร็วลมที่คำนวณได้จากแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางเป็นข้อมูลที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 3 x 3 ตารางกิโลเมตร แต่ข้อมูลความเร็วลมจากสถานีวัดเป็นข้อมูลเฉพาะจุดจึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันโดยตรงได้ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงทำการแปลงข้อมูลลมทั้งที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลอง และข้อมูลลมที่ได้จากการวัดของแต่ละสถานีให้เป็นข้อมูลลมในสภาวะทั่วไป (generalized wind) โดยใช้แบบจำลองการไหลของกระแสอากาศที่พัฒนาโดย RISO National Laboratory ประเทศเดนมาร์ก แล้วจึงนำข้อมูลลมในสภาวะทั่วไปที่ได้จากข้อมูลทั้งสองชุดมาเปรียบเทียบกัน พบว่าความเร็วลมส่วนใหญ่มีค่าสอดคล้องกัน โดยมีความแตกต่างในรูปของ root mean square difference (RMSD) เท่ากับ 12.9% และ mean bias difference (MBD) เท่ากับ -7.6%

หลังจากตรวจสอบความละเอียดถูกต้องของผลการคำนวณแล้ว ผู้วิจัยจึงนำค่าความเร็วลมรายชั่วโมงทั้งหมดที่คำนวณได้จากแบบจำลองมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยรายเดือนและรายปีที่ระดับความสูงจากพื้นผิวโลก 90 เมตร แล้วนำผลที่ได้มาจัดแสดงในรูปแผนที่ลมเฉลี่นรายเดือนและแผนที่ลมเฉลี่ยระยะยาว ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการกระจายของความเร็วลมตามพื้นที่ในประเทศไทยจะได้รับอิทธิพลมาจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยในช่วงการพัดของลมมรสุมทั้งสองจะพบบริเวณที่มีความเร็วลมเฉลี่ย 6-7 m/s ในบริเวณแนวเขาและยอดเขาต่างๆ และในช่วงเวลาเปลี่ยนลมมรสุมจะเป็นเวลาที่พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศมีความเร็วลมต่ำ หากพิจารณาแผนที่ลมเฉลี่ยระยะยาว จะพบว่าบริเวณที่มีความเร็วลมสูง 6-7 m/s อยู่ในบริเวณแคบๆตามแนวเขาในภาคใต้และแนวเขาที่เป็นรอยต่อระหว่างภาคเหนือกับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รวมถึงบริเวณภูเขาด้านบนและด้านตะวันออกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

นอกจากนั้นผู้วิจัยได้วิเคราะห์หาบริเวณที่มีศักยภาพในการพัฒนาพลังงานลมโดยอาศัยเทคนิคทางภูมิศาสตร์สารสนเทศ ผลการวิเคราะห์ พบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีความเร็วลมค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เพราะประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตศูนย์สูตร ซึ่งโดยทั่วไปเป็นบริเวณที่มีความเร็วลมต่ำ อย่างไรก็ตามสามารถพบบริเวณที่มีความเร็วลมสูง 6-7 m/s ได้ในบางบริเวณของพื้นที่ที่มีภูมิประเทศช่วยเร่งความเร็วลม เช่น ลาดเขา ช่องเขา หรือบนยอดเขา เป็นต้น

ในกรณีของลมนอกชายฝั่ง ผู้วิจัยได้วิเคราะห์หาบริเวณที่มีศักยภาพพลังงานลมนอกชายฝั่งจากข้อมูลการกระจายของความเร็วลมตามพื้นที่นอกชายฝั่ง ร่วมกับข้อมูลการใช้พื้นที่ในทะเล โดยอาศัยกระบวนวิธีทางภูมิศาสตร์สารสนเทศ ผลที่ได้พบว่ามี 3 บริเวณที่มีความเร็วลมสูงกว่าบริเวณอื่นๆ และเป็นบริเวณที่ไม่ได้อยู่ในพื้นที่หวงห้ามใดๆ ได้แก่ บริเวณอ่าวบ้านดอน จังหวัดสุราษฎร์ธานี (เนื้อที่ประมาณ 579 km^2) บริเวณอ่าวปัตตานีในเขตจังหวัดสงขลาและปัตตานี (เนื้อที่ประมาณ 435 km^2) และบริเวณทะเลสาบสงขลา จังหวัดสงขลา (เนื้อที่ประมาณ 119 km^2)

จากผลการวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่าความเร็วลมในประเทศไทยทั้งบนบกและนอกชายฝั่งมีค่าค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เพราะประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตศูนย์สูตรซึ่งเป็นย่านลมสงบ อย่างไรก็ตามจะสามารถพบบริเวณที่ความเร็วลมค่อนข้างสูงเป็นบริเวณแคบๆตามลาดเขา หรือช่องเขาได้ ซึ่งควรทำการศึกษาในระดับไมโครสเกลเฉพาะพื้นที่ต่อไป

บรรณานุกรม

Adrian, G., Fiedler, F. Simulation of unstationary wind and temperature fields over complex terrain and comparison with observations. Beitr. Phys. Atmosph., 27-48, 1991.

Exell, R.H.B., Thavapalachandran, S., Mukhia, P., The availability of wind energy in Thailand. AIT Research Report No. 134, Renewable Energy Resources Information Center, Asian Institute of Technology, 1981

Frank, H.P., Rathmann, O., Mortensen, N.G., Landberg, L., The numerical wind atlas: the KAMM method, Technical report, RISO National Laboratory, Denmark, 2001.

Hussain, M., Khadem, S.K., Ghosh, H.R., Solar and wind energy resource assessment in Bangladesh, Technical report, RISO National Laboratory, Denmark, 2007.

Justus, G. *Physical climatology of solar and wind energy*, World Scientific, Singapore, 1988

Kalthoff, N., Bischoff-Gauß, I., Fiebig-Wittmaack, M., Fiedler, F., Thürauf, J., Novoa, E., Pi-Zarro, C., Castillo, R., Gallardo, L., Rondanelli, R., Kohler, M., Mesoscale Wind Regimes in Chile at 30 °S, J. Appl. Meteorol., 41, 953-970, 2002

Kalthoff, N., Bischoff-Gauß, I., Fiedler, F., 2003. Regional effects of large-scale extreme wind events over orographically structured terrain. Theor. Appl. Climatol. 74, 53-67.

Khan, M.J., Iqbal, M.T., Wind energy resource map of Newfoundland. Renewable Energy 29, 1211-1221, 2004

Khan, M.J., Iqbal, M.T., Mahboob, S., A wind map of Bangladesh, Renewable Energy 29, 643-660, 2004

Landberg, L., Myllererup, L., Rathamann, O., Petersen, E.L., Jorgensen, B.H., Badger, J., Mortensen, N.G. Wind resource estimation-An overview, Wind Energy 6, 261-271, 2003.

Manomaiphiboon, K., Performance of Wind Resource Prediction by a Mesoscale Meteorological Model for Selected Four Areas in Thailand, 7th Eco-Energy and Materials and Engineering Symposium (EMSES 2009), Chiang Mai, Thailand, 2009.

Mathew, S., Wind Energy, Springer, Berlin, 2006

Mortensen, N.G., (editor). Wind atlas for Eqypt: measurement and modelling 1991-2005, Technical report, RISO National laboratory, Denmark, 2005.

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

Mortensen, N.G., Heathfield, D.N., Myllerup, L., Landberg, L., Rathmann, O. Wind Atlas Analysis and Application Program: *WAsP 8 Help Facility and On-line Documentation*. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark. 335 topics. ISBN 87-550-3457-8., 2005.

Mortensen, N.G., J.C. Hansen, J. Badger, B.H. Jørgensen, C.B. Hasager, L. Georgy Youssef, U. Said Said, A. Abd El-Salam Moussa, M. Akmal Mahmoud, A. El Sayed Yousef, A. Mahmoud Awad, M. Abd-El Raheem Ahmed, M. A.M. Sayed, M. Hussein Korany, M. Abd-El Baky Tarad (2005). *Wind Atlas for Egypt, Measurements and Modelling 1991-2005*. New and Renewable Energy Authority, Egyptian Meteorological Authority and Risø National Laboratory. ISBN 87-550-3493-4.258 pp.

Mortensen, N.G., J.C. Hansen, J. Badger, B.H. Jørgensen, C.B. Hasager, Uwe S.Paulsen, Ole F. Hansen, Karen Enevoldsen, L. Georgy Youssef, U. Said Said, A.Abd El-Salam Moussa, M. Akmal Mahmoud, A. El Sayed Yousef, A. Mahmoud Awad, M. Abd-El Raheem Ahmed, M. A.M. Sayed, M. Hussein Korany, M. Abd-El Baky Tarad (2006). Wind Atlas for Egypt: Measurements, micro- and mesoscale modelling. Proceedings of the *2006 European Wind Energy Conference and Exhibition*, Athens, Greece, February 27 to March 2.

Peterson, E.L., Mortensen, N.G., Landberg, L., Hojstrup, J., Frank, H.P., Wind power meteorology, Roskilde: Riso National Laboratory, Roskilde, 1997.

Suwantragul, B., Watabutr, W., Sitathani, K., Tia, V., Namprakai, P., Solar and wind energy potential assessment of Thailand. Renewable Nonconventional Energy Project USAID Project No. 493-0304, Meteorological Department Ministry of Communications, Bangkok and King Mongkut's Institute of Technology, Thonburi, Thailand, 1984.

Troen, I., Petersen, E.L., *European Wind Atlas*. ISBN 87-550-1482-8. Risø National Laboratory, Roskilde., 1989

World Bank Asia Alternative Energy Program, Wind energy resource atlas of Southeast Asia. TrueWind Solutions, LLC Albany, New York, 2001.

World Wind Energy Association, World Wind Energy Report 2009, Charles-de-Gaulle-Str. 5, 53113 Bonn, Germany, 2010 (www.wwindea.org)

กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย, เซ็นทรัลการพิมพ์, 2544

สำนักหอสมุดกลาง

รัดเกล้า พันธุ์อร่าม, ปรุงจันทร์ วงศ์วิเศษ, Meigen Zhang การศึกษาศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านอุตุนิยมวิทยา 3 มิติ, รายงานวิจัยของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ กรุงเทพ พ.ศ. 2551

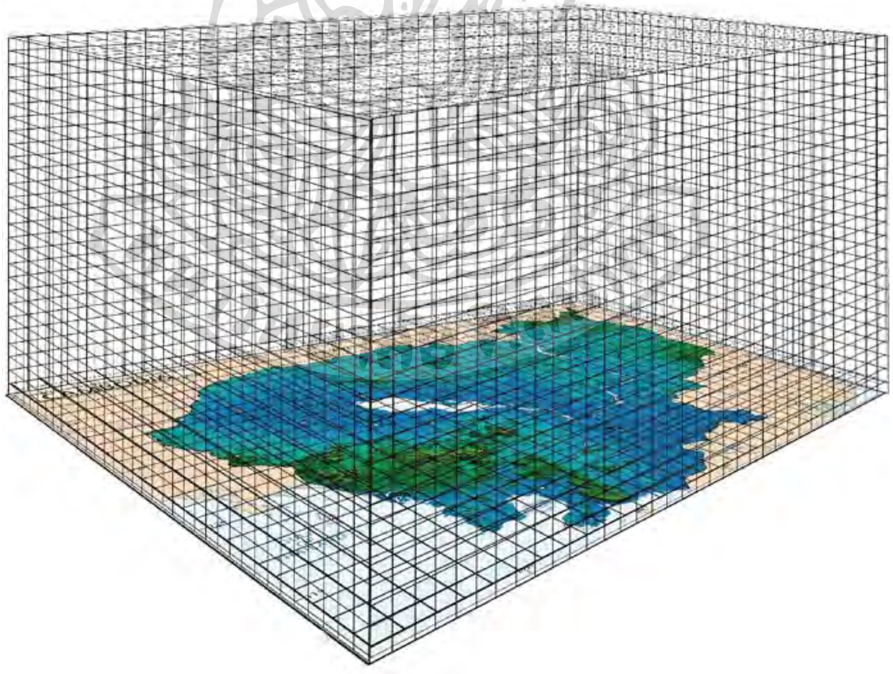
เกษมสันต์ มโนมัยพิบูลย์, อริยวัฒน์ พระบำรุง, วันวิสาข์ ชนะประเสริฐ, ณัฏฐี ราชปรีชา, ฟาน ทาน ทุง, การประเมินศักยภาพแหล่งพลังงานลมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ด้านภูมิศาสตร์สารสนเทศ, รายงานวิจัยของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย กรุงเทพ, 2553

สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวกที่ 1
กรณีศึกษา แผนที่ลมของประเทศกัมพูชา

ก่อนทำการศึกษาศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย ผู้วิจัยได้ทดลองใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกล ปานกลางในการคำนวณความเร็วลมของประเทศกัมพูชา ทั้งนี้เพราะประเทศกัมพูชามีขนาดเล็กกว่าประเทศไทย และสามารถทำการคำนวณได้เพียงโดเมนเดียวเท่านั้น ประกอบกับการที่ประเทศกัมพูชาอยู่ในเขตศูนย์สูตรเช่นเดียวกับประเทศไทย และมีข้อมูลลมจากสถานีวัดลมที่ค่อนข้างจำกัดเช่นเดียวกัน จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้ประเทศกัมพูชาเป็นกรณีศึกษาในการใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางในการคำนวณความเร็วลมในภูมิภาคนี้

กระบวนการศึกษาสำหรับประเทศกัมพูชาจะดำเนินการเช่นเดียวกับรายละเอียดและขั้นตอนในการคำนวณความเร็วลมด้วยแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง ซึ่งกล่าวไว้โดยละเอียดในบทที่ 3 ซึ่งแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางจะทำการคำนวณความเร็วลมโดยการแบ่งบรรยากาศเหนือประเทศกัมพูชาออกเป็นกริด (grid) 3 มิติ ดังรูป A1.1 โดยให้มีความละเอียดเชิงพื้นที่ในแนวราบเป็น 5 x 5 km^2



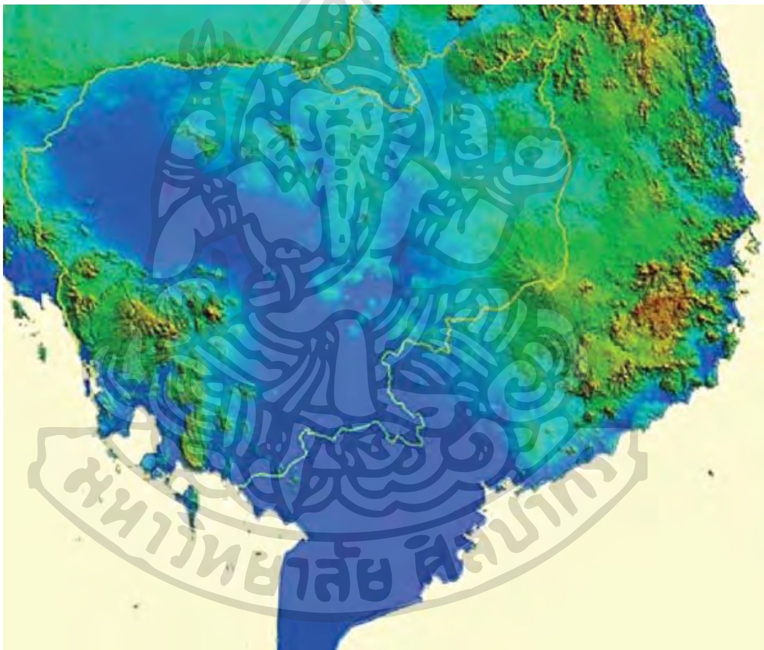
รูปที่ A1.1 ตัวอย่างการแบ่งบรรยากาศเหนือประเทศกัมพูชาออกเป็นกริดใน 3 มิติ ด้วยความละเอียดเชิงพื้นที่เป็น 5 x 5 km^2

A.1 การจัดหาข้อมูล

ในการคำนวณด้วยแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลพื้นฐานต่างๆ ดังนี้

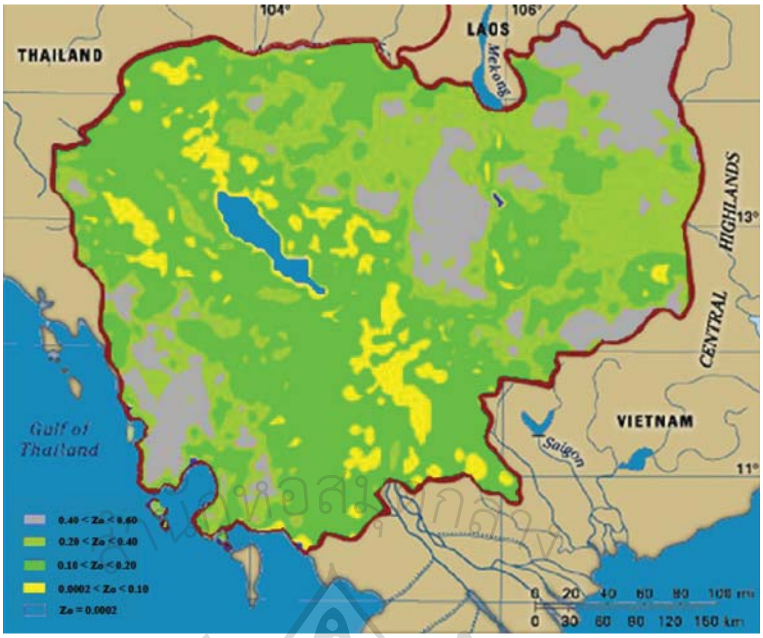
1) ข้อมูลความสูงต่ำของพื้นที่ตลอดโดเมนของการคำนวณ ได้มาจาก NASA’s Shuttle Radar Topography Mission (STRM30) dataset version 2 โดยข้อมูลดังกล่าวมีค่าความแตกต่างระหว่างคอนทัวร์ (contour interval) เป็น 100 เมตร แกน x และแกน y ใช้เป็นแบบ UTM (zone 48, datum WGS84) ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลเมตร โดยเลือกใช้โดเมน (domain) ที่ครอบคลุมพื้นที่ประเทศกัมพูชาทั้งหมดและบางส่วนของประเทศไทย ลาว และเวียดนาม รวมถึงทะเลในอ่าวไทย ดังแสดงในรูป A1.2 และทำการแปลงให้ข้อมูลดังกล่าวมีความละเอียดเชิงพื้นที่เป็น 5 x 5 km^2 เพื่อให้สอดคล้องกับการคำนวณ

สำนักหอสมุดกลาง



รูปที่ A1.2 Elevation map of Cambodia

2) ข้อมูลความหยาบของพื้นผิว เป็นข้อมูลจาก United States Geological Survey (USGS) Global Land Cover Classification (GLCC) และทำการแปลงค่าให้สอดคล้องกับลักษณะของข้อมูลในแบบจำลองผ่าน look-up table โดยข้อมูลความหยาบของพื้นผิวต้องอยู่ในโดเมนเดียวกันและมีความละเอียดเช่นเดียวกับข้อมูลความสูงต่ำของพื้นที่ ดังแสดงในรูป A1.3

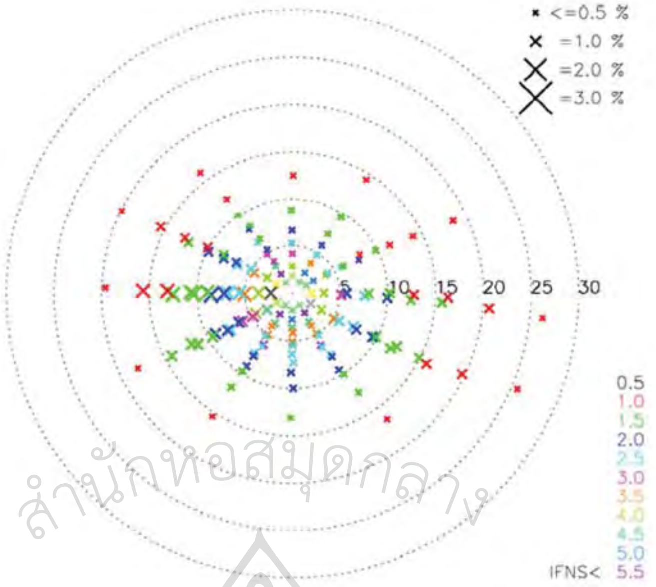


รูปที่ A1.3 Roughness map of Cambodia

3) ข้อมูลบรรยากาศในระดับสเกลใหญ่ ได้มาจากข้อมูล NCEP/NCAR reanalysis ซึ่งเป็นข้อมูลที่รวบรวมและวิเคราะห์โดย The National Center for Environmental prediction และThe National Center for Atmospheric Research ซึ่งมีข้อมูลย้อนหลังไปถึง ค.ศ. 1948 จนถึงปัจจุบัน โดยมีความระเอียดของกริด (grid) ข้อมูลทุกๆ 2.5° x 2.5° โดยในการศึกษาครั้งนี้ ข้อมูลบรรยากาศที่ต้องการได้แก่ geopotential height อุณหภูมิ และ ความชื้นของอากาศที่ระดับความดันบรรยากาศต่างๆ (300 – 1000 มิลลิบาร์) วันละ 4 เวลา คือ 0:00 GMT 6:00 GMT 12:00 GMT และ 18:00 GMT รวมถึงความเร็วลมในระดับสเกลใหญ่ ทั้งลมในแนวตะวันออก-ตะวันตก (u-wind) และ ลมในแนวเหนือ-ใต้ (v-wind) ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ข้อมูลบรรยากาศในระดับสเกลใหญ่ในช่วงเวลา 30 ปี (ค.ศ. 1977-2006) โดยเลือกที่ตำแหน่งที่ใกล้ศูนย์กลางของประเทศกัมพูชามากที่สุดได้แก่ 101.25 °E 11.25 °N ข้อมูลบรรยากาศที่ได้มานี้จะถูกนำไปสร้างเป็นอินพุทโพรไฟล์ (input profile) ซึ่งประกอบด้วย u-wind profile, v-wind profile, potential temperature profile และ relative humidity profile

A.2 วิธีการคำนวณ

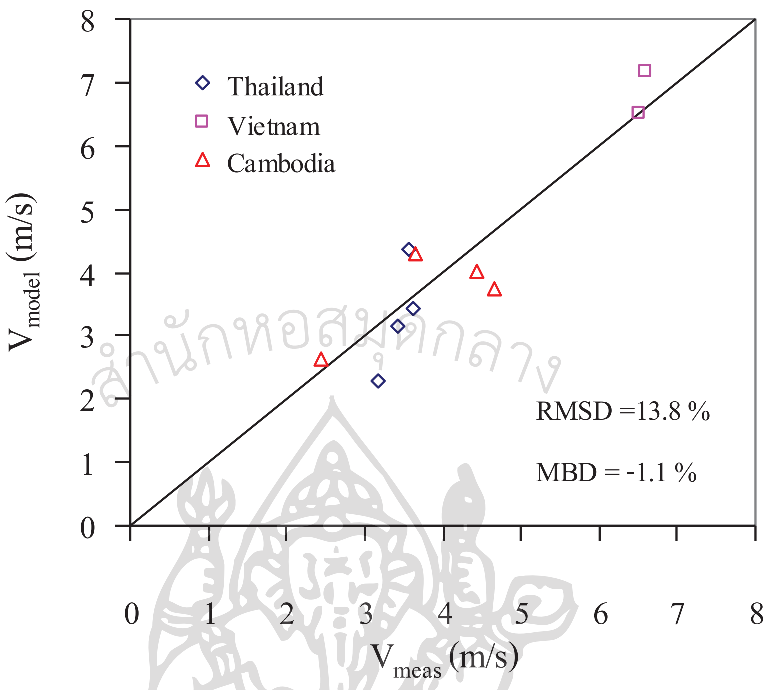
ในการคำนวณความเร็วลมสำหรับประเทศกัมพูชา ผู้วิจัยจะอาศัยเทคนิคการแบ่งข้อมูลอินพุทของแบบจำลองซึ่งเป็นตัวแปรทางบรรยากาศ และความเร็วลมระดับสเกลใหญ่ออกเป็น class โดยใช้เทคนิคที่พัฒนาโดย Riso National Laboratory, Technical University of Denmark เป็นจำนวนทั้งสิ้น 150 class ดังรูปที่ A1.4



รูปที่ A1.4 การแบ่งลมสเกลใหญ่ (geostrophic wind) ในช่วง 30 ปี (ค.ศ. 1977-2006) ณ 101.25 °E 11.25 °N ออกเป็น 150 classes เพื่อใช้ในการคำนวณ เครื่องหมาย x แทนแต่ละ class โดยที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแทนขนาดของความเร็วลม มุมของแนวรัศมีที่ลากผ่านเครื่องหมาย xกระทำกับเส้นในแนวตั้งแสดงทิศทางลม ขนาดของเครื่องหมาย x แสดงเปอร์เซ็นต์ที่พบ และสีของเคร่องหมายแสดงความสมดุลของบรรยากาศ (IFNS)

ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณความเร็วลมของทุก class และทำการหาความน่าจะเป็น (probability) ที่จะเกิดลมของแต่ละ class จากนั้นจะนำผลที่ได้ไปคำนวณความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนและรายปี หลังจากนั้นผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบความเร็วลมที่ได้จากการคำนวณและความเร็วลมที่ได้จากการวัดจากสถานีวัดบริเวณชายแดนประเทศไทย 4 แห่ง ได้แก่ สถานีท่าใหม่ จ.จันทบุรี (12.62 °N 101.92 °E) สถานีคลองใหญ่ จ.ตราด (12.05 °N 102.58 °E) สถานีอรัญประเทศ จ.สระแก้ว (13.69 °N 102.5 °E) สถานีบุญฑริก จ.อุบลราชธานี (14.91 °N 105.29 °E) และข้อมูลวัดจากสถานีวัดลมในประเทศเวียตนาม 2 แห่ง ได้แก่ สถานีPleiku(13.97°N 108.02 °E) สถานี Buon Ma Thuot (12.67°N 108.05 °E) ตลอดจนสถานีวัดใหม่ 4 แห่งในประเทศกัมพูชา ได้แก่ สถานี Siem Reap (13.38 °N 103.83 °E), สถานี Kompong Thom (12.69 °N 104.90 °E), สถานี Phnom Penh (11.56 °N 104.85 °E) และ สถานี Sihanouke Ville (10.62 °N 103.50 °E) ทั้งนี้ผู้วิจัยได้แปลงความเร็วลมที่ได้จากการคำนวณและความเร็วลมที่ได้จากการวัดให้อยู่ในรูปของลมในสภาวะทั่วไป (generalized wind) เพื่อกำจัดอิทธิพลของสิ่งกีดขวางทางลมโดยรอบเสาวัดลม จากนั้นจึงนำผลของลมในสภาวะทั่วไปของทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกัน ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ A1.5

จากผลการเปรียบเทียบพบว่าความเร็วลมที่ได้จากการคำนวณส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับการวัดโดยมีความแตกต่างในรูปของ RMSD =13.8% MBD= -1.1%

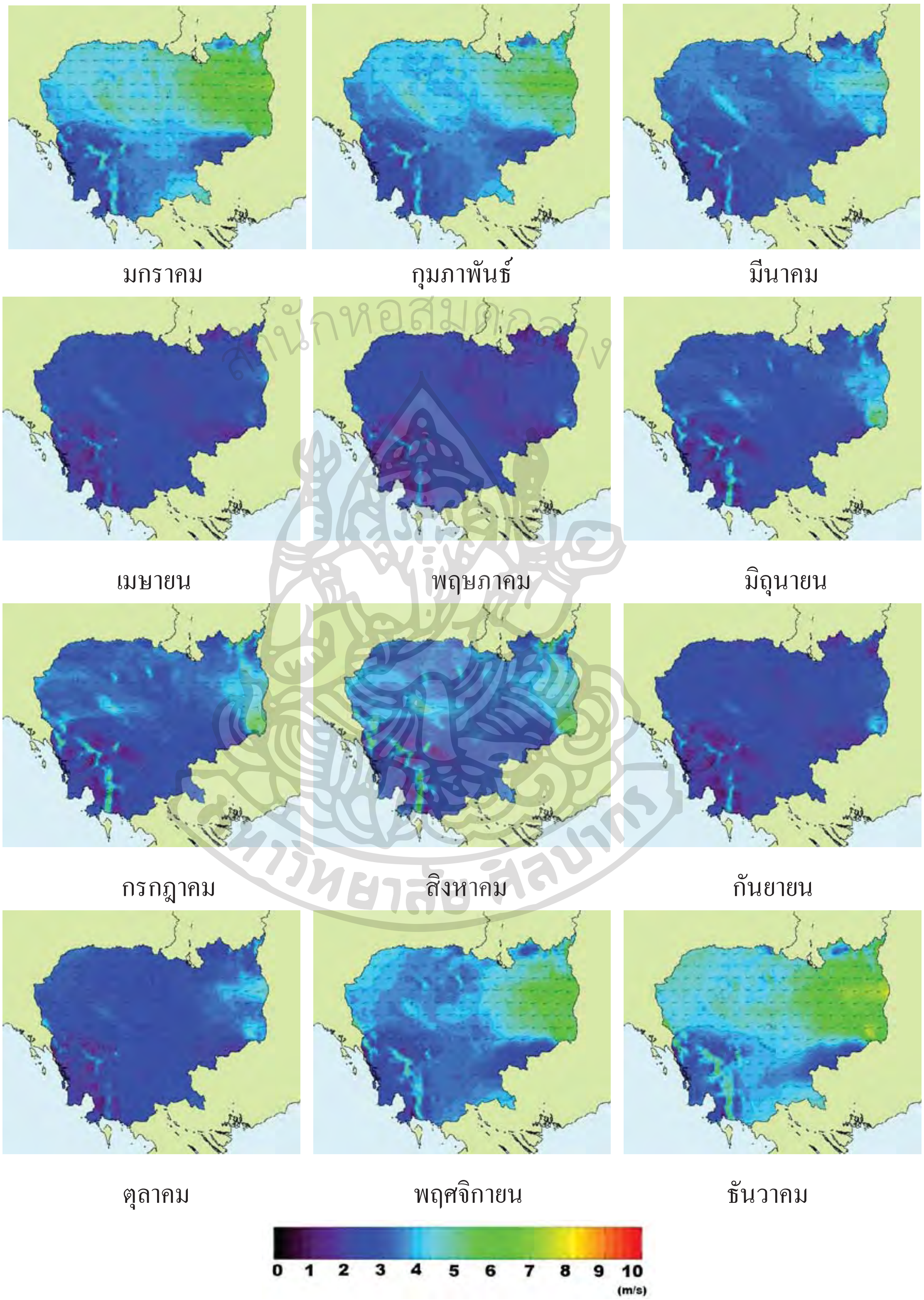


รูปที่ A1.5 ผลการเปรียบเทียบความเร็วลมที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลางและค่าที่ได้จากสถานีวัดภาคพื้นดิน (แต่ละจุดแทนความเร็วลมในสภาวะทั่วไปเฉลี่ยรายปีของแต่ละสถานี)

ผลการคำนวณ

ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณความเร็วลมของประเทศกัมพูชาตามวิธีการดังกล่าวข้างต้น จากนั้นจะนำผลมาจัดแสดงในรูปแผนที่ลมเฉลี่ยรายเดือน (รูปที่ A1.6) และเฉลี่ยรายปี (รูปที่ A1.7) จากแผนที่ลมรายเดือนชี้ให้เห็นว่าความเร็วลมในแต่ละเดือนมีการเปลี่ยนแปลงตามอิทธิพลของมรสุม กล่าวคือ ในช่วงมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (พฤศจิการยน – กุมภาพันธ์) ความเร็วลมโดยรวมมีค่าสูงกว่าในช่วงอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านตะวันออกของตอนบนของประเทศกัมพูชา และยังพบบริเวณที่มีความเร็วลมสูงบริเวณแนวเขาทางตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศ สำหรับช่วงเปลี่ยนมรสุม (เมษายน – พฤษภาคม) ความเร็วลมโดยรวมมีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเข้าสู่ช่วงมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ความเร็วลมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกเล็กน้อย โดยบริเวณที่ความเร็วลมที่มีค่าสูง

ยังคงเป็นบริเวณเดียวกับกรณีของช่วงมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงที่เปลี่ยนเข้าสู่มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (กันยายน – ตุลาคม) การกระจายความเร็วลมทั่วประเทศมีค่าค่อนข้างต่ำ

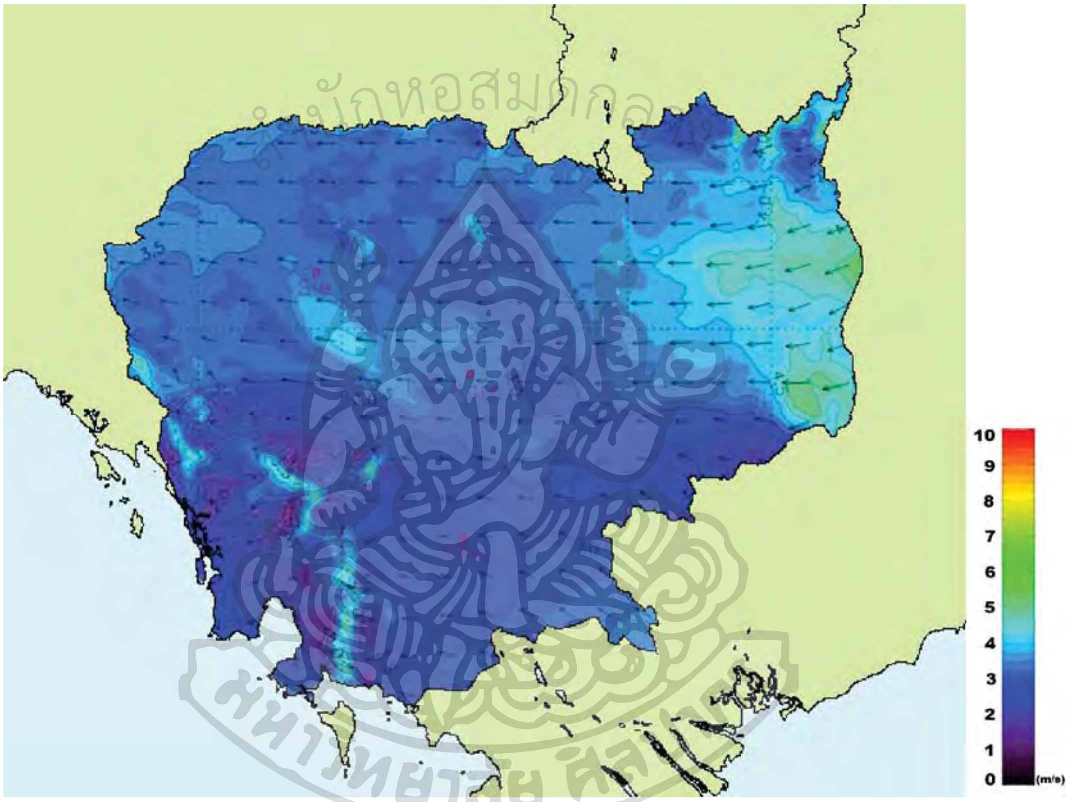


รูปที่ A1.6 แผนที่ลมเฉลี่ยรายเดือน ของประเทศกัมพูชา ที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลอง

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

บรรยากาศสเกลปานกลาง ที่ระดับความสูง 50 เมตร

กรณีของแผนที่ลมรายปี จะเห็นว่าความเร็วลมส่วนใหญ่ในประเทศกัมพูชาจะมีค่าประมาณ 5 เมตร/วินาที ซึ่งค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เพราะกัมพูชาตั้งอยู่ในเขตศูนย์สูตร ซึ่งเป็นเขตลมสงบ อย่างไรก็ตามจะพบบริเวณที่มีความเร็วลมสูงอันเนื่องจากลักษณะทางภูมิประเทศของพื้นที่อันได้แก่พื้นที่ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศและตามแนวเขาทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศ



รูปที่ A1.7 แผนที่ลมเฉลี่ยรายปี ของประเทศกัมพูชา ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองบรรยากาศสเกลปานกลาง ที่ระดับความสูง 50 เมตร

ภาคผนวกที่ 2

การตีพิมพ์เผยแพร่

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ดังนี้

1. Promsen W., Masiri I., Janjai S., Development of microscale wind maps for Phaluay Island, Thailand, **Procedia Engineering** 32, 369-375, 2012. (Available online at www.sciencedirect.com)
2. Janjai S., Promsen W., Masiri I., Laksanaboonsong J., Bischoff-Gauss I., Kalthoff N., Evaluation of wind energy potential over Thailand by using an atmospheric mesoscale model and a GIS approach, **Renewable Energy** (under review)
3. การศึกษาความเร็วลมในประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศระดับสเกลปานกลาง, **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 E-NETT2011,** จัดที่ โรงแรม Phuket Orchid Resort and Spa จ.ภูเก็ต ระหว่างวันที่ 3-**5** พฤษภาคม 2554

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นายวรภาส พรมเสน

ที่อยู่ 9/18 ถ.เลียบคลองโยง ต.คลองโยง อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

ประวัติการศึกษา

มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนสตรีศรีน่าน จังหวัดน่าน

ระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

สำนักหอสมุดกลาง