ตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง

MODEL FOR FORECASTING WIND DIRECTION AT AN ALTITUDE OF 120 METERS IN KOH PHAYAM, MUEANG RANONG, RANONG

วรางคณา เรียนสุทธิ์*

Warangkhana Riansut*

สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ (วิทยาเขตพัทลุง)

Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, Thaksin University, (Phatthalung Campus).

**Corresponding author, e-mail: warang27@gmail.com*

***Received:** 9 April 2021; **Revised:** 14 September 2022; **Accepted:** 26 September 2022*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง ด้วยวิธีการทางสถิติ 7 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ อนุกรมเวลาทิศทางลมรายชั่วโมงได้มาจากศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคมถึงวันที่ 1 ตุลาคม 2558 จำนวน 2,209 ค่า สำหรับการเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์จะใช้เกณฑ์ร้อยละค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) และเกณฑ์รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์มีความเหมาะสมมากที่สุด (MAPE = 8.694, RMSE = 24.682)

คำสำคัญ: ทิศทางลม ตัวแบบพยากรณ์ บ็อกซ์-เจนกินส์ การทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลัง

Abstract

The aim of this research is to construct seven methods of forecasting wind direction at an altitude of 120 meters in Koh Phayam, Mueang Ranong, Ranong, namely, Box-Jenkins method, Holt's exponential smoothing method, Brown's exponential smoothing method, damped trend exponential smoothing method, simple seasonal exponential smoothing method, Winters' additive exponential smoothing method, and Winters' multiplicative exponential smoothing method. Time series of hourly wind direction were gathered from research center in energy and environment, Thaksin university during 1 July to 1 October 2015 of 2,209 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 Brown's exponential smoothing method was the most appropriate (MAPE = 8.694, RMSE = 24.682).

Keywords: Wind Direction, Forecasting Model, Box-Jenkins, Exponential Smoothing

บทนำ

ปัจจุบันมีการนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์กันมาก เช่น การนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากพลังงานลมเป็นพลังงานตามธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ความกดดันของบรรยากาศ และแรงจากการหมุนของโลก ซึ่งพลังงานลมมีอยู่ทั่วไป ไม่ต้องซื้อ และเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมให้มีศักยภาพเพียงพอต้องอาศัยเทคโนโลยีกังหันลม โดยจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมของลม ลักษณะการแจกแจงทางสถิติของลม ความหนาแน่นของกำลังลมตามระดับความสูงของเสาวัดลม และลักษณะพื้นที่ของบริเวณที่จะนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์ รวมถึงทิศทางลม เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อการวางตำแหน่งของกังหันลม ในบางช่วงเวลาทิศทางลมอาจเกิดความไม่แน่นอนด้วยสาเหตุหลายประการ เช่น ความแตกต่างของพื้นที่ จากการที่ทิศทางลมมีคุณลักษณะที่มีความแปรปรวนสูง เพราะพฤติกรรมของลมที่ไม่ต่อเนื่องและมีการเปลี่ยนแปลงสูง ทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าของทุ่งกังหันลมมีลักษณะแปรปรวนตามพฤติกรรมของลม ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพไฟฟ้าที่ผลิตได้จากทุ่งกังหันลม [1] ดังนั้น จึงควรมีการพยากรณ์ทิศทางลมโดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูล จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานลมโดยใช้การพยากรณ์หลากหลายรูปแบบ เช่น การพยากรณ์โดยใช้เทคนิคทางฟิสิกส์และสถิติผสมผสานกัน ดังที่ Bielecki et al. [2] ศึกษาคุณลักษณะทางสถิติของความผิดพลาดในการพยากรณ์กำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยใช้อัลกอริธึมทางฟิสิกส์และสถิติที่มีความสลับซับซ้อนในการพยากรณ์และลดความผิดพลาด ซึ่งความผิดพลาดดังกล่าวมักจะเกี่ยวข้องกับลมและเส้นโค้งกำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้า การพยากรณ์โดยใช้การแจกแจงไวบูล (Weibull Distribution) ดังที่ Vasilji *et al.* [3] พัฒนาแบบจำลองกำลังการผลิตไฟฟ้า โดยอาศัยข้อมูลลมตรวจวัด เส้นโค้งกำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้า และกำลังการผลิตไฟฟ้าของทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้า การพยากรณ์โดยใช้โปรแกรม WindSim ดังที่ Thongyai and Assawamartbunlue [4] ศึกษาการจำลองแผนที่ความเร็วลมจังหวัดจันทบุรีและจังหวัดตราดเพื่อเสาะหาแหล่งพื้นที่ที่มีศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยกังหันลม และการพยากรณ์โดยใช้กระบวนการทางสถิติ ดังที่ Riansut [5] ได้ศึกษาการสร้างตัวแบบพยากรณ์อัตราเร็วลมรายวันที่ระดับความสูง 120 เมตร อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ด้วยวิธีการทางสถิติ 4 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีความเหมาะสม Riansut [6] ศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ทิศทางลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดนครศรีธรรมราช ด้วยวิธีการทางสถิติ 5 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม และวิธีการพยากรณ์รวม โดยวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์เป็นวิธีที่เหมาะสม Riansut and Waewsak [7] ศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์อัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร ด้วยวิธีการทางสถิติ 3 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่เหมาะสม และ Riansut and Waewsak [8] ศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดระนอง ด้วยวิธีการทางสถิติ 4 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์

วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม พบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดมเป็นวิธีที่เหมาะสม

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ยังไม่เคยมีการศึกษาพยากรณ์ทิศทางลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ทิศทางลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง โดยใช้วิธีการทางสถิติทั้งหมด 7 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ จากนั้นจึงคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมมากที่สุด 1 ตัวแบบ โดยใช้เกณฑ์ร้อยละค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) และเกณฑ์รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) ที่ต่ำที่สุด เพื่อให้ได้ตัวแบบสำหรับใช้ในการพยากรณ์ทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง แล้วนำผลการพยากรณ์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการสั่งการการทำงานของกังหันลม เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพในการหมุนของกังหันลมให้รอรับลมตามทิศทางที่พยากรณ์ได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสร้างตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง ด้วยวิธีการทางสถิติ 7 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ หลังจากนั้นจึงนำวิธีการพยากรณ์ทางสถิติที่เหมาะสมไปใช้ในการสั่งการการทำงานของกังหันลม

วิธีดำเนินการวิจัย

สร้างตัวแบบพยากรณ์ทิศทางลม (องศา) ที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง จากข้อมูลทิศทางลมรายชั่วโมงของศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2524 เวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 ตุลาคม 2558 เวลา 0.00 น. จำนวน 304,585 ค่า โดยไม่สามารถนำทิศทางลมที่เป็นปัจจุบันมาวิเคราะห์ข้อมูลได้ เนื่องจากข้อจำกัดของงบประมาณในการเก็บรวบรวมข้อมูล อย่างไรก็ตาม ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของทิศทางลมในอดีตและในปัจจุบันไม่ได้มีความแตกต่างกันมากนัก [1] ผู้วิจัยได้คัดเลือกข้อมูลทิศทางลมมาศึกษาตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2558 เวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 ตุลาคม 2558 เวลา 0.00 น. จำนวน 2,209 ค่า เนื่องจากการศึกษาข้อมูลทั้งหมดทำให้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของทิศทางลมในอดีตไม่คงที่ จึงยากแก่การสร้างตัวแบบพยากรณ์ อีกทั้งข้อมูลช่วงที่คัดเลือกดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกับข้อมูลปัจจุบันมากที่สุด ผู้วิจัยได้นำข้อมูลจำนวน 2,209 ค่า มาแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2558 เวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 29 กันยายน 2558 เวลา 23.00 น. จำนวน 2,184 ค่า สำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ และชุดที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 30 กันยายน 2558 เวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 ตุลาคม 2558 เวลา 0.00 น. จำนวน 25 ค่า สำหรับการเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ MAPE และ RMSE ที่ต่ำที่สุด

ตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลของอนุกรมเวลาทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง ชุดที่ 1 ดังนี้ ถ้าอนุกรมเวลามีการแจกแจงปรกติ (ตรวจสอบการแจกแจง

ปรกติด้วยการทดสอบคอลโมโกรอฟ-สมีร์นอฟ: Kolmogorov-Smirnov's Test) และมีความแปรปรวนเท่ากัน (ตรวจสอบความแปรปรวนเท่ากันด้วยการทดสอบของเลวีนภายใต้การใช้มัธยฐาน: Levene's Test Based on Median) จะใช้สถิติอิงพารามิเตอร์ (Parametric Statistics) คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way Analysis of Variance: ANOVA) แต่ถ้าอนุกรมเวลาไม่มีการแจกแจงปรกติหรือมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน จะใช้สถิติไม่อิงพารามิเตอร์ (Nonparametric Statistics) คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคอล-วอลลิส (Kruskal-Wallis's One-Way Analysis of Variance by Rank) ถ้าผลการตรวจสอบพบว่า อนุกรมเวลามีเฉพาะแนวโน้ม วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบ Autoregressive Integrated Moving Average: ARIMA(p, d, q) วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม อนุกรมเวลามีเฉพาะอิทธิพลของฤดูกาล วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย และอนุกรมเวลามีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบ Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average: SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)$_s$ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ [9-10] จากผลการตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลในผลการวิจัยแสดงว่า ทิศทางลมมีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล ดังนั้นวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสม คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบ SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)$_s$ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีการพยากรณ์ทางสถิติที่มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาทุกรูปแบบ ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ เพื่อให้ครอบคลุมตัวแบบพยากรณ์ที่ดีที่สุด [11] ตัวแบบพยากรณ์ทั้ง 7 วิธีดังกล่าวแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแบบพยากรณ์

วิธีที่	วิธีพยากรณ์	ตัวแบบพยากรณ์	ลักษณะอนุกรมเวลา
1	บ็อกซ์-เจนกินส์	SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)$_s$ $\hat{\phi}_p(B)\hat{\Phi}_p(B^s)(1-B)^d(1-B^s)^D\hat{Y}_t=\hat{\delta}+\hat{\theta}_q(B)\hat{\Theta}_Q(B^s)e_t$ [12]	มีแนวโน้มและฤดูกาล
2	โฮลต์	$\hat{Y}_{t+m}=a_t+b_t(m)$ โดยที่ $a_t=\alpha Y_t+(1-\alpha)(a_{t-1}+b_{t-1})$, $b_t=\gamma(a_t-a_{t-1})+(1-\gamma)b_{t-1}$ [10]	มีเพียงแนวโน้ม
3	บราวน์	$\hat{Y}_{t+m}=a_t+b_t\left[(m-1)+\frac{1}{\alpha}\right]$ โดยที่ $a_t=\alpha Y_t+(1-\alpha)a_{t-1}$, $b_t=\alpha(a_t-a_{t-1})+(1-\alpha)b_{t-1}$ [9]	มีเพียงแนวโน้ม
4	แดม	$\hat{Y}_{t+m}=a_t+b_t\sum_{i=1}^{m}\phi^i$ โดยที่ $a_t=\alpha Y_t+(1-\alpha)(a_{t-1}+\phi b_{t-1})$, $b_t=\gamma(a_t-a_{t-1})+(1-\gamma)\phi b_{t-1}$ [10]	มีเพียงแนวโน้ม
5	ฤดูกาลอย่างง่าย	$\hat{Y}_t=a_t+\hat{S}_t$ โดยที่ $a_t=\alpha\left(Y_t-\hat{S}_{t-s}\right)+(1-\alpha)a_{t-1}$, $\hat{S}_t=\delta(Y_t-a_t)+(1-\delta)\hat{S}_{t-s}$ [9]	มีเพียงฤดูกาล

6	วินเทอร์ แบบบวก	$\hat{Y}_{t+m}=(a_t+b_tm)+\hat{S}_t$ โดยที่ $a_t=\alpha\left(Y_t-\hat{S}_{t-s}\right)+(1-\alpha)(a_{t-1}+b_{t-1})$, $b_t=\gamma(a_t-a_{t-1})+(1-\gamma)b_{t-1}$, $\hat{S}_t=\delta(Y_t-a_t)+(1-\delta)\hat{S}_{t-s}$ [9]	มีแนวโน้ม และฤดูกาล
7	วินเทอร์ แบบคูณ	$\hat{Y}_{t+m}=(a_t+b_tm)\hat{S}_t$ โดยที่ $a_t=\alpha\frac{Y_t}{\hat{S}_{t-s}}+(1-\alpha)(a_{t-1}+b_{t-1})$, $b_t=\gamma(a_t-a_{t-1})+(1-\gamma)b_{t-1}$, $\hat{S}_t=\delta\frac{Y_t}{a_t}+(1-\delta)\hat{S}_{t-s}$ [9]	มีแนวโน้ม และฤดูกาล

ความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ ในตารางที่ 1 แสดงดังนี้

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

e_t แทนค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เวลา t

$\hat{\delta}=\hat{\mu}\hat{\phi}_p(B)\hat{\Phi}_P(B^s)$ แทนค่าคงตัว (Constant) โดยที่ $\hat{\mu}$ แทนค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาที่คงที่ (Stationary)

$\hat{\phi}_p(B)=1-\hat{\phi}_1B-\hat{\phi}_2B^2-\cdots-\hat{\phi}_pB^p$ แทนตัวดำเนินการสหสัมพันธ์ในตัวอันดับที่ p กรณีไม่มีฤดูกาล (Non-Seasonal Autoregressive Operator of Order p: AR(p))

$\hat{\Phi}_P(B^s)=1-\hat{\Phi}_1B^s-\hat{\Phi}_2B^{2s}-\cdots-\hat{\Phi}_pB^{Ps}$ แทนตัวดำเนินการสหสัมพันธ์ในตัวอันดับที่ P กรณีมีฤดูกาล (Seasonal Autoregressive Operator of Order P: SAR(P))

$\hat{\theta}_q(B)=1-\hat{\theta}_1B-\hat{\theta}_2B^2-\cdots-\hat{\theta}_qB^q$ แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่อันดับที่ q กรณีไม่มีฤดูกาล (Non-Seasonal Moving Average Operator of Order q: MA(q))

$\hat{\Theta}_Q(B^s)=1-\hat{\Theta}_1B^s-\hat{\Theta}_2B^{2s}-\cdots-\hat{\Theta}_QB^{Qs}$ แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่อันดับที่ Q กรณีมีฤดูกาล (Seasonal Moving Average Operator of Order Q: SMA(Q))

t แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_1 โดยที่ n_1 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดที่ 1 (n_1 = 2,184)

s แทนจำนวนฤดูกาล ซึ่งอนุกรมเวลาทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง เป็นข้อมูลรายชั่วโมง ดังนั้น s = 24

d และ D แทนลำดับที่ของการหาผลต่างและผลต่างฤดูกาล ตามลำดับ

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

a_t และ b_t แทนค่าประมาณระยะตัดแกน Y และความชันของแนวโน้ม ณ เวลา t ตามลำดับ

α, γ, ϕ และ δ แทนค่าคงตัวการทำให้เรียบ โดยที่ $0<\alpha<1$, $0<\gamma<1$, $0<\phi<1$ และ $0<\delta<1$

พิจารณาความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ โดยการเปรียบเทียบทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง ของข้อมูลชุดที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 30 กันยายน 2558 เวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 ตุลาคม 2558 เวลา 0.00 น. จำนวน 25 ค่า (n_2 = 25) กับค่าพยากรณ์ เพื่อคำนวณค่า MAPE และ RMSE โดยตัวแบบพยากรณ์ที่ให้ค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด จัดเป็นตัวแบบที่มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากให้ค่าพยากรณ์ที่มีความแตกต่างกับข้อมูลจริงน้อยที่สุด สูตร MAPE และ RMSE แสดงดังนี้ [9]

$$MAPE=\frac{100}{n}\sum_{t=1}^{n}\left|\frac{e_t}{Y_t}\right| \quad \text{และ} \quad RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}e_t^2}$$

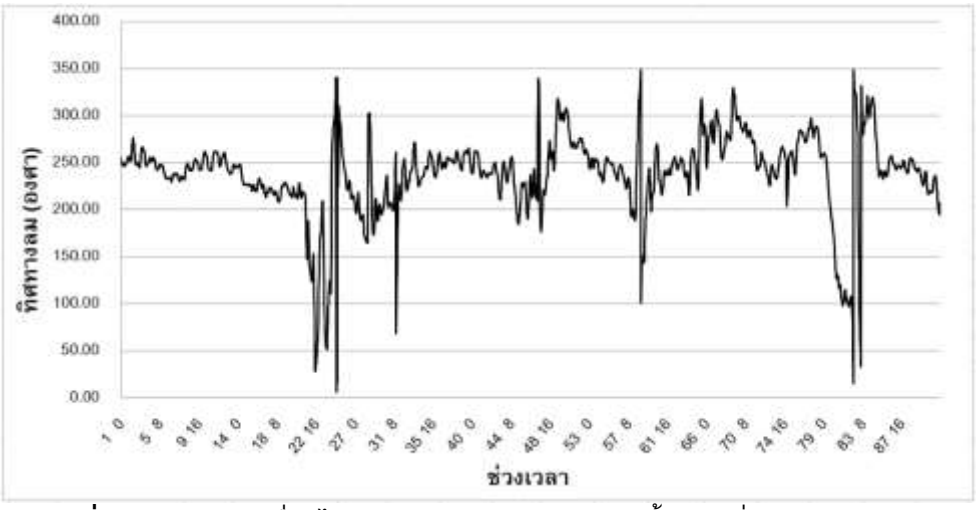
เมื่อ $e_t=Y_t-\hat{Y}_t$ แทนค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เวลา t

Y_t และ $\hat{Y}_t$ แทนอนุกรมเวลาและค่าพยากรณ์ ณ เวลา t ตามลำดับ

n แทนจำนวนข้อมูลที่นำมาคำนวณ

ผลการวิจัย

การพิจารณาลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง ชุดที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2558 เวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 29 กันยายน 2558 เวลา 23.00 น. จำนวน 2,184 ค่า ดังภาพที่ 1 พบว่า ทิศทางลมมีแนวโน้มทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง รวมถึงมีความผันผวนตามฤดูกาล



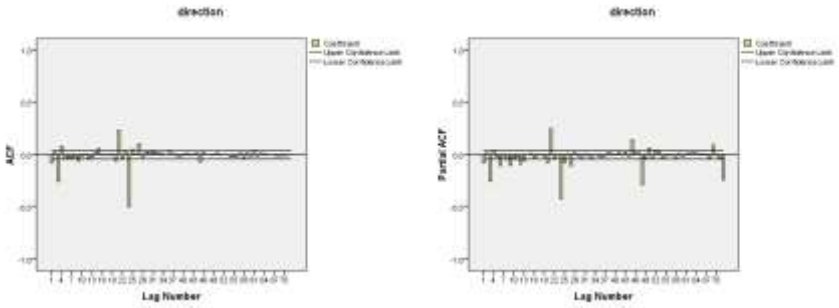
ภาพที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาทิศทางลม ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2558 เวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 29 กันยายน 2558 เวลา 23.00 น.

การทดสอบสมมุติฐานเพื่อตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล พบว่า อนุกรมเวลาทิศทางลมในแต่ละวันไม่มีการแจกแจงปรกติและมีความแปรปรวนไม่เท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคอล-วอลลิสในการตรวจสอบแนวโน้ม พบว่า อนุกรมเวลามีค่ามัธยฐานในแต่ละวันแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (χ^2 = 990.568, p-value < 0.0001) นั่นคือ อนุกรมเวลามีแนวโน้ม และอนุกรมเวลาทิศทางลมในแต่ละชั่วโมงไม่มีการแจกแจงปรกติ แต่มีความแปรปรวนเท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคอล-วอลลิสในการตรวจสอบอิทธิพลของฤดูกาล พบว่า อนุกรมเวลามีค่ามัธยฐานในแต่ละชั่วโมงแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (χ^2 = 88.606, p-value < 0.0001) นั่นคือ อนุกรมเวลามีอิทธิพลของฤดูกาล เนื่องจากอนุกรมเวลาทิศทางลมมีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล ดังนั้นวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสม คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบ SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)$_s$ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่า MAPE ของข้อมูลชุดที่ 1 ดังตารางที่ 2 พบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดมซึ่งมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีเพียงแนวโน้มเท่านั้น มีค่า MAPE ต่ำที่สุด แต่เมื่อพิจารณาค่า RMSE พบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายซึ่งมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีเพียงอิทธิพลของฤดูกาลเท่านั้น มีค่า RMSE ต่ำที่สุด ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาทุกรูปแบบ เพื่อให้ครอบคลุมตัวแบบพยากรณ์ที่ดีที่สุด

ตารางที่ 2 ค่า MAPE และ RMSE ของข้อมูลชุดที่ 1

วิธีพยากรณ์	บ็อกซ์-เจนกินส์	โฮลต์	บราวน์	แดม	ฤดูกาลอย่างง่าย	วินเทอร์แบบบวก	วินเทอร์แบบคูณ
MAPE	5.502	4.993	5.503	4.936	5.088	5.088	5.271
RMSE	23.388	17.111	18.917	17.107	16.898	16.900	17.232

ผลการตรวจสอบที่พบว่า อนุกรมเวลาทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง มีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล ดังนั้นผู้วิจัยจึงแปลงข้อมูลด้วยการหาผลต่างลำดับที่ 1 (d = 1) และผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1 (D = 1) เพื่อสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ ได้กราฟ Autocorrelation Function (ACF) และกราฟ Partial Autocorrelation Function (PACF) ของอนุกรมเวลาที่แปลงข้อมูลแล้ว แสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งพบว่า อนุกรมเวลามีลักษณะคงที่ จึงกำหนดตัวแบบพยากรณ์ที่เป็นไปได้เริ่มต้น คือ ตัวแบบ SARIMA(2, 1, 2)(3, 1, 2)$_{24}$ จากการคัดเลือกตัวแบบให้เหลือเฉพาะพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 พบว่า ตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสม คือ ตัวแบบ SARIMA(1, 1, 1)(0, 1, 1)$_{24}$ ไม่มีพจน์ค่าคงตัว เมื่อแทนค่าประมาณพารามิเตอร์ จะได้ตัวแบบพยากรณ์ของแต่ละวิธีการพยากรณ์ดังตารางที่ 3 และค่าดัชนีฤดูกาลจากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ แสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งพบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายและวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก แสดงว่า ทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง มีค่าสูงในช่วงเวลา 5.00 น. ถึง 17.00 น. เนื่องจากดัชนีฤดูกาลมีค่ามากกว่า 0 และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ แสดงว่า ทิศทางลมมีค่าสูงในช่วงเวลา 4.00 น. ถึง 12.00 น. เนื่องจากดัชนีฤดูกาลมีค่ามากกว่า 1 ผลการตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ของวิธีการพยากรณ์ต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 3 ถึง 6 ซึ่งพบว่า ค่าคลาดเคลื่อนทุกวิธีการพยากรณ์มีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ หมายความว่า ตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นทั้ง 7 วิธีมีความเหมาะสม เมื่อใช้ตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นในตารางที่ 3 สำหรับการพยากรณ์ทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง ชุดที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 30 กันยายน 2558 เวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 ตุลาคม 2558 เวลา 0.00 น. จำนวน 25 ค่า จากนั้นเปรียบเทียบค่าพยากรณ์กับค่าจริงโดยการคำนวณค่า MAPE และ RMSE ได้ผลแสดงดังตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวแบบพยากรณ์ของวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์มีความเหมาะสมมากที่สุดในการพยากรณ์ เนื่องจากมีค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด โดยมีความผิดพลาดในการพยากรณ์ทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง ร้อยละ 8.694 (MAPE = 8.694) หรือมีความผิดพลาดในการพยากรณ์ทิศทางลม 24.682 องศา (RMSE = 24.682)



ภาพที่ 2 กราฟ ACF และ PACF ของอนุกรมเวลาทิศทางลม
เมื่อแปลงข้อมูลด้วยผลต่างลำดับที่ 1 และผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1

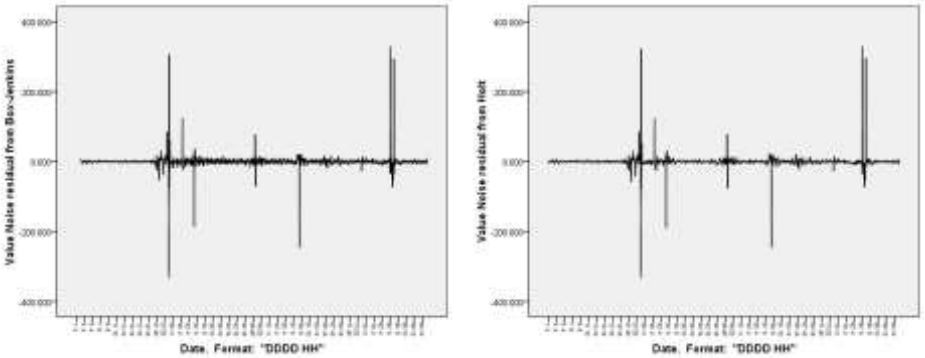
ตารางที่ 3 ผลการสร้างตัวแบบพยากรณ์

วิธีที่	วิธีพยากรณ์	ตัวแบบพยากรณ์
1	บ็อกซ์-เจนกินส์ ตัวแบบ SARIMA(1, 1, 1)(0, 1, 1)$_{24}$ ไม่มีพจน์ค่าคงตัว	$\hat{Y}_t = 0.19864(Y_{t-1} - Y_{t-25}) + 0.80136(Y_{t-2} - Y_{t-26}) + Y_{t-24} + 0.72115e_{t-1} - 0.99081e_{t-24} - 0.71452e_{t-25}$ โดยที่ Y_{t-j} แทนอนุกรมเวลา ณ เวลา t – j และ e_{t-j} แทนค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เวลา t – j
2	โฮลต์	$\hat{Y}_{t+m} = 206.37735 + 0.00733(m)$ โดยที่ m = 1 แทนวันที่ 30 กันยายน 2558 เวลา 0.00 น.
3	บราวน์	$\hat{Y}_{t+m} = 202.72443 + 1.431055\left[(m-1) + \frac{1}{0.47973}\right]$ โดยที่ m = 1 แทนวันที่ 30 กันยายน 2558 เวลา 0.00 น.
4	แดม	$\hat{Y}_{t+m} = 206.38540 + 2.10773\sum_{i=1}^{m}(0.09821)^i$ โดยที่ m = 1 แทนวันที่ 30 กันยายน 2558 เวลา 0.00 น.
5	ฤดูกาลอย่างง่าย	$\hat{Y}_t = 216.20417 + \hat{S}_t$ โดยที่ $\hat{S}_t$ แสดงดังตารางที่ 4
6	วินเทอร์แบบบวก	$\hat{Y}_{t+m} = (216.30222 + 0.00563m) + \hat{S}_t$ โดยที่ m = 1 แทนวันที่ 30 กันยายน 2558 เวลา 0.00 น. และ $\hat{S}_t$ แสดงดังตารางที่ 4
7	วินเทอร์แบบคูณ	$\hat{Y}_{t+m} = (216.70674 - 0.03005m)\hat{S}_t$ โดยที่ m = 1 แทนวันที่ 30 กันยายน 2558 เวลา 0.00 น. และ $\hat{S}_t$ แสดงดังตารางที่ 4

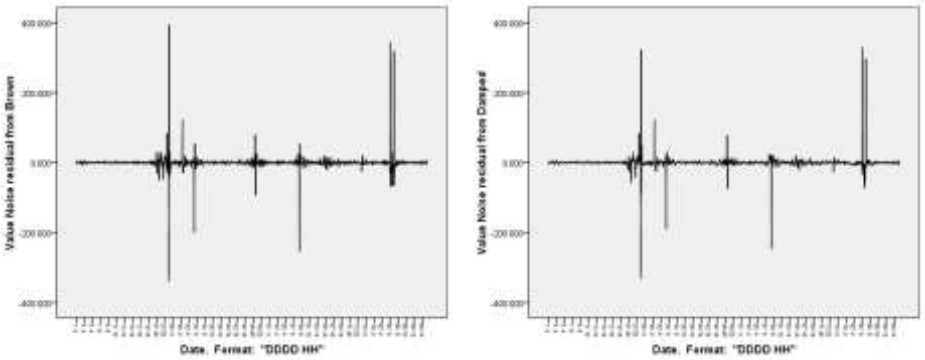
ตารางที่ 4 ดัชนีฤดูกาลของอนุกรมเวลาทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง จากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

เวลา	$\hat{S}_t$ ของวิธีฤดูกาลอย่างง่าย	$\hat{S}_t$ ของวิธีวินเทอร์แบบบวก	$\hat{S}_t$ ของวิธีวินเทอร์แบบคูณ
0.00 น.	-10.837	-10.742	0.957
1.00 น.	-8.134	-8.042	0.995
2.00 น.	-9.069	-8.985	0.986
3.00 น.	-7.791	-7.716	0.994
4.00 น.	-5.480	-5.414	1.009
5.00 น.	0.539	0.597	1.009
6.00 น.	2.078	2.127	1.020
7.00 น.	4.035	4.075	1.029
8.00 น.	8.943	8.974	1.017
9.00 น.	10.276	10.298	1.028
10.00 น.	11.794	11.807	1.041
11.00 น.	12.304	12.308	1.048
12.00 น.	10.039	10.035	1.034
13.00 น.	5.532	5.519	0.998
14.00 น.	4.123	4.101	0.993
15.00 น.	2.790	2.759	0.988
16.00 น.	1.243	1.204	0.984
17.00 น.	0.266	0.218	0.986
18.00 น.	-2.869	-2.927	0.988

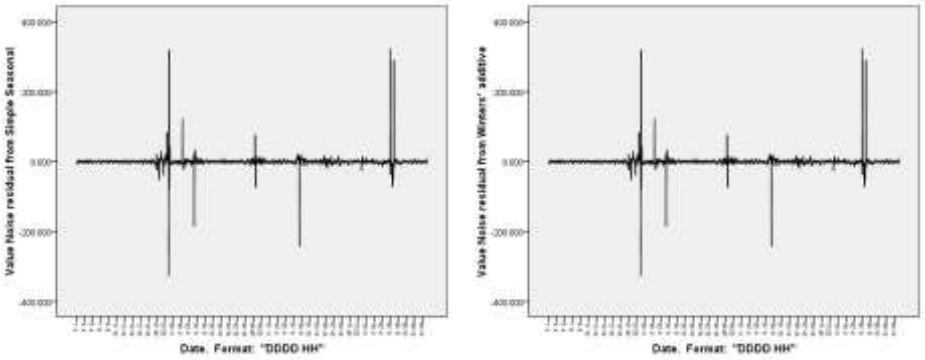
19.00 น.	-2.563	-2.629	0.992
20.00 น.	-3.334	-3.409	0.996
21.00 น.	-4.554	-4.638	0.996
22.00 น.	-9.395	-9.487	0.950
23.00 น.	-9.936	-10.030	0.953



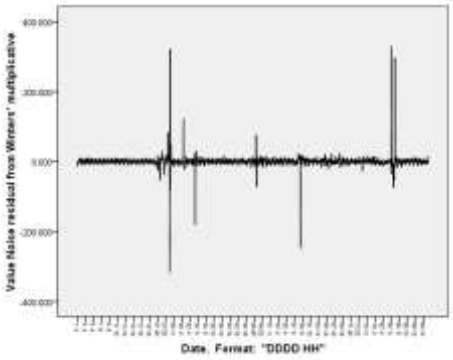
ภาพที่ 3 ค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์
และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์เทียบกับเวลา



ภาพที่ 4 ค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์โดยวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์
และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดมเทียบกับเวลา



ภาพที่ 5 ค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์โดยวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย
และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวกเทียบกับเวลา



ภาพที่ 6 ค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์โดยวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณเทียบกับเวลา

ตารางที่ 5 ค่า MAPE และ RMSE ของข้อมูลชุดที่ 2

วิธีพยากรณ์	บ็อกซ์-เจนกินส์	โฮลต์	บราวน์	แดม	ฤดูกาลอย่างง่าย	วินเทอร์แบบบวก	วินเทอร์แบบคูณ
MAPE	11.507	15.274	8.694	15.215	11.592	11.520	11.494
RMSE	30.197	40.593	24.682	40.470	30.432	30.269	31.530

สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างและคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง ด้วยวิธีการทางสถิติ 7 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ ผลการศึกษาพบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์มีความเหมาะสมมากที่สุด ซึ่งมีตัวแบบพยากรณ์ ดังนี้

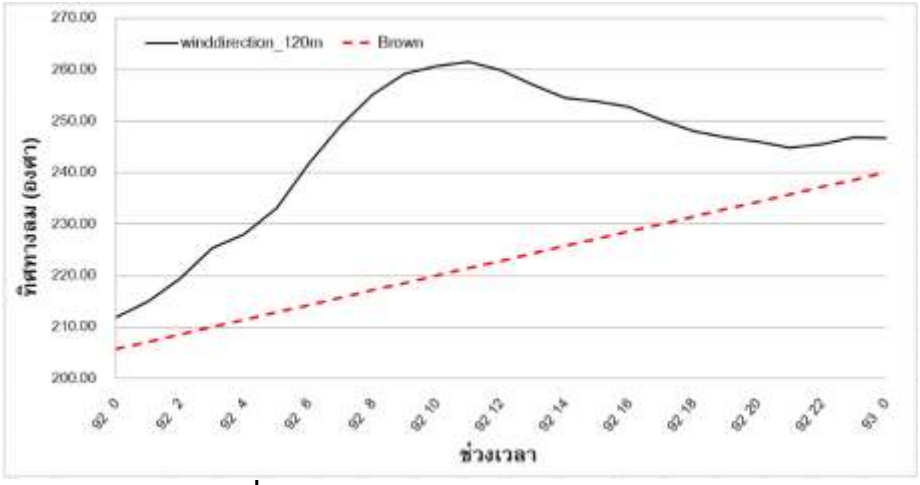
$$\hat{Y}_{t+m} = 202.72443 + 1.431055\left[(m-1) + \frac{1}{0.47973}\right]$$

โดยที่ m = 1 แทนวันที่ 30 กันยายน 2558 เวลา 0.00 น.

จากผลการตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลของอนุกรมเวลาทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง ชุดที่ 1 ที่พบว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล ดังนั้นวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมควรจะเป็นวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบ SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)$_s$ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ [9-10] ขัดแย้งกับผลการศึกษาครั้งนี้ที่พบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์เป็นตัวแบบพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมมากที่สุด แต่การศึกษาครั้งนี้ได้ผลสอดคล้องกับการศึกษาของ Riansut [11] ที่สรุปว่าควรศึกษาวิธีการพยากรณ์ที่หลากหลายเพื่อให้ครอบคลุมตัวแบบพยากรณ์ที่ดีที่สุด

ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์มีความเหมาะสมมากที่สุดกับอนุกรมเวลาทิศทางลมที่ระดับความสูง 120 เมตร ตำบลเกาะพยาม อำเภอเมือง จังหวัดระนอง อย่างไรก็ตามค่าพยากรณ์ของวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์มีความแตกต่างจากข้อมูลจริงอยู่บ้างดังภาพที่ 7 อาจเนื่องมาจากการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาเพียงปัจจัยเวลาเท่านั้นในการสร้างตัวแบบพยากรณ์ ซึ่งทิศทางลมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ และการเปลี่ยนแปลงอาจเกิดจากปัจจัยอื่น ๆ นอกเหนือจากปัจจัยเวลา ดังนั้นเมื่อมี

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของทิศทางลมหรือมีข้อมูลที่เป็นปัจจุบันมากขึ้น ผู้วิจัยควรนำมาปรับปรุงตัวแบบเพื่อให้ได้ตัวแบบพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น สำหรับใช้ในการพยากรณ์ทิศทางลมในอนาคตต่อไป



ภาพที่ 7 การเปรียบเทียบทิศทางลมและค่าพยากรณ์
จากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์

เอกสารอ้างอิง

[1] Waewsak, J., Kongruang, C., Tirawanichakul, S., Tirawanichakul, Y., Matan, N., Promphat, C., and Noo-Thong, A. (2008). *The Feasibility Study of Wind Farm Power Plants Along the Coastal Lines of Southern Thailand.* Bangkok: National Research Council of Thailand.

[2] Bielecki, M. F., Kemper, J. J., and Acker, T. L. (2014). *Statistical Characterization of Errors in Wind Power Forecasting.* Northern Arizona University, U.S.A.

[3] 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.

[4] 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. In *The 31st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*. pp. 737-745. Nakhonnayok: Phukhaongam Resort.

[5] Riansut, W. (2020). Daily Wind Speed Forecast Model at an Altitude of 120 Meters, Pak Phanang District, Nakhon Si Thammarat Province. *The Journal of Applied Science, 19*(1), 95-109.

[6] Riansut, W. (2020). A Comparison of Forecasting Methods for Wind Direction at an Altitude of 120 Meters in Nakhon Si Thammarat Province. *Journal of Research Unit on Science Technology and Environment for Learning, 11*(1), 40-52.

[7] Riansut, W., and Waewsak, J. (2019). A Comparison of Forecasting Methods for Wind Speed at an Altitude of 120 Meters in Mukdahan Province. *UTK Research Journal, 13*(2), 115-130.

[8] Riansut, W., and Waewsak, J. (2020). A Comparison of Forecasting Methods for Wind Speed at an Altitude of 120 Meters in Ranong Province. *KMUTT Research and Development Journal, 43*(3), 229-242.

[9] Ket-iam, S. (2005). *Forecasting Technique* (2nd ed.). Songkhla: Thaksin University.

[10] Manmin, M. (2006). *Time Series and Forecasting.* Bangkok: Foreprinting.

[11] Riansut, W. (2018). Comparison of Tangerine Prices Forecast Model by Exponential Smoothing Methods. *Thai Journal of Science and Technology*, *7*(5), 460-470.

[12] Box, G. E. P.; Jenkins, G. M., and Reinsel, G. C. (1994). *Time Series Analysis: Forecasting and Control* (3rd ed.). New Jersey: Prentice Hall.