

## การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ทิศทางลม ที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดนครศรีธรรมราช

วารางคณา เรียนสุทธิ

สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง พัทลุง 93210

E-mail: warang27@gmail.com

รับบทความ: 4 กันยายน 2562 แก้ไขบทความ: 17 ธันวาคม 2562 ยอมรับตีพิมพ์: 14 มกราคม 2563

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ทิศทางลม 5 วิธี คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแตรม และวิธีการพยากรณ์รวม อนุกรมเวลาทิศทางลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จากจังหวัดนครศรีธรรมราชได้มาจากศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคมถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 จำนวน 1,465 ค่า สำหรับการเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์จะใช้เกณฑ์ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยและเกณฑ์รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่าวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโฮลต์มีความเหมาะสมมากที่สุด

**คำสำคัญ:** ทิศทางลม ตัวแบบพยากรณ์ บ็อกซ์-เจนกินส์ การทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลัง  
การพยากรณ์รวม

## A Comparison of Forecasting Methods for Wind Direction at an Altitude of 120 Meters in Nakhon Si Thammarat Province

Warangkhana Riansut

Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, Thaksin University,

Phatthalung Campus, Phatthalung 93210, Thailand

E-mail: warang27@gmail.com

Received: 4 September 2019 Revised: 17 December 2019 Accepted: 14 January 2020

### Abstract

This research aimed to compare five methods of forecasting wind direction: Box–Jenkins method, Holt’s exponential smoothing method, Brown’s exponential smoothing method, damped trend exponential smoothing method, and combination forecasting method. Time series of hourly wind direction at an altitude of 120 meters in Nakhon Si Thammarat province were gathered from research center in energy and environment, Thaksin University during 1 May to 1 July 2015 of 1,465 observations. The criteria of the lowest mean absolute percentage error and root mean squared error were used for comparing the suitability of the forecasting model. The study indicated that Holt’s exponential smoothing method was the most appropriate.

**Keywords:** Wind direction, Forecasting model, Box–Jenkins, Exponential smoothing, Combined forecasting

### บทนำ

พลังงานลมมีคุณลักษณะที่มีความแปรปรวนสูง เพราะพฤติกรรมของลมที่ไม่ต่อเนื่อง และมีการเปลี่ยนแปลงสูง ทำให้การผลิตไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีลักษณะแปรปรวนตามพฤติกรรมของลม ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมผลิตไฟฟ้า ดังนั้นการคาดการณ์หน่วยผลิตหรือการพยากรณ์หน่วยผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะ

ช่วยในการวางแผนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับความต้องการใช้ไฟฟ้าไม่สูงและไม่ต่ำจนเกินไป อย่างไรก็ตาม การพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะมีความถูกต้องแม่นยำขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การพยากรณ์ลมในพื้นที่ของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงและมีความถี่เชิงเวลาที่ละเอียด เช่น รายนาทิจหรือรายชั่วโมง ปัจจุบันมัก

อาศัยแบบจำลองการไหลของลมแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการพยากรณ์ความเร็วและทิศทางลม นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิคการพยากรณ์ต่าง ๆ เช่น เทคนิคการสร้างตัวแบบพยากรณ์ทางสถิติ เพื่อช่วยให้ผลการพยากรณ์มีความถูกต้องแม่นยำสูงขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่น่าสนใจที่ควรมีการศึกษาการพยากรณ์ทิศทางลม โดยการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยให้ความสนใจกับการพยากรณ์ทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดนครศรีธรรมราช จากการศึกษางานวิจัยอื่นๆ พบว่า Keerativibool *et al.* (2011) ได้พยากรณ์อัตราเร็วลมราย 3 ชั่วโมง ที่ระดับความสูง 30 เมตร ตามแนวชายฝั่ง อำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา ผลการวิจัยพบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่ดีกว่าวิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา Mauch (2012) ได้ศึกษาการจัดการความไม่แน่นอนของการพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในระบบกริด ปัจจุบันความไม่แน่นอนของการพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้ามีค่ามากกว่าความไม่แน่นอนของการพยากรณ์ลม วิธีการหนึ่งที่จะลดความไม่แน่นอนดังกล่าวคือการรวมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเข้ากับระบบเก็บสะสมพลังงาน Bielecki *et al.* (2014) ศึกษาคุณลักษณะทางสถิติของความผิดพลาดในการพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ซึ่งการพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเป็นการผสมผสานกันระหว่างเทคนิคทางฟิสิกส์และสถิติ โดยเป็นอัลกอริธึมที่มีความซับซ้อนในการพยากรณ์และลดความผิดพลาด ความผิดพลาดดังกล่าวมักเกี่ยวข้องกับลมและเส้นโค้งกำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ Vasilji *et al.* (2015) ได้พัฒนาแบบจำลองกำลังผลิตไฟฟ้า โดยอาศัยข้อมูลลมตรวจวัด การแจกแจงไวบูล (Wei-

bull distribution) เส้นโค้งกำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และกำลังการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองทางสถิติสามารถใช้ในการจำลองความผิดพลาดในการพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้ารายปีของกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ Promdee (2016) ศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยกังหันลมชาโวเนียสแบบช่องลมคู่กังหันลม ผลการศึกษาพบว่า กังหันลมชาโวเนียสที่นำเสนอสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้ในช่วง 6.3–9.5 โวลต์และผลิตได้เพิ่มขึ้น 5.65% เมื่อติดตั้งช่องลมคู่ที่มุม 30 องศา เทียบกับทิศทางกระแสลม ณ ความเร็วลม 4.68–6.41 เมตรต่อวินาที และที่ตำแหน่งห่างจากกระแสลมระยะ 20–60 เซนติเมตร สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้สูงขึ้นเฉลี่ย 45–68% เมื่อเปรียบเทียบกับกังหันลมชาโวเนียสแบบเดิมที่ไม่มีช่องลมกังหันลม Thongyai and Assawamartbunlue (2017) ศึกษาการจำลองแผนที่ความเร็วลมจังหวัดจันทบุรีและจังหวัดตราดเพื่อเสาะหาแหล่งพื้นที่ที่มีศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยกังหันลม โดยใช้ WindSim ซึ่งเป็นแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาประยุกต์ใช้จำลองแผนที่ความเร็วลม ผลจากการจำลองแสดงแหล่งความเร็วลมที่มีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าพบพื้นที่ 3 แหล่งที่มีศักยภาพความเร็วลมเหมาะสมกับกังหันลมความเร็วต่ำเฉลี่ยรายปี 5–7 เมตร/วินาที คือ พื้นที่เขาสอยดาวจังหวัดจันทบุรี พื้นที่บริเวณเขาศิขุภูกงจังหวัดจันทบุรี และพื้นที่เกาะช้าง จังหวัดตราด ผลการสอบเทียบด้วยข้อมูลจากเสาดตรวจวัดพบว่า ค่าการจำลองมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า ยังไม่มีเคยมีการศึกษาพยากรณ์ทิศทางลมที่ระดับความ

สูง 120 เมตร จังหวัดนครศรีธรรมราช อีกทั้งการพยากรณ์ทิศทางการลมที่ระดับความสูง 120 เมตร เป็นสิ่งที่มีประโยชน์ เนื่องจากเป็นระดับความสูงของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ในปัจจุบันที่มีหอคอยสูงระดับ 120 เมตร ดังนั้นการศึกษารังนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ทิศทางการลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยใช้วิธีการทางสถิติทั้งหมด 5 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโฮลด์ วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแฉก และวิธีการพยากรณ์รวม เนื่องจากลักษณะการเคลื่อนไหวของทิศทางการลมดังภาพที่ 1 ในผลการวิจัยและอภิปรายผล พบว่า ทิศทางการลมมีแนวโน้มทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง แต่ไม่น่าจะมีความแปรผันตามฤดูกาล นอกเหนือจากการพิจารณากราฟของอนุกรมเวลาเทียบกับเวลาแล้ว ผู้วิจัยยังได้ตรวจสอบอนุกรมเวลาชุดนี้โดยการทดสอบสมมุติฐานซึ่งพบว่า อนุกรมเวลามีส่วนประกอบของแนวโน้มแต่ไม่มีความผันแปรตามฤดูกาลจริง ดังแสดงผลการทดสอบสมมุติฐานในผลการวิจัยและอภิปรายผล ซึ่งวิธีการพยากรณ์ทั้ง 5 วิธีดังกล่าวมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีส่วนประกอบของแนวโน้ม แต่ไม่มีความผันแปรตามฤดูกาล หลังจากที่ได้ตัวแบบพยากรณ์แล้วจะคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมมากที่สุด 1 ตัวแบบโดยใช้เกณฑ์ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (mean absolute percentage error: MAPE) และเกณฑ์รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean squared error: RMSE) ที่ต่ำที่สุด เพื่อให้ได้ตัวแบบพยากรณ์สำหรับใช้ในการพยากรณ์ทิศทางการลมที่ระดับความสูง 120 เมตร

จังหวัดนครศรีธรรมราช ในอนาคตต่อไป

### วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยดำเนินการสร้างตัวแบบพยากรณ์ทิศทางการลม (องศา) โดยใช้โปรแกรม SPSS ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ เป็นทิศทางการลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดนครศรีธรรมราช ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2524 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 302,377 ค่า เนื่องด้วยข้อจำกัดของงบประมาณการเก็บรวบรวมข้อมูล ทำให้การศึกษารังนี้ไม่สามารถนำทิศทางการลมที่เป็นปัจจุบันมาวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยเชื่อว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของทิศทางการลมในอดีตและในปัจจุบันไม่ได้มีความแตกต่างกันมากนัก ผู้วิจัยได้คัดเลือกข้อมูลทิศทางการลมมาศึกษาตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 1,465 ค่า เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มิลักษณะของอนุกรมเวลาเหมาะสมกับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ อีกทั้งยังเป็นช่วงเวลาที่ไม่ใกล้เคียงกับข้อมูลปัจจุบันมากที่สุด ผู้วิจัยได้นำข้อมูลจำนวน 1,465 ค่า มาแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 29 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 23.00 น. จำนวน 1,440 ค่า สำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ และชุดที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 25 ค่า สำหรับการเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ MAPE และ RMSE ที่ต่ำที่สุด

วิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ที่ศึกษา แสดงรายละเอียดดังหัวข้อที่ 1 สำหรับหัวข้อที่ 2 จะเป็นการเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ โดยพิจารณาจากเกณฑ์ MAPE และ RMSE ที่ต่ำที่สุด สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ แสดงดังนี้

$Y_t$  แทนทิศทางการ ณ เวลา  $t$

$\varepsilon_t$  แทนอนุกรมเวลาของความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ทิศทางการ ณ เวลา  $t$

$\hat{Y}_t$  และ  $\hat{Y}_{t+m}$  แทนค่าพยากรณ์ทิศทางการ ณ เวลา  $t$  และเวลา  $t + m$  ตามลำดับ โดยที่  $m$  แทนจำนวนช่วงเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปข้างหน้า

$\beta_0$  และ  $\beta_1$  แทนพารามิเตอร์ของตัวแบบแสดงระยะตัดแกนและความชันของแนวโน้ม ตามลำดับ

$a_t$  และ  $b_t$  แทนค่าประมาณของพารามิเตอร์  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  ณ เวลา  $t$  ตามลำดับ

$\alpha$ ,  $\gamma$  และ  $\phi$  แทนค่าคงตัวการทำให้เรียบ โดยที่  $0 < \alpha < 1$ ,  $0 < \gamma < 1$  และ  $0 < \phi < 1$

$t$  แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง  $n_1$  เมื่อ  $n_1$  แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดที่ 1

## 1. วิธีการพยากรณ์

### 1.1 วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins method)

ตัวแบบของวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ คือ Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average: SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)<sub>s</sub> แสดงดังนี้ (Box et al., 1994)

$$\phi_p(B)\Phi_P(B^s)(1-B)^d(1-B^s)^D Y_t = \delta + \theta_q(B)\Theta_Q(B^s)\varepsilon_t \quad \dots (1)$$

เมื่อ  $\delta = \mu\phi_p(B)\Phi_P(B^s)$  แทนค่าคงที่ โดยที่  $\mu$  แทนค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาที่คงที่ (stationary)

$\phi_p(B) = 1 - \phi_1B - \phi_2B^2 - \dots - \phi_pB^p$  แทนตัวดำเนินการสหสัมพันธ์ในตัวเองแบบไม่มีฤดูกาล

อันดับที่  $p$  (Non-Seasonal Autoregressive Operator of Order  $p$ : AR(p))

$$\Phi_p(B^s) = 1 - \phi_1B^s - \phi_2B^{2s} - \dots - \phi_pB^{ps}$$

แทนตัวดำเนินการสหสัมพันธ์ในตัวเองแบบมีฤดูกาลอันดับที่  $P$  (Seasonal Autoregressive Operator of Order  $P$ : SAR(P))

$$\Theta_q(B) = 1 - \theta_1B - \theta_2B^2 - \dots - \theta_qB^q$$

แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบไม่มีฤดูกาลอันดับที่  $q$  (Non-Seasonal Moving Average Operator of Order  $q$ : MA(q))

$$\Theta_Q(B^s) = 1 - \theta_1B^s - \theta_2B^{2s} - \dots - \theta_QB^{Qs}$$

แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบมีฤดูกาลอันดับที่  $Q$  (Seasonal Moving Average Operator of Order  $Q$ : SMA(Q))

$s$  แทนจำนวนฤดูกาล

$d$  และ  $D$  แทนลำดับที่ของการหาผลต่างและผลต่างฤดูกาล ตามลำดับ

$B$  แทนตัวดำเนินการถอยหลัง (Backward Operator) โดยที่  $B^s Y_t = Y_{t-s}$

### 1.2 วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโฮลต์ (Holt's exponential smoothing method)

ตัวแบบและตัวแบบพยากรณ์ของวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโฮลต์แสดงดังนี้ (Ket-iam, 2005)

$$\text{ตัวแบบ: } Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t,$$

$$\text{ตัวแบบพยากรณ์: } \hat{Y}_{t+m} = a_t + b_t(m) \quad \dots (2)$$

$$\text{เมื่อ } a_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}),$$

$$b_t = \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1 - \gamma)b_{t-1}$$

### 1.3 วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของบราวน์ (Brown's exponential smoothing method)

ตัวแบบและตัวแบบพยากรณ์ของวิธีการ

ทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของบราวน์แสดงดังนี้ (Manmin, 2006)

$$\text{ตัวแบบ: } Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t ,$$

$$\text{ตัวแบบพยากรณ์: } \hat{Y}_{t+m} = a_t + b_t \left[ (m-1) + \frac{1}{\alpha} \right] \quad \text{--- (3)}$$

$$\text{เมื่อ } a_t = \alpha Y_t + (1-\alpha)a_{t-1} ,$$

$$b_t = \alpha(a_t - a_{t-1}) + (1-\alpha)b_{t-1}$$

1.4 วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม (Damped trend exponential smoothing method)

ตัวแบบและตัวแบบพยากรณ์ของวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดมแสดงดังนี้ (Manmin, 2006)

$$\text{ตัวแบบ: } Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t ,$$

$$\text{ตัวแบบพยากรณ์: } \hat{Y}_{t+m} = a_t + b_t \sum_{i=1}^m \phi^i \quad \text{--- (4)}$$

$$\text{เมื่อ } a_t = \alpha Y_t + (1-\alpha)(a_{t-1} + \phi b_{t-1}) ,$$

$$b_t = \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)\phi b_{t-1}$$

1.5 วิธีการพยากรณ์รวม (Combination forecasting method)

ตัวแบบและตัวแบบพยากรณ์ของวิธีการพยากรณ์รวมแสดงดังนี้ (Manmin, 2006)

$$\text{ตัวแบบ: } Y_t = \sum_{i=1}^k w_i \hat{Y}_{it} + \varepsilon_t ,$$

$$\text{ตัวแบบพยากรณ์: } \hat{Y}_t = \sum_{i=1}^k w_i \hat{Y}_{it} \quad \text{--- (5)}$$

เมื่อ  $\hat{Y}_{it}$  แทนค่าพยากรณ์ ณ เวลา  $t$  จากวิธีการพยากรณ์เดี่ยวที่  $i$

$w_i$  แทนค่าถ่วงน้ำหนักที่มีสูตรการคำนวณคือ  $w_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^k b_i} \quad \text{--- (6)}$

$b_i$  แทนค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method) จาก

วิธีการพยากรณ์เดี่ยวที่  $i$  (Montgomery *et al.*, 2006)

$k$  แทนจำนวนวิธีการพยากรณ์เดี่ยว

2. การเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์

การเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดนครศรีธรรมราช ชุดที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 25 ค่า กับค่าพยากรณ์จากวิธีการทางสถิติทั้ง 5 วิธี โดยการคำนวณค่า MAPE และ RMSE ซึ่งถ้าพบว่าตัวแบบพยากรณ์ใดที่ให้ค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด จะจัดเป็นตัวแบบที่มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดนี้มากที่สุด เนื่องจากให้ค่าพยากรณ์ที่มีความแตกต่างกับข้อมูลจริงน้อยที่สุด เกณฑ์ MAPE และ RMSE แสดงดังนี้ (Ket-iam, 2005; Manmin, 2006) โดยค่า MAPE ควรมีค่าไม่เกินร้อยละ 15 ตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นจึงมีความแม่นยำเพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้ได้สำหรับค่า RMSE มีหน่วยตามข้อมูลจริง ดังนั้นค่า RMSE ควรมีค่าต่ำกว่าข้อมูลจริงมาก ๆ อย่างไรก็ตามหากข้อมูลชุดที่ 2 มีความผันผวนสูงอาจส่งผลให้ค่า MAPE และ RMSE มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นผู้วิจัยควรพิจารณาความเหมาะสมของค่า MAPE และ RMSE ของข้อมูลชุดที่ 1 ประกอบด้วย

$$\text{MAPE} = \frac{100}{n_2} \sum_{u=1}^{n_2} \left| \frac{e_u}{Y_u} \right| \quad \text{--- (7)}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n_2} \sum_{u=1}^{n_2} e_u^2} \quad \text{--- (8)}$$

เมื่อ  $e_u = Y_u - \hat{Y}_u$  แทนความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ทิศทางลม ณ เวลา  $t$

u แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง  $n_2$  โดยที่  $n_2$  แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดที่ 2

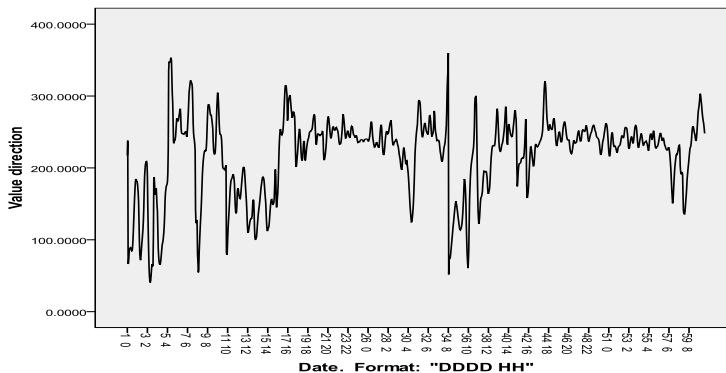
### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการตรวจสอบการเคลื่อนไหวของ ทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัด นครศรีธรรมราช ชุดที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 29 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 23.00 น. จำนวน 1,440 ค่า ดัง ในภาพที่ 1 พบว่า ทิศทางลมมีแนวโน้มทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง แต่ไม่น่าจะมีความแปรผันตามฤดูกาล นอกเหนือจากการพิจารณากราฟของอนุกรม เวลาเทียบกับเวลาแล้ว ผู้วิจัยยังได้ตรวจสอบว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของแนวโน้ม แต่ ไม่มีความผันแปรตามฤดูกาลจริงหรือไม่ดังนี้

ทิศทางลมในแต่ละวันไม่มีการแจกแจง ปรกติและมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน ที่ระดับนัย สำคัญ 0.05 จึงตรวจสอบมัธยฐานของทิศทางลม

ในแต่ละวัน โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคอลล-วอลลิส (Kruskal-Wallis's One-Way Analysis of Variance by Rank) พบว่า ทิศทางลมในแต่ละวันมีมัธยฐาน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ( $\chi^2 = 998.961, p\text{-value} < 0.0001$ ) หมายความว่า อนุกรม เวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของแนวโน้ม

ทิศทางลมในแต่ละชั่วโมงเมื่อปรับแนวโน้มออกด้วยการหารไม่มีการแจกแจงปรกติและ มีความแปรปรวนไม่เท่ากัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงตรวจสอบมัธยฐานของทิศทางลมในแต่ละชั่วโมง หลังจากกำจัดแนวโน้มออกแล้ว โดยใช้การวิเคราะห์ ความแปรปรวนทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคอลล- วอลลิส พบว่า ทิศทางลมในแต่ละชั่วโมงหลังจาก กำจัดแนวโน้มออกแล้วมีมัธยฐานไม่แตกต่างกัน ( $\chi^2 = 25.877, p\text{-value} = 0.307$ ) หมายความว่า อนุกรมเวลาชุดนี้ไม่มีส่วนประกอบของความผัน แปรตามฤดูกาล



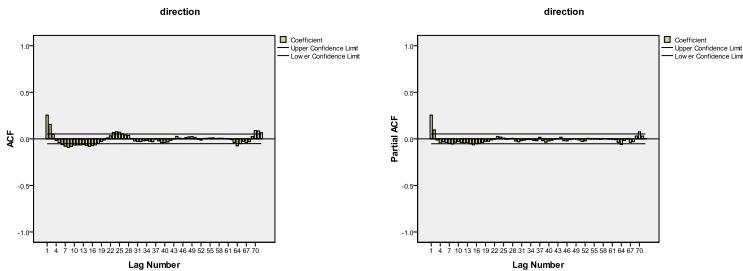
ภาพที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนไหวของทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 29 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 23.00 น.

1. ผลการสร้างตัวแบบพยากรณ์
  - 1.1 ผลของวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์

เนื่องจากอนุกรมเวลาชุดนี้มีแนวโน้ม แต่ ไม่มีความแปรผันตามฤดูกาล ผู้วิจัยจึงกำจัดแนว-

โน้มนำออกโดยการหาผลต่างลำดับที่ 1 ( $d = 1$ ) ได้ กราฟ ACF และ PACF หลังจากการแปลงข้อมูล แสดงในภาพที่ 2 ซึ่งพบว่า อนุกรมเวลาที่มีลักษณะ คงที่ จึงกำหนดตัวแบบพยากรณ์ที่เป็นไปได้ เริ่มต้น คือ ตัวแบบ ARIMA(2, 1, 2) พร้อมกับ

ประมาณค่าพารามิเตอร์ โดยตัวแบบพยากรณ์ที่มี พารามิเตอร์ทุกตัวมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 คือ ตัวแบบ ARIMA(2, 1, 2) ไม่มีพจน์ค่าคงตัว และ จากสมการที่ (1) สามารถเขียนเป็นตัวแบบได้ดังนี้



ภาพที่ 2 ACF และ PACF ของทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร เมื่อแปลงข้อมูลด้วยการหาผลต่าง ลำดับที่ 1

$$Y_t = Y_{t-1} + \phi_1(Y_{t-1} - Y_{t-2}) + \phi_2(Y_{t-2} - Y_{t-3}) + \varepsilon_t - \theta_1\varepsilon_{t-1} - \theta_2\varepsilon_{t-2}$$

ค่าประมาณพารามิเตอร์  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  ของตัวแบบ ARIMA(2, 1, 2) ไม่มีพจน์ค่าคงตัว แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของตัวแบบ ARIMA(2, 1, 2) ไม่มีพจน์ค่าคงตัว

พารามิเตอร์	AR(1): $\phi_1$	AR(2): $\phi_2$	MA(1): $\theta_1$	MA(2): $\theta_2$
ค่าประมาณ	1.60503	-0.64702	1.39437	-0.40814
$t$	27.165	-11.430	19.707	-5.866
$p$ -value	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001

จากตารางที่ 1 สามารถเขียนเป็นตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ได้ดังนี้

$$\hat{Y}_t = Y_{t-1} + 1.60503(Y_{t-1} - Y_{t-2}) - 0.64702(Y_{t-2} - Y_{t-3}) - 1.39437e_{t-1} + 0.40814e_{t-2} \quad \dots (9)$$

เมื่อ  $\hat{Y}_t$  แทนค่าพยากรณ์ทิศทางลม ณ เวลา  $t$   
 $Y_{t-j}$  แทนทิศทางลม ณ เวลา  $t - j$   
 $e_{t-j}$  แทนความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ทิศทางลม ณ เวลา  $t - j$

เคลื่อนมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ และมีการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน และผลการตรวจสอบความเป็นอิสระกันโดยใช้การทดสอบรันส์ (runs test) พบว่า ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ( $Z = 0.244$ ,  $p$ -value = 0.807) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสม

จากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ดังในภาพที่ 3 พบว่า ความคลาด-



1.2 ผลของวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโฮลต์

จากการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโฮลต์ได้ค่าประมาณพารามิเตอร์  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  หรือค่า  $a_t = 248.01826$  และ  $b_t = 0.02786$  และค่าคงตัวการทำให้เรียบ  $\alpha = 0.99995$  และ  $\gamma = 0.00090$  ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\hat{Y}_{t+m} = 248.01826 + 0.02786(m) \quad \text{--- (10)}$$

เมื่อ  $\hat{Y}_{t+m}$  แทนค่าพยากรณ์ทิศทางลม ณ เวลา  $t + m$  โดยที่  $m = 1$  แทนวันที่ 30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น.

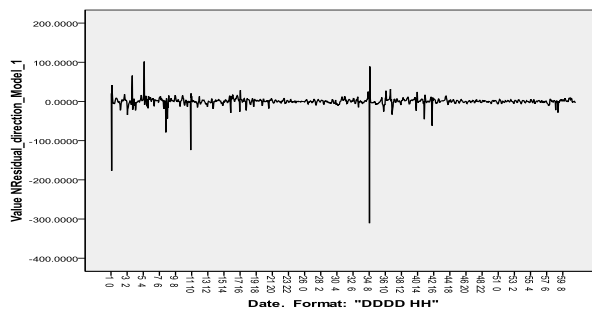
จากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ตั้งในภาพที่ 4 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ และมีการ

เคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน และผลการตรวจสอบความเป็นอิสระกันโดยใช้การทดสอบบรันส์ พบว่าไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ( $Z = -1.222$ ,  $p\text{-value} = 0.222$ ) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสม

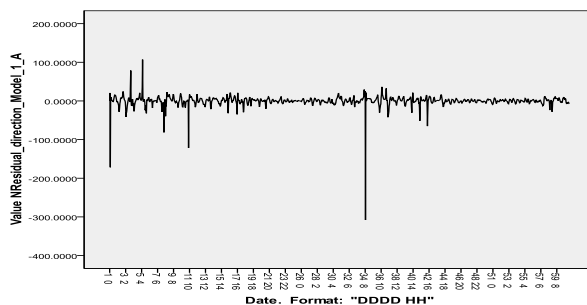
1.3 ผลของวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของบราวน์

จากการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของบราวน์ได้ค่าประมาณพารามิเตอร์  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  หรือค่า  $a_t = 250.53869$  และ  $b_t = -5.19892$  และค่าคงตัวการทำให้เรียบ  $\alpha = 0.67945$  ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\hat{Y}_{t+m} = 250.53869 - 5.19892 \left[ (m-1) + \frac{1}{0.67945} \right] \quad \text{--- (11)}$$



ภาพที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ทิศทางลมเทียบกับเวลาโดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์



ภาพที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ทิศทางลมเทียบกับเวลาโดยวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโฮลต์

เมื่อ  $\hat{Y}_{t+m}$  แทนค่าพยากรณ์ทิศทางลม ณ เวลา  $t + m$  โดยที่  $m = 1$  แทนวันที่ 30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น.

จากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ดังในภาพที่ 5 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ และมีการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน และผลการตรวจสอบความเป็นอิสระกันโดยใช้การทดสอบบรันส์ พบว่าไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ( $Z = -0.977$ ,  $p\text{-value} = 0.328$ ) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสม

1.4 ผลของวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแฉก

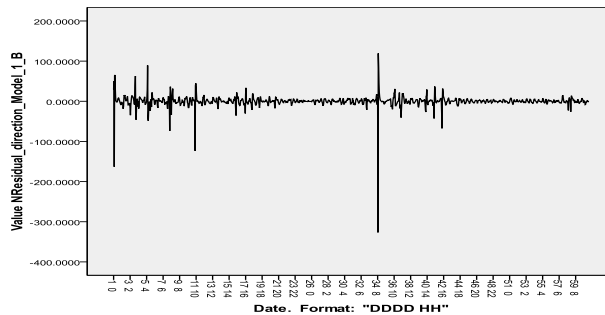
จากการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบ

แฉก ได้ค่าประมาณพารามิเตอร์  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  หรือค่า  $a_t = 248.49666$  และ  $b_t = -5.46687$  และค่าคงตัวการทำให้เรียบ  $\alpha = 0.8653$ ,  $\gamma = 0.98566$  และ  $\phi = 0.427$  ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์สามารถเขียนได้ดังนี้

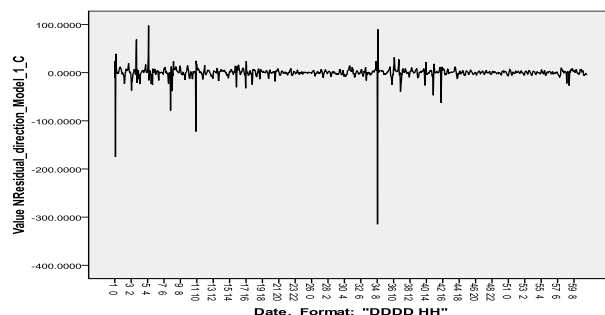
$$\hat{Y}_{t+m} = 248.49666 - 5.46687 \sum_{i=1}^m (0.427)^i \dots (12)$$

เมื่อ  $\hat{Y}_{t+m}$  แทนค่าพยากรณ์ทิศทางลม ณ เวลา  $t + m$  โดยที่  $m = 1$  แทนวันที่ 30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น.

จากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ดังในภาพที่ 6 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ และมีการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน และผลการตรวจสอบความเป็นอิสระกันโดยใช้การทดสอบบรันส์ พบว่า



ภาพที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ทิศทางลมเทียบกับเวลาโดยวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของบราวน์



ภาพที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ทิศทางลมเทียบกับเวลาโดยวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแฉก

ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ( $Z = -1.222$ ,  $p\text{-value} = 0.222$ ) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสม

### 1.5 ผลของวิธีการพยากรณ์รวม

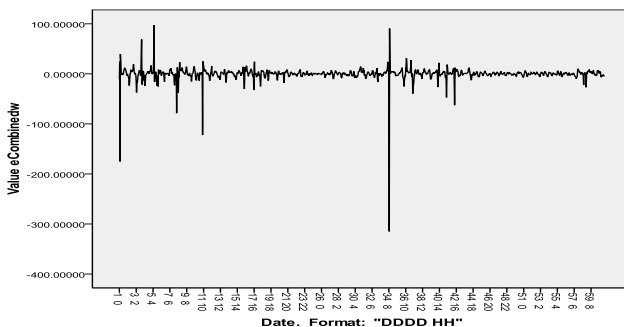
จากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดโดยกำหนดให้ค่าพยากรณ์ของวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโฮลต์ที่ได้จากสมการที่ (10) และค่าพยากรณ์ของวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแตรมที่ได้จากสมการที่ (12) เป็นตัวแปรอิสระ (โปรแกรม SPSS คัดเลือกตัวแปรอิสระเพียง 2 วิธีนี้จาก 4 วิธีการพยากรณ์ที่กล่าวมา) และใช้อุณหภูมิอากาศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดนครศรีธรรมราช ชุดที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 29 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 23.00 น. จำนวน 1,440 ค่า เป็นตัวแปรตาม ได้ว่า  $b_1 = -0.01193$  และ  $b_2 = 1.00947$  เมื่อกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละ

ตัวแบบพยากรณ์เดี่ยวตามสมการที่ (6) จะได้  $w_1 = -0.01196$  และ  $w_2 = 1.01196$  ดังนั้นจากสมการที่ (5) จะได้ตัวแบบพยากรณ์รวมดังนี้

$$\hat{Y}_t = -0.01196\hat{Y}_{1t} + 1.01196\hat{Y}_{2t} \quad \dots (13)$$

เมื่อ  $\hat{Y}_t$  แทนค่าพยากรณ์ทิศทางลม ณ เวลา  $t$   $\hat{Y}_{1t}$  และ  $\hat{Y}_{2t}$  แทนค่าพยากรณ์เดี่ยว ณ เวลา  $t$  จากวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโฮลต์ที่ได้จากสมการที่ (10) และวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแตรมที่ได้จากสมการที่ (12) ตามลำดับ

จากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ดังในภาพที่ 7 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ และมีการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน และผลการตรวจสอบความเป็นอิสระกันโดยใช้การทดสอบรันส์ พบว่า ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ( $Z = -1.711$ ,  $p\text{-value} = 0.087$ ) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสม



ภาพที่ 7 ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ทิศทางลมเทียบกับเวลาโดยวิธีการพยากรณ์รวม

## 2. ผลการเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์

ผลการเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าพยากรณ์ทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดนครศรีธรรมราช ชุดที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม

2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 25 ค่า โดยการคำนวณค่า MAPE และ RMSE แสดงดังตาราง 2 พบว่า เมื่อใช้ตัวแบบพยากรณ์ของวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโฮลต์ในสมการที่ (10) ได้ค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด ดังนั้นวิธีการพยากรณ์นี้จึงเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

ตาราง 2 MAPE และ RMSE ของการพยากรณ์ทิศทางลมชุดที่ 2

เกณฑ์	วิธีการพยากรณ์ทิศทางลม				
	บ็อกซ์-เจนกินส์	โพลต์	บราวน์	แดม	พยากรณ์รวม
MAPE	19.3393	<u>16.7859</u>	38.4557	17.7391	17.7512
RMSE	75.6685	<u>67.7132</u>	138.1683	70.9625	71.0017

ผลการศึกษาค้นพบว่า ทุกวิธีการพยากรณ์ที่ศึกษามีค่า MAPE และ RMSE ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ตัวแบบที่ได้จากแต่ละวิธีการพยากรณ์ในสมการที่ (9) ถึง (13) ในการพยากรณ์ทิศทางลมชุดที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 29 มิถุนายน

2558 ช่วงเวลา 23.00 น. จำนวน 1,440 ค่า พบว่าค่า MAPE และ RMSE ดังในตาราง 3 อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม นั่นหมายความว่า ทิศทางลมชุดที่ 2 มีความผันผวนสูง จึงส่งผลให้ค่าพยากรณ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง

ตาราง 3 MAPE และ RMSE ของการพยากรณ์ทิศทางลมชุดที่ 1

เกณฑ์	วิธีการพยากรณ์ทิศทางลม				
	บ็อกซ์-เจนกินส์	โพลต์	บราวน์	แดม	พยากรณ์รวม
MAPE	3.2045	3.8622	3.9657	3.3282	3.3236
RMSE	12.8473	13.5291	14.2487	13.0068	13.0069

การศึกษาค้นต่อไปควรประยุกต์ใช้วิธีการพยากรณ์วิธีอื่นๆ เช่น วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) รวมทั้งควรเพิ่มเติมข้อมูลทิศทางลมให้เป็นปัจจุบัน เพื่อปรับปรุงตัวแบบพยากรณ์ที่ได้ให้มีความเหมาะสมและมีค่าพยากรณ์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด อีกทั้งเพื่อประโยชน์ในด้านการวางแผนและการพัฒนาเทคโนโลยีกักหนลมภายในประเทศ ควรสร้างตัวแบบพยากรณ์ทิศทางลมที่ระดับความสูงอื่นๆ เช่น 50 และ 100 เมตร

ทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโพลต์ วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม และวิธีการพยากรณ์รวม ในการพยากรณ์ทิศทางลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยใช้ข้อมูลจากศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ผลการศึกษาค้นพบว่า วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโพลต์มีความเหมาะสมมากที่สุด ซึ่งมีตัวแบบพยากรณ์ดังนี้

$$\hat{Y}_{t+m} = 248.01826 + 0.02786(m)$$

### สรุปผล

การวิจัยครั้งนี้ได้เปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ 5 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการ

### เอกสารอ้างอิง

Bielecki, M. F., Kemper, J. J., and Acker, T. L.

- (2014). **Statistical Characterization of Errors in Wind Power Forecasting**. USA: Northern Arizona University.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., and Reinsel, G. C. (1994). **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Keerativibool, W., Waewsak, J., and Kanjansamranwong, P. (2011). Short-term forecast of wind speed at Chana district, Songkhla province, Thailand. **Proceedings of the 2011 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies** (pp. 343–350). Hat Yai, Thailand.
- Ketiam, S. (2005). **Forecasting Technique**. 2nd ed. Songkhla: Thaksin University. (in Thai)
- Manmin, M. (2006). **Time Series and Forecasting**. Bangkok: Foreprinting. (In Thai)
- Mauch, B. K. (2012). **Managing Wind Power Forecast Uncertainty in Electric Grids**. Ph.D. dissertation. USA: Carnegie Mellon University.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., and Vining, G. G. (2006). **Introduction to Linear Regression Analysis**. 4th ed. New York: John Wiley and Sons.
- Promdee, C. (2016). **Electric Power Generation of Savonius Wind Turbine with Double Wind Tunnels**. Master of Electrical and Computer Engineering Thesis. Mahasarakham: Mahasarakham University. (in Thai)
- Thongyai, N., and Assawamartbunlue, K. (2017). Wind atlas simulation to find wind potential area to generate electric power of the Chanthaburi and Trat Provinces, Thailand. **Proceedings of the 31st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand** (pp. 737–745). Nakhon Nayok: Phukhaongam Resort. (in Thai)
- Vasilji, J., Sarajcev, P., and Jakus, D. (2015). Wind Power Forecast Error Simulation Model. **World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering** 9(2): 138–143.