

การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร

A Comparison of Forecasting Methods for Wind Speed
at an Altitude of 120 Meters in Mukdahan Provinceวารangkha เรียนสุทธิ์^{1*}, จอมภพ แววศักดิ์²Warangkha Riansut^{1*}, Jompob Waewsak²¹สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

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

²สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

Department of Physics, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung Campus

*E-mail: warang27@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์อัตราเร็วลม 3 วิธี คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ อนุกรมเวลอัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จากจังหวัดมุกดาหาร ได้มาจากรศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายนถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 จำนวน 721 ค่า สำหรับการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์จะใช้เกณฑ์ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) และเกณฑ์รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า จากวิธีการพยากรณ์ทั้งหมดที่ได้ศึกษา วิธีที่มีความถูกต้องมากที่สุดคือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ มีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ร้อยละ 4.9216 (MAPE = 4.9216) หรือมีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ 0.5 เมตร/วินาที (RMSE = 0.5) ซึ่งทั้ง 2 เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์ให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำให้น่าเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้นว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดนี้มากที่สุด

คำสำคัญ: อัตราเร็วลม ตัวแบบพยากรณ์ บ็อกซ์-เจนกินส์ การปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลัง

ABSTRACT

This research aimed to compare three methods of forecasting wind speed: Box-Jenkins method, Winters' additive exponential smoothing method, and Winters' multiplicative exponential smoothing method. Time series of hourly wind speed at an altitude of 120 meters in Mukdahan province were gathered from research center in energy and environment, Thaksin university during 1 June to 1 July 2015 of 721 observations. The criteria of the lowest mean absolute percentage error (MAPE) and root mean squared error (RMSE) were used for comparing

Received 08-05-2019

Revised 15-08-2019

Accepted 16-08-2019

the accuracy of the forecasting model. Research findings indicated that for all forecasting methods that were studied, the most accurate method was the Box-Jenkins method. This forecasting method was 4.9216 percent forecasting error (MAPE = 4.9216) or was forecasting error of 0.5 meter/second (RMSE = 0.5). The comparison of the accuracy of the forecasting model for both criteria provided the same result. Therefore, it made more reliable that the Box-Jenkins method was the most suitable method for this time series.

Keywords: Wind speed, Forecasting model, Box-Jenkins, Exponential smoothing

1. บทนำ

ปัจจุบันมีทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ที่กำลังดำเนินการในประเทศไทยแล้ว 21 โครงการ กำลังการผลิตติดตั้ง 681.4 เมกะวัตต์ ในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดชัยภูมิ จังหวัดเพชรบูรณ์ จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดสงขลา จังหวัดสมุทรสาคร จังหวัดภูเก็ต และจังหวัดตราด นอกจากนี้ยังมีอีกหลายโครงการที่กำลังอยู่ในระหว่างก่อสร้าง เช่น ทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 60 เมกะวัตต์ บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ในรูปแบบผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small power producer, SPP) ของบริษัทกัลกุล รวมถึงยังมีอีกหลายโครงการที่กำลังอยู่ในระหว่างการพัฒนา ซึ่งเป็นการพัฒนาเพื่อเป็นไปตามแผนการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมของกระทรวงพลังงานและมีเป้าหมายการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าให้ได้ถึง 3,002 เมกะวัตต์ จากการที่พลังงานลมมีคุณลักษณะที่มีความแปรปรวนสูง เพราะพฤติกรรมของลมที่ไม่ต่อเนื่องและมีการเปลี่ยนแปลงสูง ทำให้การผลิตไฟฟ้าของทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีลักษณะแปรปรวนตามพฤติกรรมของลม ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพไฟฟ้าที่ผลิตได้จากทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่อาจจะส่งผลกระทบต่อระบบกริดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งการดำเนินงานของทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะสามารถผลิตไฟฟ้าออกมาในลักษณะที่เรียกว่า Stochastic และ Intermittency ดังนั้นการคาดการณ์หน่วยผลิตหรือการพยากรณ์หน่วยผลิตไฟฟ้าจากทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะช่วยให้การวางแผนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับความต้องการใช้ไฟฟ้าไม่สูงและไม่ต่ำจนเกินไป อย่างไรก็ตาม การพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าจากทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะมีความถูกต้องแม่นยำขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การพยากรณ์ลมในพื้นที่ของทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงและมีความถี่เชิงเวลาที่ละเอียด เช่น รายนาที่หรือรายชั่วโมง ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าของทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้า (Wind turbine generator) และเส้นโค้งกำลัง (Power curve) ที่มีความถูกต้อง ข้อมูลเชิงพื้นที่ของโครงการ แบบจำลองการไหลของลม (Wind flow modeling) เชิงพื้นที่ในพื้นที่ศึกษาของโครงการ ซึ่งปัจจุบันมักจะอาศัยแบบจำลองการไหลของลมแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิคการพยากรณ์ต่าง ๆ เช่น เทคนิคการสร้างตัวแบบพยากรณ์ทางสถิติ (Statistical modeling) เพื่อช่วยให้ผลการพยากรณ์มี

ความถูกต้องแม่นยำสูงขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงเป็นที่น่าสนใจที่ควรมีการศึกษาการพยากรณ์ข้อมูลอัตราเร็วลม จากการศึกษางานวิจัยอื่น ๆ พบว่า วรณดา กิรติวิบูลย์ และเจี๊ยะอัฐพาน มาทิละ [1] ได้พยากรณ์อัตราเร็วลมราย 3 ชั่วโมง ที่ระดับความสูง 20 เมตร ตามแนวชายฝั่งของอำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา ด้วยวิธีการทางสถิติ 2 วิธี คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ และวิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา ผลการวิจัยพบว่า วิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลาในรูปแบบบวกให้ความแม่นยำในการพยากรณ์สูงกว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วรณดา กิรติวิบูลย์ และเจี๊ยะอัฐพาน มาทิละ [2] ได้พยากรณ์อัตราเร็วลมรายชั่วโมง ที่ระดับความสูง 40 เมตร ตามแนวชายฝั่ง อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช ด้วยวิธีการทางสถิติ 6 วิธี คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา วิธีการพยากรณ์รวมโดยใช้การเฉลี่ยอย่างง่าย วิธีการพยากรณ์รวมโดยใช้การถ่วงน้ำหนักด้วยการถ่วงน้ำหนักของผลรวมของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง วิธีการพยากรณ์รวมโดยใช้การถ่วงน้ำหนักด้วยการถ่วงน้ำหนักของผลรวมของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ และวิธีการพยากรณ์รวมโดยใช้การถ่วงน้ำหนักด้วยสัดส่วนของค่าจากเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ตัวประกอบหลัก ผลการวิจัยพบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ โดยใช้ตัวแบบ SARIMA(1, 1, 1)(0, 1, 1)₂₄ ไม่มีพจน์ค่าคงตัว เป็นวิธีที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดนี้มากที่สุด Keerativibool et al. [3] ได้พยากรณ์อัตราเร็วลมราย 3 ชั่วโมง ที่ระดับความสูง 30 เมตร ตามแนวชายฝั่ง อำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา ด้วยวิธีการทางสถิติ 2 วิธี คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ และวิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา ผลการวิจัยพบว่า

วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่ดีกว่าวิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา และ Bielecki et al. [4] ได้ศึกษาคุณลักษณะทางสถิติของความผิดพลาดในการพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ซึ่งการพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเป็นการผสมผสานกันระหว่างเทคนิคทางฟิสิกส์และทางสถิติ โดยเป็นอัลกอริธึมที่มีความสลับซับซ้อนในการพยากรณ์และลดความผิดพลาด ความผิดพลาดดังกล่าวมักจะเกี่ยวข้องกับลมและเส้นโค้งกำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้า การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาการพยากรณ์จากกังหันลมผลิตไฟฟ้าเพียงต้นเดียว

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า ยังไม่มีเคยมีการศึกษาพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร อีกทั้งการพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร เป็นสิ่งที่มีประโยชน์เนื่องจากเป็นระดับความสูงของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ในปัจจุบันที่มีหอคอยสูงระดับ 120 เมตร ดังนั้นการศึกษาค้นคว้านี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร โดยใช้วิธีการทางสถิติทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ จากนั้นจึงคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่มีความถูกต้องและเหมาะสมมากที่สุด 1 ตัวแบบ โดยใช้เกณฑ์ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute percentage error, MAPE) และเกณฑ์รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean squared error, RMSE) ที่ต่ำที่สุด เพื่อให้ได้ตัวแบบพยากรณ์สำหรับการพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร ในอนาคตต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการสร้างตัวแบบพยากรณ์อัตราเร็วลม (เมตร/วินาที) โดยใช้โปรแกรม SPSS ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ เป็นอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2524 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 302,377 ค่า เนื่องด้วยข้อจำกัดของงบประมาณการเก็บรวบรวมข้อมูล ทำให้การศึกษานี้ไม่สามารถนำอัตราเร็วลมที่เป็นปัจจุบันมาวิเคราะห์ข้อมูลได้ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยเชื่อว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วลมในอดีตและในปัจจุบันไม่ได้มีความแตกต่างกันมากนัก

ผู้วิจัยคัดเลือกข้อมูลอัตราเร็วลมมาศึกษา ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 721 ค่า เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มียุทธศาสตร์ของอนุกรมเวลาเหมาะสมกับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ อีกทั้งยังเป็นช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกับข้อมูลปัจจุบันมากที่สุด ผู้วิจัยได้นำข้อมูลจำนวน 721 ค่า มาแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 29 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 23.00 น. จำนวน 696 ค่า สำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ และชุดที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 25 ค่า สำหรับการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์ ด้วยเกณฑ์ MAPE และ RMSE ที่ต่ำที่สุด ซึ่งข้อมูลชุดที่ 2 ที่ใช้ในการศึกษานี้มีจำนวนไม่ถึงร้อยละ 10 (จำนวน 72 ค่า) เนื่องจากผู้วิจัยต้องการเก็บข้อมูลในช่วงวันที่ 28 - 29 มิถุนายน 2558 ที่พบแนวโน้ม

ที่ลดลง เป็นข้อมูลชุดที่ 1 เพื่อให้ได้ตัวแบบพยากรณ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาชุดที่ 1 พบว่า อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร มีส่วนประกอบของแนวโน้มทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงรวมถึงมีความผันแปรตามฤดูกาล (แสดงรายละเอียดในผลการทดลองและอภิปรายผลภาพที่ 1) นอกเหนือจากการพิจารณารูปของอนุกรมเวลา (Y_t) เทียบกับเวลา (t) แล้ว ผู้วิจัยยังได้ตรวจสอบว่าอนุกรมเวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาลจริงหรือไม่ โดยใช้การทดสอบสมมติฐานดังนี้ [5]

การตรวจสอบว่าอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร มีส่วนประกอบของแนวโน้มหรือไม่ ดำเนินการดังนี้

1.ตรวจสอบข้อสมมติ (Assumption) คืออนุกรมเวลาในแต่ละวันมีการแจกแจงปกติโดยใช้การทดสอบชาปิโร-วิลค์ (Shapiro-Wilk test) เนื่องจากอนุกรมเวลาในแต่ละวันมี 24 ค่า ซึ่งเป็นข้อมูลรายชั่วโมง ($n < 50$) ผลการตรวจสอบพบว่าอัตราเร็วลมในแต่ละวันไม่มีการแจกแจงปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2.ตรวจสอบความเท่ากันของความแปรปรวนโดยใช้การทดสอบของเลวิน ภายใต้การใช้มัธยฐาน (Levene's test based on median) เนื่องจากการทดสอบของเลวิน ภายใต้การใช้มัธยฐาน เป็นการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนประชากรหลายกลุ่มที่ได้รับการพัฒนามาจากวิธีเลวิน ภายใต้การใช้ค่าเฉลี่ย (Levene's test based on mean) แต่วิธีเลวิน ภายใต้การใช้มัธยฐานจะได้สถิติที่มีความแกร่ง (Robust) ต่อข้อสมมติของการแจกแจงปกติของตัวแปรสุ่มที่พิจารณา จึงเป็น

วิธีที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า เนื่องจากสามารถใช้ได้กับข้อมูลที่ไม่ได้มีการแจกแจงปกติด้วย เพราะเมื่อข้อมูลมีลักษณะเบ้ซ้ายหรือเบ้ขวาจะมีผลกระทบกับมัธยฐานน้อยกว่าค่าเฉลี่ย ผลการตรวจสอบความแปรปรวนพบว่า อัตราเร็วลมในแต่ละวันมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.ทดสอบมัธยฐานของอนุกรมเวลาในแต่ละวัน โดยใช้สถิติไม่อิงพารามิเตอร์ (Nonparametric statistics) ซึ่งก็คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคอลล-วอลลิส (Kruskal-Wallis's one-way analysis of variance by rank) เนื่องจากอัตราเร็วลมในแต่ละวันไม่มีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน ผลการทดสอบพบว่า อัตราเร็วลมในแต่ละวันมีมัธยฐานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 481.191$, p-value < 0.0001) หมายความว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของแนวโน้ม ซึ่งอาจจะเป็นแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้

การตรวจสอบว่าอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหารมีส่วนประกอบของความผันแปรตามฤดูกาลหรือไม่ดำเนินการดังนี้

1.จากการตรวจสอบแนวโน้ม พบว่า อนุกรมเวลามีส่วนประกอบของแนวโน้ม จึงต้องกำจัดแนวโน้มออกก่อนที่จะทดสอบค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาในแต่ละชั่วโมง ซึ่งวิธีการกำจัดแนวโน้มมี 2 วิธีคือ ถ้าพิจารณาที่กราฟของอนุกรมเวลาเทียบกับเวลาแล้วพบว่า อนุกรมเวลาที่มีการเคลื่อนไหวหรือมีการแกว่งตัวที่ค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปกล่าวได้ว่า อนุกรมเวลามีความเหมาะสมกับตัวแบบบวก ควรกำจัดแนวโน้มออกด้วยการลบ แต่ถ้า

อนุกรมเวลาที่มีการเคลื่อนไหวหรือมีการแกว่งตัวที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป กล่าวได้ว่า อนุกรมเวลาไม่เหมาะสมกับตัวแบบบวก ควรกำจัดแนวโน้มออกด้วยการหาร สำหรับการเคลื่อนไหวของอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร ในผลการทดลองและอภิปรายผลภาพที่ 1 พบว่า อนุกรมเวลาไม่เหมาะสมกับตัวแบบบวก จึงกำจัดแนวโน้มออกด้วยการหาร

2. ตรวจสอบข้อสมมุติโดยใช้การทดสอบชาปิโร-วิลค์ สำหรับการตรวจสอบการแจกแจงปกติ เนื่องจากอนุกรมเวลาในแต่ละชั่วโมงมี 29 ค่า ซึ่งเป็นข้อมูลชุดที่ 1 ที่มีจำนวน 29 วัน ($n < 50$) และใช้การทดสอบของเลวิน ภายใต้การใช่มัธยฐานสำหรับการตรวจสอบความเท่ากันของความแปรปรวน ผลการตรวจสอบพบว่า อัตราเร็วลมในแต่ละชั่วโมงหลังจากกำจัดแนวโน้มออกแล้วไม่มีการแจกแจงปกติ แต่มีความแปรปรวนเท่ากัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.ทดสอบมัธยฐานของอนุกรมเวลาในแต่ละชั่วโมงหลังจากกำจัดแนวโน้มออกแล้ว โดยใช้สถิติไม่อิงพารามิเตอร์ ซึ่งก็คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคอลล-วอลลิส เนื่องจากอัตราเร็วลมในแต่ละชั่วโมงหลังจากกำจัดแนวโน้มออกแล้วไม่มีการแจกแจงปกติ ผลการทดสอบพบว่า อัตราเร็วลมในแต่ละชั่วโมงเมื่อปรับแนวโน้มออกด้วยการหารมีมัธยฐานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 96.593$, p-value < 0.0001) หมายความว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของความผันแปรตามฤดูกาล

จากผลการทดสอบสมมุติฐานข้างต้น สรุปได้ว่า อนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร

จังหวัดมุกดาหาร ชุดที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 29 มิถุนายน 2558 จำนวน 696 ค่า มีส่วนประกอบของ แนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาล สอดคล้องกับการพิจารณาจากกราฟของอนุกรมเวลา (Y_t) เทียบกับเวลา (t) ดังนั้นวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีทั้งส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาล ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (เมื่อใช้ตัวแบบ Seasonal autoregressive integrated moving average, SARIMA) วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ วิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีการทางสถิติทั้ง 3 วิธี ดังกล่าว แสดงรายละเอียดดังหัวข้อที่ 2.1 สำหรับหัวข้อที่ 2.2 จะเป็นการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์ โดยพิจารณาจากเกณฑ์ MAPE และ RMSE ที่ต่ำที่สุด สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ในหัวข้อที่ 2.1 แสดงดังนี้

Y_t แทนอนุกรมเวลาอัตราเร็วรวม ณ เวลา t
 $\hat{Y}_t$ และ $\hat{Y}_{t+m}$ แทนค่าพยากรณ์อัตราเร็วรวม ณ เวลา t และเวลา $t + m$ ตามลำดับ โดยที่ m แทนจำนวนช่วงเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปข้างหน้า
 a_t , b_t และ S_t แทนค่าประมาณระยะตัดแกน Y ความชันของแนวโน้ม และความผันแปรตามฤดูกาล ณ เวลา t ตามลำดับ
 α , γ และ δ แทนค่าคงตัวการปรับเรียบ โดยที่ $0 < \alpha < 1$, $0 < \gamma < 1$ และ $0 < \delta < 1$
 t แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_1 เมื่อ n_1 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดที่ 1
 s แทนจำนวนคาบของฤดูกาล

2.1 วิธีการพยากรณ์

2.1.1 วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์

วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีทั้งส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาล มีตัวแบบในรูปทั่วไป คือ SARIMA($p, d, q(P, D, Q)$) แสดงดังสมการที่ (1) [6] แต่ในกรณีที่อนุกรมเวลาที่มีเพียงส่วนประกอบของแนวโน้มเท่านั้น ตัวแบบจะสามารถลดรูปเหลือเพียง ARIMA (p, d, q) ขั้นตอนการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์สามารถศึกษาได้จากวราภรณ์เรียนสุทธิ [7]

$$\phi_p(B)\Phi_p(B^s)(1-B)^d(1-B^s)^D Y_t = \delta + \theta_q(B)\Theta_q(B^s)\varepsilon_t \quad (1)$$

เมื่อ ε_t แทนอนุกรมเวลาของความคลาดเคลื่อนที่มีการแจกแจงปกติและเป็นอิสระกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา

$\delta = \mu\phi_p(B)\Phi_p(B^s)$ แทนค่าคงตัว (Constant) โดยที่ μ แทนค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาที่คงที่ (Stationary)

$\phi_p(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ แทนตัวดำเนินการสหสัมพันธ์ในตัวเองอันดับที่ p กรณีไม่มีฤดูกาล (Non-seasonal autoregressive operator of order p , AR(p))

$\Phi_p(B^s) = 1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_p B^{ps}$ แทนตัวดำเนินการสหสัมพันธ์ในตัวเองอันดับที่ P กรณีมีฤดูกาล (Seasonal autoregressive operator of order P , SAR(P))

$\theta_q(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่อันดับที่ q กรณีไม่มีฤดูกาล

(Non-seasonal moving average operator of order q , $MA(q)$)

$\Theta_Q(B^s) = 1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{2s} - \dots - \Theta_Q B^{Qs}$ แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่อันดับที่ Q ฤดูกาล (Seasonal moving average operator of order Q , $SMA(Q)$)

d และ D แทนลำดับที่ของการหาผลต่างและผลต่างฤดูกาล ตามลำดับ

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

2.1.2 วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก

วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวกมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีส่วนประกอบของแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงและมีความผันแปรตามฤดูกาล โดยที่อัตราส่วนของความผันแปรตามฤดูกาลต่อค่าแนวโน้มมีค่าคงที่ กล่าวคืออัตราส่วนของความผันแปรตามฤดูกาลต่อค่าแนวโน้มมีค่าไม่เพิ่มขึ้นและไม่ลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังสมการที่ (2) [5]

$$\hat{Y}_{t+m} = (a_t + b_t m) + \hat{S}_t \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } a_t &= \alpha(Y_t - \hat{S}_{t-s}) + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \\ b_t &= \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1} \\ \hat{S}_t &= \delta(Y_t - a_t) + (1-\delta)\hat{S}_{t-s} \end{aligned}$$

2.1.3 วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีส่วนประกอบของแนวโน้มที่เป็น

เส้นตรงและมีความผันแปรตามฤดูกาล โดยที่อัตราส่วนของความผันแปรตามฤดูกาลต่อค่าแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังสมการที่ (3) [5]

$$\hat{Y}_{t+m} = (a_t + b_t m) \hat{S}_t \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } a_t &= \alpha \frac{Y_t}{\hat{S}_{t-s}} + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \\ b_t &= \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1} \\ \hat{S}_t &= \delta \frac{Y_t}{a_t} + (1-\delta)\hat{S}_{t-s} \end{aligned}$$

2.2 การเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์

การวิจัยครั้งนี้ได้คัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่มีความถูกต้องและเหมาะสมกับอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร โดยการเปรียบเทียบอัตราเร็วลมรายชั่วโมงของข้อมูลชุดที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 25 ค่า กับค่าพยากรณ์จากวิธีการทางสถิติทั้ง 3 วิธี เพื่อคำนวณค่า MAPE และ RMSE โดยตัวแบบพยากรณ์ที่ให้ค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด จัดเป็นตัวแบบที่มีความถูกต้องและเหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดนี้มากที่สุด เนื่องจากให้ค่าพยากรณ์ที่มีความแตกต่างกับข้อมูลจริงน้อยที่สุด เกณฑ์ MAPE และ RMSE แสดงดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ [5], [8]

$$MAPE = \frac{100}{n_2} \sum_{t=1}^{n_2} \left| \frac{e_t}{Y_t} \right| \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_2} \sum_{t=1}^{n_2} e_t^2} \quad (5)$$

เมื่อ $e_t = Y_t - \hat{Y}_t$ แทนความคลาดเคลื่อน

จากการพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา t

Y_t และ $\hat{Y}_t$ แทนอนุกรมเวลา และ
ค่าพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา t

t แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_2 โดย
ที่ n_2 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดที่ 2

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการพิจารณาลักษณะการเคลื่อนไหวของ
อนุกรมเวลาอัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง
120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร ชุดที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1
มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 29
มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 23.00 น. จำนวน 696 ค่า
ดังภาพที่ 1 พบว่า อัตราเร็วลมในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่
14 มิถุนายน 2558 มีแนวโน้มลดลง ($b_1 = -0.0021$,
 $t = -3.011$, $p\text{-value} = 0.0029$) อัตราเร็วลมในช่วง
วันที่ 15 ถึงวันที่ 25 มิถุนายน 2558 มีแนวโน้ม
เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ($b_1 = 0.0290$, $t = 24.389$,
 $p\text{-value} < 0.0001$) หลังจากนั้นอัตราเร็วลมมี
แนวโน้มลดลงอีกครั้งหนึ่ง ($b_1 = -0.0305$, $t =$
 -8.964 , $p\text{-value} < 0.0001$) และอัตราเร็วลมมี
ส่วนประกอบของความผันแปรตามฤดูกาลรวมอยู่ด้วย

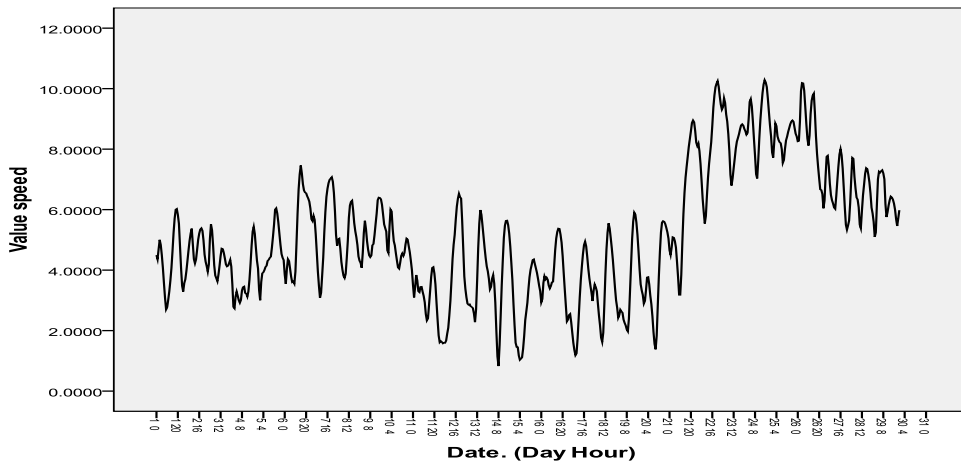
3.1 ผลการสร้างตัวแบบพยากรณ์

3.1.1 ผลของวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์

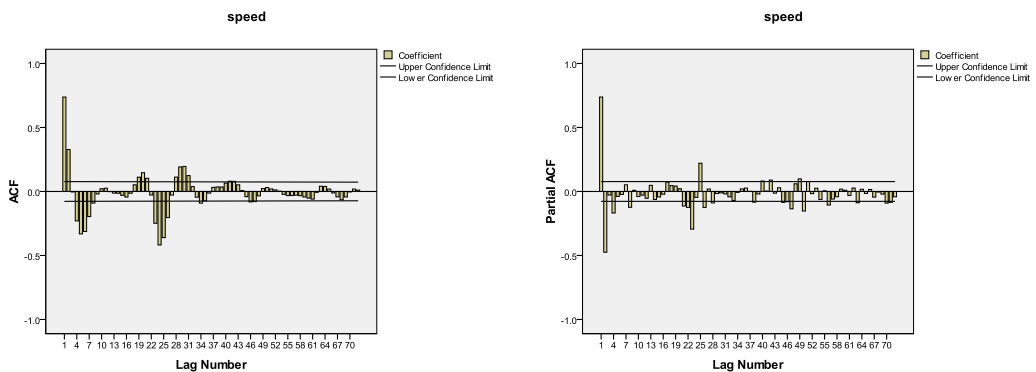
เนื่องจากอนุกรมเวลาชุดนี้มี
ส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตาม
ฤดูกาล ผู้วิจัยจึงกำจัดแนวโน้มออกโดยการหาผลต่าง
ลำดับที่ 1 ($d = 1$) และกำจัดความผันแปรตาม
ฤดูกาลออกโดยการหาผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1 ($D =$
 1 , $s = 24$) ได้กราฟ ACF และ PACF หลังจาก
การแปลงข้อมูลแสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งพบว่า อนุกรม
เวลายังมีลักษณะไม่คงที่ (Non-stationary)
โดยกราฟ ACF แสดงให้เห็นว่าสัมพันธ์สหสัมพันธ์
ในตัวเองลดลงอย่างช้า ๆ จึงแปลงข้อมูลอีกครั้งโดย
การหาผลต่างลำดับที่ 2 และผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1
($d = 2$, $D = 1$, $s = 24$) ได้กราฟ ACF และ PACF
หลังจากการแปลงข้อมูลแสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งพบว่า
อนุกรมเวลามีลักษณะคงที่ จึงกำหนดตัวแบบ
พยากรณ์ที่เป็นไปได้เริ่มต้น คือ ตัวแบบ SARIMA(3,
2, 3)(1, 1, 1)₂₄ พร้อมกับประมาณค่าพารามิเตอร์
โดยตัวแบบพยากรณ์ที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวมี
นัยสำคัญที่ระดับ 0.05 คือ ตัวแบบ SARIMA(2, 2,
2)(1, 1, 1)₂₄ ไม่มีพจน์ค่าคงตัว ดังตารางที่ 1 และ
จากสมการที่ (1) สามารถเขียนเป็นตัวแบบได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)(1 - \phi_1 B^{24})(1 - B)^2(1 - B^{24})Y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2)(1 - \Theta_1 B^{24})\varepsilon_t \\ & (1 - \phi_1 B^{24} - \phi_1 B + \phi_1 \phi_1 B^{25} - \phi_2 B^2 + \phi_2 \phi_1 B^{26})(1 - B^{24} - 2B + 2B^{25} + B^2 - B^{26})Y_t \\ & = (1 - \Theta_1 B^{24} - \theta_1 B + \theta_1 \Theta_1 B^{25} - \theta_2 B^2 + \theta_2 \Theta_1 B^{26})\varepsilon_t \\ & (1 - B^{24} - 2B + 2B^{25} + B^2 - B^{26} - \phi_1 B^{24} + \phi_1 B^{48} + 2\phi_1 B^{25} - 2\phi_1 B^{49} - \phi_1 B^{26} + \phi_1 B^{50} - \phi_1 B + \phi_1 B^{25} + 2\phi_1 B^2 \\ & - 2\phi_1 B^{26} - \phi_1 B^3 + \phi_1 B^{27} + \phi_1 \phi_1 B^{25} - \phi_1 \phi_1 B^{49} - 2\phi_1 \phi_1 B^{26} + 2\phi_1 \phi_1 B^{50} + \phi_1 \phi_1 B^{27} - \phi_1 \phi_1 B^{51} - \phi_2 B^2 + \phi_2 B^{26} \\ & + 2\phi_2 B^3 - 2\phi_2 B^{27} - \phi_2 B^4 + \phi_2 B^{28} + \phi_2 \phi_1 B^{26} - \phi_2 \phi_1 B^{50} - 2\phi_2 \phi_1 B^{27} + 2\phi_2 \phi_1 B^{51} + \phi_2 \phi_1 B^{28} - \phi_2 \phi_1 B^{52})Y_t \\ & = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \Theta_1 \varepsilon_{t-24} + \theta_1 \Theta_1 \varepsilon_{t-25} + \theta_2 \Theta_1 \varepsilon_{t-26} \end{aligned}$$

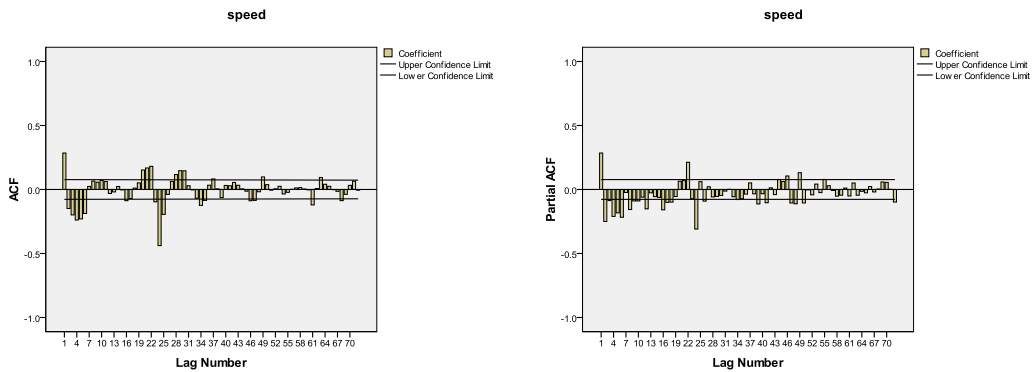
$$Y_t = (2 + \phi_1)Y_{t-1} - (1 + 2\phi_1 - \phi_2)Y_{t-2} + (\phi_1 - 2\phi_2)Y_{t-3} + \phi_2 Y_{t-4} + (1 + \Phi_1)Y_{t-24} - (2 + \phi_1)(1 + \Phi_1)Y_{t-25} \\ + (1 + 2\phi_1 - \phi_2)(1 + \Phi_1)Y_{t-26} - (\phi_1 - 2\phi_2)(1 + \Phi_1)Y_{t-27} - \phi_2(1 + \Phi_1)Y_{t-28} - \Phi_1 Y_{t-48} + \Phi_1(2 + \phi_1)Y_{t-49} \\ - \Phi_1(1 + 2\phi_1 - \phi_2)Y_{t-50} + \Phi_1(\phi_1 - 2\phi_2)Y_{t-51} + \phi_2 \Phi_1 Y_{t-52} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \theta_1 \varepsilon_{t-24} + \theta_1 \varepsilon_{t-25} \\ + \theta_2 \varepsilon_{t-26}$$



ภาพที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร ตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 29 มิถุนายน 2558



ภาพที่ 2 กราฟ ACF และ PACF ของอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร เมื่อแปลงข้อมูลด้วยการหาผลต่างลำดับที่ 1 และผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1



ภาพที่ 3 กราฟ ACF และ PACF ของอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร เมื่อแปลงข้อมูลด้วยการหาผลต่างลำดับที่ 2 และผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของตัวแบบ SARIMA(2, 2, 2)(1, 1, 1)₂₄ ไม่มีพจน์ค่าคงตัว

พารามิเตอร์	AR(1): ϕ_1	AR(2): ϕ_2	MA(1): θ_1	MA(2): θ_2	SAR(1): Φ_1	SMA(1): ϕ_1
ค่าประมาณ	0.74021	-0.17035	0.58499	0.41351	0.18694	0.88541
t	9.572	-2.459	5.732	5.024	3.708	25.312
p-value	< 0.0001	0.014	< 0.0001	< 0.0001	0.0002	< 0.0001

เมื่อแทนค่าประมาณพารามิเตอร์จากตารางที่ 1 จะได้ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังสมการที่ (6)

$$\begin{aligned} \hat{Y}_t = & 2.74021Y_{t-1} - 2.65077Y_{t-2} + 1.08091Y_{t-3} - 0.17035Y_{t-4} + 1.18694Y_{t-24} - 3.25246Y_{t-25} \\ & + 3.14630Y_{t-26} - 1.28298Y_{t-27} + 0.20220Y_{t-28} - 0.18694Y_{t-48} + 0.51225Y_{t-49} - 0.49553Y_{t-50} \\ & + 0.20207Y_{t-51} - 0.03185Y_{t-52} - 0.58499e_{t-1} - 0.41351e_{t-2} - 0.88541e_{t-24} + 0.51796e_{t-25} \\ & + 0.36613e_{t-26} \end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อ $\hat{Y}_t$ แทนค่าพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา t

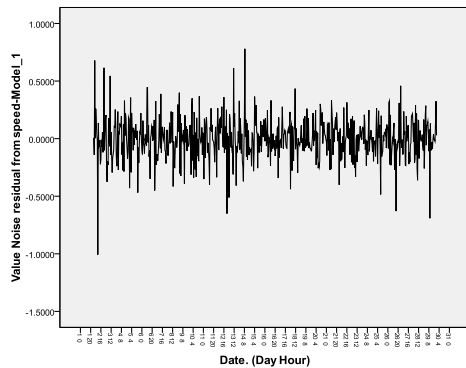
Y_{t-j} แทนอนุกรมเวลาอัตราเร็วลม ณ เวลา t - j

e_{t-j} แทนความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา t - j

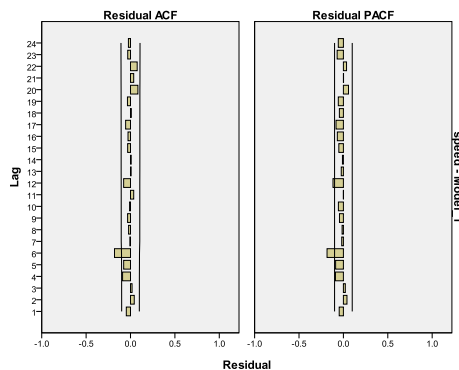
จากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ในสมการที่ (6) โดยพิจารณาที่ค่าความคลาดเคลื่อนดังภาพที่ 4 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ และมีการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน ผลจากการพิจารณากราฟ ACF และ PACF ของค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ดังภาพที่ 5 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการเคลื่อนไหวเป็น

อิสระกัน (ยกเว้นช่วงเวลาที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวบางส่วนเกินจากขอบเขตเพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่มีผลเสียแต่อย่างใด เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนช่วงเวลาที่ t กับความคลาดเคลื่อนช่วงเวลาที่ t - 6) และผลการตรวจสอบความเป็นอิสระกันโดยใช้การทดสอบรันส์ (Runs test) พบว่า

ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ($Z = 1.795$, $p\text{-value} = 0.073$) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสม



ภาพที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์เทียบกับเวลาโดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์



ภาพที่ 5 กราฟ ACF และ PACF ของค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์

3.1.2 ผลของวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก

จากการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก ได้ตัวแบบพยากรณ์ดังสมการที่ (7)

$$\hat{Y}_{t+m} = (6.16669 + 0.00248m) + \hat{S}_t \quad (7)$$

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

$\hat{S}_t$ แทนดัชนีฤดูกาล ณ เวลา t รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า อัตราเร็วลมของช่วงเวลา 3.00 น. ถึง 4.00 น. และช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 22.00 น. ของทุกวัน มีค่ามากกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ เนื่องจากมีค่าดัชนีฤดูกาลมากกว่า 0

ตารางที่ 2 ดัชนีฤดูกาลของอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จากวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก

ช่วงเวลา	ดัชนีฤดูกาล	ช่วงเวลา	ดัชนีฤดูกาล
0.00 น.	-0.52233	12.00 น.	-0.25343
1.00 น.	-0.57331	13.00 น.	0.23969
2.00 น.	-0.20685	14.00 น.	0.61642
3.00 น.	0.08076	15.00 น.	0.92353
4.00 น.	0.00150	16.00 น.	1.05669
5.00 น.	-0.25582	17.00 น.	1.08807
6.00 น.	-0.52275	18.00 น.	1.03096
7.00 น.	-0.75328	19.00 น.	0.88727
8.00 น.	-0.91695	20.00 น.	0.64588
9.00 น.	-1.05385	21.00 น.	0.36575
10.00 น.	-1.03257	22.00 น.	0.09255
11.00 น.	-0.75282	23.00 น.	-0.18509

จากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ในสมการที่ (7) โดยพิจารณาที่ค่าความคลาดเคลื่อนดังภาพที่ 6 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ และการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน และผลการตรวจสอบความเป็นอิสระกันโดยใช้การทดสอบรันส์ พบว่า ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ($Z = -1.397$, $p\text{-value} =$

0.162) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสม

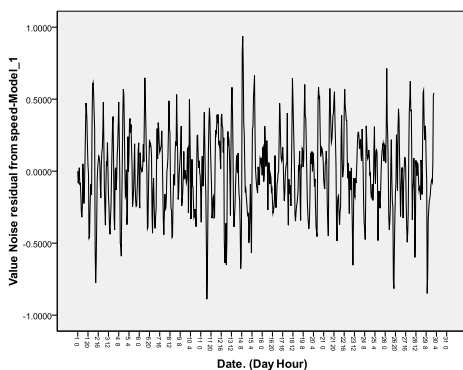
3.1.3 ผลของวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

จากการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ ได้ตัวแบบพยากรณ์ดังสมการที่ (8)

$$\hat{Y}_{t+m} = (6.15589 + 0.00513m)\hat{S}_t \quad (8)$$

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

$\hat{S}_t$ แทนดัชนีฤดูกาล รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า อัตราเร็วลมของช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 22.00 น. ของทุกวัน มีค่ามากกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ เนื่องจากมีค่าดัชนีฤดูกาลมากกว่า 1

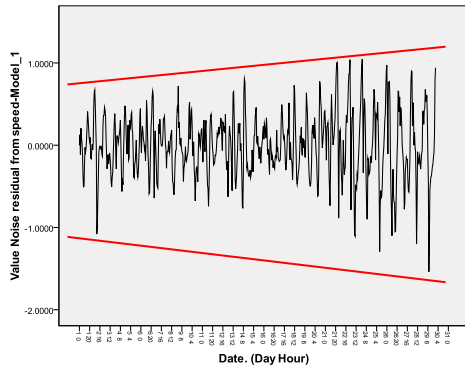


ภาพที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์เทียบกับเวลาโดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

ตารางที่ 3 ดัชนีฤดูกาลของอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จากวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

ช่วงเวลา	ดัชนี ฤดูกาล	ช่วงเวลา	ดัชนี ฤดูกาล
0.00 น.	0.83985	12.00 น.	0.97064
1.00 น.	0.79284	13.00 น.	1.08100
2.00 น.	0.86308	14.00 น.	1.17667
3.00 น.	0.88739	15.00 น.	1.26680
4.00 น.	0.84286	16.00 น.	1.32058
5.00 น.	0.77765	17.00 น.	1.35642
6.00 น.	0.71798	18.00 น.	1.37395
7.00 น.	0.68675	19.00 น.	1.35988
8.00 น.	0.68627	20.00 น.	1.30692
9.00 น.	0.70959	21.00 น.	1.22272
10.00 น.	0.78011	22.00 น.	1.10126
11.00 น.	0.86530	23.00 น.	0.97169

จากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ในสมการที่ (8) โดยพิจารณาที่ค่าความคลาดเคลื่อนดังภาพที่ 7 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ แต่มีการเคลื่อนไหวไม่เป็นอิสระกัน กล่าวคือ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความผันแปรของความคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้น และผลการตรวจสอบความเป็นอิสระกันโดยใช้การทดสอบรันส์ พบว่า มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ($Z = -5.168$, $p\text{-value} < 0.0001$) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นไม่มีความเหมาะสม จึงไม่ควรนำไปพยากรณ์ข้อมูลชุดที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบค่า MAPE และ RMSE



ภาพที่ 7 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์เทียบกับเวลาโดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

3.2 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์

จากการเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าพยากรณ์อัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร ของข้อมูลชุดที่ 2 ตั้งแต่วันที่

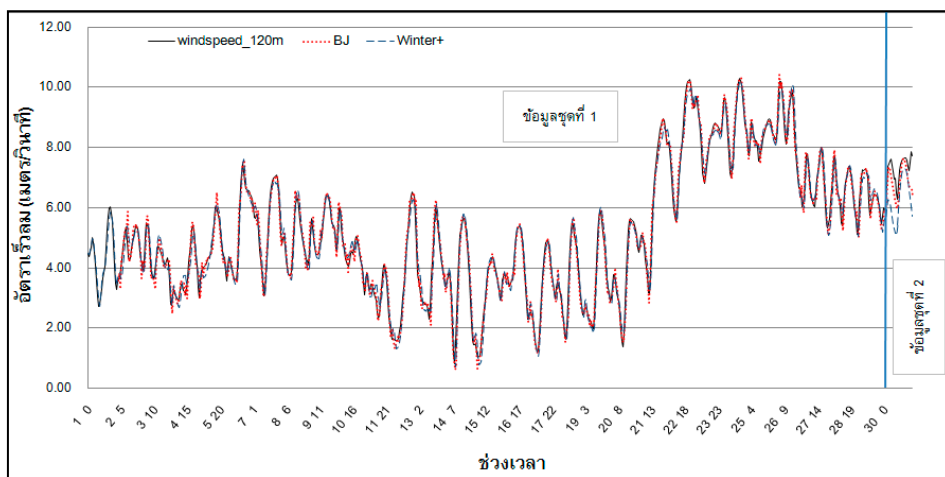
30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 25 ค่า โดยการคำนวณค่า MAPE และ RMSE ในสมการที่ (4) และสมการที่ (5) ตามลำดับ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4 และภาพที่ 8 ซึ่งพบว่า เมื่อใช้ตัวแบบพยากรณ์ของวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ ในสมการที่ (6) ได้ค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด ดังนั้นวิธีการพยากรณ์นี้จึงเป็นวิธีที่มีความถูกต้องและเหมาะสมมากที่สุดกับอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร โดยวิธีการพยากรณ์นี้มีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ร้อยละ 4.9216 ($MAPE = 4.9216$) หรือมีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ 0.5 เมตร/วินาที ($RMSE = 0.5$) ซึ่งทั้ง 2 เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์ให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำให้เราเชื่อได้ว่ามากยิ่งขึ้นว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดนี้มากที่สุด

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์

ช่วงเวลา	อัตราเร็วลม (เมตร/วินาที)	ค่าพยากรณ์จากวิธีการพยากรณ์	
		บ็อกซ์-เจนกินส์	วินเทอร์แบบบวก
30/6/2015 0:00 น.	5.9095	5.9103	5.6468
30/6/2015 1:00 น.	5.9932	6.1189	5.5983
30/6/2015 2:00 น.	6.7231	6.7392	5.9673
30/6/2015 3:00 น.	7.3818	7.3028	6.2574
30/6/2015 4:00 น.	7.5553	7.3535	6.1806
30/6/2015 5:00 น.	7.6225	7.1403	5.9257
30/6/2015 6:00 น.	7.3963	6.9324	5.6613
30/6/2015 7:00 น.	7.1798	6.7213	5.4332
30/6/2015 8:00 น.	6.9544	6.5182	5.2720
30/6/2015 9:00 น.	6.9642	6.2862	5.1376

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์ (ต่อ)

ช่วงเวลา	อัตราเร็วลม (เมตร/วินาที)	ค่าพยากรณ์จากวิธีการพยากรณ์	
		บ็อกซ์-เจนกินส์	วินเทอร์แบบบวก
30/6/2015 10:00 น.	6.4804	5.9788	5.1614
30/6/2015 11:00 น.	6.2601	6.0542	5.4436
30/6/2015 12:00 น.	6.7519	6.5105	5.9455
30/6/2015 13:00 น.	7.2185	6.9569	6.4411
30/6/2015 14:00 น.	7.4259	7.2902	6.8203
30/6/2015 15:00 น.	7.5503	7.5541	7.1299
30/6/2015 16:00 น.	7.6087	7.6362	7.2655
30/6/2015 17:00 น.	7.6652	7.6112	7.2994
30/6/2015 18:00 น.	7.6631	7.4976	7.2447
30/6/2015 19:00 น.	7.5792	7.3113	7.1035
30/6/2015 20:00 น.	7.3644	7.0339	6.8646
30/6/2015 21:00 น.	7.2232	6.7607	6.5870
30/6/2015 22:00 น.	7.5171	6.6826	6.3162
30/6/2015 23:00 น.	7.8452	6.6181	6.0411
1/7/2015 0:00 น.	7.7110	6.3649	5.7063
MAPE		4.9216	13.9033
RMSE		0.5000	1.1539



ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบอัตราเร็วลมและค่าพยากรณ์ ที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร

ผลการศึกษาครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของวรารณ กิริติวิบูลย์ และเจ๊ะอัฐพาน มาหิละ [2] ที่พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมมากที่สุดกับอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมรายชั่วโมง ที่ระดับความสูง 40 เมตร ตามแนวชายฝั่งอำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช และสอดคล้องกับการศึกษาของ Keerativibool et al. [3] ที่พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่ดีในการพยากรณ์อัตราเร็วลมราย 3 ชั่วโมง ที่ระดับความสูง 30 เมตร ตามแนวชายฝั่ง อำเภोजะนะ จังหวัดสงขลา แต่มีความขัดแย้งกับการศึกษาของวรารณ กิริติวิบูลย์ และเจ๊ะอัฐพาน มาหิละ [1] ที่พบว่า วิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลาในรูปแบบบวกให้ความแม่นยำในการพยากรณ์สูงกว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ในการพยากรณ์อัตราเร็วลมราย 3 ชั่วโมง ที่ระดับความสูง 20 เมตร ตามแนวชายฝั่งของอำเภोजะนะ จังหวัดสงขลา อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของช่วงเวลาในการเก็บรวบรวมข้อมูล ระดับความสูงที่วัดอัตราเร็วลม พื้นที่ที่ศึกษา และวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบ

ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีความถูกต้องและเหมาะสมที่สุดกับอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร อาจเนื่องมาจากการสร้างตัวแบบพยากรณ์ของวิธีนี้จะพิจารณาลักษณะของอนุกรมเวลาว่ามีสหสัมพันธ์กันอย่างไร รวมถึงมีการพิจารณาข้อมูลและความคลาดเคลื่อนในอดีตเพื่อนำมาสร้างเป็นตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสม โดยวิธีการพยากรณ์นี้สามารถใช้ได้กับอนุกรมเวลาที่มีลักษณะการเคลื่อนไหวทุกรูปแบบ อีกเหตุผลหนึ่งที่ผู้วิจัยคาดว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีความเหมาะสมมากกว่าวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบ

บวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ อาจเนื่องมาจากตัวแบบพยากรณ์ที่ได้จากวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณมีค่าความชัน (b_1) เป็นบวก ซึ่งหมายถึงผลที่ได้จากการพยากรณ์อัตราเร็วลมจะเป็นไปในทิศทางเพิ่มขึ้นเท่านั้น ขณะที่อัตราเร็วลมชุดที่ 1 ที่นำมาศึกษามีแนวโน้มทั้งลดลงและเพิ่มขึ้น

การศึกษารังต่อไปควรประยุกต์ใช้วิธีการพยากรณ์วิธีอื่น ๆ เช่น วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks, ANN) รวมทั้งควรเพิ่มเติมข้อมูลอัตราเร็วลมให้เป็นปัจจุบัน เพื่อปรับปรุงตัวแบบพยากรณ์ที่ได้ให้มีความเหมาะสมและมีค่าพยากรณ์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด อีกทั้งเพื่อประโยชน์ในด้านการวางแผนและการพัฒนาเทคโนโลยีกักกันลมภายในประเทศ ควรสร้างตัวแบบพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูงอื่น ๆ เช่น 50 และ 100 เมตร เป็นต้น

4. สรุปผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างและคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร โดยใช้ข้อมูลจากศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ผลการศึกษพบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีความถูกต้องและเหมาะสมมากกว่าวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ ซึ่งตัวแบบพยากรณ์ของวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ แสดงดังนี้

$$\begin{aligned}\hat{Y}_t = & 2.74021Y_{t-1} - 2.65077Y_{t-2} + 1.08091Y_{t-3} - 0.17035Y_{t-4} + 1.18694Y_{t-24} - 3.25246Y_{t-25} \\ & + 3.14630Y_{t-26} - 1.28298Y_{t-27} + 0.20220Y_{t-28} - 0.18694Y_{t-48} + 0.51225Y_{t-49} - 0.49553Y_{t-50} \\ & + 0.20207Y_{t-51} - 0.03185Y_{t-52} - 0.58499e_{t-1} - 0.41351e_{t-2} - 0.88541e_{t-24} + 0.51796e_{t-25} \\ & + 0.36613e_{t-26}\end{aligned}$$

เมื่อ $\hat{Y}_t$ แทนค่าพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา t

Y_{t-j} แทนอนุกรมเวลาอัตราเร็วลม ณ เวลา $t - j$

e_{t-j} แทนความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา $t - j$

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลอัตราเร็วลม สำหรับการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยทักษิณที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

6. อ้างอิง

- [1] วรางคณา กิรติวิบูลย์, เจ๊ะอัฐพาน มาหิเละ. ตัวแบบพยากรณ์ความเร็วลม ตามแนวชายฝั่ง จังหวัดสงขลา. ว.วิจัยพลังงาน. 2554; 8(1): 63-72.
- [2] วรางคณา กิรติวิบูลย์, เจ๊ะอัฐพาน มาหิเละ. ตัวแบบพยากรณ์ความเร็วลมตามแนวชายฝั่ง อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช. ว.วิจัย มช. 2556; 18(1): 32-50.
- [3] Keerativibool W, Waewsak J, Kanjnasamranwong P. 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; 2011 May 25-28; Hat Yai, Thailand, pp. 343-350.

- [4] Bielecki MF, Kemper JJ, Acker TL. Statistical Characterization of Errors in Wind Power Forecasting, Northern Arizona University, U.S.A.; 2014.
- [5] สมเกียรติ เกตุเอี่ยม. เทคนิคการพยากรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 2. สงขลา: มหาวิทยาลัยทักษิณ; 2548.
- [6] Box GEP, Jenkins GM, Reinsel GC. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall; 1994.
- [7] วรางคณา เรียนสุทธิ์. ตัวแบบพยากรณ์ราคา เมล็ดกาแฟ. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. 2562; 13(1): 141-155.
- [8] มุกดา มั่นมินทร์. อนุกรมเวลาและการพยากรณ์. กรุงเทพฯ: โพรพรินตัง; 2549.