



## การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของความเร็วลมและทิศทางลมที่ระดับความสูง 30 และ 40 เมตร: กรณีศึกษาอำเภอเสิงสาง จังหวัดสงขลา

### An Investigation of Means of Wind Speed and Wind Direction at the Altitudes of 30 and 40 Meters: A Case Study of Sathing Phra District, Songkhla Province

วารangkนา กิรติวิบูลย์<sup>1\*</sup> จอมภพ แววศักดิ์<sup>2</sup> และ เจ๊ะอัฐพาน มาหิเละ<sup>3</sup>

Warangkha Keerativibool<sup>1\*</sup> Jompob Waewsak<sup>2</sup> and Jehathfarn Mahileh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร., สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ และนักวิจัยประจำศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร., สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และนักวิจัยประจำศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

<sup>3</sup>นิสิต สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

\*Correspondent author: warang27@gmail.com

## บทคัดย่อ

การตรวจวัดลมที่ระดับความสูงแตกต่างกันย่อมส่งผลต่อต้นทุนของอุปกรณ์และระดับกำลังลมแตกต่างกัน ระดับความสูงที่เหมาะสมจึงเป็นตัวแปรต้นที่สำคัญที่ควรศึกษา วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ คือ การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม 2 ตัว คือ ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที) และทิศทางลม (องศา) บริเวณแนวชายฝั่งทะเล อำเภอเสิงสาง จังหวัดสงขลา ที่ระดับความสูงของเสาวัดลมหรือตัวแปรต้น 2 ระดับ คือ 30 และ 40 เมตร โดยใช้ความเร็วลมและทิศทางลมเฉลี่ยต่อวัน ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ถึงวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2554 จำนวน 179 ค่า ในแต่ละระดับความสูง ซึ่งถูกเก็บรวบรวมโดยศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ผลการตรวจสอบค่าเฉลี่ยด้วยการทดสอบไคสแควร์ พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวัน ณ ระดับความสูงของเสาวัดลมที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 30 และ 40 เมตร ไม่มีความแตกต่างกัน ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าทางเลือกหนึ่งของการลดต้นทุนของอุปกรณ์และการติดตั้ง รวมทั้งประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน คือ การติดตั้งเสาวัดลมที่ระดับความสูง 30 เมตร มากกว่าที่ระดับความสูง 40 เมตร

## Abstract

The different heights of wind observation required different investment costs for sensor and meteorological tower (met tower) installation as well as wind power class. Consequently, the suitable height of met tower becomes a crucial independent variable to be taken into consideration. The main objective of this research is to investigate the mean wind speed (meters per second) and wind direction (degrees) at coastal area of Sathing Phra district in Songkhla province for two heights of met tower, i.e., 30 and 40 meters. The wind speed and wind direction were

observed by Research Center in Energy and Environment at Thaksin University starting from 1 January 2011 to 28 June 2011 with the total number of 179 sampling values for each elevation. Results based on Hotelling's  $T^2$  test showed that the means of wind speed and wind direction at the altitudes 30 and 40 meters are not different at the significance level 0.05. Therefore, we can say that the alternative way to reduce the costs of equipment and installation, including the costs of operations is the installation of met tower at an altitude of 30 meter more than 40 meter.

**คำสำคัญ:** ความเร็วลมและทิศทางลมการแจกแจงปกติของหลายตัวแปรเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วม สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ การทดสอบโฮเทลลิงที่สแควร์

**Keywords:** wind speed and wind direction, multivariate normal distribution, covariance matrix, correlation coefficient, Hotelling's  $T^2$  test

## 1. บทนำ

การพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมและการกำหนดระดับความสูงของเสาวัดลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุดจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมของลม ลักษณะการแจกแจงทางสถิติของลม ความหนาแน่นของกำลังลมตามระดับความสูง และลักษณะพื้นที่ของบริเวณที่จะนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์ ลักษณะพื้นที่ดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วและทิศทางลม กล่าวคือ เมื่อมีลมพัดผ่านพื้นที่ผิวขรุขระหรือบริเวณพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางต่างๆ เช่น ต้นไม้ ภูเขา และสิ่งปลูกสร้าง จะทำให้เกิดความปั่นป่วนของการไหล ซึ่งความปั่นป่วนนี้ส่งผลให้กำลังและแรงในกระแสลมที่จะส่งไปยังกังหันลดลง ความรุนแรงของความปั่นป่วนขึ้นอยู่กับขนาดและรูปทรงของสิ่งกีดขวาง โดยในทางธรรมชาติ บริเวณของการเกิดความปั่นป่วนมีผลในแนวตั้งประมาณ 2 เท่าของความสูงของสิ่งกีดขวางและส่งผลในแนวราบ 10-20 เท่าทางด้านใต้ลม (1) จะเห็นได้ว่าระดับความสูงของเสาวัดลมที่จะติดตั้งมีความแตกต่างกันตามความเหมาะสมในแต่ละพื้นที่ โดยเฉพาะพื้นที่ที่ปราศจากสิ่งกีดขวางทางลม เช่น พื้นที่บริเวณแนวชายฝั่งทะเล สามารถติดตั้งเสาวัดลมที่ระดับความสูงต่างๆ ได้ โดยไม่ต้องคำนึงถึงความปั่นป่วนของการไหลเพราะมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก ส่วนใหญ่ลมจะพัดแรงมากที่บรรยากาศระดับสูงเนื่องจากสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระโดยไม่มี

สิ่งกีดขวาง แต่การลงทุนสร้างเสาวัดลมที่ระดับความสูงมากๆ เช่น 100 เมตร อาจไม่คุ้มทุนเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งต้นทุนของอุปกรณ์และการติดตั้งคิดเป็นร้อยละ 75-90 ของการลงทุนทั้งหมด (2) รวมทั้งความเร็วลมยังมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบวันและตามฤดูกาลในรอบปี ความเร็วลมในบางช่วงเวลาและบางฤดูกาลอาจมีค่าต่ำหรือสูงไม่มีความแน่นอน และมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ (1) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้คือการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของความเร็วลมและทิศทางลมที่ระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร บริเวณแนวชายฝั่งทะเล อำเภอสติงพระ จังหวัดสงขลา ซึ่งสถิติที่มีความเหมาะสมสำหรับเปรียบเทียบเวกเตอร์ค่าเฉลี่ย 2 ประชากร คือ การวิเคราะห์หลายตัวแปร (multivariate analysis) ด้วยการทดสอบโฮเทลลิงที่สแควร์ (Hotelling's  $T^2$  Test) โดยไม่ควรทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย 2 ประชากรครั้งละ 1 ตัวแปร จำนวน  $p$  ครั้ง เมื่อ  $p$  แทนจำนวนตัวแปรที่ต้องการทดสอบ เนื่องจากจะส่งผลให้ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดประเภทที่ 1 หรือความน่าจะเป็นที่จะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐานหลัก เมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง หรือระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่ต้องการทดสอบ เช่น กำหนดระดับนัยสำคัญในการทดสอบแต่ละครั้งเท่ากับ 0.05 ( $\alpha = 0.05$ ) และมีตัวแปรที่ต้องการทดสอบ จำนวน 2 ตัวแปร ( $p = 2$ ) จะได้ว่าระดับนัยสำคัญใหม่ มีค่ามากกว่า 0.05 ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ระดับนัยสำคัญใหม่} &= P(\text{ปฏิเสธสมมติฐานหลัก เมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริงอย่างน้อย 1 ครั้ง} \\
 &\quad \text{จากการทดสอบทั้งหมด 2 ครั้ง}) \\
 &= 1 - P(\text{ยอมรับสมมติฐานหลัก เมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริงทั้ง 2 ครั้ง}) \\
 &= 1 - (1 - \alpha^2) = 1 - (1 - 0.05)^2 = 0.0975
 \end{aligned}$$

จะเห็นว่าระดับนัยสำคัญใหม่มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.0475 (0.0975 - 0.05) หรือร้อยละ 4.75 นั่นคือมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดประเภทที่ 1 หรือความผิดพลาดที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลักเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง เพิ่มมากขึ้นร้อยละ 4.75 แต่ปัญหาดังกล่าวนี้จะไม่เกิดขึ้นในกรณีที่ตัวแปรแต่ละตัวเป็นอิสระกัน นั่นหมายความว่า ในกรณีที่ทุกตัวแปรเป็นอิสระกัน ผู้วิจัยสามารถใช้การทดสอบครั้งละ 1 ตัวแปรได้ (3)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วลมและทิศทางลมจากลมสถิติโดยเฉลี่ยต่อวัน จำนวน 179 ค่า พบว่า ความเร็วลมและทิศทางลมมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม กล่าวคือ ระดับความเร็วลมที่สูงจะเกิดขึ้นเมื่อองศาของทิศทางลมต่ำ และในทางกลับกันระดับความเร็วลมที่ต่ำจะเกิดขึ้นเมื่อองศาของทิศทางลมสูง ดังนั้นสถิติที่มีความเหมาะสมสำหรับตรวจสอบค่าเฉลี่ยของความเร็วลมและทิศทางลมพร้อมกัน เพื่อควบคุมความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดประเภทที่ 1 หรือระดับนัยสำคัญให้เป็นที่ไปตามที่กำหนดไว้คือ การทดสอบไฮเทลลิงทีสแควร์ ผู้วิจัยมีความคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการวิจัยครั้งนี้จะเป็นสารสนเทศเบื้องต้นว่าระดับความสูงของเสาวัดลมที่ระดับใดจะให้ศักยภาพพลังงานลมที่ดีที่สุดเพื่อประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุดต่อไป

## 2. วิธีการวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ ความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวัน ที่ระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร บริเวณแนวชายฝั่งทะเล อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ถึงวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2554 จำนวน 179 ค่า ในแต่ละระดับความสูง ซึ่งถูกเก็บรวบรวมโดยศูนย์วิจัยพลังงานและ

สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ผู้วิจัยต้องการตรวจสอบว่าระดับความสูงของเสาวัดลมที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 30 และ 40 เมตร ส่งผลให้ความเร็วลมและทิศทางลมเฉลี่ยแตกต่างกันหรือไม่ ด้วยการทดสอบไฮเทลลิงทีสแควร์ ซึ่งมีเงื่อนไขหรือข้อตกลงเบื้องต้นของการทดสอบคือ ประชากรต้องมีการแจกแจงปกติของหลายตัวแปร (multivariate normal distribution) ตัวแปรตามต้องมีความสัมพันธ์เชิงเส้น (linearity) และมีความเป็นเอกพันธ์ของเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของประชากร (homogeneity of covariance matrices) (4) วิธีการวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ การตรวจสอบการแจกแจงปกติของหลายตัวแปร การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้น การตรวจสอบความเป็นเอกพันธ์ของเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของ 2 ประชากร และการทดสอบสมมติฐานของผลต่างของเวกเตอร์ค่าเฉลี่ย 2 ประชากร ทำการวิเคราะห์ข้อมูลแต่ละส่วนด้วยโปรแกรม SAS รุ่น 9 ดังหัวข้อ 2.1 - 2.4 โดยกำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย ดังนี้

$n$  แทนจำนวนค่าสังเกตจากลมสถิติโดยเฉลี่ยต่อวันของความเร็วลมและทิศทางลมในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร  $n$  ที่นี้คือ 179 ค่า ( $n_1 = n_2 = n = 179$ )

$p$  แทนจำนวนตัวแปรตามที่ต้องการตรวจสอบ  $n$  ที่นี้คือ 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวัน

### 2.1 การตรวจสอบการแจกแจงปกติของหลายตัวแปร

ในกรณีที่ต้องการตรวจสอบการแจกแจงปกติของตัวแปรตามหลายๆ ตัวพร้อมกัน โดยตัวแปรตามดังกล่าวมีความสัมพันธ์กัน มีวิธีการตรวจสอบไม่มากนัก จึงทำให้มีนักวิจัยหลายท่านอาจทำการตรวจสอบการแจกแจงปกติของตัวแปรตามครั้งละ 1 ตัว เป็นจำนวน  $p$  ครั้ง เมื่อ  $p$  แทนจำนวนตัวแปรตามที่ต้องการตรวจสอบ

ถ้าผลการตรวจสอบ พบว่า มีตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัว ไม่มีการแจกแจงปกติจะสามารถสรุปได้ทันทีว่าเวกเตอร์ของตัวแปรตามไม่มีการแจกแจงปกติของหลายตัวแปร ในทางกลับกันกรณีที่มีตัวแปรตามทุกตัวมีการแจกแจงปกติยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเวกเตอร์ของตัวแปรตามหรือตัวแปรตามทั้งหมด  $p$  ตัว มีการแจกแจงปกติของหลายตัวแปร ดังนั้นการตรวจสอบการแจกแจงปกติของตัวแปรตามหลายๆ ตัว พร้อมกัน จึงให้ผลสรุปที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือได้มากกว่าการตรวจสอบการแจกแจงปกติครั้งละตัวแปร โดยถ้าพบว่าเวกเตอร์ของตัวแปรตามมีการแจกแจงปกติของหลายตัวแปร จะสามารถสรุปได้ทันทีว่าตัวแปรตามแต่ละตัวมีการแจกแจงปกติด้วย วิธีการตรวจสอบการแจกแจงปกติของความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ วิธีพลอตของไคกำลังสอง (Chi-square plot) มีขั้นตอนดังนี้ (3)

**ขั้นที่ 1** คำนวณค่า  $d_{ij}^2$  ดังนี้

$$d_{ij}^2 = (y_{ij} - \bar{y}_i)' S_i^{-1} (y_{ij} - \bar{y}_i); j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$S_i = \begin{bmatrix} \text{ความแปรปรวนของความเร็วม} & \text{ความแปรปรวนร่วมของความเร็วมและทิศทางลม} \\ \text{ความแปรปรวนร่วมของความเร็วมและทิศทางลม} & \text{ความแปรปรวนของทิศทางลม} \end{bmatrix}_{\text{ระดับความสูงที่ } i}$$

**ขั้นที่ 2** เรียงลำดับค่า  $d_{ij}^2$  จากน้อยไปหามาก โดยที่  $d_{i(1)}^2$  แทนค่า  $d_{ij}^2$  ที่น้อยที่สุด และ  $d_{i(n)}^2$  แทนค่า  $d_{ij}^2$  ที่มากที่สุด ดังนี้

$$d_{i(1)}^2 \leq d_{i(2)}^2 \leq \dots \leq d_{i(n)}^2$$

**ขั้นที่ 3** หาค่า  $\chi_{1-\frac{j-0.5}{n}, p}^2$  จากตารางไคกำลังสอง เมื่อ  $1 - \frac{j-0.5}{n}$  แทนพื้นที่หางขวามือของค่า  $\chi_{1-\frac{j-0.5}{n}, p}^2$  และองศาเสรีเท่ากับ  $p$  โดยที่  $j = 1, 2, \dots, n$

**ขั้นที่ 4** นำค่า  $d_{i(j)}^2$  จากขั้นที่ 2 และค่า  $\chi_{1-\frac{j-0.5}{n}, p}^2$  จากขั้นที่ 3 มาพลอตกราฟในลักษณะของคู่อันดับ โดยให้แกน  $X$  เป็นค่าของ  $d_{i(j)}^2$  และให้แกน  $Y$  เป็นค่าของ  $\chi_{1-\frac{j-0.5}{n}, p}^2$  หากพบว่ากราฟอยู่ในรูปแบบใกล้เคียงเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิดหรือมีความชันประมาณ 1 จะสรุปได้ว่าเวกเตอร์ของตัวแปรตามมีการแจกแจงปกติของหลายตัวแปร ซึ่งหมายความว่า ความเร็วลมและทิศทางลม

เมื่อ  $y_{ij}$  แทนเวกเตอร์ขนาด  $2 \times 1$  ของค่าสังเกตจากลมสถิติโดยเฉลี่ยวันที่  $j$  ของความเร็วลมและทิศทางลมในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 เมตร ( $i = 1$ ) และ 40 เมตร ( $i = 2$ ) นั่นคือ

$$y_{ij} = \begin{bmatrix} \text{ค่าสังเกตตัวที่ } j \text{ ของความเร็วลม} \\ \text{ค่าสังเกตตัวที่ } j \text{ ของทิศทางลม} \end{bmatrix}_{\text{ระดับความสูงที่ } i}$$

$\bar{y}_i$  แทนเวกเตอร์ขนาด  $2 \times 1$  ของค่าเฉลี่ยจากลมสถิติของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 เมตร ( $i = 1$ ) และ 40 เมตร ( $i = 2$ ) นั่นคือ

$$\bar{y}_i = \begin{bmatrix} \text{ค่าเฉลี่ยของความเร็วม} \\ \text{ค่าเฉลี่ยของทิศทางลม} \end{bmatrix}_{\text{ระดับความสูงที่ } i}$$

$S_i$  แทนเมตริกซ์ขนาด  $2 \times 2$  ของความแปรปรวนร่วมจากลมสถิติของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 เมตร ( $i = 1$ ) และ 40 เมตร ( $i = 2$ ) นั่นคือ

โดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร มีการแจกแจงปกติของหลายตัวแปร

## 2.2 การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้น

การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นในการวิจัยครั้งนี้ เป็นการตรวจสอบความสัมพันธ์ของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร หากพบว่า ความเร็วมและทิศทางลมไม่มีความสัมพันธ์กัน อาจทำการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของความเร็วมและทิศทางลมแยกจากกันได้ (univariate test) นั่นคือ สามารถทำการทดสอบสมมติฐานได้ทั้งหมด 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 เป็นการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ “ความเร็วลม” ที่ระดับความสูงของเสาวัดลม 2 ระดับ คือ 30 และ 40 เมตร ครั้งที่ 2 เป็นการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ “ทิศทางลม” ที่ระดับความสูงของเสาวัดลม 2 ระดับ เช่นกัน แต่ในกรณีที่พบความสัมพันธ์ของ

ความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม ความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่ควรสูงเกินไป จึงจะสามารถใช้การทดสอบหลายตัวแปรได้ (multivariate test) ซึ่ง Pallant (5) สรุปไว้ว่าค่าความสัมพันธ์ไม่ควรเกิน 0.80 เพราะถ้าค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้ 1.00 หมายความว่า นักวิจัยกำลังวัดในสิ่งเดียวกันหรือเครื่องมือที่สร้างขึ้นมีความซ้ำซ้อนในการวัด ซึ่งผู้วิจัยจะควรกลับไปพิจารณาเครื่องมือที่นำไปวัดตัวแปรตามดังกล่าว วิธีการตรวจสอบความสัมพันธ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ด้วยสถิติทดสอบที (t-test statistics) มีขั้นตอนดังนี้ (6)

**ขั้นที่ 1** กำหนดสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) และสมมติฐานรอง ( $H_a$ ) ของการทดสอบ ดังนี้

$$H_0 : \rho_i = 0$$

$$H_a : \rho_i \neq 0$$

$$S_{y_{1i} \cdot y_{2i}} = \sum_{j=1}^n y_{1ij} y_{2ij} - \frac{\sum_{j=1}^n y_{1ij} \sum_{j=1}^n y_{2ij}}{n}, S_{y_{1i}} = \sqrt{\sum_{j=1}^n y_{1ij}^2 - \frac{\left(\sum_{j=1}^n y_{1ij}\right)^2}{n}}, S_{y_{2i}} = \sqrt{\sum_{j=1}^n y_{2ij}^2 - \frac{\left(\sum_{j=1}^n y_{2ij}\right)^2}{n}}$$

$y_{1ji}$  แทนค่าสังเกตจากลมสถิติโดยเฉลี่ยวันที่  $j$  ของความเร็วลม ณ ระดับความสูงของเสาวัดลมที่  $i$

$y_{2ji}$  แทนค่าสังเกตจากลมสถิติโดยเฉลี่ยวันที่  $j$  ของทิศทางลม ณ ระดับความสูงของเสาวัดลมที่  $i$

**ขั้นที่ 3** สรุปผลการทดสอบสมมติฐาน ดังนี้

ปฏิเสธสมมติฐานหลัก “ความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันที่ระดับความสูงของเสาวัดลม 30 เมตร ไม่มีความสัมพันธ์กัน” และสมมติฐานหลัก “ความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันที่ระดับความสูงของเสาวัดลม 40 เมตร ไม่มีความสัมพันธ์กัน” เมื่อ  $p\text{-value} = P(|t_i| > t_{n-2})$  มีค่าน้อยกว่า  $\alpha$

## 2.3 การตรวจสอบความเป็นเอกพันธ์ของเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของ 2 ประชากร

การตรวจสอบความเป็นเอกพันธ์ของเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของ 2 ประชากร ในการวิจัยครั้งนี้

เมื่อ  $\rho_i$  แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ของความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 เมตร ( $i = 1$ ) และ 40 เมตร ( $i = 2$ )

**ขั้นที่ 2** ทดสอบสมมติฐานโดยใช้การทดสอบที (t-test) แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$t_i = \frac{r_i}{\sqrt{\text{Var}(r_i)}} \quad (2)$$

เมื่อ  $r_i = \frac{S_{y_{1i} \cdot y_{2i}}}{S_{y_{1i}} S_{y_{2i}}}$  แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตามวิธีของเพียร์สัน (Pearson product moment correlation coefficient) โดยมีค่าที่เป็นไปได้ตั้งแต่ -1 ถึง 1 ถ้าค่าความสัมพันธ์มีค่าน้อยกว่า 0 หมายถึง ความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางตรงข้าม ในทางกลับกันถ้าค่าความสัมพันธ์มีค่ามากกว่า 0 หมายถึง ความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

$\text{Var}(r_i) = \frac{1-r_i^2}{n-2}$  แทนความแปรปรวนของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

เป็นการตรวจสอบความเท่ากันหรือความคงที่ของความแปรปรวนของความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร มีขั้นตอนดังนี้ (3)

**ขั้นที่ 1** กำหนดสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) และสมมติฐานรอง ( $H_a$ ) ของการทดสอบ ดังนี้

$$H_0 : \Sigma_1 = \Sigma_2$$

$$H_a : \Sigma_1 \neq \Sigma_2$$

เมื่อ  $\Sigma_i$  แทนเมตริกซ์ขนาด  $2 \times 2$  ของความแปรปรวนร่วมของความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 เมตร ( $i = 1$ ) และ 40 เมตร ( $i = 2$ )

**ขั้นที่ 2** ทดสอบสมมติฐานโดยใช้สถิติทดสอบยู (U-test statistics) แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$U = -2(1-C) \log M \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } C = \frac{2p^2 + 3p - 1}{4(n-1)(p+1)}$$

$$\log M = 0.5(n-1) \left[ \log |S_1| + \log |S_2| - 2 \log |S_{\text{pooled}}| \right]$$

$S_i$  แทนเมตริกซ์ขนาด  $2 \times 2$  ของความแปรปรวนร่วมจากผลสถิติของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 เมตร ( $i = 1$ ) และ 40 เมตร ( $i = 2$ )

$S_{\text{pooled}}$  แทนเมตริกซ์ขนาด  $2 \times 2$  ของความแปรปรวนร่วมจากผลสถิติของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันทั้ง 2 ระดับความสูงของเสาวัดลมและเนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลความเร็วมและทิศทางลมจำนวนเท่ากันทั้ง 2 ระดับความสูง ( $n_1 = n_2 = n$ ) จึงได้ว่า

$$S_{\text{pooled}} = \frac{(n_1 - 1)S_1 + (n_2 - 1)S_2}{n_1 + n_2 - 2} = \frac{S_1 + S_2}{2} \quad (4)$$

**ขั้นที่ 3** สรุปผลการทดสอบสมมติฐาน ดังนี้

ปฏิเสธสมมติฐานหลัก “เมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร มีความเป็นเอกพันธ์” เมื่อ  $p\text{-value} = P(U > \chi^2_{0.5p(p+1)})$  มีค่าน้อยกว่า  $\alpha$

## 2.4 การทดสอบสมมติฐานของผลต่างของเวกเตอร์ค่าเฉลี่ย 2 ประชากร

การทดสอบสมมติฐานของผลต่างของเวกเตอร์ค่าเฉลี่ย 2 ประชากร ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร มีขั้นตอนดังนี้ (7)

**ขั้นที่ 1** กำหนดสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) และสมมติฐานรอง ( $H_a$ ) ของการทดสอบ ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a : \mu_1 \neq \mu_2$$

เมื่อ  $\mu_i$  แทนเวกเตอร์ขนาด  $2 \times 1$  ของค่าเฉลี่ยของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 เมตร ( $i = 1$ ) และ 40 เมตร ( $i = 2$ )

**ขั้นที่ 2** ทดสอบสมมติฐานโดยใช้สถิติทดสอบโฮเทลลิงทิสแควร์ (Hotelling's  $T^2$  test statistics) ซึ่ง

สามารถเขียนได้อีกในรูปแบบหนึ่งในรูปของสถิติทดสอบเอฟ (F-test statistics) แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$T^2 = (\bar{y}_1 - \bar{y}_2)' \left[ \frac{2}{n} S_{\text{pooled}} \right]^{-1} (\bar{y}_1 - \bar{y}_2) \quad \text{หรือ} \quad T^2 = \frac{n}{2} D^2 \quad (5)$$

$$\text{เมื่อ} \quad D^2 = (\bar{y}_1 - \bar{y}_2)' S_{\text{pooled}}^{-1} (\bar{y}_1 - \bar{y}_2)$$

$$F = \frac{(2n - p - 1)}{2p(n - 1)} T^2 \quad (6)$$

$\bar{y}_i$  แทนเวกเตอร์ขนาด  $2 \times 1$  ของค่าเฉลี่ยจากผลสถิติของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 เมตร ( $i = 1$ ) และ 40 เมตร ( $i = 2$ )

$S_{\text{pooled}}$  แทนเมตริกซ์ขนาด  $2 \times 2$  ของความแปรปรวนร่วมจากผลสถิติของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันทั้ง 2 ระดับความสูงของเสาวัดลม ดังแสดงในสมการที่ (4)

**ขั้นที่ 3** สรุปผลการทดสอบสมมติฐาน ดังนี้

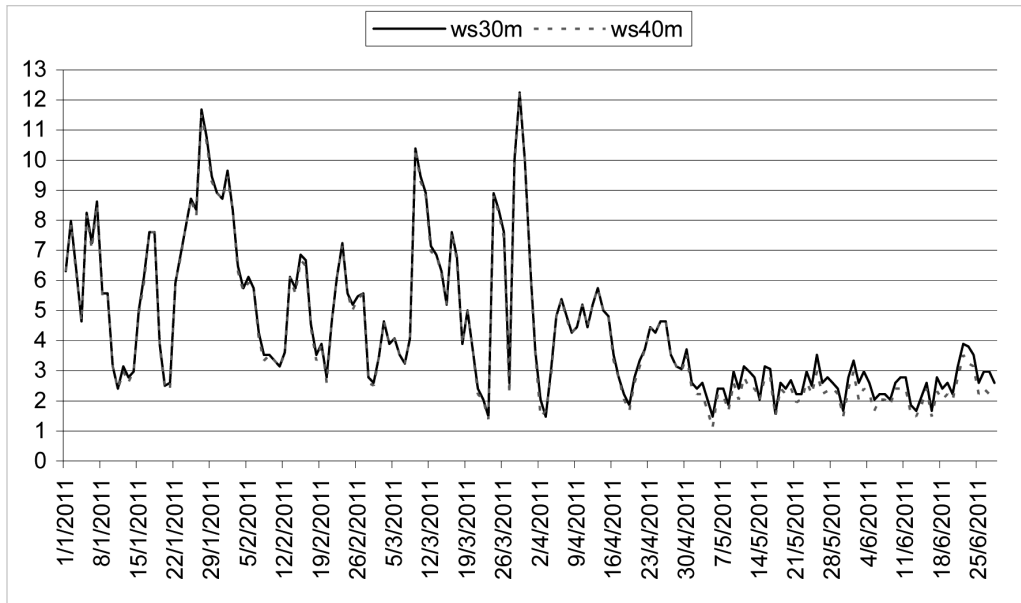
ปฏิเสธสมมติฐานหลัก “เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร ไม่มีความแตกต่างกัน” เมื่อ  $p\text{-value} = P(F > F_{p, 2n-p-1})$  มีค่าน้อยกว่า  $\alpha$

## 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

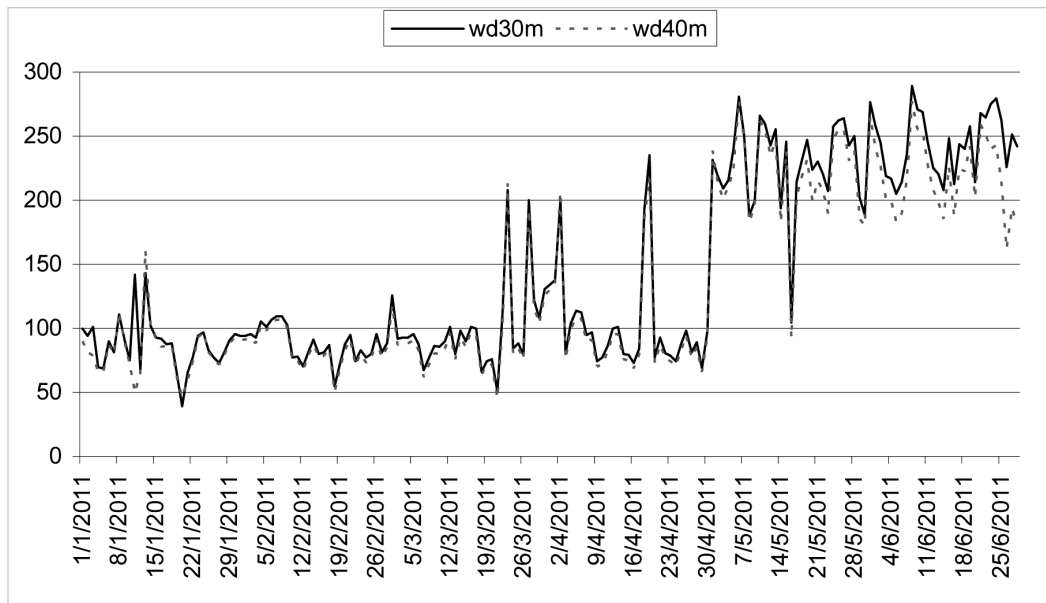
ผลการวิจัยและอภิปรายแบ่งออกเป็น 4 ส่วน เพื่อความสอดคล้องกับวิธีการวิจัย ดังนี้

### 3.1 ผลการตรวจสอบการแจกแจงปกติของหลายตัวแปร

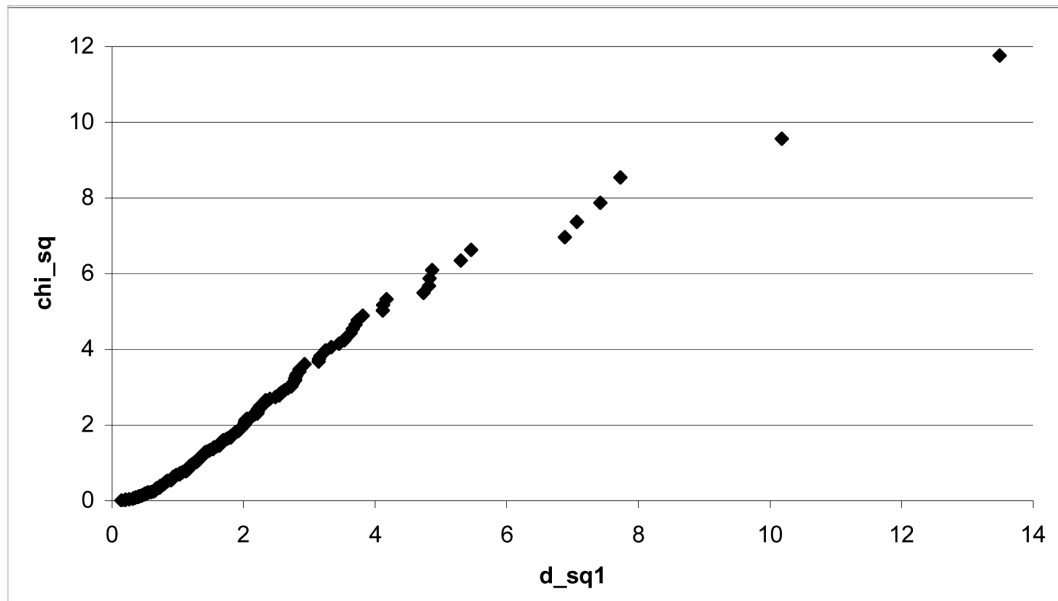
จากข้อมูลความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันของ 2 ประชากร คือ ที่ระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร ดังรูปที่ 1 และ 2 ดำเนินการตรวจสอบการแจกแจงปกติของทั้ง 2 ตัวแปร คือ ความเร็วมและทิศทางลม พร้อมกัน ด้วยวิธีพลอตของไคกำลังสอง แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งพบว่า กราฟทั้ง 2 อยู่ในรูปแบบใกล้เคียงเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิดหรือมีความชันประมาณ 1 หมายความว่า ความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร มีการแจกแจงปกติของหลายตัวแปร



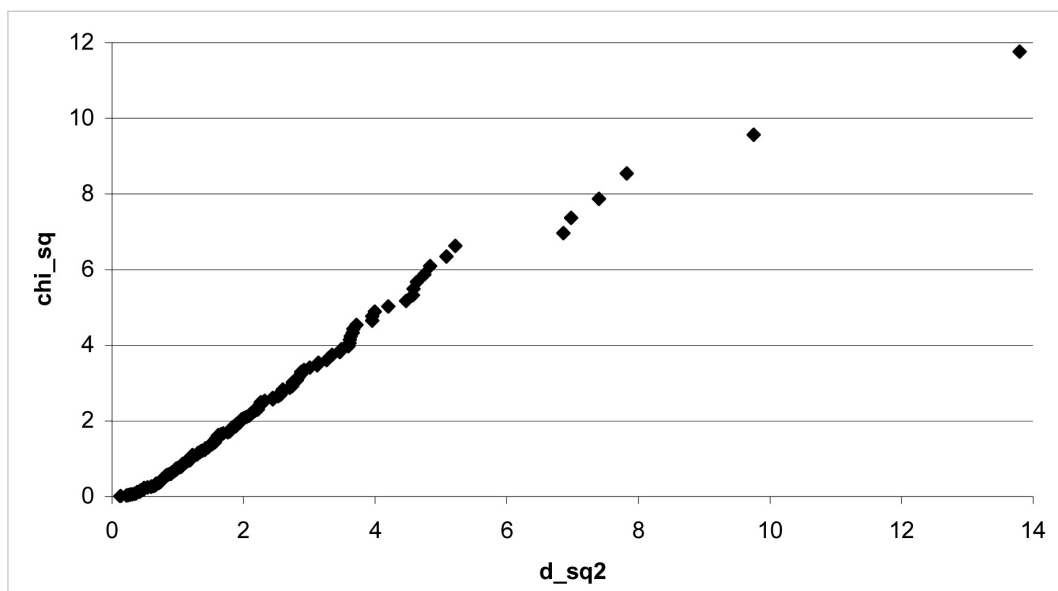
รูปที่ 1. ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที) โดยเฉลี่ยต่อวันที่ระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร



รูปที่ 2. ทิศทางลม (องศา) โดยเฉลี่ยต่อวันที่ระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร



รูปที่ 3. พล็อตของไคกำลังสอง สำหรับการตรวจสอบการแจกแจงปกติของหลายตัวแปรของประชากรที่ 1 หรือความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันที่ระดับความสูงของเสาวัดลม 30 เมตร



รูปที่ 4. พล็อตของไคกำลังสอง สำหรับการตรวจสอบการแจกแจงปกติของหลายตัวแปรของประชากรที่ 2 หรือความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันที่ระดับความสูงของเสาวัดลม 40 เมตร

### 3.2 ผลการตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้น

ผลการตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นของความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวัน จำนวน 179 ค่า ในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร โดยการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2) พบว่า p-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้ง 2 ระดับความสูงของเสาวัดลม หมายความว่า ความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อ

วันมีความสัมพันธ์กันในรูปแบบเชิงเส้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นไปในทิศทางตรงข้าม (เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นลบ) นั่นคือระดับความเร็วลมที่สูงจะเกิดขึ้นเมื่อองศาของทิศทางลมต่ำและในทางกลับกันระดับความเร็วลมที่ต่ำจะเกิดขึ้นเมื่อองศาของทิศทางลมสูง รายละเอียดของค่าสถิติต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1. ค่าสถิติของความเร็วลม (เมตรต่อวินาที) และทิศทางลม (องศา) โดยเฉลี่ยต่อวัน จำนวน 179 ค่า

| กลุ่มตัวอย่าง                                | ตัวแปร     | ค่าเฉลี่ย | ความแปรปรวน  | ความแปรปรวนร่วม | ความสัมพันธ์ (r) | ความแปรปรวนของความสัมพัทธ์<br>[Var(r)] | สถิติทดสอบที่ | p-value = $P( t  > t_{177})$ |
|----------------------------------------------|------------|-----------|--------------|-----------------|------------------|----------------------------------------|---------------|------------------------------|
| กลุ่มตัวอย่างที่ 1<br>(ระดับความสูง 30 เมตร) | ความเร็วลม | 4.43774   | 5.586648     | -93.845482      | -0.543315        | 0.003982                               | -8.61         | < 0.0001                     |
|                                              | ทิศทางลม   | 141.09050 | 5,340.384797 |                 |                  |                                        |               |                              |
| กลุ่มตัวอย่างที่ 2<br>(ระดับความสูง 40 เมตร) | ความเร็วลม | 4.28050   | 5.889277     | -93.298426      | -0.564207        | 0.003851                               | -9.09         | < 0.0001                     |
|                                              | ทิศทางลม   | 132.53240 | 4,643.122259 |                 |                  |                                        |               |                              |

### 3.3 ผลการตรวจสอบความเป็นเอกพันธ์ของเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของ 2 ประชากร

ผลการตรวจสอบความเป็นเอกพันธ์ของเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร โดยการทดสอบสมมติฐานความเป็นเอกพันธ์ของเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมด้วยสถิติ

ทดสอบยู ดังสมการที่ (3) พบว่า p-value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 หมายความว่า เมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของความเร็วลมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร มีความเป็นเอกพันธ์ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 รายละเอียดของค่าสถิติต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ค่าสถิติของการตรวจสอบความเป็นเอกพันธ์ของเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมของ 2 ประชากร

| C         | log M     | สถิติทดสอบยู | p-value = $P(U > \chi^2_3)$ |
|-----------|-----------|--------------|-----------------------------|
| 0.0060861 | -0.796552 | 1.58340821   | 0.66315772                  |

### 3.4 ผลการทดสอบสมมติฐานของผลต่างของเวกเตอร์ค่าเฉลี่ย 2 ประชากร

ผลการทดสอบสมมติฐานของผลต่างของเวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร โดยใช้สถิติทดสอบไสเทิลลิ่งทีสแควร์ ดังสมการที่ (5) และสถิติทดสอบเอฟ ดังสมการที่ (6) พบว่า p-value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 หมายความว่าเวกเตอร์

ค่าเฉลี่ยของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันในแต่ละระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร ไม่มีความแตกต่างกัน นั่นคือ ระดับความสูงของเสาวัดลมที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 30 และ 40 เมตร ไม่ได้ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันแตกต่างกัน ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 รายละเอียดของค่าสถิติต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3. ค่าสถิติของการทดสอบสมมติฐานของผลต่างของเวกเตอร์ค่าเฉลี่ย 2 ประชากร

| สถิติทดสอบไสเทิลลิ่งทีสแควร์ | สถิติทดสอบเอฟ | p-value = $P(F > F_{2,355})$ |
|------------------------------|---------------|------------------------------|
| 3.5800874                    | 1.7850155     | 0.1692972                    |

## 4. สรุป

การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวัน ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ถึงวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2554 จำนวน 179 ค่า ที่ระดับความสูงของเสาวัดลม 30 และ 40 เมตร บริเวณแนวชายฝั่งทะเล อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา โดยการทดสอบสมมติฐานของผลต่างของเวกเตอร์ค่าเฉลี่ย 2 ประชากร ด้วยสถิติทดสอบไสเทิลลิ่งทีสแควร์และสถิติทดสอบเอฟ พบว่า ระดับความสูงของเสาวัดลมที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 30 และ 40 เมตร ไม่ได้ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความเร็วมและทิศทางลมโดยเฉลี่ยต่อวันมีความแตกต่างกัน ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นผลการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงลักษณะของลมที่มีความสม่ำเสมอในการไหล นั้นหมายความว่า การลงทุนติดตั้งเสาวัดลมที่ระดับความสูง 30 เมตร น่าจะมีความคุ้มค่ามากกว่าที่ระดับความสูง 40 เมตร เพราะจะช่วยลดต้นทุนของอุปกรณ์และการติดตั้ง รวมทั้งประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานได้อีกทางหนึ่ง จากผลสรุปของการวิจัยครั้งนี้จึงได้สารสนเทศเบื้องต้นที่เป็นประโยชน์ในการตัดสินใจแก่ผู้ที่ต้องการพัฒนาโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม รวมทั้งศึกษาการลงทุนติดตั้งเสาวัดลมและเซนเซอร์ตรวจวัดลมที่

ระดับความสูง 30 เมตร สำหรับการวิเคราะห์ศักยภาพในการพัฒนาโครงการต่อไป

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลความเร็วมและทิศทางลมสำหรับการวิจัยครั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับทุนอุดหนุนการวิจัยของโครงการประเมินศักยภาพของพลังงานลมบริเวณพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ของประเทศไทย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Waewsak J, Kongruang C, Tirawanichakul Y, Tirawanichakul S, Matan N, Promphat C, Noo-Thong A. Feasibility study of wind farm power plant along the coast of Southern Thailand. Bangkok: Office of the National Research Council of Thailand; 2008. Thai.

- (2) Rajamangala University of Technology Thanyaburi. Research and development including making the prototype of low wind speed. Pathumthani: Ministry of Energy; 2011. Thai.
- (3) Vanishbancha K. Multivariate Analysis. 4<sup>th</sup> ed. Bangkok: Thammasan; 2009. Thai.
- (4) Poosri-On T. Hotelling  $T^2$  test. [Internet]. Mahasarakham University; 2009 Aug [cite 2011 Jul 2]. Available form: <http://education.msu.ac.th/remsu/?name=knowledge&file=readknowledge&id=4> Thai.
- (5) Pallant JF. SPSS survival manual: a step by step guide to data analysis using SPSS. 4<sup>th</sup> ed. Maidenhead: Open University Press/McGraw-Hill; 2010.
- (6) Montgomery DC. Introduction to linear regression analysis. 4<sup>th</sup> ed. New York: Wiley; 2006.
- (7) Johnson RA, Wichern DW. Applied multivariate statistical analysis. 4<sup>th</sup> ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall; 1998.