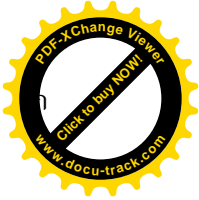
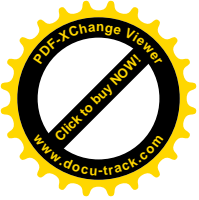


การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองภูมิอากาศโลกในการพยากรณ์
การเกิดมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือด้วยเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม

The Potential Predictability of the Northeast Monsoon Forecasts
by the Educational Global Climate Model as Measured by
the Supremum Lyapunov Exponent

นางสาวสุนิสา สายอุปราช
นางสาวชานี สุภีรัตน์
นางสาวปิยธิดา รุจะศิริ

งานวิจัยได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



ชื่อเรื่อง การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองภูมิอากาศโลกในการพยากรณ์การเกิดมรสุม

ตะวันออกเฉียงเหนือด้วยเลขชี้กำลังไลยาพูนอฟซูพรีมัม

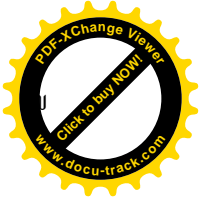
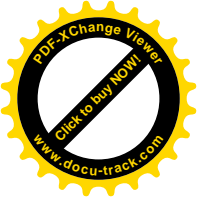
ผู้วิจัย นางสาวสุนิสา สายอุปราช, นางสาวชวณี สุภีรัตน์
และนางสาวปิยธิดา รุจะศิริ

ปีที่ทำวิจัย พ.ศ. 2557

บทคัดย่อ

การพยากรณ์อากาศที่ถูกต้องแม่นยำนั้นกระทำได้ยาก ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการประมวลผลการพยากรณ์ และประสิทธิภาพของแบบจำลองภูมิอากาศที่สร้างขึ้น โดยประสิทธิภาพและความถูกต้องของแบบจำลองภูมิอากาศสามารถวัดได้โดยใช้เลขชี้กำลังไลยาพูนอฟ ซึ่งเป็นตัวแบบที่ใช้ได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีตัวแบบที่ใช้วัดประสิทธิภาพและความถูกต้องของแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่ประยุกต์มาจากเลขชี้กำลังไลยาพูนอฟ ได้แก่ เลขชี้กำลังไลยาพูนอฟขนาดจำกัด เลขชี้กำลังไลยาพูนอฟเวลาจำกัด เลขชี้กำลังไลยาพูนอฟเฉพาะที่ และทำการสร้างตัวแบบวัดขึ้นมาใหม่ให้สอดคล้องกับแบบจำลองภูมิอากาศโลกและบริเวณที่ใช้ในการพยากรณ์คือ เลขชี้กำลังไลยาพูนอฟซูพรีมัม ซึ่งตัวแบบดังกล่าวสามารถใช้วัดประสิทธิภาพและความถูกต้องของการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (มรสุมฤดูหนาว) โดยแบบจำลองภูมิอากาศโลก และทดสอบความอ่อนไหวของแบบจำลองภูมิอากาศโลก ต่อค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่ถูกรบกวนในลักษณะต่าง ๆ พบว่าแบบจำลองภูมิอากาศโลกอ่อนไหวต่อค่าเงื่อนไขเริ่มต้น จึงเหมาะสมในการนำมาใช้พยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยให้แบบจำลองภูมิอากาศโลกประมวลผลการพยากรณ์ทั้งหมด 142 ปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1958-2100 และวิเคราะห์ผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยใช้ตัวแปรนำออกคือความดันบรรยากาศที่ระดับ 500 เฮกโตปาสกาล (hPa) ของเดือนธันวาคม ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2012-2100 พบว่าแบบจำลองภูมิอากาศโลก มีประสิทธิภาพสามารถพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ได้ถูกต้องจำนวน 120 ปี ดังนั้นแบบจำลองภูมิอากาศโลกเหมาะสมกับการพยากรณ์ในช่วงระยะเวลาที่ยาวนานได้

คำสำคัญ : ความสามารถในการพยากรณ์/ แบบจำลองภูมิอากาศโลก/ มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ / เลขชี้กำลังไลยาพูนอฟซูพรีมัม



Title The Potential Predictability of the Northeast Monsoon Forecasts by the Educational Global Climate Model as Measured by the Supremum Lyapunov Exponent

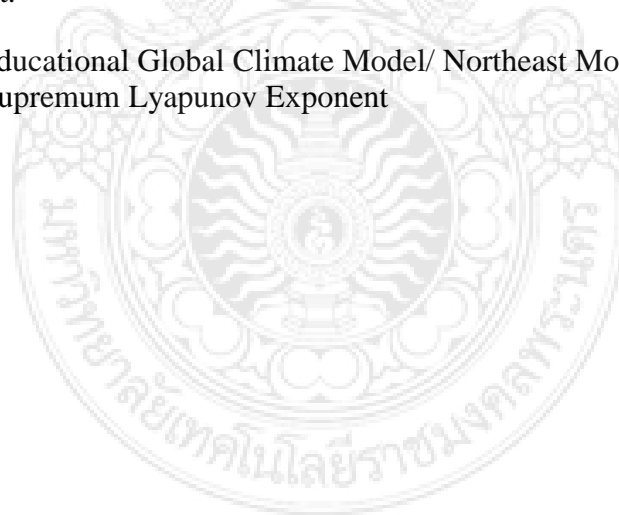
Researcher Miss Sunisa Saiuparad
Miss Chawanee Suphirat
Miss Piyatida Rujasiri

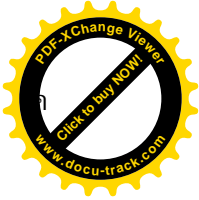
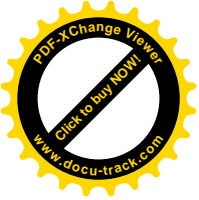
Year 2014

Abstract

Weather predictions by an atmospheric model are determined by the uncertainties in the initial condition and the imperfection of the model. It is difficult to provide accurate weather prediction. The efficiency of weather predictions model is obtained from the analyses of Lyapunov exponent. In addition, the predictability measurements is applied from Lyapunov exponent are finite size Lyapunov exponent, finite time Lyapunov exponent, local Lyapunov exponent together with a new method called supremum Lyapunov exponent are used to measure predictability of the northeast monsoon (winter monsoon) by the Educational Global Climate Model (EdGCM) and to test sensitivity of the model to small initial perturbations. The EdGCM sensitive to initial perturbations, it is suitable for predictability of the northeast monsoon. The EdGCM is run for 142-year predictions from the year 1958 to 2100. However, only the outputs of geopotential height at 500hPa of December from 2012 to 2100 are used for predictability measurement. The results show that the EdGCM predictability for the northeast monsoon forecast is about 120 years. So the EdGCM can be predictability of the long range forecast.

Keywords: Educational Global Climate Model/ Northeast Monsoon / Predictability/ Supremum Lyapunov Exponent



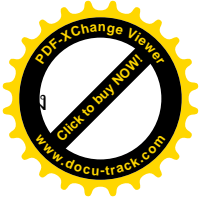
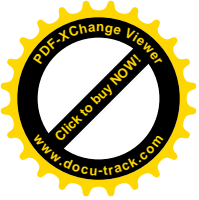


กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยจากงานวิจัย เรื่องการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองภูมิอากาศโลกในการพยากรณ์การเกิดมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือด้วยเลขชี้กำลังไลยาพูนอฟซูพรีมัม ขอขอบพระคุณ อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และคณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบพระคุณ ดร.ศุภฤกษ์ สุขวัฒน์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้คำแนะนำและเป็นพี่เลี้ยงของงานวิจัยในครั้งนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณหัวหน้างานวิจัยและพัฒนา ผู้ประสานงานวิจัย และหัวหน้างานการเงิน ที่ให้คำแนะนำในขั้นตอนการดำเนินการรายงานความก้าวหน้าในการทำวิจัยและการเบิกจ่ายงบประมาณของการทำวิจัย

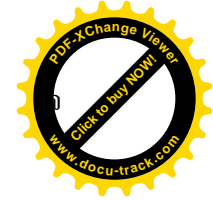
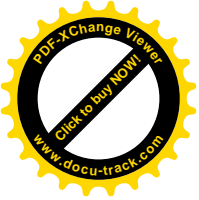
ท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครูอาจารย์ ของคณะผู้วิจัยทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนจนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี





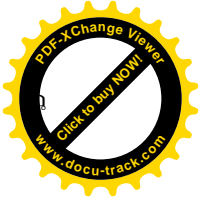
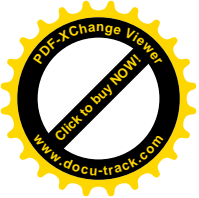
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(ก)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(ข)
กิตติกรรมประกาศ	(ค)
สารบัญ	(ง)
สารบัญตาราง	(ฉ)
สารบัญรูปภาพ	(ช)
รายการสัญลักษณ์	(ซ)
คำศัพท์เฉพาะทางและตัวย่อ	(ณ)
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1.1 เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (Lyapunov Exponent: LE)	3
2.1.2 เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัด (Finite Time Lyapunov Exponent: FTLE)	4
2.1.3 เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟขนาดจำกัด (Finite Size Lyapunov Exponent: FSLE)	4
2.1.4 เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเฉพาะที่ (Local Lyapunov Exponent: LLE)	5
2.2 การทดสอบความแม่นยำในการพยากรณ์	6
2.2.1 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยสมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE)	6
2.2.2 รากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (Root Mean Square Error: RMSE)	6
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7



สารบัญ (ต่อ)

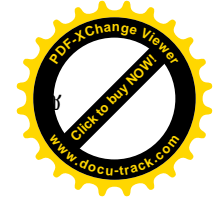
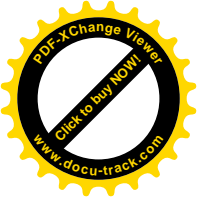
	หน้า
3. ระเบียบวิธีการวิจัย	8
3.1 แบบจำลองภูมิอากาศโลก (The Educational Global Climate Model: EdGCM)	8
3.2 ข้อมูล	11
3.2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลของแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM	11
3.3 ขอบเขตของบริเวณในการพยากรณ์	12
3.3.1 ขอบเขตของบริเวณในการศึกษาและพยากรณ์	12
3.3.2 บริเวณในการพยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM	12
3.4 การออกแบบการทดลอง	13
3.4.1 สร้างเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (Supremum Lyapunov Exponent: SLE)	13
3.4.2 การตั้งค่าพยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (EdGCM)	15
4. ผลของการทดลอง	16
4.1 การหาประสิทธิภาพของแบบจำลองภูมิอากาศโลก	16
4.2 ผลการพยากรณ์โดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM	17
4.3 ผลต่างของค่าความดันบรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์การพยากรณ์มรสุม ตะวันออกเฉียงเหนือ	20
4.4 ผลของการวัดประสิทธิภาพและความถูกต้องของการพยากรณ์มรสุม ตะวันออกเฉียงเหนือ	21
5. สรุปผล และข้อเสนอแนะของการทดลอง	25
5.1 สรุปผลการทดลอง	25
5.2 ข้อเสนอแนะ	26
บรรณานุกรม	27
ภาคผนวก ก การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือด้วยแบบจำลองภูมิอากาศโลก (PER1a)	31
ภาคผนวก ข การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือด้วยแบบจำลองภูมิอากาศโลก (PER2b)	34
ประวัติคณะผู้วิจัย	37



สารบัญตาราง

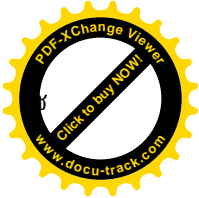
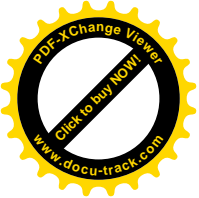
ตารางที่		หน้า
3.1	เงื่อนไขของแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM	11
3.2	รูปแบบการประมวลผลของแบบจำลองภูมิอากาศโลก	15
4.1	ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (RMSE: เมตร) ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM.	16
4.2	ค่าของตัวแบบวัดความถูกต้องของการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ	22
4.3	สรุปผลของตัวแบบวัดการพยากรณ์ที่สามารถใช้วัดประสิทธิภาพและความถูกต้องในการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ	23
4.4	สรุปผลการวัดประสิทธิภาพและความถูกต้องในการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยวัดจากความดันบรรยากาศที่ระดับ 500 hPa	24





สารบัญรูปร่างภาพ

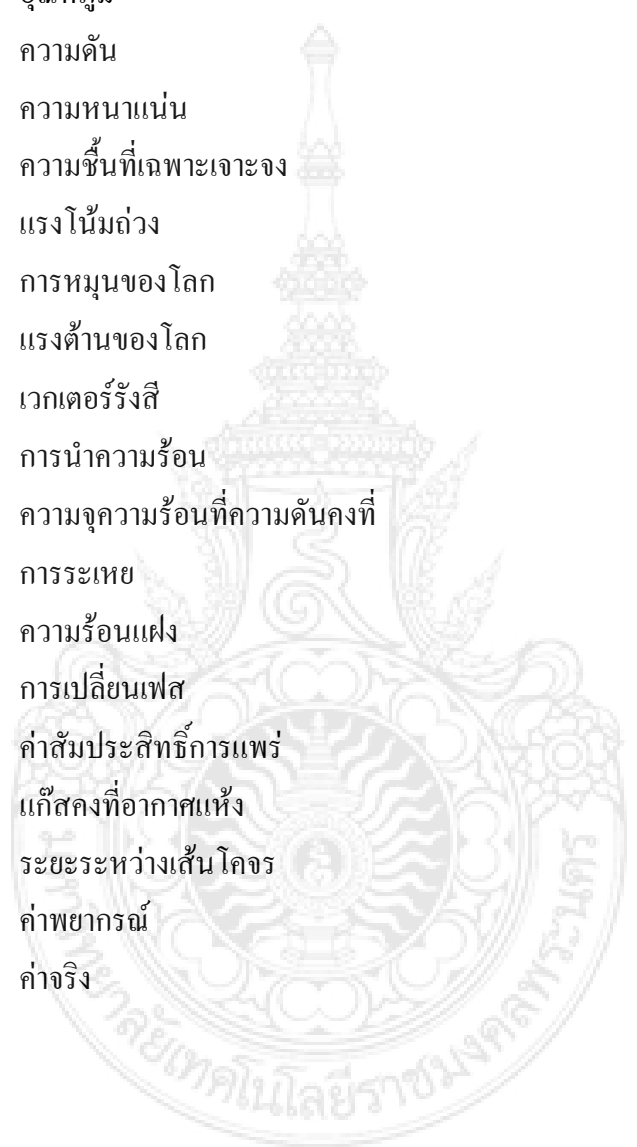
รูปที่		หน้า
3.1	ความละเอียดของแบบจำลองภูมิอากาศโลก 8° ละติจูด \times 10° ลองจิจูด	9
3.2	ขั้นตอนในการประมวลผลของแบบจำลองภูมิอากาศโลก	11
3.3	บริเวณในการศึกษาและพยากรณ์	12
3.4	บริเวณในการพยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM	12
4.1	ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (RMSE: เมตร) ของ EdGCM	16
4.2	ผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เดือนธันวาคม ในปี ค.ศ. 2072, 2082 และ 2092 จาก EdGCM, a) CTRL และ b) PER1a.	18
4.3	ผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เดือนธันวาคม ในปี ค.ศ. 2072, 2082 และ 2092 จาก EdGCM a) CTRL และ b) PER2b.	19
4.4	ผลต่างของค่าความดันบรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์การพยากรณ์มรสุม ตะวันออกเฉียงเหนือระหว่างการประมวลผลการพยากรณ์ของแบบจำลอง แบบควบคุม (CTRL) และการประมวลผลการพยากรณ์แบบก่อกวน (PER1a)	20
4.5	ผลต่างของค่าความดันบรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์การพยากรณ์มรสุม ตะวันออกเฉียงเหนือระหว่างการประมวลผลการพยากรณ์ของแบบจำลอง แบบควบคุม (CTRL) และการประมวลผลการพยากรณ์แบบก่อกวน (PER2b)	21
ก	การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือของแบบจำลองภูมิอากาศโลก จากค่าความดันบรรยากาศ geopotential height (m), a) CTRL และ b) PER1a.	32
ข	การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือของแบบจำลองภูมิอากาศโลก จากค่าความดัน บรรยากาศ geopotential height (m), a) CTRL และ b) PER2b	35

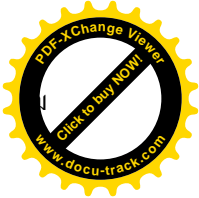
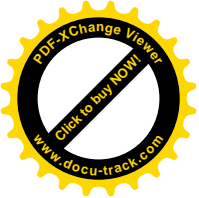


รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

V	ความเร็ว
T	อุณหภูมิ
p	ความดัน
ρ	ความหนาแน่น
q	ความชื้นที่เฉพาะเจาะจง
g	แรงโน้มถ่วง
Ω	การหมุนของโลก
F_d	แรงต้านของโลก
R	เวกเตอร์รังสี
C	การนำความร้อน
c_p	ความจุความร้อนที่ความดันคงที่
E	การระเหย
S	ความร้อนแฝง
S_q	การเปลี่ยนเฟส
k	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
R_d	แก๊สคงที่อากาศแห้ง
δ	ระยะระหว่างเส้น โจร
\hat{x}_i	ค่าพยากรณ์
x_i	ค่าจริง

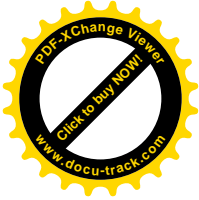
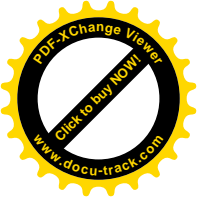




คำศัพท์เฉพาะทางและตัวย่อ

CTRL	Control Run
EdGCM	Educational Global Climate Model
FSLE	Finite Size Lyapunov Exponent
FTLE	Finite Time Lyapunov Exponent
GISS GCM Model II	Goddard Institute for Space Studies General Circulation Model II
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LE	Lyapunov Exponents
LLE	Local Lyapunov Exponent
MAE	Mean Absolute Error
MSE	Mean Square Error
NASA/GISS	NASA's Goddard Institute for Space Studies
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PER	Perturbed Run
RMSE	Root Mean Square Error
SLE	Supremum Lyapunov Exponent



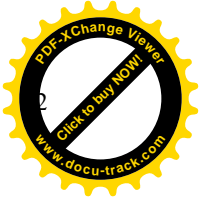
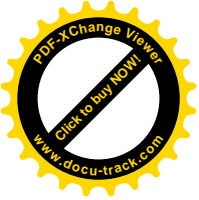


บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

มรสุมเป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ของลมซึ่งเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละฤดูกาล การพยากรณ์การเกิดมรสุมที่แน่นอนจึงเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก โดยความสามารถในการพยากรณ์นั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขค่าเริ่มต้นของตัวแปรและประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์ โดยประสิทธิภาพและความถูกต้องของแบบจำลองสามารถวัดได้โดยใช้เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (Lyapunov exponent) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ โดยเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (LE) คืออัตราที่ค่าเฉลี่ยในการลู่เข้าหรือลู่ออกของระยะระหว่างเส้นโคจร (trajectory) ในสนาม นอกจากนี้เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (LE) สามารถใช้วัดการเปลี่ยนแปลงในระบบพลวัตต่อเนื่องและระบบยุ่งเหยิง (chaotic system) ได้เป็นอย่างดี ถ้าค่าของเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (LE) เป็นบวกจะได้ว่าระยะระหว่างเส้นโคจรลู่ออกซึ่งจะถือได้ว่าเป็นระบบยุ่งเหยิง แต่ถ้าค่าของเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (LE) เป็นลบจะได้ว่าระยะระหว่างเส้นโคจรลู่เข้าถือได้ว่าเป็นระบบที่เสถียร (stable) โดยทั่วไปแล้วการวัดประสิทธิภาพและความถูกต้องในการพยากรณ์ของแบบจำลองจะประยุกต์มาจากวิธีเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (LE) เช่น เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัด (The finite time Lyapunov exponent: FTLE), เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟขนาดจำกัด (The Finite Size Lyapunov exponent: FSLE) และเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเฉพาะที่ (The Local Lyapunov exponent: LLE) ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้สามารถใช้วัดการพยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศในช่วงเวลาที่จำกัดได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการพยากรณ์การเกิดมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือโดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก (EdGCM) และวัดประสิทธิภาพ ความถูกต้องของการพยากรณ์ ทดสอบความอ่อนไหว (sensitivity) ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (EdGCM) ต่อค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่ถูกรบกวน (perturbation) ในแบบต่าง ๆ โดยใช้ตัวแบบวัดการพยากรณ์เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (LE), เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัด (FTLE), เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟขนาดจำกัด (FSLE), เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเฉพาะที่ (LLE) และสร้างตัวแบบวัดประสิทธิภาพและความถูกต้องในการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (EdGCM) เรียกว่าเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (Supremum Lyapunov exponent: SLE) เพื่อวัดความอ่อนไหวของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (EdGCM) เมื่อเปลี่ยนค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในการประมวลผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้



1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

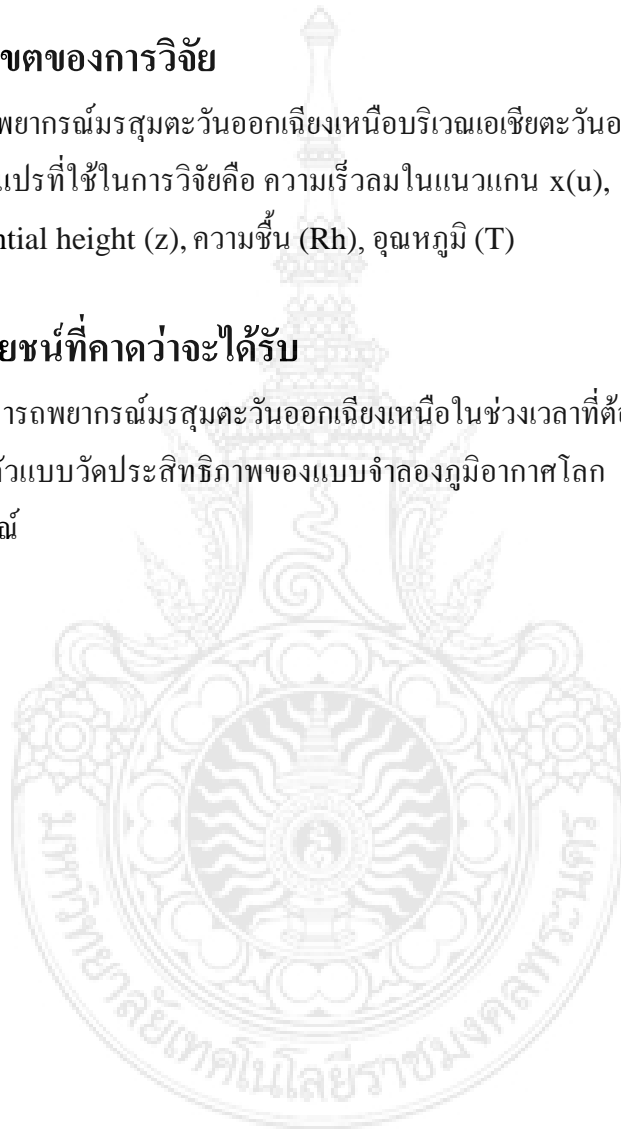
- 1) เพื่อพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือโดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก (EdGCM)
- 2) เพื่อสร้างตัววัดประสิทธิภาพการพยากรณ์มรสุมของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (EdGCM) เรียกว่า เลขชี้กำลังไลยาพูนอฟซูพรีมัม (SLE)
- 3) วัดความอ่อนไหวของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (EdGCM) เมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขค่าเริ่มต้น

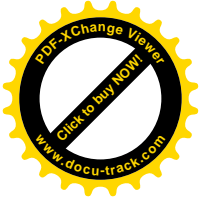
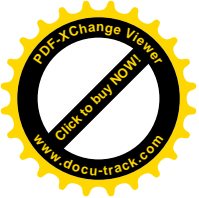
1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้
- 2) ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัยคือ ความเร็วลมในแนวแกน $x(u)$, ความเร็วลมในแนวแกน $y(v)$ และ Geopotential height (z), ความชื้น (Rh), อุณหภูมิ (T)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในช่วงเวลาที่ต้องการได้
- 2) ได้ตัวแบบวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (EdGCM) ในแต่ละช่วงเวลาของการพยากรณ์





บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

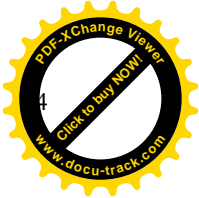
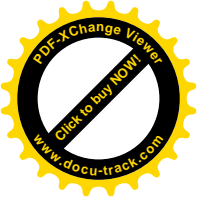
การวิจัยครั้งนี้เป็นการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่าง ๆ ในอนาคต การพยากรณ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์โดยไม่มีผิดพลาดนั้น เป็นสิ่งที่กระทำได้ยาก สาเหตุสำคัญของความผิดพลาดในการพยากรณ์เนื่องจากมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามพื้นที่และเวลา ทำให้ไม่อาจทราบสถานะที่แท้จริงของมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือได้ นอกจากนั้นแล้วประสิทธิภาพของแบบจำลองก็เป็นสิ่งสำคัญในการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนืออีกด้วย ดังนั้นในการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจึงมีความจำเป็นต้องทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยใช้ตัวแบบวัดการพยากรณ์ในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

2.1.1 เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (Lyapunov Exponent: LE)

เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ คือปริมาณทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วัดความแตกต่างของเส้นโคจรเริ่มต้นกับเส้นโคจรที่อ่อนไหวต่อค่าเริ่มต้นและใช้กำหนดความเสถียรในแต่ละลักษณะของสถานะ เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟในระบบพลวัต $f: R^n \rightarrow R^n$ ภายใต้อันโคจร $\mathbf{x}(t) = f(\mathbf{x}_0, t)$ และเงื่อนไขเริ่มต้น $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ ใช้วัดการลู่เข้าหรือลู่ออกของสองเส้นโคจรในพื้นที่ ถ้าค่าของเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเป็นบวกแสดงว่าค่าเฉลี่ยเลขชี้กำลังลู่ออกหรือระบบเกิดความยุ่งเหยิง (chaos) แต่ถ้าเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเป็นลบแสดงว่าค่าเฉลี่ยเลขชี้กำลังลู่เข้า. ให้ $\delta \mathbf{x}_i(t)$ คือส่วนเบี่ยงเบนของค่าการก่อกวนเริ่มต้น (perturbed run) ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเริ่มต้น (control run) พิจารณาสองเส้นโคจรระหว่างค่าเริ่มต้น (control run) และค่าที่ได้จากการก่อกวน (perturbed run) ในสนามที่เวลา t และ เวลา $t + \Delta t$, x_i , $i=1,2,3,\dots,N$, จะได้ $\|\delta(x_i(t))\|$ และ $\|\delta(x_i(t + \Delta t))\|$, ตามลำดับ ดังนั้นเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ คือ อัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของระยะเริ่มต้น (the initial distance)

$$\lambda = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\|\delta(x_i(t + \Delta t))\|}{\|\delta(x_i(t))\|}, i=1,2,\dots,N \quad (2.1)$$

- เมื่อ $\|\dots\|$ คือระยะระหว่างสองเส้นโคจร
- $\delta(x_i(t))$ คือระยะระหว่างสองเส้นโคจรที่เวลา t
- $\delta(x_i(t + \Delta t))$ คือระยะระหว่างสองเส้นโคจรที่เวลา $t + \Delta t$,
- และ Δt คือช่วงเวลาของการพยากรณ์



2.1.2 เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัด (Finite Time Lyapunov Exponent: FTLE)

เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัด คือ ตัวเลขทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วัดความอ่อนไหวระหว่างเส้นโคจรในแต่ละช่วงเวลา t ที่ได้จากการก่อกวนเงื่อนไขเริ่มต้น (perturbations of the initial conditions) กับเงื่อนไขเริ่มต้นซึ่งกำหนดให้ $\delta \mathbf{x}_i(t)$ คือส่วนเบี่ยงเบนของค่าการก่อกวนเริ่มต้นจากค่าเริ่มต้นโดยเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัด (FTLE), λ , กำหนดเป็น

$$\lambda(\mathbf{x}(t), \delta \mathbf{x}(t), \Delta t) = \frac{1}{\Delta t} \log \frac{\|\delta(x_i(t + \Delta t))\|}{\|\delta(x_i(t))\|}, i=1,2,\dots,N \quad (2.2)$$

เมื่อ $\lambda(\mathbf{x}(t), \delta \mathbf{x}(t), \Delta t)$ ขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นในสถานะ $\mathbf{x}(t)$, ค่าเริ่มต้นคาดเคลื่อน $\delta \mathbf{x}(t)$ และช่วงเวลา Δt ดังนั้นเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัดใช้เป็นตัววัดการลู่เข้าและลู่ออกระหว่างสองเส้นโคจรในสนาม สามารถใช้ตรวจสอบระบบที่อ่อนไหวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น ซึ่งถ้าเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัด (FTLE) เป็นค่าบวกแสดงว่าเส้นโคจรลู่ออกจากกันและถ้าเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัด (FTLE) เป็นค่าลบแสดงว่าเส้นโคจรลู่เข้าหากัน

2.1.3 เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟขนาดจำกัด (Finite Size Lyapunov Exponent: FSLE)

เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟขนาดจำกัด คือ ตัววัดการพยากรณ์ทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาเพิ่มเติมมาจากเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ เป็นการวัดค่าเฉลี่ยการลู่เข้าและลู่ออกระหว่างเส้นโคจรบริเวณพื้นที่ที่กำหนดได้ดังนี้ (Ovidio, 2008)

$$\lambda(\delta) = \left\langle \frac{1}{t} \ln \left(\frac{\|\delta \mathbf{x}(t)\|}{\|\delta \mathbf{x}(0)\|} \right) \right\rangle \quad (2.3)$$

เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟขนาดจำกัด (FSLE) สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของอัตราการลู่ออก ตามช่วงเวลาต่าง ๆ Δt ที่เพิ่มขึ้นได้ดังสมการ

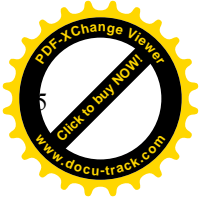
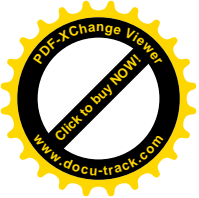
$$\lambda(\delta) = \frac{1}{\Delta t} \left\langle \ln \left(\frac{\|\delta \mathbf{x}(t + \Delta t)\|}{\|\delta \mathbf{x}(t)\|} \right) \right\rangle \quad (2.4)$$

เมื่อ $\delta x(t)$ คือระยะระหว่างสองเส้นโคจรที่เวลา t

$\delta x(t + \Delta t)$ คือระยะระหว่างสองเส้นโคจรที่เวลา $t + \Delta t$,

Δt คือช่วงเวลาของการพยากรณ์

และ $\langle \dots \rangle$ คือค่าเฉลี่ยของทุกจุดในเส้นโคจร



เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟขนาดจำกัด (FSLE) มีค่าใกล้เคียงกับค่าเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟมากที่สุด (Maximum Lyapunov exponent : MLE) (Aurell, 1997),

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \lambda(\delta) = \lambda_{\max} \quad (2.5)$$

คุณสมบัติของเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟขนาดจำกัด (Lacorata, 2001).

- 1) เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟขนาดจำกัดระหว่างเส้นโคจรที่ $\delta \rightarrow 0$ จะมีค่าเข้าใกล้เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟมากที่สุด
- 2) ในการแพร่กระจาย, $\langle \delta(t)^2 \rangle \approx t$, $\lambda(\delta) \approx \delta^{-2}$ สัดส่วนของค่าคงที่คือลำดับสัมประสิทธิ์ของการกระจาย
- 3) ทุกๆ ความชัน > -2 สำหรับ $\lambda(\delta)$, δ บ่งชี้ลักษณะของการกระจายของเส้นโคจร
- 4) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง, เมื่อ $\lambda(\delta) =$ ค่าคงที่ที่มากที่สุดบนช่วงที่แยกกันระหว่างเส้นโคจรจะเกิดสภาวะความวุ่นวาย (chaotic advection).

2.1.4 เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเฉพาะที่ (Local Lyapunov Exponent: LLE)

เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเฉพาะที่ คือการวัดทางคณิตศาสตร์ของช่วงเวลาที่ยกเว้นเมื่อมีการก่อวนเงื่อนไขค่าเริ่มต้นทำให้ระยะทางระหว่างระบบของเส้นโคจร มีการเพิ่มขึ้นและลดลงในเวลาจำกัด (Abarbanel et al., 1992). นิยามของเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเฉพาะที่ (LLE) เริ่มจากสมการของไหล $\dot{x} = v(x)$, เส้นโคจร $x(t)$ และการเปลี่ยนแปลงของเส้นโคจร δx แสดงด้วยสมการดังนี้ (Eckhardt & Yao, 1993),

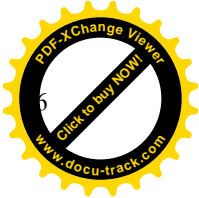
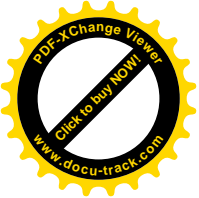
$$\delta \dot{x}_i = (\partial v_i / \partial x_j) \delta x_j \quad (2.6)$$

สำหรับในส่วนของเส้นโคจรแบบยาว สามารถคำนวณเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเฉพาะที่ (LLE) ได้จากสมการดังนี้ (McCue, 2005),

$$\lambda_{\Delta t}(x(t), \delta x(0)) = \frac{1}{\Delta t} \log \frac{\|\delta x(t + \Delta t)\|}{\|\delta x(t)\|} \quad (2.7)$$

สมการที่ (2.7) ขึ้นอยู่กับช่วงของเวลา t และบนเส้นโคจรที่แทนด้วย $x(t)$. กำหนดเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเฉพาะที่ ในจุด $x(t)$ ของสถานะที่ไม่เสถียรโดยให้ $\Delta t \rightarrow 0$ ลิมิตของสมการที่ (2.7) เรียกว่าการคำนวณเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเฉพาะที่ (LLE)

$$\lambda(x(t)) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \log \frac{\|\delta x(t + \Delta t)\|}{\|\delta x(t)\|} \quad (2.8)$$



เมื่อ $x(t)$ คือเส้นโคจรที่เวลา t
 $\delta x(t)$ คือระยะระหว่างสองเส้นโคจรที่เวลา t
 $\delta x(t + \Delta t)$ คือระยะระหว่างสองเส้นโคจรที่เวลา $t + \Delta t$,
 Δt คือช่วงเวลาของการพยากรณ์

เพราะฉะนั้นเลขชี้กำลังโลยาพูนอฟเฉพาะที่ (LLE) เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบระบบที่มีการเคลื่อนไหว และสามารถวิเคราะห์การพยากรณ์ได้ในพื้นที่ต่างๆ กัน (Abarbanel et al., 1992).

2.2 การทดสอบความแม่นยำในการพยากรณ์

การประเมินประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของแบบจำลองและความถูกต้องของการพยากรณ์สามารถใช้ตัวแบบทางสถิติ เช่น mean absolute error (MAE) และ root mean square error (RMSE)

2.2.1 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยสมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE)

ค่าผิดพลาดเฉลี่ยสมบูรณ์ คือ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสมบูรณ์ระหว่างค่าพยากรณ์และค่าจริง หากมีค่าน้อย แสดงว่าแบบจำลองสามารถประมาณค่าประมาณได้ใกล้เคียงกับค่าจริง โดย MAE มีสูตรในการคำนวณดังนี้ (Ian, 2003),

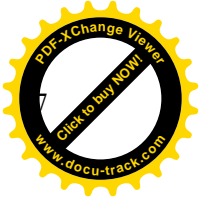
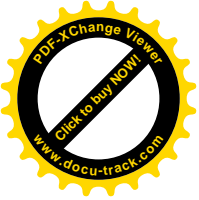
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{x}_i - x_i| \quad (2.9)$$

เมื่อ n คือ จำนวนตัวแปร
 \hat{x}_i คือ ค่าพยากรณ์
 x_i คือ ค่าจริง

2.2.2 รากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (Root Mean Square Error: RMSE)

รากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด คือ การวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่ประมาณจากแบบจำลองยกกำลังสอง ถ้า RMSE มีค่าน้อย แสดงว่าแบบจำลองสามารถประมาณค่าประมาณได้ใกล้เคียงกับค่าจริง แต่ถ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ หมายความว่าไม่เกิดความคาดเคลื่อนในแบบจำลองนี้ RMSE คำนวณได้ดังนี้ (Ian, 2003)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (2.10)$$



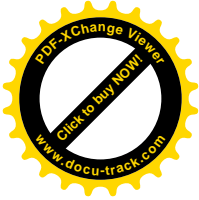
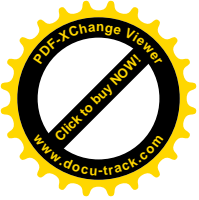
เมื่อ n คือ จำนวนตัวแปร
 \hat{x}_i คือ ค่าพยากรณ์
 x_i คือ ค่าจริง

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Liu et al. (2004) ศึกษาลำดับเวลาของ an urban hourly water consumption และหาความยุ่งเหยิง (the chaotic system) ของระบบ โดยระบบยุ่งเหยิงนั้นสามารถทดสอบโดยใช้เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (Lyapunov exponents) นอกจากนี้ยังใช้เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟในการประเมิน fractal dimensions และวิเคราะห์ Kolmogorov power spectra อีกด้วย ผลสรุปทำให้ทราบได้ว่าเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟมีนัยสำคัญ นอกจากนี้แล้วยังใช้เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟที่ใหญ่สุดอีกด้วย (largest Lyapunov exponent)

Yoden et al. (2006) นำเสนอว่าเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัด (the finite-time Lyapunov exponent; FTLE) คืออัตราการเพิ่มของการก่อกวน (perturbations) โดยขึ้นอยู่กับช่วงเวลาอ้างอิง และเวกเตอร์ไลยาปูนอฟเวลาจำกัด (the finite-time Lyapunov vector) จะสอดคล้องกับเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟมากที่สุด (the largest Lyapunov exponents) ซึ่งทำให้สนามของ streamfunction เพิ่มการก่อกวนขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา นอกจากนี้เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัดอาจจะใช้วัดช่วงเวลาในการพยากรณ์ของการดำเนินการในการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข (Numerical Weather Prediction; NWP)

Ding and Li (2007) แนะนำนิยามของความไม่เป็นเชิงเส้นของเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัด (nonlinear FTLE) สำหรับระบบยุ่งเหยิง ซึ่งความไม่เป็นเชิงเส้นของเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัดสามารถใช้หาประสิทธิภาพและปริมาณของการกำหนดช่วงการทำนายในระบบยุ่งเหยิงได้

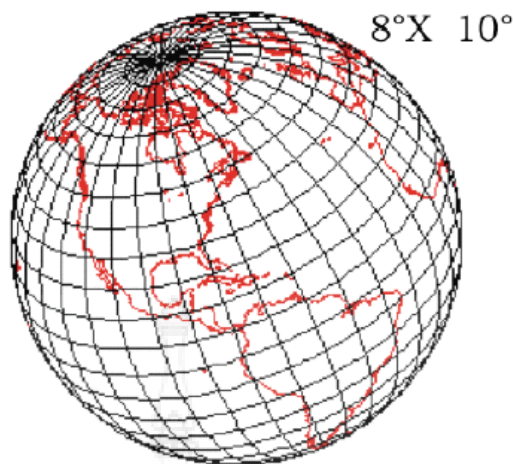


บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ใช้ตัวแบบวัดการพยากรณ์ ในการทดสอบประสิทธิภาพและความถูกต้องของการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (The Educational Global Climate Model: EdGCM) โดยตัวแบบวัดการพยากรณ์ ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (The Lyapunov exponent: LE), เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัด (The finite time Lyapunov exponent: FTLE), เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟขนาดจำกัด (The Finite Size Lyapunov exponent: FSLE) และเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเฉพาะที่ (The Local Lyapunov exponent: LLE) ซึ่งตัวแบบวัดการพยากรณ์สามารถบ่งบอกลักษณะของอัตราการเคลื่อนที่ของเส้นโคจรในระบบกลศาสตร์ได้ นั่นคืออัตราการเคลื่อนที่ของเส้นโคจรที่ลู่ออกหรือลู่ออกจากกันสามารถตรวจสอบได้โดยตัวแบบวัดการพยากรณ์ดังกล่าว การลู่ออกหรือลู่ออกจากกันของเส้นโคจรสามารถบ่งบอกประสิทธิภาพของการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลกได้นอกจากนั้นแล้วในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้สร้างตัวแบบวัดการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (LE) เรียกว่า เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (The Supremum Lyapunov exponent: SLE) และทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของแบบจำลองภูมิอากาศโลกในการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยใช้รากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (RMSE).

3.1 แบบจำลองภูมิอากาศโลก (The Educational Global Climate Model: EdGCM)

แบบจำลองภูมิอากาศโลก คือแบบจำลองที่สามารถใช้พยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในช่วงเวลาที่ยาวนานได้ ซึ่งแบบจำลองภูมิอากาศโลกเป็นชุดคำสั่งที่ผู้ใช้สามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์อากาศได้ทันทีโดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมขึ้นมาใหม่ โดยสามารถประมวลผลการพยากรณ์ออกมาในรูปแบบสามมิติ โดยสามารถทำการติดตั้งได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลตั้งโต๊ะ (desktop computers) หรือเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (notebooks) แบบจำลองภูมิอากาศโลก (EdGCM) พัฒนาขึ้นโดยองค์การนาซ่า (NASA's Goddard Institute for Space Studies (NASA/GISS)) และแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่ใช้มีความละเอียด 7776 จุดในแต่ละช่วงของเซลล์ที่อยู่ในแต่ละสี่เหลี่ยม มีความละเอียดที่ใช้ในการประมวลผลการพยากรณ์คือ 8° ละติจูด \times 10° ลองจิจูด ดังรูปที่ 3.1 โดยประมวลผลในชั้นบรรยากาศทั้ง 9 ระดับและพื้นดิน 2 ระดับ (Mark, 2006).



รูปที่ 3.1 ความละเอียดของแบบจำลองภูมิอากาศโลก 8° ละติจูด × 10° ลองจิจูด (Mark, 2006).

แบบจำลองภูมิอากาศโลก (EdGCM) เป็นแบบจำลองที่ประมวลผลแบบสามมิติ ที่ใช้วิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขสำหรับระบบสมการอนุรักษ์พลังงาน, มวล, โมเมนตัม ความชื้น (Hansen,1983) และใช้กฎของก๊าซอุดมคติ (the ideal gas law) ที่สัมพันธ์กันกับความดัน (pressure) และอุณหภูมิ (temperature) ตัวแปรอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลเชิงประจักษ์หรือสมมติฐานทางกายภาพง่ายที่จะใช้ในการคำนวณปริมาณที่ไม่ได้รับการจัดการโดยสมการพื้นฐานหรือที่เกิดขึ้นในระดับพื้นที่ โดยมี 5 สมการทางกายภาพพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายถึงการพัฒนาของบรรยากาศ คือการอนุรักษ์อนุรักษ์ โมเมนตัม, กฎการอนุรักษ์มวล, กฎการอนุรักษ์พลังงาน, กฎการอนุรักษ์ความชื้นและแก๊สอุดมคติ (Mark, 2006).

การอนุรักษ์โมเมนตัม หรือกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน (Conservation of momentum or Newton's second law of motion)

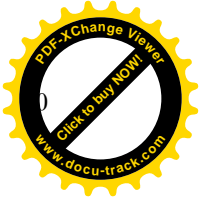
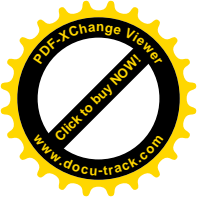
$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -(\mathbf{V} \cdot \nabla)\mathbf{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \mathbf{g} - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} + \nabla \cdot (k \nabla \mathbf{V}) - \mathbf{F}_d \quad (3.1)$$

การอนุรักษ์มวล หรือสมการต่อเนื่อง (Conservation of mass or continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\mathbf{V} \cdot \nabla)\rho - \rho(\nabla \cdot \mathbf{V}) \quad (3.2)$$

การอนุรักษ์พลังงาน หรือกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์ (Conservation of energy or first law of thermodynamics)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_p (\mathbf{V} \cdot \nabla)T - \nabla \cdot \mathbf{R} + \nabla \cdot (k_T \nabla T) + C + S \quad (3.3)$$



การอนุรักษ์ความชื้น (Conservation of moisture: vapor, liquid, solid),

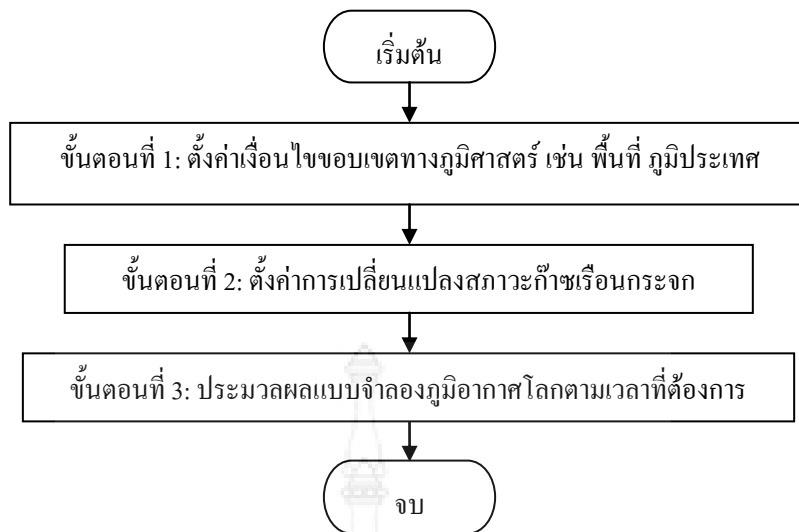
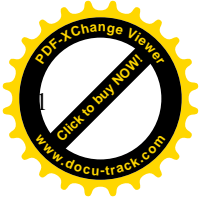
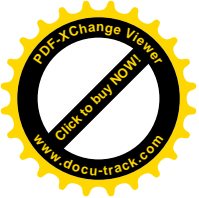
$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(\mathbf{V} \cdot \nabla)q + \nabla \cdot (k_q \nabla q) + S_q + E \quad (3.4)$$

กฎของแก๊สอุดมคติ (Ideal gas law)

$$p = \rho R_d T \quad (3.5)$$

สัญลักษณ์:	V	ความเร็ว
	T	อุณหภูมิ
	p	ความดัน
	ρ	ความหนาแน่น
	q	ความชื้นที่เฉพาะเจาะจง
	g	แรงโน้มถ่วง
	Ω	การหมุนของโลก
	F_d	แรงต้านของโลก
	R	เวกเตอร์รังสี
	C	การนำความร้อน
	c_p	ความจุความร้อนที่ความดันคงที่
	E	การระเหย
	S	ความร้อนแฝง
	S_q	การเปลี่ยนเฟส
	k	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
	R_d	แก๊สคงที่อากาศแห้ง

ขั้นตอนในการประมวลผลของแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการประมวลผลของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (Columbia University, 2009).

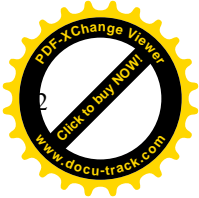
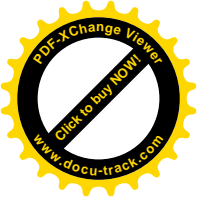
3.2 ข้อมูล

3.2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลของแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM

แบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM สามารถพยากรณ์อุณหภูมิได้ตามวัฏจักรของแสงอาทิตย์ทั้งฤดูกาลและรายวัน อนุภาคของเมฆ ละอองและก๊าซ มีความสำคัญ ซึ่งจะรวมกันอย่างชัดเจนเป็น โครงสร้างรังสีและระบบขนาดใหญ่ที่มีเมฆปกคลุมไหลเวียนสามารถทำการพยากรณ์ได้ (Mark, 2006) ข้อมูลดังกล่าวแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM (Mark, 2006).

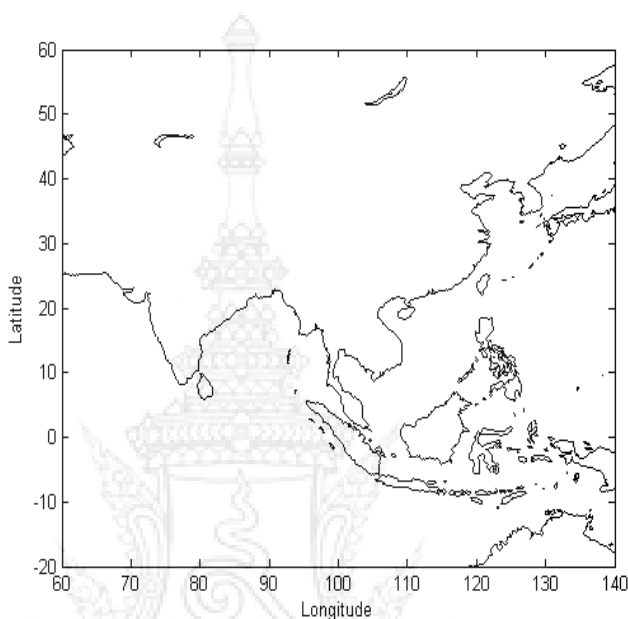
เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)	เงื่อนไขขอบเขต ได้แก่ ที่ดิน ทะเลและภูมิประเทศ ปกคลุมพื้นผิวที่คืนที่ระบุไว้รวมทั้งสถานที่และความสูงของแผ่นน้ำแข็ง โดยกระจายตามฤดูกาลของพืชและขอบเขตของทะเลสาบ
เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Conditions)	เงื่อนไขเริ่มต้นระบุอุณหภูมิเริ่มต้น ความดัน ลมและความชื้น สำหรับทุกชั้นบรรยากาศ
สภาพภูมิอากาศของแรง (Climate Forcings)	สภาพภูมิอากาศของแรงส่งผลกระทบต่อผลการดำเนินการอย่างมาก เช่น ก๊าซเรือนกระจก
สภาพภูมิอากาศที่ส่งผลย้อนกลับ (Climate Feedbacks)	มีข้อเสนอแนะ 3 ข้อ ที่เป็นตัวอย่างของกระบวนการและกลไกที่โดดเด่นซึ่งมีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนและการระบายความร้อนที่สถานการณ์ทั่วโลกคือ ไอน้ำ เมฆ และน้ำแข็งอัลเบโด
สภาพภูมิอากาศที่อ่อนไหว (Climate Sensitivity)	ความอ่อนไหวของระบบภูมิอากาศ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลกเฉลี่ยที่คาดว่าจะได้รับหลังจากเวลานานพอ สำหรับบรรยากาศและมหาสมุทรมาโดยสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ



3.3 ขอบเขตของบริเวณในการพยากรณ์

3.3.1 ขอบเขตของบริเวณในการศึกษาและพยากรณ์

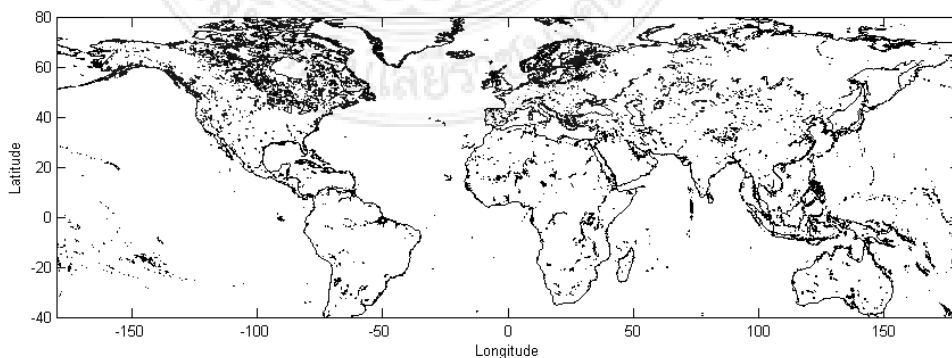
พื้นที่ในการศึกษาและพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนืออยู่ระหว่างบริเวณ ลองจิจูดที่ 60° ตะวันออก ถึง 140° ตะวันออก และแลตติจูดที่ 20° ใต้ ถึง 60° เหนือ แสดงในรูปที่ 3.3



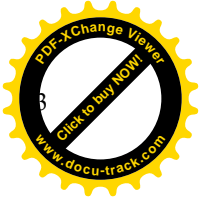
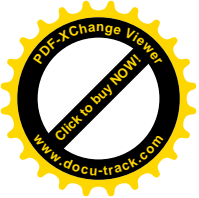
รูปที่ 3.3 บริเวณในการศึกษาและพยากรณ์

3.3.2 บริเวณในการพยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM

บริเวณในการพยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลกคือ 180° ตะวันตก ถึง 180° ตะวันออก และ 40° ใต้ ถึง 80° เหนือ แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 บริเวณในการพยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM



3.4 การออกแบบการทดลอง

3.4.1 สร้างเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (Supremum Lyapunov Exponent: SLE)

วิธีการที่สามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพและความถูกต้องในการพยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศส่วนใหญ่จะเป็นวิธีที่พัฒนามาจากเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (LE) ซึ่งเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟสามารถวัดอัตราการลู่เข้าบรรจบกันและลู่ออกระหว่างเส้นโคจรที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ แสดงให้เห็นถึงระดับของความอ่อนไหวของระบบต่อเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลการพยากรณ์ (McCue, 2005) เนื่องจากการประเมินประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลกมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งและเพื่อทดสอบความถูกต้องของการพยากรณ์ของแบบจำลองจึงทำการสร้างเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (SLE) ขึ้น โดยเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (SLE) ที่สร้างขึ้นสามารถวัดอัตราเฉลี่ยของการลู่ออกระหว่างเส้นทางโคจร ถ้าค่าของเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (SLE) มีค่าเป็นบวกแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนั้นอ่อนไหวขึ้นอยู่กับค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ซึ่งกล่าวได้ว่าแบบจำลองภูมิอากาศโลกไม่สามารถทำการพยากรณ์ได้ตามช่วงเวลาที่กำหนด เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (SLE) สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

สมมติว่าวิวัฒนาการของบรรยากาศเกิดขึ้นมาจากระบบอนุพลวัต แบบไม่เชิงเส้น (nonlinear dynamical system) ของ n -มิติ และต่อเนื่องตามเวลา โดยสามารถกำหนดโดยสมการเชิงอนุพันธ์ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}(t)) \tag{3.6}$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} \tag{3.7}$$

เมื่อ $\mathbf{x}(t)$ คือ เส้นทางโคจรของระบบบนพื้นที่จำกัด R^n , (finite-dimensional state space)

$$\mathbf{x}(t) \in R^n$$

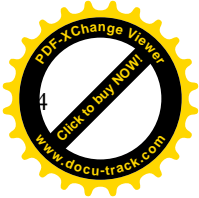
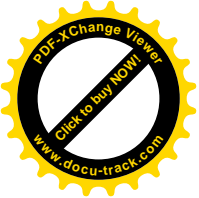
โดย $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n]^T$

และ \mathbf{F} คือ สนามเวกเตอร์ n -มิติ (n -dimensional vector field)

สมมุติ สนามเวกเตอร์ \mathbf{F} สามารถสร้างเวกเตอร์ในสนาม คือ $\mathbf{x}(t) = f(\mathbf{x}, t)$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{F}(f(\mathbf{x}, t)) \tag{3.8}$$

จากสมการที่ (3.8) ภายใต้อินิเชียลเงื่อนไขเริ่มต้น $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ จะได้ว่า



$$\mathbf{x}(t) = f(\mathbf{x}_0, t) \quad (3.9)$$

เมื่อ $f(\mathbf{x}_0, t): R \rightarrow R^n$

ดังนั้น $f(\mathbf{x}_0, 0) = \mathbf{x}_0$

ให้ $\{f(\mathbf{x}_0, t): t \in N\}$ คือ เส้นทางการโคจรของระบบผ่าน \mathbf{x}_0

พิจารณารูปแบบทั่วไปของแบบจำลองใน n -มิติ ที่เวลาเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับค่าเงื่อนไขเริ่มต้นได้ดังนี้

$$f(\mathbf{x}, t + \Delta t) = M[f(\mathbf{x}_0, t)], t \in N \quad (3.10)$$

เมื่อ $f(\mathbf{x}_0, t) \in R^n$ คือ สนามเวกเตอร์ของระบบที่เวลา t

Δt คือ ช่วงเวลาของการพยากรณ์

M คือ วิธีการดำเนินการเชิงตัวเลขของแบบจำลอง

$f(\mathbf{x}, t + \Delta t)$ คือ ค่าของการพยากรณ์ที่เวลาถัดไป

กำหนดความดันบรรยากาศตามระดับความสูง (the geopotential height) คือ $(x_i(t))$ ที่เวลา t และที่จุด $x_i, i=1,2,3,\dots,N$ (N คือจำนวนจุดของกริดบริเวณพื้นที่ของการประมวลผลของแบบจำลอง) เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (LE) สำหรับ $(x_i(t))$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\|\delta(x_i(t + \Delta t))\|}{\|\delta(x_i(t))\|}, i=1,2,\dots,N \quad (3.11)$$

เนื่องจากลิมิตของกำลังสองของความดันบรรยากาศตามระดับความสูง $(x_i(t))$ กำหนดโดย

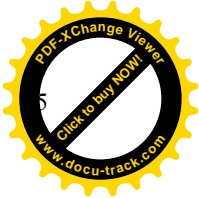
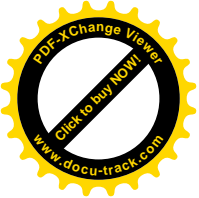
$$\lambda_{\inf} = \liminf_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\|\delta(x_i(t + \Delta t))\|}{\|\delta(x_i(t))\|}, i=1,2,\dots,N \quad (3.12)$$

และ

$$\lambda_{\sup} = \limsup_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\|\delta(x_i(t + \Delta t))\|}{\|\delta(x_i(t))\|}, i=1,2,\dots,N \quad (3.13)$$

ถ้าสมการที่ (3.12) และสมการที่ (3.13) ลิมิตหาค่าได้ ดังนั้น

$$\liminf_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\|\delta(x_i(t + \Delta t))\|}{\|\delta(x_i(t))\|} = \limsup_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\|\delta(x_i(t + \Delta t))\|}{\|\delta(x_i(t))\|}, i=1,2,\dots,N \quad (3.14)$$



เนื่องจากลิมิตของกำลังสองของความดันบรรยากาศตามระดับความสูง ($x_i(t)$) หาค่าได้ ดังนั้นจะได้

$$\Lambda = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\|\delta(x_i(t + \Delta t))\|}{\|\delta(x_i(t))\|}, i=1,2,\dots,N \quad (3.15)$$

เพราะฉะนั้นกำลังสองของความดันบรรยากาศตามระดับความสูง ($x_i(t)$) คืออัตราการลู่เข้าและลู่
ออกของเส้นทางโคจรที่ใกล้เคียงกัน และค่าที่มากที่สุด (The supremum) ของสมการที่ (3.15) ใน
ทุกๆ เส้นทางโคจร ($x_i(t)$) ของสนามคือจุดที่สนใจ

กำหนด $Z(\mathbf{x}, t)$ เป็นเซตของ $x \in Z$ และสมการที่ (3.15) ลิมิตหาค่าได้
ดังนั้น เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (SLE) กำหนดโดยสมการที่ (3.16)

$$\Lambda_{\text{sup}} = \sup_{x \in Z(\mathbf{x}, t)} \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\|\delta(x_i(t + \Delta t))\|}{\|\delta(x_i(t))\|}, i=1,2,\dots,N \quad (3.16)$$

ถ้า $Z(\mathbf{x}, t)$ คือ เซตว่าง และกำหนดให้ $\Lambda_{\text{sup}} = -\infty$

ดังนั้นเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (SLE) สามารถใช้เป็นตัวแบบในการวัดประสิทธิภาพการ
พยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศได้ โดยสามารถบอกอัตราการลู่ออกของเส้นทางโคจรที่แทน
รูปแบบของเส้นทางเดินของมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ นั่นคือจะกล่าวได้ว่าแบบจำลองที่มีค่าของ
เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (SLE) เป็นบวกแสดงให้รู้ว่าแบบจำลองนั้นอ่อนไหวต่อค่าเงื่อนไข
เริ่มต้น

3.4.2 การตั้งค่าพยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (EdGCM)

แบบจำลองภูมิอากาศโลกประมวลผลทั้งหมด 142 ปี ตั้งแต่ปี ค.ศ.1958 ถึง ปี ค.ศ.2100 ตัวแปรที่ใช้ใน
การประมวลผลของแบบจำลองภูมิอากาศโลกแสดงในตารางที่ 3.2 และใช้ข้อมูลในการวัดการ
พยากรณ์จาก ปี ค.ศ. 2012 ถึง ปี ค.ศ. 2100

ตารางที่ 3.2 รูปแบบการประมวลผลของแบบจำลองภูมิอากาศโลก

ตัวแปร (Greenhouse gas)	การประมวลผลแบบควบคุม (The Control Run: CTRL)	การประมวลผลแบบก่อกวน (The Perturbed Run1a: PER1a) CO ₂ เพิ่มขึ้น 1%	การประมวลผลแบบก่อกวน (The Perturbed Run2b: PER2b) CO ₂ เพิ่มขึ้น 5%
Water Vapor (H ₂ O)	1%	1%	1%
Carbon Dioxide (CO ₂)	354.8 ppmv	358.3 ppmv	372.5 ppmv
Methane (CH ₄)		1.2240 ppmv	
Nitrous Oxide (N ₂ O)		0.2908 ppmv	
CFC-11		0.0076 ppbv	
CFC-12		0.0296 ppbv	
Ozone (O ₃)		70 ppbv	

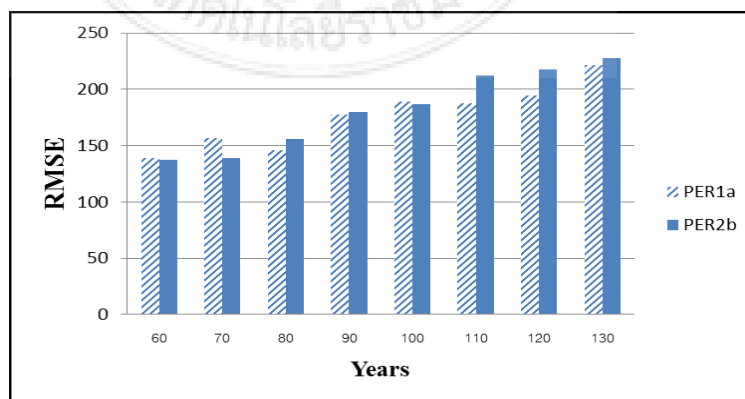
บทที่ 4 ผลของการทดลอง

4.1 การหาประสิทธิภาพของแบบจำลองภูมิอากาศโลก

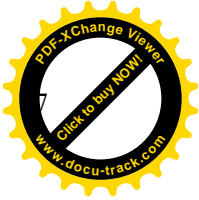
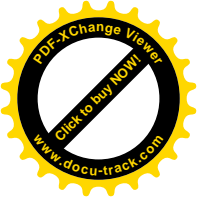
รากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (RMSE) สามารถใช้หาประสิทธิภาพของแบบจำลองภูมิอากาศโลกในการพยากรณ์ได้ และสามารถตรวจสอบค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสมในการประมวลผลการพยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก โดยรากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (RMSE) คำนวณจากค่าของตัวแปรความดันบรรยากาศ (geopotential height) ที่ระดับ 500 hPa ระหว่างค่าที่ได้จากการประมวลผลการพยากรณ์ของแบบจำลองที่ควบคุม (CTRL) และค่าที่ได้จากการประมวลผลการพยากรณ์ของแบบจำลองที่ก่อวน (PERs) ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (RMSE) ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 โดยการพยากรณ์มีรศมตะวันตกเฉียงเหนือของแบบจำลองภูมิอากาศโลกเริ่มต้นพยากรณ์ในปี ค.ศ. 1958.

ตารางที่ 4.1 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (RMSE: เมตร) ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM.

จำนวนปีที่พยากรณ์ (ปี)	รากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (RMSE)	
	PER1a (CO ₂ เพิ่มขึ้น 1%)	PER2b (CO ₂ เพิ่มขึ้น 5%)
60	138.43	137.56
70	156.59	138.90
80	146.04	156.25
90	177.04	179.45
100	188.73	187.01
110	187.23	212.56
120	194.57	217.89
130	221.67	227.96



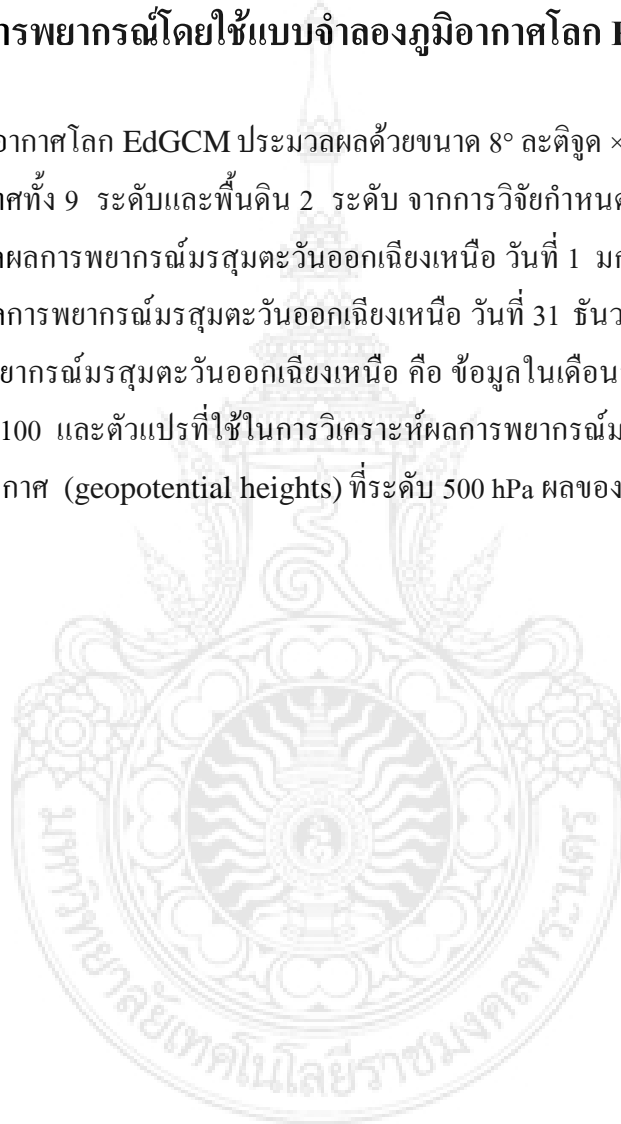
รูปที่ 4.1 ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (RMSE: เมตร) ของ EdGCM.

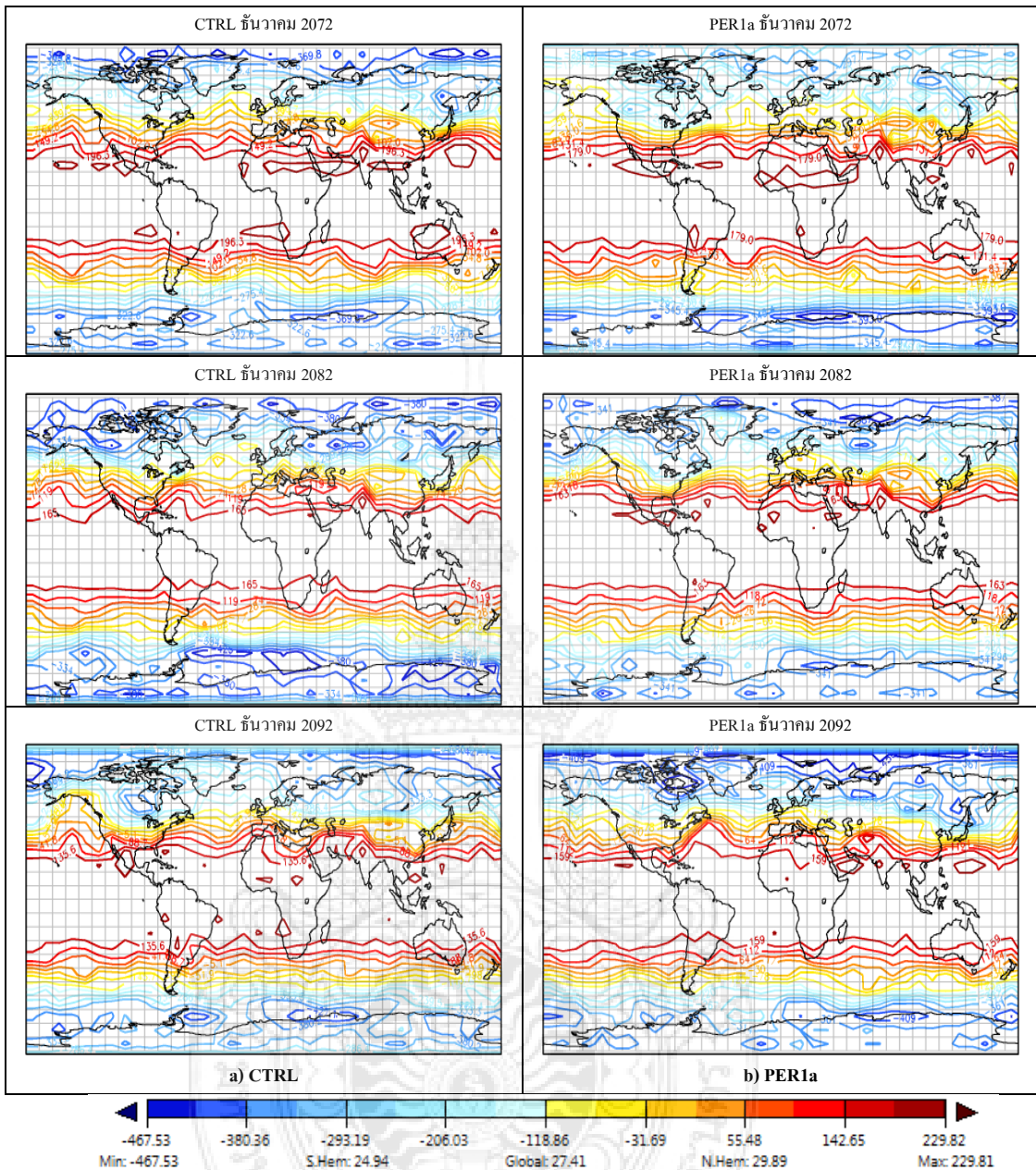


พิจารณาค่าเฉลี่ยของความดันบรรยากาศ (geopotential height) ที่ระดับ 500 hPa มีความสูงประมาณ 5,500 เมตร จะพบว่าค่ารากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (RMSE: เมตร) ของการทดลอง ดังตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.1 มีค่าต่ำกว่า 5 % ของความสูงที่ 5,500 เมตร (น้อยกว่า 275 เมตร) ดังนั้นค่าที่ได้จากการประมวลผลการพยากรณ์ของแบบจำลองที่ก่อกวน (PER1a และ PER2b) สามารถนำไปใช้ในการทดสอบการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือของแบบจำลองภูมิอากาศโลกได้

4.2 ผลการพยากรณ์โดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM

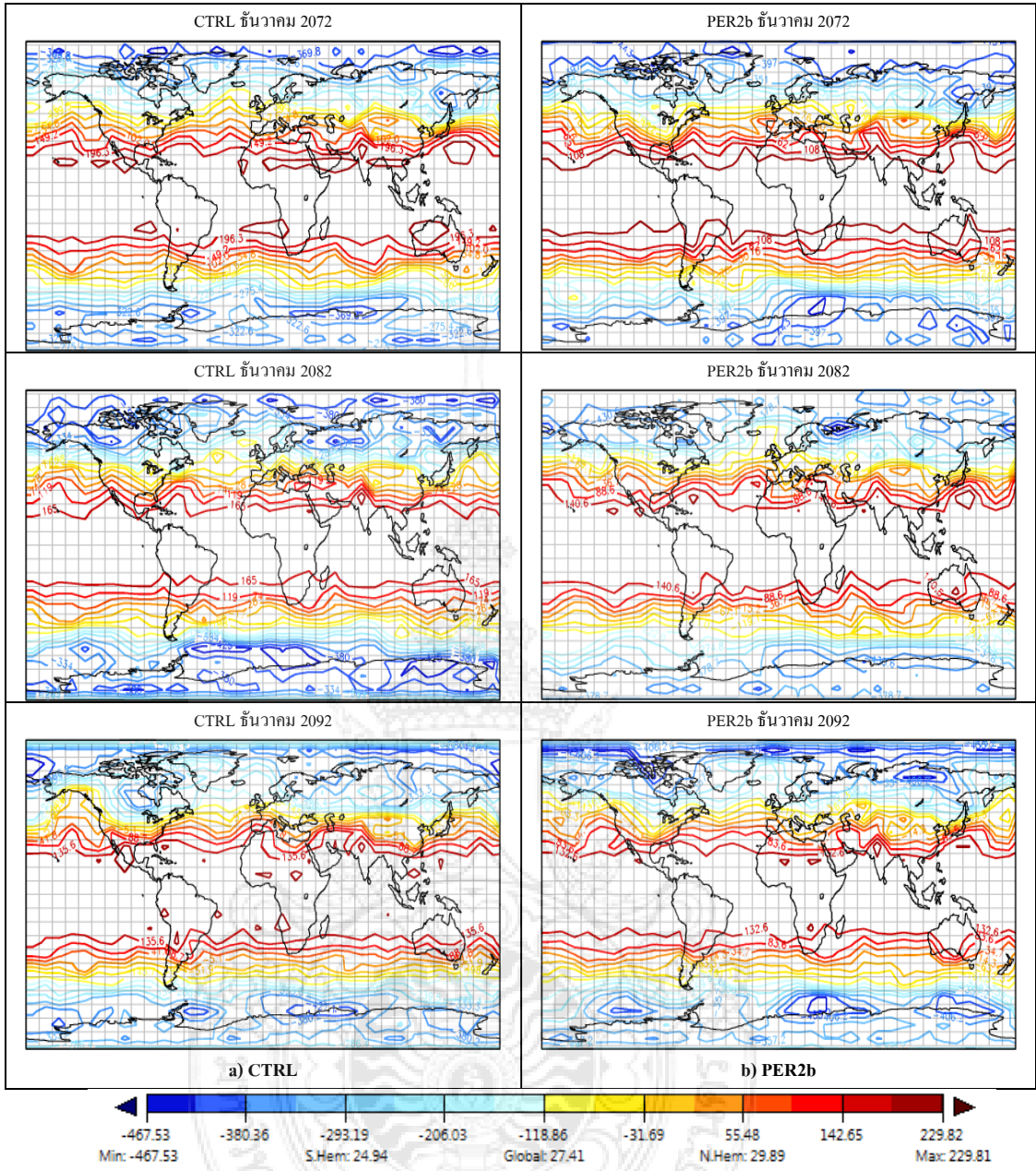
แบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM ประมวลผลด้วยขนาด 8° ละติจูด \times 10° ลองจิจูด โดยประมวลผลในชั้นบรรยากาศทั้ง 9 ระดับและพื้นดิน 2 ระดับ จากการวิจัยกำหนดให้แบบจำลองภูมิอากาศโลก เริ่มต้นประมวลผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ วันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 1958 และสิ้นสุดการประมวลผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ วันที่ 31 ธันวาคม ค.ศ.2100 ข้อมูลที่ใช้เพื่อวิเคราะห์การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ คือ ข้อมูลในเดือนธันวาคม ค.ศ.2012 ถึง เดือนธันวาคม ค.ศ.2100 และตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ คือ ความดันบรรยากาศ (geopotential heights) ที่ระดับ 500 hPa ผลของการพยากรณ์นั้นแสดงดังรูปที่ 4.2-4.3





รูปที่ 4.2 ผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เดือนธันวาคม ในปี ค.ศ. 2072, 2082 และ 2092 จาก EdGCM, a) CTRL และ b) PER1a.

จากรูป 4.2 พบว่า PER1a มีรูปแบบของเส้นความดันบรรยากาศ (geopotential height) เข้าใกล้ CTRL ในเดือนธันวาคม ค.ศ. 2072 แสดงว่าการพยากรณ์จาก PER1a เส้นความดันบรรยากาศ เริ่มที่จะเข้าสู่ค่าการพยากรณ์ของ CTRL ภายหลังจากการพยากรณ์ 110 ปี ภาคผนวก ก แสดงการพยากรณ์ของ CTRL และ PER1a ในเดือนธันวาคม ค.ศ. 2012- ค.ศ. 2062

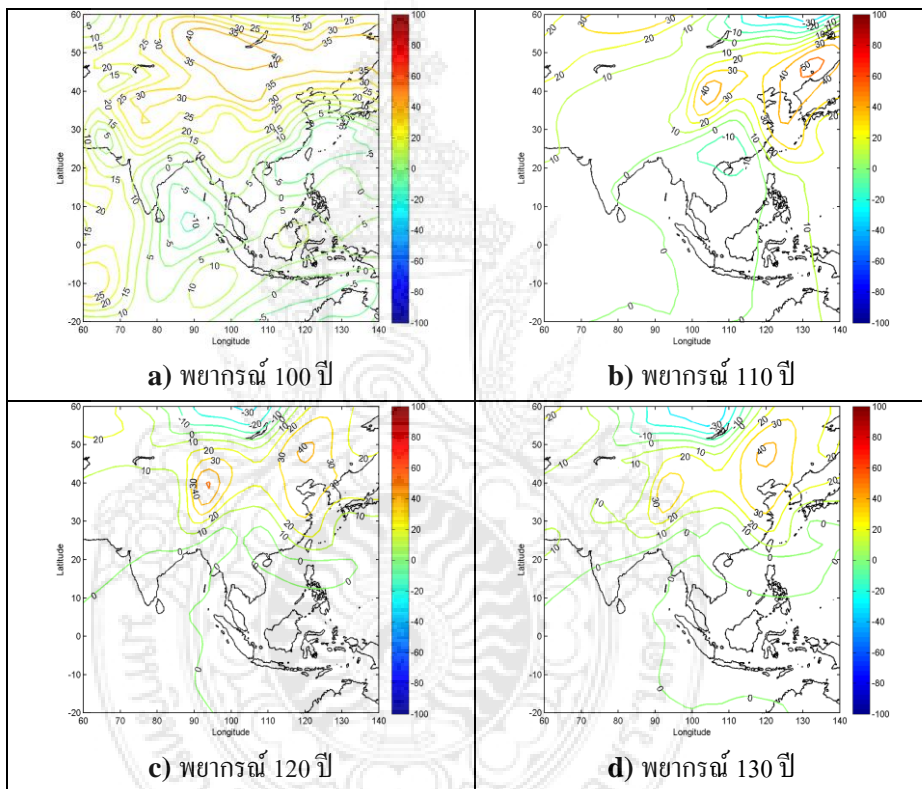


รูปที่ 4.3 ผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เดือนธันวาคม ในปี ค.ศ. 2072, 2082 และ 2092 จาก EdGCM a) CTRL และ b) PER2b.

จากรูป 4.3 พบว่า PER2b มีรูปแบบของเส้นความดันบรรยากาศ (geopotential height) เข้าใกล้ CTRL ในเดือนธันวาคม ค.ศ. 2082 แสดงว่าการพยากรณ์จาก PER2b เส้นความดันบรรยากาศ เริ่มที่จะเข้าสู่ค่าการพยากรณ์ของ CTRL ภายหลังจากการพยากรณ์ 120 ปี ภาคผนวก ข แสดงการพยากรณ์ของ CTRL และ PER2b ในเดือนธันวาคม ค.ศ. 2012- ค.ศ. 2062

4.3 ผลต่างของค่าความดันบรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

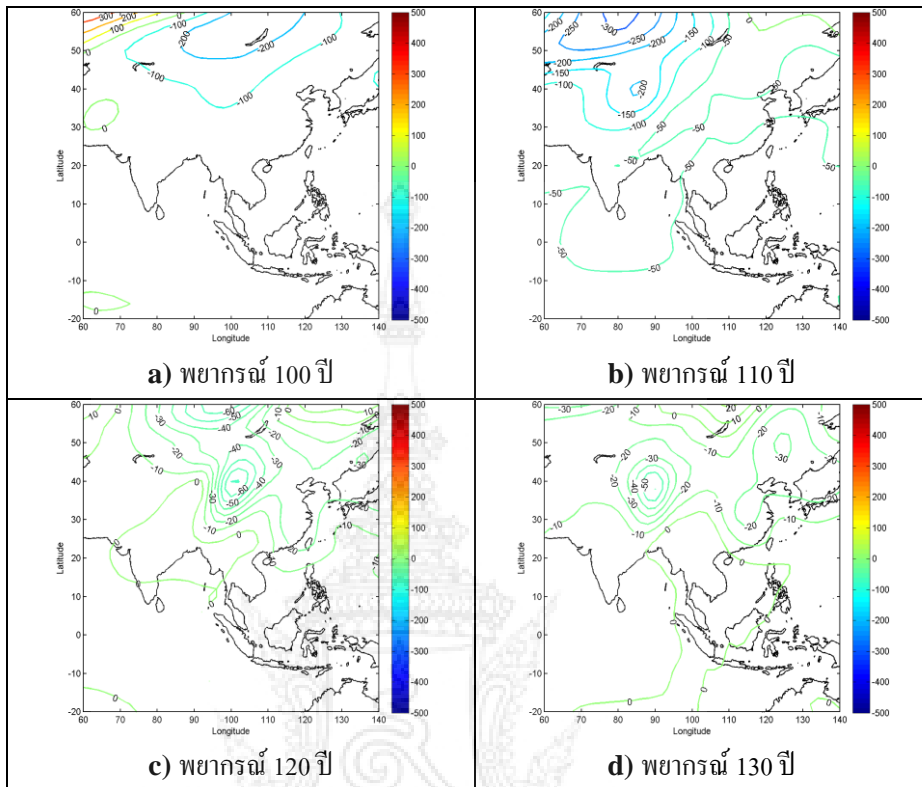
ผลต่างของค่าความดันบรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ระหว่างการประมวลผลการพยากรณ์ของแบบจำลองแบบควบคุม (CTRL) และการประมวลผลการพยากรณ์แบบก่อกวน (PER1a และ PER2b) ที่คำนวณในแต่ละเซลล์ในพื้นที่ที่ทำการพยากรณ์ พบว่าแบบจำลองภูมิอากาศโลกอ่อนไหวต่อการก่อกวนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ผลต่างของค่าความดันบรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 ผลต่างของค่าความดันบรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือระหว่างการประมวลผลการพยากรณ์ของแบบจำลองแบบควบคุม (CTRL) และการประมวลผลการพยากรณ์แบบก่อกวน (PER1a)

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าค่าของผลต่างของความดันบรรยากาศระหว่าง CTRL และ PER1a ของการพยากรณ์ภายใน 100 ปี มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 40 เมตร และการพยากรณ์จำนวน 110 ปี, 120 ปี และ 130 ปี มีค่าของผลต่างของระดับความดันบรรยากาศเท่ากับ 50, 40 และ 40 เมตร ตามลำดับ ดังนั้นจึง

พบว่าผลต่างของความดันบรรยากาศของ CTRL และ PER1a เริ่มมีค่าน้อยหรือใกล้เคียงกันหลังจากการพยากรณ์ภายหลังจาก 110 ปี

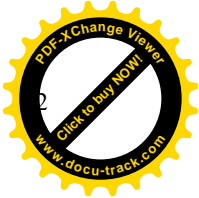
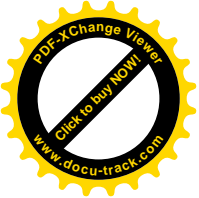


รูปที่ 4.5 ผลต่างของค่าความดันบรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือระหว่างการประมวลผลการพยากรณ์ของแบบจำลองแบบควบคุม (CTRL) และการประมวลผลการพยากรณ์แบบก่อกวน (PER2b)

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าค่าของผลต่างของความดันบรรยากาศระหว่าง CTRL และ PER2b ของการพยากรณ์ภายใน 100 ปี มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 200 เมตร และการพยากรณ์ภายใน 110 ปี, 120 ปี และ 130 ปี มีค่าของผลต่างของระดับความดันบรรยากาศเท่ากับ 200, 60 และ 50 เมตร ตามลำดับ และจะพบว่าผลต่างของความดันบรรยากาศของ CTRL และ PER2b เริ่มมีค่าน้อยหรือใกล้เคียงกันหลังจากการพยากรณ์ภายหลังจาก 120 ปี

4.4 ผลของการวัดประสิทธิภาพและความถูกต้องของการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

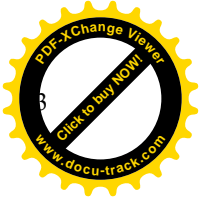
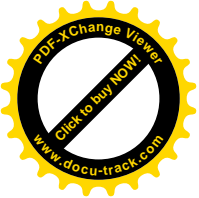
ค่าของตัวแบบที่ใช้ในการวัดความถูกต้องของการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือโดยใช้ตัวแบบวัดการพยากรณ์ ดังต่อไปนี้ คือ LE, FSLE, FTLE, LLE และ SLE โดยทำการวัดค่าของการ



พยากรณ์ระหว่าง CTRL กับค่าของการพยากรณ์แบบ PER1a (CO₂ เพิ่มขึ้น 1%) และ PER2b (CO₂ เพิ่มขึ้น 5%) โดยวัดความถูกต้องของการพยากรณ์บริเวณ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (ลองจิจูด 60° ตะวันออก ถึง 140° ตะวันออก และ แลตติจูด 20° ใต้ ถึง 60° เหนือ) ค่าของตัวแบบวัดความถูกต้องของการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าของตัวแบบวัดความถูกต้องของการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

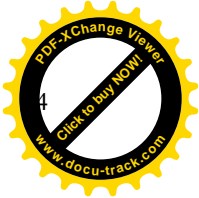
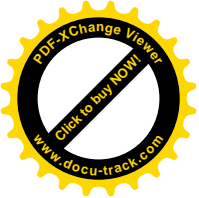
จำนวนปีที่พยากรณ์	ตัวแบบ	PER1a	PER2b
60	LE	1.4939	1.1643
	FSLE	1.6203	1.2004
	FTLE	0.7467	0.2365
	LLE	1.8731	1.2726
	SLE	2.1259	1.3448
70	LE	1.2523	1.3809
	FSLE	2.3787	2.4187
	FTLE	0.5051	1.4531
	LLE	2.6315	0.4892
	SLE	1.8843	1.5614
80	LE	2.6315	1.4892
	FSLE	2.7579	2.5253
	FTLE	2.8843	2.5614
	LLE	1.0107	0.5975
	SLE	3.2635	1.6697
90	LE	2.3899	2.7058
	FSLE	3.5163	1.7419
	FTLE	1.6427	0.4778
	LLE	0.7691	1.8141
	SLE	2.0219	1.8863
100	LE	2.1483	1.9224
	FSLE	1.2747	1.9585
	FTLE	1.4011	1.9946
	LLE	0.5275	2.0307
	SLE	1.7803	2.1029
110	LE	0.9067	1.2139
	FSLE	-2.0331	2.1751
	FTLE	2.1595	2.2112
	LLE	-1.2859	1.2473
	SLE	3.5387	2.3195
120	LE	1.8251	0.2581
	FSLE	2.9515	3.2942
	FTLE	-4.0779	4.3303
	LLE	-1.2043	-1.3664
	SLE	-3.4571	3.4386
130	LE	-2.4235	2.5722
	FSLE	-1.5499	-0.6083
	FTLE	-2.6763	1.6444
	LLE	-3.8027	-3.6805
	SLE	-4.0555	2.7527



จากตารางที่ 4.2 พบว่าการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 60 ปี ถึง 100 ปี ของ PER1a ค่าของตัวแบบวัดการพยากรณ์เป็นบวก แสดงว่าเส้นทางโคจรระหว่างความดันบรรยากาศของ CTRL และ PER1a ถู้ออกจากกัน แต่การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 110 ปี ถึง 130 ปี ของ PER1a ค่าของตัวแบบวัดการพยากรณ์เป็นลบ แสดงว่าเส้นทางโคจรระหว่างความดันบรรยากาศของ CTRL และ PER1a ถู้เข้าหากัน ดังนั้นการพยากรณ์โดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้นแบบก่อน PER1a เริ่มต้นลู้เข้าหาค่าการพยากรณ์โดยใช้เงื่อนไขควบคุม CTRL หลังจากการพยากรณ์เป็นเวลา 110 ปี นั่นคือแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM ไม่อ่อนไหวต่อค่าเงื่อนไขเริ่มต้นภายหลังจากการพยากรณ์ไปแล้ว 110 ปี นอกจากนี้การพยากรณ์ตั้งแต่ 60 ปี ถึง 110 ปี ของการพยากรณ์โดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้นแบบก่อน PER2b ค่าของตัวแบบวัดการพยากรณ์เป็นบวก แสดงว่าเส้นทางโคจรระหว่างความดันบรรยากาศของ CTRL และ PER2b ถู้ออกจากกัน แต่การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 120 ปี ของการพยากรณ์โดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้นแบบก่อน PER2b มีค่าเป็นลบ นั่นคือแบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM ไม่อ่อนไหวต่อค่าเงื่อนไขเริ่มต้นภายหลังจากการพยากรณ์ไปแล้ว 120 ปี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองภูมิอากาศโลกเหมาะสมกับการพยากรณ์ในช่วงเวลาที่ยาวนาน ผลของตัวแบบวัดการพยากรณ์ของมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือโดยใช้ตัวแปรความดันบรรยากาศที่ ระดับ 500 hPa หรือที่ความสูงที่ระดับ 5,500 เมตร สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปผลของตัวแบบวัดการพยากรณ์ที่สามารถใช้วัดประสิทธิภาพและความถูกต้องในการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

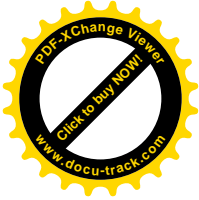
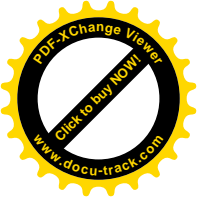
ตัวแบบวัดการพยากรณ์	ผลที่ได้
LE	สามารถวัดการลู้เข้าและลู้ออกระหว่างสองเส้นทางโคจรเพื่อวิเคราะห์การพยากรณ์ได้
FSLE	ไม่สามารถวัดการลู้เข้าและลู้ออกระหว่างสองเส้นทางโคจรเพื่อวิเคราะห์การพยากรณ์ได้ชัดเจน
FTLE	สามารถวัดการลู้เข้าและลู้ออกระหว่างสองเส้นทางโคจรเพื่อวิเคราะห์การพยากรณ์ได้
LLE	สามารถวัดการลู้เข้าและลู้ออกระหว่างสองเส้นทางโคจรเพื่อวิเคราะห์การพยากรณ์ได้
SLE	สามารถวัดการลู้เข้าและลู้ออกระหว่างสองเส้นทางโคจรเพื่อวิเคราะห์การพยากรณ์ได้



ตารางที่ 4.4 สรุปผลการวัดประสิทธิภาพและความถูกต้องในการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยวัดจากความดันบรรยากาศที่ระดับ 500 hPa

จำนวนปีที่พยากรณ์	ตัวแบบวัดการพยากรณ์	ค่าของตัวแบบวัดการพยากรณ์ PER1a และ PER2b
60-100	LE	มีค่าเป็นบวก ทั้งหมด
	FSLE	
	FTLE	
	LLE	
	SLE	
110	LE	มีค่าเป็นบวก ทั้งหมด
	FSLE	ค่าบวก 1/2
	FTLE	มีค่าเป็นบวก ทั้งหมด
	LLE	ค่าบวก 1/2
	SLE	มีค่าเป็นบวก ทั้งหมด
120	LE	มีค่าเป็นบวก ทั้งหมด
	FSLE	มีค่าเป็นบวก ทั้งหมด
	FTLE	ค่าบวก 1/2
	LLE	มีค่าเป็นลบ ทั้งหมด
	SLE	ค่าบวก 1/2
130	LE	ค่าลบ 1/2
	FSLE	มีค่าเป็นลบ ทั้งหมด
	FTLE	ค่าลบ 1/2
	LLE	มีค่าเป็นลบ ทั้งหมด
	SLE	ค่าลบ 1/2

จากตารางที่ 4.4 พบว่าการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือโดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM สามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องเป็นระยะเวลา 110 ปี



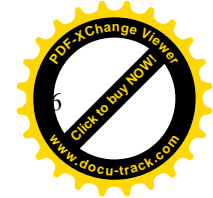
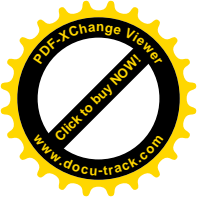
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะของการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือหรือมรสุมฤดูหนาวมีอิทธิพลอย่างมากต่อสภาพภูมิอากาศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคมของทุกปี การพยากรณ์มรสุมเพื่อให้ได้ผลการพยากรณ์ที่ถูกต้องนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรและแบบจำลองการพยากรณ์ที่สร้างขึ้น และที่สำคัญคือค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในการพยากรณ์ต้องมีค่าเข้าสู่ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นดั้งเดิม เพื่อจะได้เปรียบเทียบผลของการพยากรณ์ที่ถูกต้องหรือผลการพยากรณ์ที่แตกต่างกันไป มีวิธีการมากมายที่ใช้ในการวัดความถูกต้องของการพยากรณ์โดยใช้แบบจำลองการพยากรณ์แบบต่าง ๆ แต่จากการศึกษาพบว่าตัวแบบวัดความถูกต้องของการพยากรณ์จะมีพื้นฐานมาจากตัวแบบเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (Lyapunov exponent: LE) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและใช้ตัวแบบวัดการพยากรณ์ดังนี้ คือ เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟกำลังสอง (LE), เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟขนาดจำกัด (finite size Lyapunov exponent: FSLE), เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเวลาจำกัด (finite time Lyapunov exponent: FTLE) และเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟเฉพาะที่ (local Lyapunov exponent: LLE)

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือโดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก EdGCM และสร้างตัวแบบวัดประสิทธิภาพและความถูกต้องในการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือของแบบจำลองภูมิอากาศโลก เรียกว่าเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (Supremum Lyapunov exponent: SLE) เพื่อวัดความอ่อนไหวของแบบจำลองภูมิอากาศโลกเมื่อเปลี่ยนค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในการประมวลผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

การสร้างตัวแบบวัดประสิทธิภาพและความถูกต้องในการพยากรณ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลกในการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ คือ เลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (SLE) นั้น ใช้หลักการของเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟ (LE) เป็นพื้นฐานในการสร้างและพัฒนาของตัวแบบดังกล่าว โดยค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือมี 3 ลักษณะ คือ ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่แบบจำลองกำหนดขึ้น และค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณของตัวแปรคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) การประมวลผลการพยากรณ์โดยแบบจำลองภูมิอากาศโลกเริ่มต้น วันที่ 1 มกราคม ค.ศ.1958 และสิ้นสุดการประมวลผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ วันที่ 31 ธันวาคม ค.ศ.2100 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ คือ ข้อมูลในเดือนธันวาคม ค.ศ.2012 ถึง เดือนธันวาคม ค.ศ.2100 และตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ คือความดันบรรยากาศ (geopotential heights) ที่ระดับ 500 hPa ซึ่งเลขชี้กำลังไลยาปูนอฟซูพรีมัม (SLE) ที่สร้างขึ้นนั้นสามารถตรวจสอบประสิทธิภาพและ

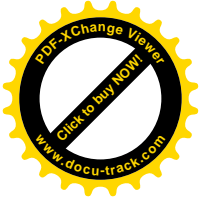
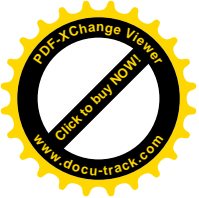


ความถูกต้องของผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือโดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลกได้ว่าแบบจำลองภูมิอากาศโลกสามารถพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือได้ล่วงหน้าประมาณ 110-120 ปี และในการประมวลผลการพยากรณ์ที่มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่แตกต่างกันจะทำให้ผลการพยากรณ์มีค่าแตกต่างกันออกไปด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการพยากรณ์มรสุมตะวันตกเฉียงใต้เพิ่มขึ้นระหว่างเดือนพฤษภาคม ถึง เดือนกันยายน
2. สร้างตัวแบบวัดประสิทธิภาพและความถูกต้องของผลการพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเพิ่มขึ้นที่สอดคล้องกับแบบจำลองภูมิอากาศโลก





บรรณานุกรม

Abarbanel, H.D.I., Brown, R. and Kennel, B., 1992, “Local Lyapunov Exponents Computed from Observed Data”, **Journal of Nonlinear Science**, Vol. 2, pp. 343-365.

Anderson, J.D. JR., 1995, **Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications**, Mc Graw-Hill, Inc, pp. 27-32.

Aurell, E., Boffetta, G., Crisanti, A., Paladin, G. and Vulpiani, A., 1997, “Predictability in the Large: An Extension of the Concept of Lyapunov Exponent”, **Journal of Physics A**, Vol. 30, No. 1, pp. 1-26.

Awadshesh, P. and Ramakrishna, R., 1999, “Characteristic Distributions of Finite Time Lyapunov Exponents”, **Physical Review E**, Vol. 60, No. 3, pp. 2761-2766.

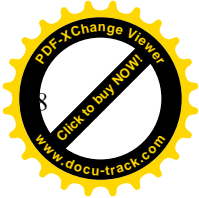
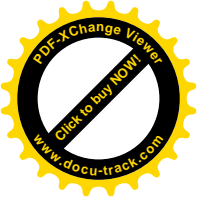
Basu, S., Foufoula-Georgiou, E. and Porté-Agel, F., 2002, “Predictability of Atmospheric Boundary Layer Flows as a Function of Scale”, **Geophysical Research Letters**, Vol. 29, No. 21, pp. 1-14.

Boffetta, G., Giuliani, P., Paladin, G. and Vulpiani, A., 1998, “An Extension of the Lyapunov Analysis for the Predictability Problem”, **Journal of the Atmospheric Sciences**, Vol. 55, No. 23, pp. 3409-3416.

Boffetta, G., Cencic, M., Falcionid, M. and Vulpiani, A., 2002, “Predictability: a Way to Characterize Complexity”, **Physics Reports**, Vol. 356, No. 26, pp. 367-474.

Columbia.edu, 1997, **Intergovernmental Panel on Climate Change The IPCC Data Distribution Centre** [Online], Available : <http://sedac.columbia.edu/ddc/sres/> [3 March 2014].

Columbia University, 2009, **EdGCM Quick Start Guide**, 4th ed., Dimension, 4D Inc., Columbia, pp. 9-18.



Chen, H. and Lin, Z., 2009, “The Potential Predictability of the South China Sea Summer Monsoon in a Dynamical Seasonal Prediction System”, **Atmospheric and Oceanic Science Letters**, Vol. 2, No. 5, pp.1-6.

Dechert, W.D. and Gencay, R., 2000, “Is the Largest Lyapunov Exponent Preserved in Embedded Dynamics?”, **Physics Letters A**, Vol. 276, pp. 59-64.

Ding, R. and Li, J., 2007, “Nonlinear Finite-time Lyapunov Exponent and Predictability”, **Physics Letters A**, Vol. 364, pp. 396-400.

Diebold, F.X. and Kilian, L., 2001, “Measuring Predictability: Theory and Macroeconomic Applications” **Journal of Applied Econometrics**, Vol. 16, pp. 657-669.

Donald, C. A., 2000, **Essential of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere**, 3rd ed., Brooks Cole, Pacific Grove, CA, pp.171-173.

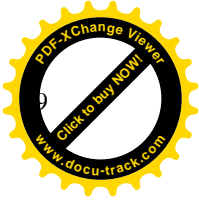
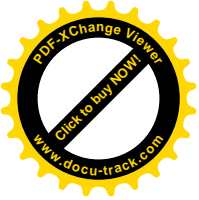
Eric, W., 1998, **Meteorology**, Mc Graw-Hill, Inc, USA, pp. 316.

Eckmann, J.-P., and Ruelle, D., 1985, “Ergodic Theory of Chaos and Strange Attractors”, **Reviews of Modern Physics**, No. 3, Vol. 51, pp. 617.

Eckhardt, B. and Yao, D., 1993, “Local Lyapunov Exponents in Chaotic Systems”, **Physica D**, Vol. 65, pp. 100-108.

Francesco, O., Vicente, F., Emilio, H.G. and Cristo'bal, L., 2004, “Mixing Structures in the Mediterranean Sea from Finite-Size Lyapunov Exponents”, **Geophysical Research Letters**, Vol. 31, pp. 1-4.

Guillaume, L., 2002, “Characterization of Finite-Time Lyapunov Exponents and Vectors in Two-dimensional Turbulenc”, **Chaos**, Vol. 12, No. 3, pp. 688-698.



Hansen, J., Russell, G., Rind, D., Stone, P., Lacis, A., Lebedeff, S., Ruedy, R. and Travis, L., 1983, "Efficient Three-Dimensional Global Models for Climate Studies: Models I and II" **Monthly Weather Review**, Vol. 111, No. 4, pp. 609-662.

Holton, J. R., 2004, **Introduction to Dynamic Meteorology**, 4th ed., Elsevier Inc., UK., pp. 188-219.

Ismael, H.C., Cristóbal, L., Emilio, H.G. and Antonio, T., 2010, "How Reliable are Finite-Size Lyapunov Exponents for the Assessment of Ocean Dynamics?", **Atmospheric and Oceanic Physics**, Vol. 1, pp.1-30.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2009, **The IPCC data Distribution Centre** [Online], Available: http://www.ipcc-data.org/sres/ddc_sres_emissions.html#pict [2014, January 23].

Ian, T.J. and David, B.S., 2003, **Forecast Verification**, John Wiley & Sons Ltd, England, pp. 101-115.

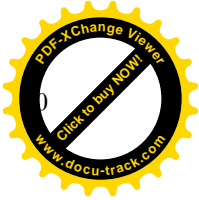
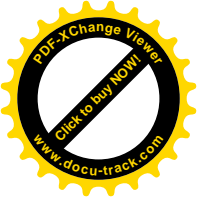
Krishnamurthy, V., 2010, "Predictability of South Asian Monsoon Circulation in the NCEP Climate Forecast System", **COLA Technical Report 301 August**, pp.1-19.

Liu, H.-F., Dai, Z.-H., Li, W.-F., and Yu, Z.-H., 2005, "Noise Robust Estimates of the Largest Lyapunov Exponent", **Physics Letters A**, Elsevier, Vol. 341, pp. 119-127.

Mark, A.C. and Ana, M., 2006, **EdGCM Climate Modeling Workshop**, pp. 11-13.

McCue, L. and Troesch, A., 2004, "Use of Lyapunov Exponents to Predict Chaotic Vessel Motions", **book google.com**, pp. 156-171.

McCue, L., 2005, "Applications of Finite-Time Lyapunov Exponents to the Study of Capsize in Beam Seas", In: 8th **International Ship Stability Workshop**, pp. 1-9.



Ovidio, F., Jordi, I.F., Cristóbal, L., Emilio, H.G. and Emilio, G.L., 2008, “Comparison between Eulerian Diagnostics and Finite-Size Lyapunov Exponents Computed from Altimetry in the Algerian Basin”, Elsevier, pp. 1-29.

Palmer, T.N., 1999, “Predicting Uncertainty in Forecasts of Weather and Climate”, **ECMWF Technical Memorandum**, No. 294, pp. 1.

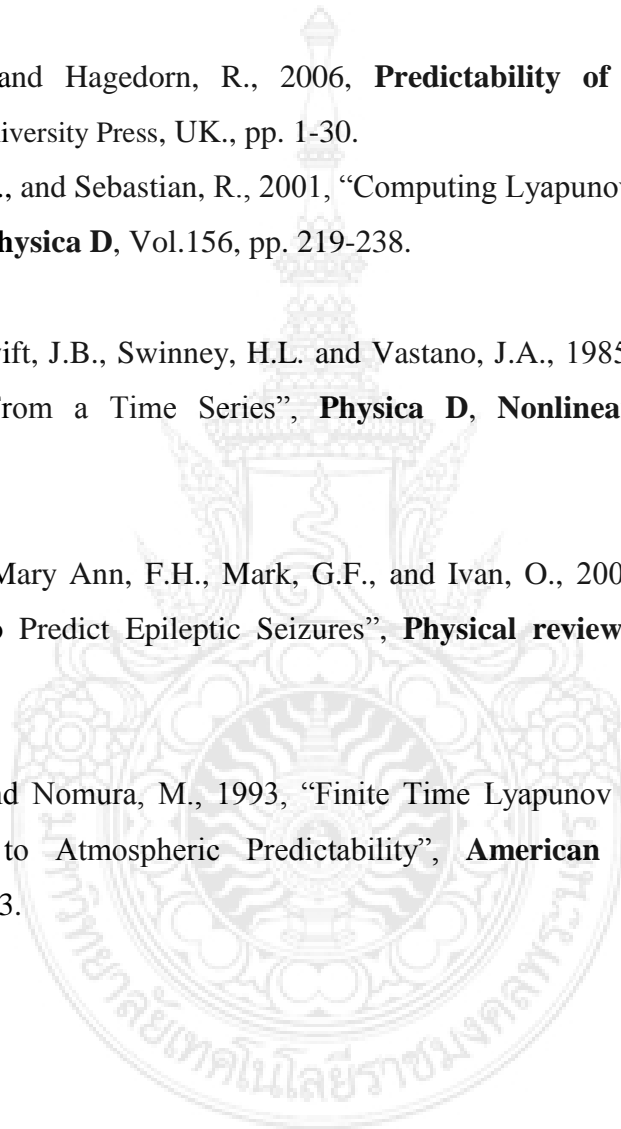
Palmer, T. and Hagedorn, R., 2006, **Predictability of Weather and Climate**, Cambridge University Press, UK., pp. 1-30.

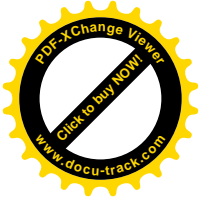
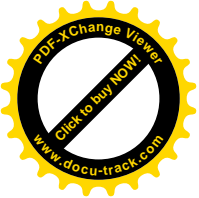
Thomas, J. B., and Sebastian, R., 2001, “Computing Lyapunov Exponents on a Stiefel Manifold”, **Physica D**, Vol.156, pp. 219-238.

Wolf, A., Swift, J.B., Swinney, H.L. and Vastano, J.A., 1985, “Determining Lyapunov Exponents From a Time Series”, **Physica D, Nonlinear Phenomena**, Vol. 16, pp. 285-371.

Ying, C.L., Mary Ann, F.H., Mark, G.F., and Ivan, O., 2003, “Inability of Lyapunov Exponents to Predict Epileptic Seizures”, **Physical review letters**, Vol. 91, No. 6, pp. 1-4.

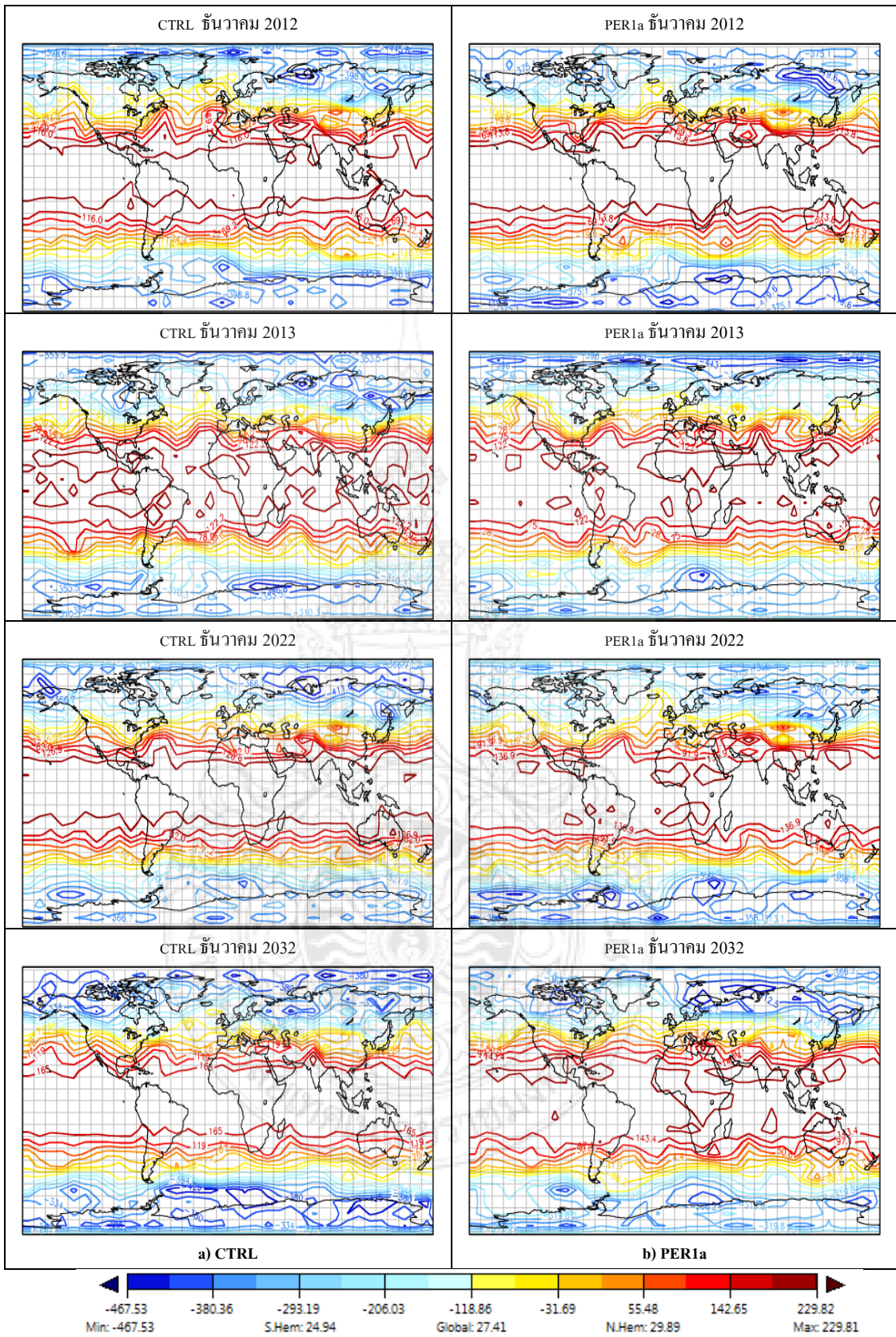
Yoden, S. and Nomura, M., 1993, “Finite Time Lyapunov Stability Analysis and Its Application to Atmospheric Predictability”, **American Meteorological Society**, pp. 1531-1543.



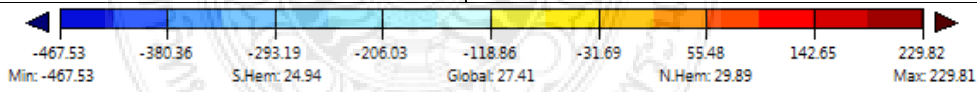
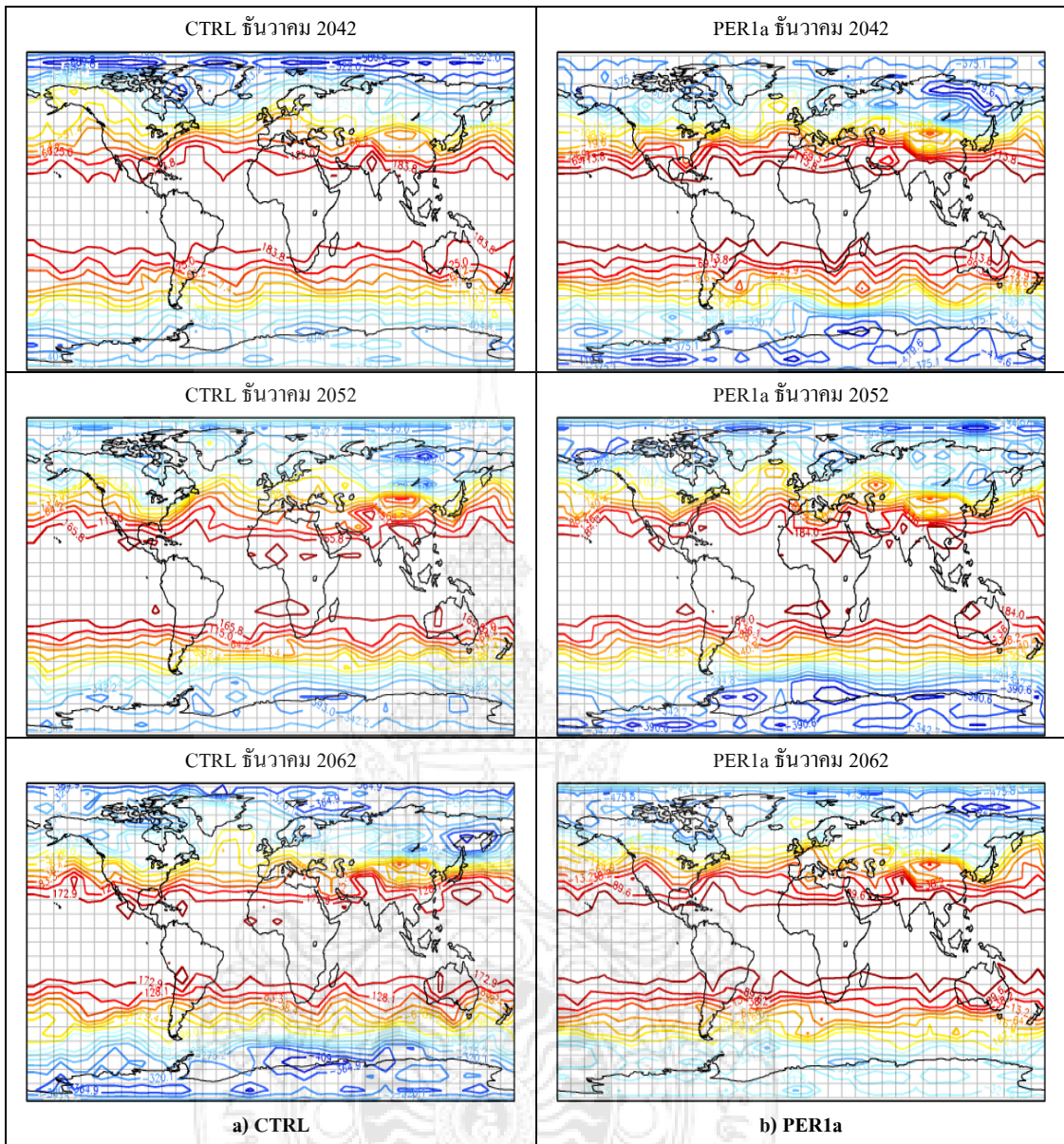


ภาคผนวก ก
การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือด้วยแบบจำลองภูมิอากาศโลก (PER1a)
(The EdGCM Forecasts)

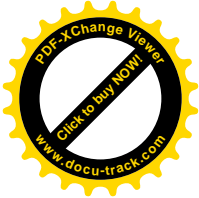
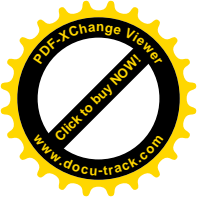




รูปที่ ๓ การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือของแบบจำลองภูมิอากาศโลก จากความดันบรรยากาศ geopotential height (m), a) CTRL และ b) PER1a.

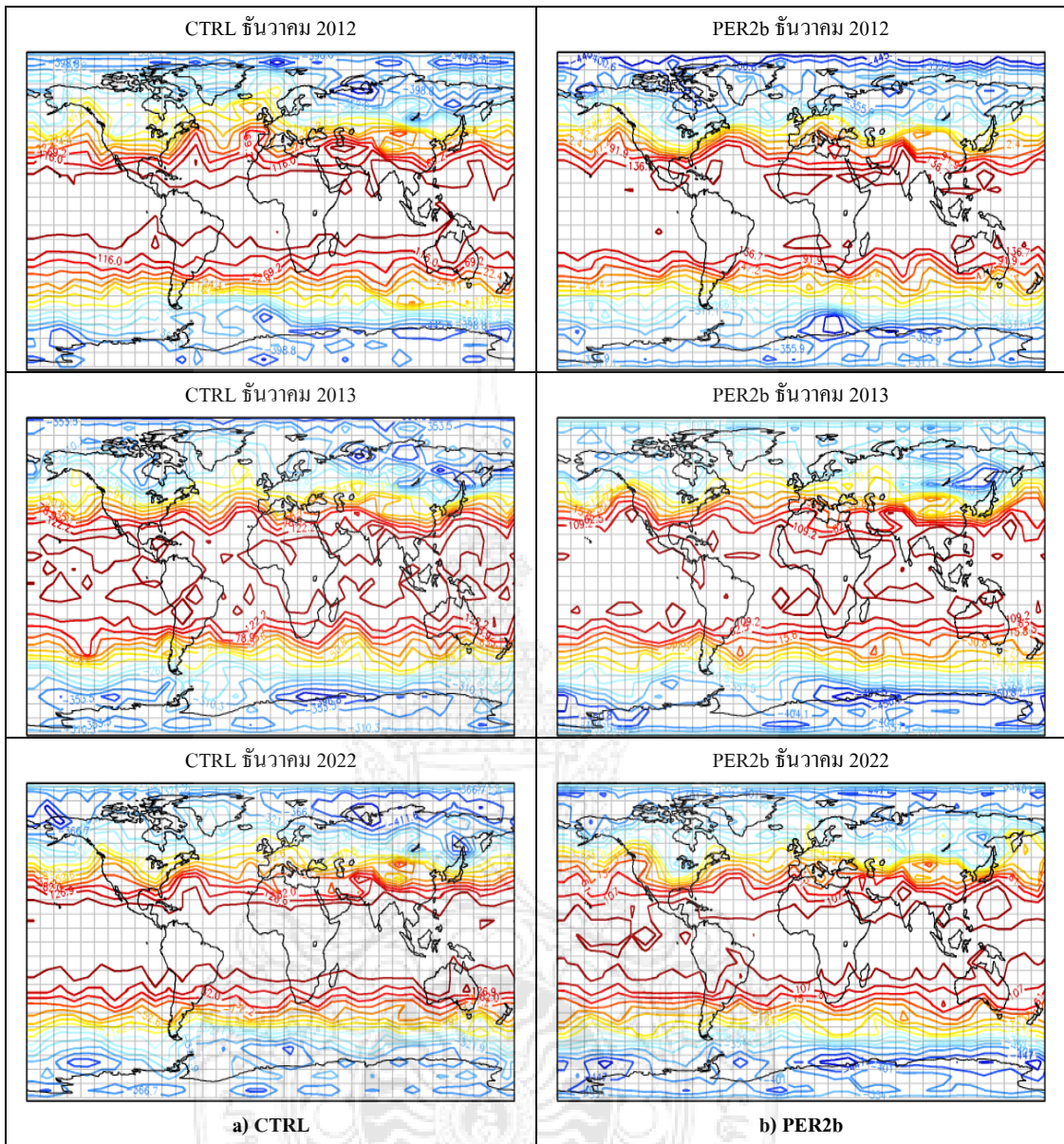


รูปที่ ๓ การพยากรณ์รสมุมตะวันออกเฉียงเหนือของแบบจำลองภูมิอากาศโลก จากความดันบรรยากาศ geopotential height (m), a) CTRL และ b) PER1a.

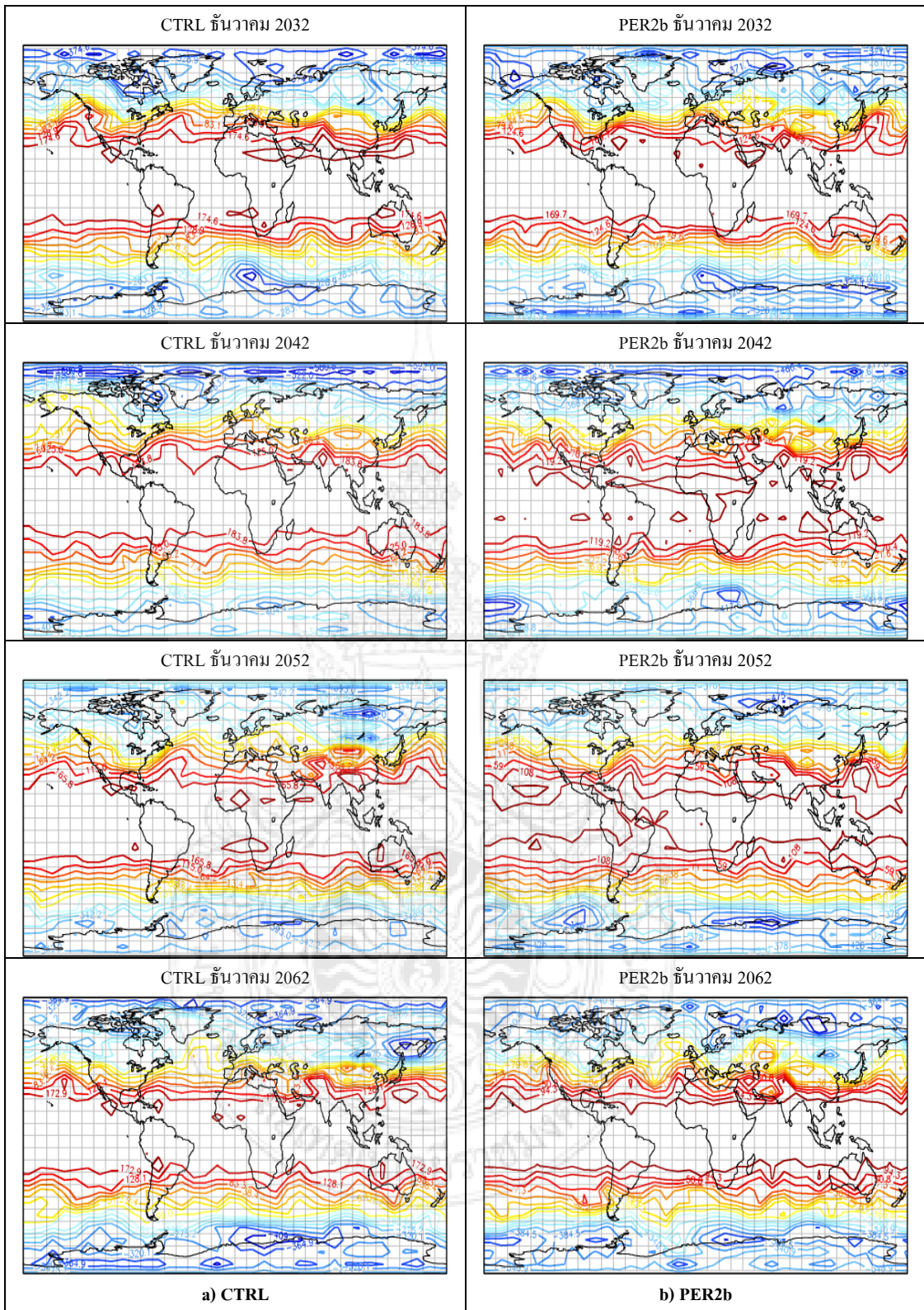


ภาคผนวก ข
การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือด้วยแบบจำลองภูมิอากาศโลก (PER2b)
(The EdGCM Forecasts)

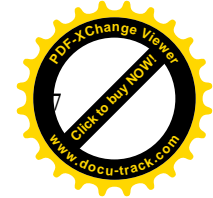
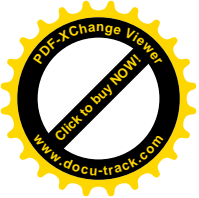




รูปที่ ข การพยากรณ์รศุมตะวันออกเฉียงเหนือของแบบจำลองภูมิอากาศโลก จากความดันบรรยากาศ geopotential height (m), a) CTRL และ b) PER2b



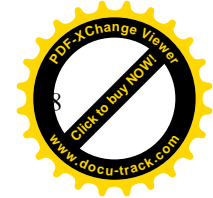
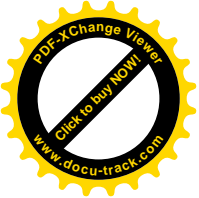
รูปที่ ๓ การพยากรณ์มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือของแบบจำลองภูมิอากาศโลก จากความดันบรรยากาศ geopotential height (m), a) CTRL และ b) PER2b



ประวัติคณะผู้วิจัย

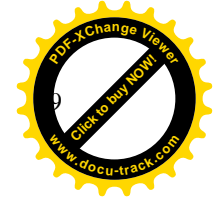
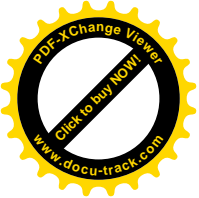
ประวัติผู้วิจัยคนที่ 1

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ดร.สุนิสา สายอุปราช
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Dr.Sunisa Saiuparad
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 7202 00341 42 0
- ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
- หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
เลขที่ 1381 ถ.ประชาราษฎร์สาย 1 แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์: 02-9132424 ต่อ 197
โทรสาร: 02-9132424 ต่อ 136
E-mail: sunisa.sa@rmutp.ac.th
- ประวัติการศึกษา
2554 ปริญญาคุชฎีบัณฑิต (ปร.ค.) สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2550 ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (คอ.ม.) สาขาวิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2548 วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาคณิตศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
สาขาวิชา Mathematical Model
สาขาวิชา Meteorological
- ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุ
สถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัยหัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วม
วิจัยในแต่ละผลงานวิจัย
7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : -
7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : -
7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : -
7.4 งานวิจัยที่กำลังทำ :
- สภาวะฝนหนักและฝนแล้งภายใต้ภาวะโลกร้อน



ประวัติผู้วิจัยคนที่ 2

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวชานี สุภิรัตน์
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss. Chawanee Suphirat
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 7097 00014 54 0
- ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
- หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
เลขที่ 1381 ถ.ประชาราษฎร์สาย 1 แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์: 02-9132424 ต่อ 197
โทรสาร: 02-9132424 ต่อ 156
E-mail: chawanee.s@rmutp.ac.th
- ประวัติการศึกษา
2552 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาสถิติ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2549 ป.บัณฑิต สาขาการสอนวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล
2548 วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาคณิตศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
 - การใช้โปรแกรมทางสถิติ เช่น SPSS , SAS
 - Experimental Design
- ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัยหัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย
 - ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : -
 - หัวหน้าโครงการวิจัย : -
 - งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : -
 - งานวิจัยที่กำลังทำ :



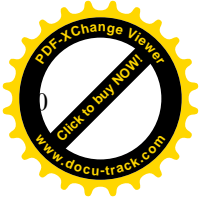
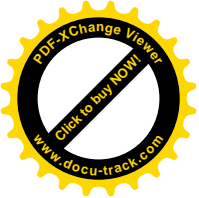
- ความพึงพอใจของนักศึกษา มทร.พระนคร ที่มีต่อการบริหารงานด้านกิจการนักศึกษา
- การศึกษาลักษณะความเป็นพลเมืองดีของนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล พระนคร

ประวัติผู้วิจัยคนที่ 3

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวปิยธิดา รุจะศิริ
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Piyatida Rujasiri
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 5 7706 00049 42 1
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
เลขที่ 1381 ถ.ประชากรศาสตร์สาย 1 แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์: 02-9132424 ต่อ 197
โทรสาร: 02-9132424 ต่อ 156
E-mail: piyatida.r@rmutp.ac.th

5. ประวัติการศึกษา
 - 2552 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาสถิติ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 - 2549 ป.บัณฑิต สาขาการสอนวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล
 - 2548 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาคณิตศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
 1. การใช้โปรแกรมทางสถิติ เช่น SPSS , MATLAB
 2. Multivariate Analysis
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศโดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัยหัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย
 - 7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : -



7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย :-

7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว :-

7.4 งานวิจัยที่กำลังทำ :

- ความพึงพอใจของนักศึกษา มทร.พระนคร ที่มีต่อการบริหารงานด้านกิจการ
นักศึกษา

- การศึกษาลักษณะความเป็นพลเมืองดีของนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลพระนคร

