



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศที่ซับซ้อน  
กรณีศึกษา การไหลของอากาศผ่านเขาพุคา จังหวัดลพบุรี

Analysis and Simulation of Air Flow over Complex Terrain

Case Study: Air Flow over Phuka Mountain in Lop Buri

นามผู้วิจัย ร้อยเอก วีรพงษ์ บุญเต็ม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รศ.ดร.อาจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รศ.ดร.อาจารย์สมาน เจริญกิจพุทธผล, M.Eng. )

หัวหน้าภาควิชา

( รศ.ดร.อาจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รศ.ดร.อาจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศที่ซับซ้อน  
กรณีศึกษา การไหลของอากาศผ่านเขาพุกา จังหวัดลพบุรี

Analysis and Simulation of Air Flow over Complex Terrain  
Case Study: Air Flow over Phuka Mountain in Lop Buri

โดย

ร้อยเอก ชีรพงษ์ บุญเต็ม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2553

ธีรพงษ์ บุญเติม, ร้อยเอก 2553: การวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศที่ซับซ้อน  
กรณีศึกษา การไหลของอากาศผ่านเขาพุคา จังหวัดลพบุรี ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
(วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. 88 หน้า

เนื่องจากว่าเขาพุคา จังหวัดลพบุรี ได้ถูกใช้ในการฝึกลงจอดตามภูมิประเทศของศิษย์การบินทหารบก ซึ่งพื้นที่ในการปฏิบัติการกิจส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะภูมิประเทศที่เป็นภูเขาสูงมีบริเวณพื้นที่ที่ลงจอดจำกัดและมีลมแรงทำให้ยากต่อการควบคุม และยังได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากการไหลของอากาศผ่านภูเขา ไม่ว่าจะเป็นลมกระโชก การหมุนวนของอากาศบริเวณใกล้ภูเขา เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลกระทบต่อการบินกับอากาศยานไม่ว่าจะเป็นการนำอากาศยานวิ่งขึ้น หรือการนำอากาศยานร่อนลง เป็นไปด้วยความยากลำบาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาและวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศที่ซับซ้อน โดยการใช้โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ช่วยวิเคราะห์ โดยมีการจำลองการไหลของอากาศผ่านเขาพุคาแบบ 3 มิติ ใช้ อัลกอริทึม RNG k-ε กับ standard and SIMPLER ในการคำนวณการไหลของอากาศหน้าหนาวในช่วงเดือน ธันวาคม ซึ่งมีทิศทางลมที่มาจากเขาพุคา ในทิศ 90 และ 120 องศา ความเร็วลมในแบบจำลอง 30, 40 และ 50 เมตรต่อวินาที ณ จุดลงจอดสามจุด นอกจากนี้เพื่อให้ผลการศึกษา มีความแม่นยำมากขึ้น จึงได้ทำการจำลองการไหลของอากาศผ่านแบบจำลองเขาพุคาในอุโมงค์ลม เพื่อเปรียบเทียบและทดสอบความถูกต้องแม่นยำ

จากผลการศึกษาวิเคราะห์ทำให้ทราบว่า โปรไฟล์ความเร็วของอากาศที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้น มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองในอุโมงค์ลม ทำให้สามารถนำเอาผลที่ได้ไปทำนายการไหลของอากาศผ่านเขาพุคาได้ และสามารถแนะนำแนวปฏิบัติในการนำเครื่องบินขึ้นหรือลงโดย จุดวัดที่ 2 ควรทำการบินและนำเครื่องลงจอดด้วยความระมัดระวัง และสามารถทำการบินลัดเลาะได้ ที่ความสูงไม่เกิน 84 เมตร (275 ฟุต) โดยประมาณ ส่วนด้านบนยอดเขา และด้านหลังเขาพุคา มุมในการร่อนลงจอดอากาศยานนั้นควรเป็นมุม Shallow (ประมาณ 5-12 องศา กับแนวระดับ) ที่ระยะความสูงจากพื้นดินประมาณ 210 เมตร (688 ฟุต) ห่างจากยอดเขาตามแนวราบประมาณ 280 เมตร (918 ฟุต) นักบินควรระมัดระวังอากาศยานไถลออกนอกแนวร่อนด้วย เพราะอากาศช่วงนี้เริ่มมีการไหลวน และนักบินควรหลีกเลี่ยงการร่อนลงด้วยมุม Steep (ประมาณ 15-20 องศา กับแนวตั้ง) ตั้งแต่ช่วงความสูง 440 เมตร (1443.6 ฟุต) จากยอดเขา ซึ่งอาจทำให้มีโอกาสร่วมสัมผัสพื้นโดยการกระแทกได้

Theerapong Boonterm, Captain 2010: Analysis and Simulation of Air Flow over Complex Terrain  
Case Study: Air Flow over Phuka Mountain in Lop Buri. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering.  
Thesis Advisor: Associate Professor Chawalit Kittichaikarn, Ph.D. 88 pages.

Phuka Mountain in Lopburi, Thailand is used as a training place for pilot students to practice taking off and landing their airplanes. However, there are many factors that affect the control of airplane during take off and landing. For example, very small pad to land, unforecast wind speed and direction, gust, turbulence and updraft and downdraft due to various mountainous areas are the main keys. This paper presents the simulation of air flow over Phuka Mountain using commercial Computational Fluid Dynamics software. Air flow over Phuka Mountain was modeled in three-dimensional domain. RNG k- $\epsilon$  with standard and SIMPLEC algorithm were used to solve for the separated flow. Simulation was made for flow of atmospheric air in December where the two wind directions (90 degrees and 120 degrees), three wind speeds (30, 40 and 50 m/s) and three different landing locations were studied. The results from wind tunnel experiment are used to verify with Computational Fluid Dynamics software data. From the results obtained, it is found that the velocity profile obtained from Computational Fluid Dynamics software agree well with those obtained from wind tunnel experiment. Contours of those velocity obtained from Computational Fluid Dynamics Program therefore can be used to predict the flow over the Phuka Mountain and suggest the pilot how to control the air plane during its landing and take off. From the results obtained, it can be suggested that at the location number 2, the pilots should land and make the terrain contour flying carefully at the altitude above the ground not over 84 m (275 feet) approximately. At the location number 3 and 4 which are at the top and rear side of the mountain respectively, the approach angle should be the shallow angle (approximately 5-12 degrees with the horizon) at the altitude above the ground approximately 210 m (688 feet) and far from the landing point approximately 280 m (918 feet). The aircrafts maybe slip from the glide slope because of the highly separated and swirl wind. The pilots should avoid the steep angle to approach (approximately 15-20 degrees from the vertical) which begins from 440 m (1443.6 feet) above the mountain. It cause the aircraft to be at risk for hard landing.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต กิตติชัยการ อาจารย์ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้  
คำแนะนำปรึกษา และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์สมาน  
เจริญกิจพูลผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลือในการทำ  
วิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ นาวาอากาศเอก บุญเลิศ อังคารา หัวหน้ากองเทคโนโลยีการบิน  
กองวิชาวิศวกรรมอากาศยานและเทคโนโลยีการบิน กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ,  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.โอษฐ์ศิลป์ นิธิกุล และ นาวาอากาศตรี กนก อินสว่าง  
อาจารย์โรงเรียนนายเรืออากาศ ที่เอื้อเฟื้ออุโมงค์ลม และคำแนะนำในการทดลอง ขอขอบคุณ  
พันเอก ภูมิจิตต์ ภูธรใจ หัวหน้ากองสนามบิน ศูนย์การบินทหารบก พันโท ชาคิต กมคาย และ  
พันโท ชนัญญู กลั่นทอง อาจารย์โรงเรียนการบินทหารบก ที่ให้คำปรึกษาด้านการบินและพื้นที่  
ในการทำวิจัย จำสับเอก ฉัตรนัย สุภามณีย์ ช่างอากาศยานกรมแผนที่ทหาร ที่ช่วยทำแบบจำลองใช้  
ในการทดลองอุโมงค์ลม ขอขอบคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม  
(RDIPT) ที่ช่วยการทำวิศวกรรมย้อนรอย และขอบคุณ นายปิยะวุฒิ แก้วฤทธิ์ ที่ให้คำปรึกษาใน  
การใช้โปรแกรมเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ชี้นำและ  
สนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

ร้อยเอก ชีรพงษ์ บุญเดิม  
มีนาคม 2553

## สารบัญ

### หน้า

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| สารบัญ                      | (1) |
| สารบัญตาราง                 | (2) |
| สารบัญภาพ                   | (3) |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ   | (7) |
| คำนำ                        | 1   |
| วัตถุประสงค์                | 2   |
| การตรวจเอกสาร               | 3   |
| อุปกรณ์และวิธีการ           | 50  |
| อุปกรณ์                     | 50  |
| วิธีการ                     | 52  |
| ผลและวิจารณ์                | 55  |
| ผล                          | 55  |
| วิจารณ์                     | 73  |
| สรุปและข้อเสนอแนะ           | 80  |
| สรุป                        | 80  |
| ข้อเสนอแนะ                  | 81  |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง        | 82  |
| ประวัติการศึกษา และการทำงาน | 88  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                                                      | หน้า |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1        | ความขรุขระของผิว และความสูงของชั้นจืดผิวบรรยากาศ ตามลักษณะ<br>ประเภทของภูมิประเทศ                    | 13   |
| 2        | ค่าความขรุขระตามลักษณะพื้นผิวของภูมิประเทศแบบต่างๆ                                                   | 17   |
| 3        | ค่าคงที่ของแบบจำลอง Low Reynolds Number $k - \varepsilon$ (Standard $k - \varepsilon$ )              | 27   |
| 4        | การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบ                                                               | 54   |
| 5        | เวลาในการคำนวณของความละเอียดกริดต่างๆ ของจุดวัดที่ 1<br>ความเร็วอากาศเข้า 50 เมตรต่อวินาที           | 56   |
| 6        | เวลาในการคำนวณของความละเอียดกริดต่างๆ ของจุดวัดที่ 1<br>Full scale ความเร็วอากาศเข้า 7 เมตรต่อวินาที | 57   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่                                                                                                                                 | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 ภาพเขาพุคา จังหวัดลพบุรี                                                                                                             | 15   |
| 2 เขาพุคา และ ภูมิประเทศโดยรอบ                                                                                                         | 16   |
| 3 โพรไฟล์การไหลของอากาศที่บริเวณใกล้พื้นผิว                                                                                            | 19   |
| 4 โพรไฟล์การไหลของอากาศที่บริเวณใกล้พื้นผิวที่เป็นต้นไม้                                                                               | 20   |
| 5 ลักษณะของการเกิดคลื่นภูเขา                                                                                                           | 44   |
| 6 อุโมงค์ลม โรงเรียนนายเรืออากาศ                                                                                                       | 50   |
| 7 การแสดงจุดวัดและทิศทางลมในอุโมงค์ลม                                                                                                  | 51   |
| 8 พื้นที่เขาพุคา ภูมิประเทศโดยรอบจุดวัดความเร็วลม และทิศทางลม<br>เข้าปะทะเมื่อเทียบกับแนวยาวของภูเขา                                   | 51   |
| 9 กริดที่ใช้ในโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ                                                                                           | 53   |
| 10 ขอบเขตของแบบจำลองใน โปรแกรม                                                                                                         | 53   |
| 11 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม<br>90 องศา ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที ที่ความละเอียดกริดต่างๆ               | 55   |
| 12 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม แบบ Full scale ณ จุดวัดที่ 1<br>ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที ที่ความละเอียดกริดต่างๆ | 56   |
| 13 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 90 องศา<br>ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที                                       | 57   |
| 14 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 90 องศา<br>ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที                                       | 58   |
| 15 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 90 องศา<br>ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที                                       | 58   |
| 16 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 90 องศา<br>ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที                                       | 59   |
| 17 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 90 องศา<br>ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที                                       | 60   |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                | หน้า |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 18     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 90 องศา<br>ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที  | 60   |
| 19     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 90 องศา<br>ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที  | 61   |
| 20     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 90 องศา<br>ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที  | 62   |
| 21     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 90 องศา<br>ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที  | 62   |
| 22     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 4 ทิศทางลม 90 องศา<br>ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที  | 63   |
| 23     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 4 ทิศทางลม 90 องศา<br>ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที  | 64   |
| 24     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 4 ทิศทางลม 90 องศา<br>ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที  | 64   |
| 25     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 120 องศา<br>ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที | 65   |
| 26     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 120 องศา<br>ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที | 66   |
| 27     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 120 องศา<br>ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที | 66   |
| 28     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 120 องศา<br>ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที | 67   |
| 29     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 120 องศา<br>ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที | 68   |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                         | หน้า |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 30     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 120 องศา<br>ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที                          | 68   |
| 31     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 120 องศา<br>ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที                          | 69   |
| 32     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 120 องศา<br>ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที                          | 70   |
| 33     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 120 องศา<br>ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที                          | 70   |
| 34     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 4 ทิศทางลม 120 องศา<br>ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที                          | 71   |
| 35     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 4 ทิศทางลม 120 องศา<br>ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที                          | 72   |
| 36     | การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 4 ทิศทางลม 120 องศา<br>ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที                          | 72   |
| 37     | ภาพ Contours of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg plane 2                                                      | 74   |
| 38     | ภาพ Path line of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg plane 2                                                     | 75   |
| 39     | ภาพ Vector of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg ระหว่างเขาพุคา<br>และเขาวงพระจันทร์ บริเวณ จุดวัดที่ 2         | 75   |
| 40     | ภาพ Vector of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg และ<br>แสดงลักษณะการบินลัดเลาะตามภูมิประเทศ บริเวณ จุดวัดที่ 2 | 76   |
| 41     | ภาพ Contours of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg มองจาก<br>ด้านบน ความสูง 70 เมตร จากพื้นดิน                  | 76   |
| 42     | ภาพ Contours of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg มองจาก<br>ด้านบน ความสูง 110 เมตร จากยอดเขาพุคา              | 77   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                            | หน้า |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 43     | ภาพ Contours of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg มองจาก<br>ด้านบน ความสูง 220 เมตร จากยอดเขาฟูคา | 79   |
| 44     | ภาพ Contours of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg plane 3<br>และแนวการร่อนลงจอด                   | 78   |
| 45     | ภาพ Path line of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg plane 3                                        | 78   |
| 46     | ภาพ Vector of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg plane 3                                           | 79   |
| 47     | ภาพ Vector of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg<br>ด้านหลังเขาฟูคา                                | 79   |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

|                                                |   |                                                  |
|------------------------------------------------|---|--------------------------------------------------|
| ABL                                            | = | Atmospheric boundary layer                       |
| A                                              | = | Control volume surface area                      |
| CFD                                            | = | Computational fluid dynamics                     |
| $C, C_1, C_2$                                  | = | Model constant                                   |
| $C_\delta, C_{\varepsilon 2}, C_{IRNG}, C_\mu$ | = | Constants in turbulence transport equations      |
| DES                                            | = | Detached eddy simulation                         |
| DNS                                            | = | Direct numerical simulation                      |
| $D_{ij}$                                       | = | Diffusion term in Reynolds stress equation       |
| $d$                                            | = | Zero plane displacement height                   |
| $F$                                            | = | Force                                            |
| $F_1$                                          | = | Constant in $k - \omega$ turbulence model        |
| $Fr$                                           | = | Froude number                                    |
| $f$                                            | = | Coriolis parameter                               |
| $f_1, f_2, f_\mu$                              | = | Terms in low Reynolds number turbulence model    |
| $g$                                            | = | Gravitational acceleration                       |
| $h$                                            | = | Height above ground; hill height                 |
| $h_R$                                          | = | Average roughness height                         |
| $k$                                            | = | Turbulence kinetic energy                        |
| $k^+$                                          | = | Non-dimensional roughness height                 |
| LES                                            | = | Large eddy simulation                            |
| $L$                                            | = | Obukhov length scale; characteristic hill length |
| $l$                                            | = | Mixing length; inner layer depth                 |
| $m$                                            | = | Mass                                             |
| $N$                                            | = | Stratification frequency                         |
| $P$                                            | = | Pressure                                         |
| $P_{ij}$                                       | = | Production term in Reynolds stress equation      |
| Pe                                             | = | Peclet number                                    |
| Pr                                             | = | Prandtl number                                   |

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

|                        |                                                       |
|------------------------|-------------------------------------------------------|
| RANS                   | = Reynolds averaged Navier-Stokes                     |
| RNG                    | = Renormalization group                               |
| RSM                    | = Reynolds stress model                               |
| Re                     | = Reynolds number                                     |
| Ri                     | = Richardson number                                   |
| $R_T$                  | = Term in low Reynolds number $k - \varepsilon$ model |
| S                      | = Source; strain rate                                 |
| $S_{ij}$               | = Strain rate tensor                                  |
| t                      | = Time                                                |
| U                      | = Mean velocity                                       |
| $U_\infty$             | = Free stream velocity                                |
| $u'$                   | = Fluctuating component of velocity                   |
| $u^*$                  | = Friction velocity                                   |
| $u^+, u^x$             | = Non-dimensional velocity scale                      |
| $\overline{u'_i u'_j}$ | = Reynolds stress                                     |
| u, v, w                | = Velocity components                                 |
| V                      | = Volume                                              |
| $x_i$                  | = Distance                                            |
| x, y, z                | = Directional components                              |
| $y_R$                  | = Sand grain roughness height                         |
| z                      | = Vertical height                                     |
| $z_o$                  | = Roughness length                                    |
| $\alpha$               | = Turbulence model constant                           |
| $\beta$                | = Advection scheme variable                           |
| $\beta^*, \beta$       | = Turbulence model constant                           |
| $\delta_{ij}$          | = Kronecker delta                                     |
| $\varepsilon$          | = Dissipation rate of $k$ per unit mass               |
| $\varepsilon_{ij}$     | = Dissipation term in Reynolds stress equation        |

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

|                                |   |                                                      |
|--------------------------------|---|------------------------------------------------------|
| $\eta, \eta_o$                 | = | Turbulence model constants                           |
| $\theta$                       | = | Hill steepness                                       |
| $\phi_{ij}$                    | = | Pressure-strain correlation term                     |
| $\phi$                         | = | Latitude                                             |
| $\kappa$                       | = | Von Karman constant                                  |
| $\mu$                          | = | Dynamic viscosity                                    |
| $\mu_T$                        | = | Turbulent viscosity                                  |
| $\nu$                          | = | Kinematic viscosity                                  |
| $\rho$                         | = | Density                                              |
| $\rho_0$                       | = | Reference density                                    |
| $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ | = | Turbulent Prandtl numbers in $k - \varepsilon$ model |
| $\sigma, \sigma^*$             | = | Turbulent model constant                             |
| $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ | = | Root mean square of turbulence component             |
| $\tau$                         | = | Shear stress                                         |
| $\tau_0$                       | = | Wall shear stress                                    |
| $\tau_{ij}$                    | = | Turbulent shear stress tensor                        |
| $\Phi$                         | = | Flow property                                        |
| $\Omega_{ij}$                  | = | Rotation term in Reynolds stress equation            |
| $\Omega$                       | = | Angular velocity                                     |
| $\omega$                       | = | Dissipation rate of $k$ per unit $k$                 |
| $\omega_k$                     | = | Rotation vector                                      |

การวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศที่ซับซ้อน  
กรณีศึกษา การไหลของอากาศผ่านเขาพุคา จังหวัดลพบุรี

Analysis and Simulation of Air Flow over Complex Terrain

Case Study: Air Flow over Phuka Mountain in Lop Buri

คำนำ

ในปัจจุบันเขาพุคา จังหวัดลพบุรี ได้ถูกใช้เป็นสถานที่ทำการฝึกการใช้อาวุธทางอากาศ ตลอดจนการฝึกลงจอดตามภูมิประเทศของศิษย์การบินทหารบก เนื่องจากว่าบริเวณดังกล่าว มีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะภูมิประเทศจริงในการปฏิบัติภารกิจหลังจากการที่ศิษย์การบินได้จบหลักสูตรไปแล้ว ซึ่งพื้นที่ในการปฏิบัติภารกิจส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะภูมิประเทศที่เป็นภูเขาสูง บริเวณมีพื้นที่ลาดชันจากริมฝั่งและมีลมแรงทำให้ยากต่อการควบคุม และยังได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากการไหลของอากาศผ่านภูเขา ไม่ว่าจะเป็นลมกระโชก การหมุนวนของอากาศบริเวณใกล้ภูเขา เป็นต้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อการบินของอากาศยาน ไม่ว่าจะเป็นการนำอากาศยานขึ้น หรือ การนำอากาศยานร่อนลง เป็นไปด้วยความยากลำบาก ดังนั้น การศึกษาวิเคราะห์สภาพการไหลรวมทั้งจำลองลักษณะการไหลของอากาศผ่านเขาพุคาจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการบินทหารบก

ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาและวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศที่ซับซ้อน โดยใช้โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ช่วยวิเคราะห์ นอกจากนี้ ยังมีการจำลองการไหลของอากาศผ่านภูเขาจำลองในอุโมงค์ลม เพื่อเปรียบเทียบและทดสอบความถูกต้องแม่นยำ เนื่องจากการวัดจริงนั้นทำได้ยากและมีข้อจำกัดในการวัด ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์การวัด หรือเป็นสิ่งที่อันตรายเกินไป ในการวิจัยนี้ได้เลือกเขาพุคา ตำบลเขาพระงาม อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี เป็นสถานที่ทำการวิจัย ผลการศึกษาวิเคราะห์จะทำให้ทราบถึงทิศทาง ความเร็วของอากาศ การหมุนวนของอากาศ ระยะ และบริเวณที่เป็นอันตรายต่อการบิน เพื่อที่จะทำการหลีกเลี่ยงและใช้ประกอบการวางแผนในการบินได้

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของอากาศผ่านเขาพุคา โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของอากาศผ่านเขาพุคา โดยทำการทดลองในอุโมงค์ลม
3. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้อุโมงค์ลม
4. เพื่อนำผลที่ได้ไปทำนายนการไหลของอากาศผ่านเขาพุคาได้ และสามารถแนะนำแนวปฏิบัติในการนำเครื่องบินขึ้นหรือลงได้

## การตรวจเอกสาร

ในการศึกษา และวิเคราะห์ลักษณะการไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศ ถือว่ามีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะผลกระทบจากการหมุนวนของอากาศ ความเร็วของอากาศ หรือคลื่นภูเขาต่อเครื่องบินที่บินผ่านภูมิประเทศนั้นๆ อีกทั้งการไหลเหล่านี้ก็มีความซับซ้อนมาก (Baines, 1995; Hunt and Snyder, 1980; Kaimal and Finigan, 1994; Eidsvik and Utne, 1997) จากการศึกษาและวิจัยของผู้วิจัยหลายท่านพบว่า ในการศึกษาการไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศนั้น ข้อมูลที่ได้จากการวัดความเร็วลมในบริเวณภูมิประเทศนั้น ยังไม่เพียงพอต่อการทำนายลักษณะการไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศที่ซับซ้อนได้ นอกจากนี้ในการศึกษาและทำนายลักษณะการไหลของอากาศในบริเวณภูมิประเทศที่ซับซ้อน โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณก็มีความซับซ้อนและไม่ใช่ว่าเรื่องง่ายเช่นกัน (Hunt *et al.*, 1991; Galperin and Orsag, 1993; Kaimal and Finigan, 1994)

Kim and Lee (1998) ใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ วิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศที่ซับซ้อน โดยได้แนะนำ แบบจำลองเชิงตัวเลข RNG-Based  $k-\epsilon$  นั้นเหมาะสมในการทำนายการกระจายตัวของฝุ่นควัน ของพื้นที่ที่มีความซับซ้อน แบบจำลองนี้สามารถทำนาย โพรไฟล์การไหล และระยะของเขตการเกิดการแยกตัวจากผิว (Separation) ได้ โดยการใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume method) และใช้อัลกอริทึม SIMPLEC ในการคำนวณ นอกจากนี้ (Kim and Lee, 1998) ยังนำผลที่วิเคราะห์ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากอุโมงค์ลมโดยใช้แบบจำลองภูเขา

Kim *et al.* (2000) ได้ใช้ แบบจำลอง Standard  $k-\epsilon$  และ RNG เพื่อทำนายการไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศที่เป็นภูเขา โดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดจากสถานที่จริง ผลอันเนื่องมาจากการไหลแบบแยกตัว (Separated Flow) ของอากาศผ่านหุบเขานั้น แบบจำลอง RNG  $k-\epsilon$  จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับการวัดจริงมากกว่าแบบจำลองแบบ Standard  $k-\epsilon$  และจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ (Kim, 1997) ได้ศึกษาการไหลของอากาศผ่าน แบบจำลองเนินเขาสองมิติ โดยการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองความปั่นป่วน Standard  $k-\epsilon$  กับ Low Reynolds number พบว่า การแก้สมการที่บริเวณใกล้ผนังของ Low Reynolds number ไม่สามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณได้ ทำให้เสียเวลาในการสร้างกริดและเวลาในการคำนวณโดยเปล่าประโยชน์ (Lun *et al.*, 2003) ได้ทำการจำลองการไหลของอากาศผ่านหน้าผาและภูเขาโดยใช้แบบจำลองการไหลของอากาศ สามแบบดังนี้ คือ Standard Model, Durbin Model (1993) และแบบจำลอง

ไม่เชิงเส้นของ (Shih *et al.*, 1995) ผลที่ได้ปรากฏว่า สิ่งที่ส่งผลกระทบต่อการไหลแบบแยกตัว (Separation Flow) ก็คือ ค่าความขรุขระของผิว (Surface Roughness) แบบจำลองที่ได้กล่าวมาแล้ว ทั้งสามแบบนี้ยังช่วยทำนายค่า พลังงานจลน์ได้แม่นยำมากขึ้น แต่แบบจำลอง Durbin Model (1993) สามารถอธิบายคุณสมบัติของการไหลเฉลี่ยได้ดีที่สุด แต่ว่าในเขตที่มีการหมุนวนของอากาศนั้น แบบจำลองของ Shih จะสามารถอธิบายได้ดีกว่า

จากงานวิจัยของ (Uchida and Ohya, 1999) ได้ศึกษากริดชนิดต่างๆ ที่ส่งผลต่อการคำนวณ การไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศที่ซับซ้อน ปรากฏว่า ชนิดของกริดแทบไม่ส่งผลกระทบต่อค่า จากการคำนวณเลย เพราะว่าค่าความคลาดเคลื่อนจาก Spatial Discretisation มีค่าน้อยมาก จากงานวิจัยด้านระเบียบวิธีเชิงคำนวณของ (Ishihara, 2000) ได้มีการจำลองการไหลของอากาศผ่าน ภูเขาสามมิติที่ค่อนข้างสูงชัน แล้วทำการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณกับผลที่ได้จากการทดลอง ในอุโมงค์ลม และจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของเขา (Ishihara *et al.*, 1999) ซึ่งได้มีการใช้แบบจำลอง ความปั่นป่วนแบบ k- $\epsilon$  และแบบไม่เชิงเส้น (Non linear version) ของ (Shih, 1995) ซึ่งแบบจำลอง ความปั่นป่วนแบบไม่เชิงเส้นนั้นสามารถทำนายโพรไฟล์การไหลได้เฉพาะในเขตที่มีการหมุนวน ของอากาศ และยังประมาณค่าพลังงานจลน์ในเขตที่เกิดการไหลแบบแยกตัวได้ดี

อีกทั้งแบบจำลอง k- $\epsilon$  มาตรฐาน นั้นไม่สามารถให้ผลการคำนวณเพื่อทำนายปรากฏการณ์ การเคลื่อนที่ขึ้นข้างบนของอากาศ (Updraft) ที่เกิดขึ้นด้านหลังภูเขาได้ (Lee *et al.*, 2002) ได้ทำการ วิจัยถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากการเรียงตัวของเนินเขาหลายๆ เนิน กับทิศทางการไหลของอากาศ แล้วทำการวิเคราะห์ โครงสร้างของการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศ ณ จุดที่มีการไหลของอากาศ แบบแยกตัวที่ด้านบนเนินเขา ในการจำลองการไหลของอากาศได้ใช้แบบจำลองเชิงคำนวณแล้ว เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลที่ได้จากการจำลองการไหลของอากาศในอุโมงค์ลม พบว่า ค่าของตัวแปร ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ และการทดลองของการไหลเฉลี่ย (Mean flow) นั้น มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นด้านบนของเนินเขา ส่วนที่มีการแยกตัวของอากาศนั้นจะค่อนข้างมีความคลาดเคลื่อนกัน ระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลอง

Montavon (1998) ได้ทำการวิจัยการไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศที่เป็นภูเขาสองมิติที่มี ความซับซ้อนอย่างมาก โดยใช้สมการเฉลี่ยของนาเวียร์-สโตก (RANS) ปรากฏว่า ค่าที่ได้จากการ คำนวณกับค่าที่ได้จากการวัดจริงมีแนวโน้มเป็นอย่างเดียวกัน ถึงแม้ว่าค่าที่ได้จากการวัดจริงนั้น ประสบช่วงที่มีพายุ ก็มีผลทำให้ข้อมูลบางจุดมีความคลาดเคลื่อนไปบ้างแต่ว่าการศึกษาการไหล

ของอากาศผ่านภูมิประเทศที่เป็นสองมิติก็เป็นสิ่งที่จะช่วยต่อ ยอดการศึกษาการไหลผ่านภูมิประเทศที่เป็นแบบสามมิติ แต่ความซับซ้อนที่มากขึ้น อันเนื่องมาจากลักษณะภูมิประเทศที่เป็นสามมิติ ถ้าพึ่งเพียงแค่แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐานคงยังไม่เพียงพอนัก

อุโมงค์ลมนั้นเป็นเครื่องมือทั่วๆ ไปที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพบรรยากาศ และยังสามารรถใช้ในการสร้างการไหลของอากาศผ่านภูมิประเทศได้อย่างแม่นยำอีกด้วย สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับลมนั้น ต้องมีการคำนึงถึงสิ่งที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะของชั้นขีดผิวบรรยากาศด้วย อาทิเช่น ผลของความร้อน ความขรุขระของผิว แรงโคริโอลิส และปัจจัยอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งเป็นการใช้วิธีการทางสถิติเข้ามาประกอบ มากกว่าการใช้การคำนวณเชิงตัวเลข แต่บางทีก็เป็นไปได้ที่จะมีการนำเอาข้อมูลที่เป็นทางอุตุนิยมวิทยา เพื่อที่จะใช้เป็นเงื่อนไขค่าขอบเขตที่เราจะศึกษาด้วยเหตุนี้การศึกษาเกี่ยวกับสภาพบรรยากาศจึงได้มีการใช้อุโมงค์ลม เพื่อที่จะได้ข้อมูลสำหรับการใช้เปรียบเทียบกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Gosman, 1999)

ข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งของอุโมงค์ลมก็คือ สามารถควบคุมและสร้างสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ เพื่อใช้สำหรับการวิจัยปัญหาเฉพาะที่เราสนใจ สามารถเปลี่ยนแปลงสิ่งที่เป็ปัจจัยสำคัญของปัญหาได้ อุโมงค์ลมนั้นถูกนำมาใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมลมอย่างกว้างขวางและมีความแม่นยำเมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งอุโมงค์ลมนั้นยังคงเป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ควบคู่กับงานทางด้านวิศวกรรมลมได้อีกยาวนาน และแบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นจำเป็นต้องใช้ควบคู่กับข้อมูลที่ได้จากอุโมงค์ลมเพื่อที่จะให้ได้ผลเฉลยที่สามารถนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมลมได้อย่างถูกต้อง

ในส่วนของการวัดการเกิดการไหลแบบแยกตัว (Separation flow) นั้น จำเป็นต้องมีการใช้ Hot wire anemometer เป็นเครื่องมือหลักในการวัด และ Pulsed wire anemometer ก็เป็นเครื่องมือหนึ่งที่มีความเหมาะสมและนิยมใช้อย่างกว้างขวางเช่นเดียวกัน (Britter *et al.*, 1981) ส่วนวิธีการจำลองภูมิประเทศที่ซับซ้อนการย่อขนาดนั้นก็มีความสำคัญเช่นเดียวกันเพื่อที่จะให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด Schlichting (2000) ได้นำเสนอค่า Roughness Reynolds Number ซึ่งต้องมีค่ามากกว่า 5 ( $u_* z/V > 5$ ) เมื่อภูมิประเทศจริงถูกย่อให้มีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดของอุโมงค์ลม ความขรุขระของผิวนั้น ต้องมีขนาดลดลงตามอัตราส่วน เพื่อให้ได้สภาพการทดลองที่ใกล้เคียงกัน และที่ผิวของแบบจำลองที่การไหลที่เป็นอิสระจากเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) จะต้องใช้ขนาดของอนุภาคความหยาบผิว 0.75 มิลลิเมตร (Snyder and Castro, 2002)

ส่วนความคลาดเคลื่อนอื่นๆ ที่เกิดจากการทดลองในอุโมงค์ลมนั้น (Farell and Iyengar, 1999) ได้พบว่า มีความคลาดเคลื่อนจากการทำนายค่า ความเค้นเฉือน (Shear stress) ประมาณ 10% และความคลาดเคลื่อนจากการหาค่าความขรุขระของผิว ในงานวิจัยล่าสุดของ (Iyengar and Farell, 2001) ได้แสดงความคลาดเคลื่อนในการหาค่า  $\mu_*$  เกินกว่า 15 % ซึ่งได้จากการวัดค่า Reynolds stresses ด้วยหัววัดแบบ Cross wire และความผิดพลาดในการคำนวณความขรุขระผิว การจำลองการไหลของชั้นซิดผิวบรรยากาศ เป็นการเตือนให้ผู้ที่ทำการทดลองโดยการใช้อุโมงค์ลมให้ทราบว่าต้องคำนึงถึงความคลาดเคลื่อนจากค่า  $z_0$  ด้วย และเป็นตัวแปรที่ต้องนำมาพิจารณาในการย่อส่วน ด้วย

ความมีเสถียรภาพของชั้นซิดผิวภายในอุโมงค์ลม สามารถจำลองขึ้นได้ด้วยการให้ความร้อนหรือการทำความเย็นของพื้นผิว และอากาศที่ไหลผ่าน เพื่อจำลองอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนจากพื้นไปสู่อากาศ (Hoya, 2001) สิ่งที่สำคัญที่สุดสิ่งหนึ่งนั่นก็คือความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นภายในชั้นซิดผิว และจะต้องทำการสร้างขึ้นเพื่อให้การทดลองมีความแม่นยำมากขึ้น อย่างไรก็ตามความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นนี้ก็ต่างจากการจำลองขึ้นในอุโมงค์ลม ซึ่งมีผลอันเนื่องมาจากความเค้นเฉือนและอุณหภูมิ แต่ว่าสิ่งนั้นก็ทดแทนผลอันเนื่องมาจากการหมุนของโลกจากภูมิประเทศจริงแล้ว (Garratt, 1992)

สำหรับการไหลแบบ Neutral flow ซึ่งไม่มีผลของแรงลอยตัว นั้นจะเกิดขึ้นกับการไหลของอากาศในอุโมงค์ลม ซึ่งจะใกล้เคียงและเหมือนกับการไหลของอากาศในวันที่มีลมแรงและมีเมฆปกคลุมหนาแน่น (Garratt, 1992) อย่างไรก็ตามการไหลในภูมิประเทศจริงซึ่งเป็นการไหลแยกเป็นชั้นเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermally Stratified Flow) และแรงโคริโอลิสนั้น เกินความสามารถของอุโมงค์ลมในการที่จะจำลองขึ้นมาได้ แต่ในขณะเดียวกันอุโมงค์ลมนั้นก็ยังสามารถสร้างการไหลการไหลแยกเป็นชั้น เนื่องจากอุณหภูมิ (Thermally Stratified Flow) ได้ ถึงแม้ว่าจะทำได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูงก็ตาม (Derickson and Peterka, 2004)

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการใช้อุโมงค์ลมในการศึกษาการไหลของอากาศทั่วๆ ไปนั้นให้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำและชัดเจน แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนต่างๆ เกิดขึ้นกับงานวิจัยหลายๆ ชิ้น แต่สิ่งเหล่านี้ถือว่ามีค่าน้อยมากในการพิจารณารูปแบบการไหล, การวัดค่า และการทดลอง อย่างไรก็ตามอุโมงค์ลมนั้นก็ยังคงเป็นทางเลือกหนึ่งในการศึกษาการไหลของอากาศของวิศวกรตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และต่อไปอีกนานหลายปี ถึงแม้ว่าจะมีแบบจำลองเชิงตัวเลข

ขึ้นมา แต่ก็ไม่สามารถยกเลิกการทดลองในอุโมงค์ลมได้ และวิธีการจำลองการไหลของอากาศทั้งสองวิธีนั้น ต้องใช้ควบคู่กันเสมอเพื่อให้สามารถตรวจสอบ และทำความเข้าใจการไหลของอากาศได้อย่างถูกต้อง

### อิทธิพลอันเนื่องมาจากบรรยากาศ

อิทธิพลของสภาพภูมิประเทศที่ส่งผลกระทบต่อ การไหลนั้น มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็น ความเร็วของอากาศที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตลอดจนระดับการเกิดความปั่นป่วนของการไหลของอากาศ ล้วนส่งผลกระทบต่อการบินตามภูมิประเทศเป็นอย่างยิ่ง ระดับการเกิดความปั่นป่วนของการไหลที่สูงทำให้เกิดอันตรายต่อการบิน และมีความซับซ้อนทำให้ทำนายการไหลได้ยาก การไหลตามธรรมชาติผ่านภูมิประเทศนั้น มีผลกระทบอันเนื่องมาจาก แรงลอยตัวแรงโคริโอลิส ซึ่งทำให้รูปแบบของการไหลมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก

### การทำนายการไหลของลม

การทำนายการไหลของลมผ่านภูมิประเทศที่ซับซ้อนนั้น จะต้องทำการอ้างอิงจากทฤษฎี และจากการทดลอง ในส่วนของการทดลองนั้น สามารถทำได้ทั้งจากการทดลองจากขนาดจริง และการทดลองในอุโมงค์ลม ด้วยเหตุที่ว่าเทคนิคทางทฤษฎีก็มีการอ้างอิงจาก การทดลอง การวิเคราะห์ หรือระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเหมือนกัน เพื่อที่จะให้ได้การไหลของลมผ่านภูมิประเทศทุกสถานการณ์นั้น จะต้องมีการใช้หลายๆ วิธีเข้าด้วยกัน เพื่อให้แต่ละวิธีสามารถตรวจสอบความถูกต้องของกันและกันได้ แต่ถ้าพูดถึงแบบจำลองการไหลแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น RANS, DES และ LES สามารถนำมาใช้ในการอ้างอิงในทางอุตสาหกรรมได้อย่างมั่นใจ อย่างไรก็ตามจะต้องมีผลการทดลองจากอุโมงค์ลม และผลจากการวัดจริงมาเปรียบเทียบกับทุกครั้ง (Strangroom, 2004)

### ชั้นขีดผิวบรรยากาศ

หลักการของการไหลในชั้นขีดผิว (Boundary Layer) ของของไหล ตั้งแต่ตอนปลายศตวรรษที่ 19 นักวิทยาศาสตร์อย่าง เช่น Froude และ Prandtl ได้มีการศึกษาและแยกประเภทของการไหลขึ้น โดยได้มีการศึกษาการไหลบริเวณใกล้ๆ พื้นผิว และการไหลแบบทรานซิชัน (Transition) จากสถานะ Free Stream ไปยังสถานะ No slip บริเวณผนัง จากมุมมองทางด้านภูมิศาสตร์ การไหลผ่าน

ชั้นจิตผิวนั้น เป็นชั้นการไหลของอากาศเหนือพื้นโลก ซึ่งได้รับผลกระทบจากภูมิประเทศตามธรรมชาติโดยตรงไม่ว่าจะเป็นรูปร่างของภูมิประเทศ ความเสียดทาน ความร้อน เป็นต้น

ดังนั้น ในบทนี้จึงได้มีการสรุปถึงสิ่งต่างๆ ที่เกี่ยวข้องต่อการไหลในชั้นจิตผิว ไม่ว่าจะเป็นหญา ต้นไม้ รูปร่างภูมิประเทศต่างๆ เนื่องจากการบินทางทหารบินนั้นต้องทำการบิน และลงจอดตามภูมิประเทศ ดังนั้น ก่อนที่จะทำการจำลองโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข จะต้องมีความเข้าใจชั้นจิตผิวของบรรยากาศเป็นอย่างดี

### สมการแสดงการไหลของของไหล

สมการแสดงการไหลของของไหลนั้น สามารถใช้ได้กับการไหลตามธรรมชาติเหมือนกับการไหลในห้องทดลองธรรมดา แต่ว่าสมการรายละเอียดของการไหลทั้งหมดนั้นคงไม่สามารถกล่าวถึงได้หมดในที่นี้

### สมการการอนุรักษ์ (Conservation equations)

สมการที่ 1 แสดงสมการการอนุรักษ์สำหรับการแสดงการไหลของของไหล

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

### โคริโอลิส (Coriolis)

การหมุนของโลกนั้นส่งผลกระทบต่อ การไหลของอากาศตามธรรมชาติ เนื่องจากว่ามีแรงลัพท์อันเนื่องจากการหมุน เรียกว่า แรงโคริโอลิส และเป็นพจน์ที่เพิ่มเข้าไปในสมการแสดงการไหลเป็นพิเศษสำหรับการไหลตามธรรมชาติ โดยแรงโคริโอลิสจะเป็นฟังก์ชันของ ความเร็วเชิงมุม,  $\Omega$ , ละติจูด,  $\phi$  ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกเมื่ออยู่ซีกโลกเหนือ และเป็นลบเมื่ออยู่ซีกโลกใต้

$$f = 2\Omega \sin \phi \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 จะได้สมการโมเมนตัมที่มีการเพิ่มพจน์ ของ แรงโคริโอลิส,  $fu_i$  ดังแสดงในสมการที่ 3

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + fu_i + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

สำหรับการศึกษาในชั้นขีดผิว แรงโคริโอลิสจะไม่ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาด้วย เพราะว่าแรงโคริโอลิสจะส่งผลกระทบต่อ ชั้นด้านนอกเท่านั้น และ มีความซับซ้อน ยุ่งยากในการนำมาประกอบการคำนวณ ที่ด้านบนของชั้นขีดผิว แรงโคริโอลิส จะสมดุลกับแรงเค้นเฉือนของความดัน จึงทำให้ยับยั้งการเติบโตของชั้นขีดผิวได้ ตามที่ (Stubley and Riopelle, 1998) ได้ทำการวิจัยออกมา ดังนั้น แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในการศึกษาสภาวะอากาศ จะต้องทำการพิจารณาผลกระทบต่อการไหลอันเนื่องมาจากแรงโคริโอลิสใส่เข้าไปที่ด้านบนของโดเมนด้วย

#### การเปลี่ยนแปลงของความดันและอุณหภูมิ (Variation of Pressure and Temperature)

อยู่ภายใต้สมมติฐาน ไฮโดรอสแตติก หมายความว่า เป็นอิสระจากความเร่งในแนวตั้ง และการไหลเฉลี่ย

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (4)$$

ดังนั้น ความหนาแน่นของอากาศจึงเป็นฟังก์ชันของความสูงเท่านั้น สำหรับการไหลตามธรรมชาติจะได้ว่า:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial z} = 0 \quad (5)$$

## การไหลแบบปั่นป่วน

เมื่อการไหลมีความเร็วสูงขึ้น โครงสร้างของการไหลจะแยกออกจากกันแล้วเกิดรูปแบบการหมุนวน ยิ่งการหมุนวนมีมากขึ้นการไหลยิ่งมีความปั่นป่วนมากขึ้น ความปั่นป่วน คือ การเคลื่อนที่แบบหมุนวน ซึ่งเลขเรย์โนลด์ส นั้นมีค่าสูง มีการหมุนหลายขนาด และประกอบไปด้วยหลายๆ ความถี่

การเคลื่อนที่จะเป็นรูปแบบของการหมุนเสมอและจะต้องคิดถึงกระแสนที่มีความยุ่งเหยิงนั้นด้วย ซึ่งมีความไม่เสถียรสูงมาก ความปั่นป่วนทำให้พลังงานออกจากการไหล ดังนั้น ผลของความปั่นป่วนจึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมา

ธรรมชาติความปั่นป่วนของชั้นขีดผิว เป็นส่วนที่มีความสำคัญมากที่สุดส่วนหนึ่ง ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นนี้ แตกต่างจากความปั่นป่วนที่สร้างขึ้นจากอุโมงค์ลม เนื่องจากผลของความร้อน กับการเกิด Wind shear และเนื่องจากว่าความปั่นป่วนของชั้นขีดผิว กระทำการกับไหลเฉื่อย ซึ่งได้รับผลกระทบมาจากการหมุนของโลก อย่างไรก็ตามโครงสร้างของมันได้แสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงหลายอย่างในชั้นขีดผิวสองมิติที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ลม ทั้งคู่มีส่วนที่เป็นขอบเขตชั้นนอกและชั้นในส่วนที่อยู่ด้านใน จะขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวและไม่ได้หมุนเหมือนกับส่วนที่อยู่ด้านนอก ส่วนที่อยู่ระหว่างชั้นนอกกับชั้นในนั้นก็ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และทำหน้าที่เป็นส่วนทับซ้อนกันระหว่างสองส่วน

Townsend (1961) ได้ตั้งสมมติฐานที่สำคัญเกี่ยวกับความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับ ชั้นขีดผิว การเคลื่อนไหวของชั้นขีดผิวส่วนในประกอบไปด้วยส่วนที่ทำให้เกิดความเค้นเฉือน และขึ้นอยู่กับความสูงและความเค้นซึ่งส่วนชั้นขีดผิวด้านนอกเป็นส่วนไม่เกิดการหมุน และยังได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่า ความปั่นป่วนของส่วนชั้นที่หมุนจะไม่มีรบกวนส่วนชั้นที่ไม่หมุนในทุกกรณี

แต่ว่าสมมติฐานของ Townsend (1961) ที่ว่าความปั่นป่วนในชั้นขีดผิวส่วนนอกไม่ส่งผลกระทบต่อการไหลใกล้ๆพื้นผิวนั้นได้ถูกแย้งโดยนักวิจัยหลายๆ ท่าน รวมทั้ง McNaughton and Brunet (2002) ซึ่งทั้งสองคนได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กันของทั้งสองส่วน McNaughton and Brunet (2002) สรุปได้ว่าในขณะที่สมมติฐานนั้นได้มีการยอมรับกันอย่างแพร่หลาย แต่ก็ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จริง

## RANS Equations

สมการมาตรฐานของนาเวียร์-สโตก โดยปกติแล้วใช้สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งการไหลโดยทั่วๆ ไปนั้น ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน การเคลื่อนที่ของของไหลเป็นแบบสุ่ม ไม่คงตัว และเป็นสามมิติ Reynolds (1895) ได้ใช้หลักการทางสถิติในการหาค่าความเร็ว,  $u_j$ , ณ ช่วงเวลาใดๆ สามารถแบ่งออกได้เป็นความเร็วเฉลี่ย และความเร็วการสั่น ซึ่ง  $U_j$  คือ ความเร็วเฉลี่ย และ  $u'_j$  คือ ความเร็วของการสั่น

$$u_j = U_j + u'_j \quad (6)$$

สมการโมเมนตัมนาเวียร์-สโตก ที่ใช้สำหรับการไหลแบบราบเรียบ:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (7)$$

และแทนค่า  $u_j = U_j + u'_j$  เข้าไป และทำการเฉลี่ยสมการด้วยเวลาโดย  $\overline{u'_j} = 0$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho (U_j U_i + \overline{u'_j u'_i}) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (8)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho (U_j U_i) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (9)$$

จะเห็นได้ว่า มีพจน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้วิธีเฉลี่ยเรย์โนลด์ส์ คือ พจน์ Reynolds

Stresses

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (10)$$

## Mixing Length

เพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับการไหลมากขึ้น เกี่ยวกับ mixing-length ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการไหลอย่างอิสระในเรื่องทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ถ้าเราพิจารณาความไม่ต่อเนื่องของปริมาตรของไหล (กระแสม้วน), กระจายออกจากระดับเดิม,  $z$  และไปยังระดับใหม่,  $z + l$ , ซึ่งผสมกับการไหลเฉลี่ย คือ mixing-length ค่านี้เป็นคุณลักษณะเฉพาะของค่า turbulence intensity ที่ทุกๆ ระดับความสูงแต่ก็ยังเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งหรือความเร็ว

## โครงสร้างและความลึกของชั้นขีดผิวบรรยากาศ (ชั้นขีดผิว Structure and depth)

โครงสร้างและความหนาของชั้นขีดผิว ขึ้นอยู่กับสภาวะบรรยากาศและเวลาของแต่ละวัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ ทำให้การจำลองการไหล โดยใช้แบบจำลองการไหลเชิงคำนวณ และการทดลองในอุโมงค์ลมนั้นค่อนข้างยาก การจัดการจำลองจะต้องเลือกสิ่งที่ดีที่สุดเพื่อแทนสภาวะบรรยากาศจริง ชั้นขีดผิวจะมีสองส่วน ส่วนนอกบางครั้งเรียกว่า Ekman layer ซึ่งได้รับอิทธิพลจาก Coriolis ซึ่งมีความหนา 3-5 กิโลเมตร จากพื้นโลก แต่อาจจะลดลงเหลือน้อยกว่า 1 กิโลเมตร ในตอนกลางคืนเมื่อผลของอุณหภูมิมีค่าน้อยที่สุด, ส่วนชั้นในได้รับผลกระทบจากพื้นผิวซึ่งก็มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความสูงเช่นเดียวกัน ปกติแล้วจะอยู่ระหว่าง 100 เมตร ถึง 1 กิโลเมตร แต่ละชั้นความสูงเหนือพื้นขึ้นมานั้นเป็นส่วนของ Viscous Sublayer การไหลนั้นมีความซับซ้อนอันเป็นผลมาจากรูปร่างของภูมิประเทศและความขรุขระของผิวถัดจากชั้นนี้ขึ้นมา คือ Dynamic sublayer เป็นช่วงที่มีความปั่นป่วนเต็มที่ แรงลอยตัว และแรงโคริโอลิสสามารถตัดทิ้งได้ แต่ว่าไกลเพียงพอที่จะทำให้ไม่ได้รับผลกระทบจากความขรุขระผิว และความหนาของอากาศ

ภายใต้สภาวะปกติ Dynamic sublayer นั้น จะเชื่อมขอบเขตส่วนอื่นด้วยประมาณ 10% ของชั้นขีดผิว เขตที่มีการเชื่อมกันระหว่างขอบเขตชั้นในกับชั้นนอก หรือ Ekman layer ซึ่งการไหลนั้นใกล้ที่จะเป็นอิสระจากผิวของภูมิประเทศแต่จะขึ้นอยู่กับ Freestream แทน

โครงร่างของชั้นขีดผิวนี้อยู่ในภาวะปกติ แต่เมื่อชั้นขีดผิวไม่เสถียรแล้ว ขอบเขตภายนอกจะได้รับผลกระทบจากการพาความปั่นป่วนของอุณหภูมิ ทำให้ความหนาของชั้นขีดผิวก่อนข้างจะแปรผัน แต่ว่าทุกๆ ไปแล้วจะหนากว่าสภาวะปกติ สำหรับสภาวะชั้นขีดผิวที่เสถียร ความหนาจะอยู่ในช่วง 10 เมตร- 500 เมตร

ความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งส่งผลกระทบต่อ ความสูงของชั้นซิดผิว (Ansley, 1997) ได้นิยามความสูงชั้นซิดผิวว่าเป็นจุดที่ความเร็วเฉลี่ยเป็นอิสระจากพื้น ความสูงของชั้นซิดผิวจะมีค่ามากขึ้น (Ansley *et al.*, 1977) ได้กำหนดพื้นผิวภูมิประเทศที่มีความขรุขระต่างกัน ดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ความขรุขระของผิวและความสูงของชั้นซิดผิวบรรยากาศ ตามลักษณะประเภทของภูมิประเทศ

| ลำดับที่ | ลักษณะภูมิประเทศ                                            | ความสูงของชั้น | ความขรุขระ, |
|----------|-------------------------------------------------------------|----------------|-------------|
|          |                                                             | ภายใน (m)      | $z_0$ (m)   |
| 1        | ทะเลเปิด, น้ำแข็ง, ทะเลทราย                                 | 250            | 0.001       |
| 2        | พื้นดินโล่ง, มีสิ่งกีดขวางน้อย, ต้นไม้ประปราย               | 300            | 0.03        |
| 3        | พื้นที่ชนบท, เมืองเล็กๆ, มีป่าค่อนข้างหนาแน่น               | 400            | 0.3         |
| 4        | ตึกสูงหรือสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่, ใจกลางเมือง, นิคมอุตสาหกรรม | 500            | 3           |

ที่มา: Aynsley *et al.* (1997)

#### Stratification and stability

เลขฟรูด (Froude number)

เลขฟรูด ;  $Fr$ , เป็นการวัดการแยกชั้นของชั้นซิดผิวได้ ใช้เปรียบเทียบระดับการแยกชั้นของของไหลที่ไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่มีความสูง,  $h$ , และความเร็วของ free stream  $U_\infty$ ,

$$Fr = \frac{U_\infty}{N \cdot h} \quad (11)$$

เมื่อ  $N$  คือ ความถี่ของการแยกชั้น การไหลปกติ(เป็นกลาง)  $Fr = 0$  ภาวะเสถียร  $Fr > 0$  และการไหลไม่เสถียร เมื่อ  $Fr < 0$  การเปลี่ยนแปลง  $N$  ก็ไม่รับผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความสูง  $h$  ด้วยเช่นกัน เลขฟรูดนั้นขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นภายในของไหลซึ่งไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรง

เลขริชาร์ดสัน (Richardson number)

ความเสถียรภาพทางความร้อนของการไหล สามารถวัดได้โดยเลขริชาร์ดสัน ซึ่งวัดระดับการถ่ายเทความร้อนภายในของไหลการเปลี่ยนแปลงเลขฟรูดนั้น สัมพันธ์กับเสถียรภาพของการไหลเนื่องจากอุณหภูมิมากกว่าความหนาแน่น เนื่องจากการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินั้นง่ายกว่า

$$Ri = \frac{\frac{g}{T} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2} = \frac{I}{Fr^2} \quad (12)$$

ในภาวะที่เป็นกลาง,  $Ri = 0$  และผลของความร้อนนั้นตัดทิ้งได้ ดังนั้น ผลของแรงลอยตัวก็ไม่ต้องนำมาคิดด้วยในภาวะที่เสถียร แรงลอยตัวที่กระทำกับพลังงานจลน์ความปั่นป่วน ในขณะที่ภาวะที่ไม่เสถียรทั้งแรงเฉือนและแรงลอยตัวกระทำเพื่อสร้างพลังงานจลน์ความปั่นป่วน ค่าเลขริชาร์ดสันวิกฤตอยู่ที่ 0.25 (Derbyshire and Wood, 1994) ที่ซึ่งไหลเปลี่ยนจากปั่นป่วนเป็นราบเรียบ ค่าอยู่ระหว่าง 0.25 และ 0 ความปั่นป่วนจะถูกก่อกำเนิดจาก wind shear

เลขริชาร์ดสัน ไม่สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์สำหรับคุณลักษณะของความเสถียรชั้นของของไหล แต่พารามิเตอร์สำหรับการไหลที่พื้นผิวจะให้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{z}{L} = \frac{\frac{g}{T} (\overline{w'T'})_0}{u_*^3 / kz} \quad (13)$$

$(\overline{w'T'})_0$  คือ ฟลักซ์ของอุณหภูมิที่พื้นผิว เครื่องหมายลบทำให้อัตราส่วนมีเครื่องหมายเหมือน  $Ri$

## คุณลักษณะต่างๆ ของภูมิประเทศ

### สภาพภูมิประเทศของเขาพุคา

เขาพุคาตั้งอยู่ที่จังหวัดลพบุรี เป็นสถานที่ฝึกการร่อนลงจอดตามภูมิประเทศของนักบินทหารบก และ ฝึกการใช้อาวุธทางอากาศ ความสูงที่สุดประมาณ 110 เมตร ยาวที่สุดประมาณ 4.5 กิโลเมตร วางตัวตามยาว ในแนวทิศตะวันตกเฉียงเหนือและ ตะวันออกเฉียงใต้ มีต้นไม้สูงประมาณ 5 เมตร ปกคลุมทั่วพื้นที่ ความเร็วลมพัดผ่านเฉลี่ย ประมาณ 4-6 น็อต ความเร็วลมพัดผ่านสูงสุดประมาณ 14 น็อต (เดือน พฤศจิกายน ถึง ธันวาคม) อากาศที่ไหลผ่านมีความปั่นป่วนสูงทำให้ประสบปัญหาในการนำอากาศยานลงจอด การควบคุมอากาศยานในบริเวณใกล้เคียง โดยทำการเลือกจุดวัดความเร็วของอากาศ 4 จุด ดังนี้ จุดที่ 1 วัดความเร็วของอากาศด้านเข้า จุดที่ 2 เป็นจุดใกล้ภูเขาสำหรับการฝึกซ้อม จุดที่ 3 เป็นจุดสูงสุดของภูเขาสำหรับการฝึกลงจอดบนเขาสูง จุดที่ 4 เป็นจุดสำหรับการฝึกการร่อนลงจอดและใช้อาวุธทางอากาศ



ภาพที่ 1 เขาพุคา จังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 2 เขาพุดา และภูมิประเทศโดยรอบ

#### Aerodynamics roughness length

ความขรุขระ (Roughness length),  $z_0$  คือ ความสูงเหนือพื้นที่ซึ่งความเร็วทางทฤษฎีเป็นศูนย์ ไม่มีความเร็วของการไหลเกิดขึ้น ถึงแม้ว่าจะมีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมก็ตาม

ตารางที่ 2 ค่าความขรุขระตามลักษณะพื้นผิวภูมิประเทศแบบต่างๆ

| ชนิดของความขรุขระ                           | $z_0$ (m)       |
|---------------------------------------------|-----------------|
| ทะเล, ทRAY, หิมะ                            | ~0.0002         |
| คอนกรีต, ทะเลทราย, กระแสน้ำที่ราบเรียบ      | 0.0002 - 0.0005 |
| สนามหิมะที่ราบเรียบ                         | 0.0001 - 0.0007 |
| สนามน้ำแข็งที่ไม่เรียบ                      | 0.001 - 0.012   |
| พื้นดินที่ถูกไถเตรียมทำการเพาะปลูก          | 0.001 - 0.004   |
| พื้นที่หญ้าสั้น                             | 0.008 - 0.03    |
| พื้นที่หญ้ายาว, พื้นที่ที่ปกคลุมด้วยหญ้าสีท | 0.02 - 0.06     |
| พื้นที่การเพาะปลูกเบาบาง                    | 0.04 - 0.09     |
| พื้นที่การเพาะปลูกหนาแน่น                   | 0.12 - 0.18     |
| ป่าสน                                       | 0.8 - 1.6       |

ที่มา: Wieringa (1993)

แต่จากงานวิจัยของ (Kustas and Brutsaert, 1986) แสดงให้เห็นว่าสำหรับภูมิประเทศที่มีความซับซ้อนมากๆ ค่า  $z_0$  นั้น สามารถมีค่าเพิ่มสูงขึ้นได้ถึง 5 เมตร แม้จะมีการกระจายตัวของสิ่งต่างๆ ที่มีขนาดใหญ่ ที่อยู่ตามพื้นผิวดินแบบไม่ปกติ และไม่แน่นอน อย่างเช่น ในเมืองใหญ่ และป่าใหญ่ (Wieringa, 1993)

### ค่าความขรุขระเฉลี่ย (Mean roughness height)

สำหรับการไหลผ่านผนังที่ราบเรียบ ความเร็วเฉลี่ยจะแปรผันจากศูนย์กลางที่ผนัง ไปสู่ความเร็ว  $U_\infty$  ที่ Free stream ความขรุขระของผิวจะแปรผันตามโปรไฟล์การไหล โดย (Schlichting, 2000) ได้ทำการศึกษาการไหลผ่านท่อโดยการเปลี่ยนค่ารูปแบบความขรุขระ และยังได้ศึกษาการไหลอยู่สามรูปแบบโดยจะอ้างอิงจากความเร็วเสียดทาน (Friction velocity),  $u^*$  และขนาดของความขรุขระของส่วนประกอบผิว,  $h_R$ :

ท่อเรียบ  $Re < 5$

ทรานซิชัน  $5 < Re < 70$

ขรุขระ  $Re > 70$

$$\text{เมื่อ} \quad Re = \frac{\rho u_* h_R}{\mu} \quad (14)$$

ทั้งกรณีการไหลแบบราบเรียบสมบูรณ์และการไหลแบบขรุขระสมบูรณ์ล้วนเป็นอิสระจากเลขเรย์โนลด์ส ในขณะที่เดียวกันขอบเขตการไหลแบบทรานซิชัน ก็มีความแตกต่างจากทั้งสองแบบโดยสิ้นเชิง (Snyder and Castro, 2002) ได้ทำการหาค่าเลขเรย์โนลด์วิกฤติ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เป็นอิสระจากเลขเรย์โนลด์ และสรุปได้ว่า เลขเรย์โนลด์วิกฤติสำหรับการไหลที่ผิวเรียบควรจะมีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่า 5 ซึ่งได้จากการทดลองของ (Schlichting, 2000) และยังได้รับการยืนยันจาก งานวิจัยของ (Calder, 1949)

สำหรับการไหลในบรรยากาศจริง จะต้องมีการใช้ค่าที่เหมาะสมกว่า ซึ่งอยู่ในรูปของความขรุขระ  $z_0$  ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการบรรยายถึงคุณลักษณะของความขรุขระผิว ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความขรุขระของขนาดจริง ความสัมพันธ์ระหว่าง  $z_0$  และ  $h_R$  ได้ถูกนำมาเป็นตัวหลักในการพิจารณาในงานวิจัย สำหรับการไหลที่มีอิทธิพลจากความขรุขระผิวตามธรรมชาติ แนวคิดดั้งเดิมสำหรับการหาค่าความขรุขระผิวจะถูกจำกัดอยู่แค่การไหล ในท่อเท่านั้น (Schlichting, 2000; White, 1999) ที่ซึ่งความขรุขระนั้นสามารถทำการวัดได้ง่าย สำหรับความขรุขระที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติค่า  $z_0$  สามารถหาได้ง่ายกว่า จากการวัดโพไฟล์ของความเร็ว (Xian *et al.*, 2002) แสดงให้เห็นถึงความเข้าใจอันดีในการเพิ่มค่า  $z_0$  ด้วยการเพิ่มขนาดและการครอบคลุมความขรุขระของสิ่งต่างๆ ในงานวิจัย สำหรับการหาค่าความขรุขระของทะเลทราย (Paeschke, 1937) อาจจะเป็นคนแรกในการหาวิธีเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่าง  $z_0$  และ  $h_R$  โดยในงานวิจัยของเขานั้น ได้ทำการศึกษาจากพื้นผิวหิมะ พื้นผิวที่ปกคลุมไปด้วยหญ้าหลายๆ ประเภท และลักษณะของพื้นที่เพาะปลูกโดยได้อัตราส่วนดังนี้ สำหรับพื้นที่ที่มีหญ้าปกคลุมเหนือภูเขา ค่าของ  $z_0$  จะอยู่ระหว่าง 0.01 เมตร ถึง 0.05 เมตร โดยเขาได้เลือกค่า 0.03 เมตร มาเป็นตัวแทน สำหรับค่า 7.5 ถูกใช้ในสูตร จะได้ความสูงของหญ้าเฉลี่ยที่ 0.225 เมตร

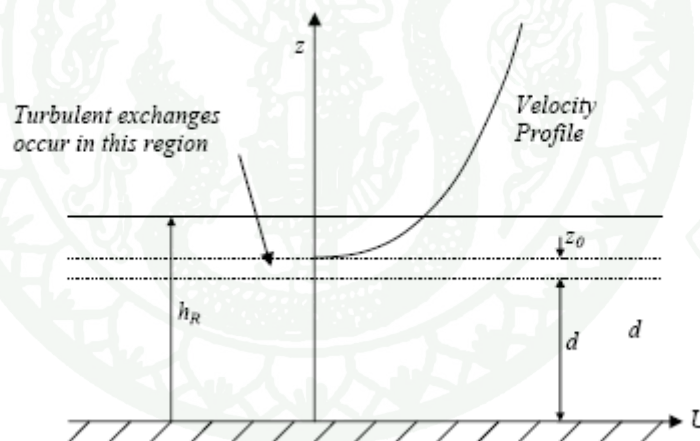
## การไหลของอากาศผ่านภูเขาสามมิติ

### พื้นผิวที่เป็นป่า (Forest surface)

เป็นพื้นผิวที่ปกคลุมไปด้วยต้นไม้ จะมีสมการลอการิทึมแสดงโปรไฟล์ของอากาศที่ไหลผ่าน ดังนี้

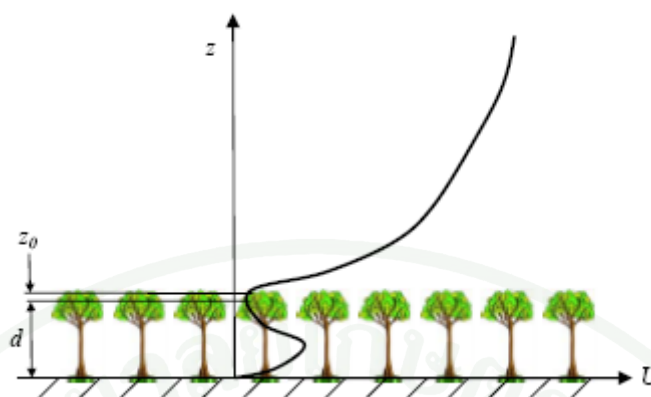
$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \quad (15)$$

เมื่อกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้  $u_* = 0.654$  m/s ,  $\kappa = 0.41$ ,  $d = 1.5$  m,  $z_0 = 0.3$  m และใช้ความสัมพันธ์  $y_R$  จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับต้นไม้สูงประมาณ 3-4 m (Brutsaert, 1982) ดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4



ภาพที่ 3 โปรไฟล์การไหลของอากาศที่บริเวณใกล้พื้นผิว

ที่มา: Strangroom (2004)



ภาพที่ 4 โพรไฟล์การไหลของอากาศที่บริเวณใกล้พื้นผิวที่เป็นต้นไม้

ที่มา: Strangroom (2004)

#### Extreme roughness in CFD

สำหรับการจำลองการไหลผ่านพื้นที่ที่มีความขรุขระของผิวมากๆ นั้น ยังไม่มีวิธีที่แน่ชัดในการนำเอาค่า  $d$  ที่มีขนาดมากๆ เข้าในแบบจำลอง CFD ได้มีการใส่ค่าความขรุขระของในความสัมพันธ์ของ  $z_0$  และไม่ชัดเจนว่าค่า  $d$  นั้นส่งผลกระทบต่อขนาดของความหยาบเม็ดทรายอย่างไรถ้านิยามของ  $y_R = 7.5 \times z_0$  ถูกใช้ร่วมกับแบบจำลองโพรไฟล์ลอการิทึมนี้ จะไม่สามารถใช้ด้วยกันได้ เพราะวานิยามของความขรุขระผิวนั้นนิยามที่โพรไฟล์ความเร็วต่างกัน

ในการหาค่าความขรุขระของผิว สำหรับการไหลของอากาศผ่านบริเวณที่ปกคลุมไปด้วยต้นไม้ นิยามของระนาบที่มีความเร็วเป็นศูนย์จะยกสูงขึ้นจากเดิมเป็นระยะทาง  $d + z_0$  สำหรับปัญหาทาง CFD นั้น เราไม่สามารถละเว้นค่า  $d$  ได้

ผลเฉลยของงานวิจัยนี้ได้ทำการเอาค่า  $d$  ออกจากการคำนวณโพรไฟล์ของความเร็ว และพิจารณาความขรุขระผิวทรายอย่างเดียว จากนั้นเมื่อมีการอ่านค่าจากผลเฉลยจาก CFD ระดับพื้นผิวนั้น ไม่ใช่ศูนย์ต้องเป็นค่า  $d$  แต่อย่างไรก็ตามด้านล่างของบริเวณป่าจะถือว่าไม่มีการไหลของอากาศเกิดขึ้น

จากมุมมองทางด้านทฤษฎีนั้นจะพบว่าค่อนข้างจะไม่ค่อยมีความแม่นยำมากนัก ถ้าหากว่าไม่มีความเข้าใจในเรื่องการไหลของอากาศผ่านบริเวณป่าชัดเจนมากพอ อย่างไรก็ตามในมุมมองทางด้าน CFD จะไม่มีการไหลของอากาศเกิดขึ้นด้านใต้ของ d ดังนั้น ค่าที่ได้จากการคำนวณถือว่าถูกต้อง

เมื่อเราได้รับข้อมูลจากการคำนวณนั้นสิ่งสำคัญที่จะต้องจำไว้ก็คือ ค่า  $z = d$  ไม่ใช่  $z = 0$  ขณะที่โปรแกรมการไหลที่ใช้ในการทดลองในอุโมงค์ลม จะมีความสูงระนาบศูนย์ด้วย ซึ่งโปรแกรมที่ได้จาก CFD ไม่ได้รวมค่านี้เข้าไปด้วย ซึ่งจะต้องพิจารณาจากหลักการข้างต้นประกอบด้วย

### ผลการจำลองจากคอมพิวเตอร์

การเปรียบเทียบโปรแกรมการไหลของอากาศขาเข้าและขาออกนั้น ความคลาดเคลื่อนของความเร็วของชั้นซิดผิวที่เกิดขึ้นอยู่ที่ระยะความสูงประมาณ 3.5 เมตรจากพื้น ในกรณีนี้ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1.14% ก็ถือว่าดีพอในการจัดค่า ความขรุขระของผิวในการทดลองต่อไป

โดยสรุปแล้วความสูงของชั้นซิดผิวประมาณ สองถึงสามเมตรเมื่อวัดจากพื้นนั้น มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างมาก มีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันสูง และมีความซับซ้อนในการจำลองการไหลในช่วงนี้ ความแตกต่างของโปรแกรมการไหลเพียงเล็กน้อยนี้ เป็นสิ่งที่ไม่คาดว่าจะเกิดขึ้นและทำให้มีความคลาดเคลื่อน Spatial discretisation ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อผลการคำนวณอยู่บ้าง สำหรับการทดลองเพื่อที่จะทดสอบการรักษาโปรแกรมการไหลของอากาศตลอดโดเมนการไหลของอากาศ เพื่อเป็นการยืนยันความมีเสถียรภาพของโปรแกรมการไหลแบบลอการิทึม และความขรุขระของผิวที่ได้กำหนดไว้ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากชั้นซิดผิวนั้นถือว่าน้อยมาก

จากงานวิจัยของ (Mason and King, 1985) ได้ทำการวัดโปรแกรมการไหลความเร็วและความปั่นป่วน ณ ตำแหน่งหลายๆ ตำแหน่ง ตามระนาบตรงกลางของภูเขา และก็ใช้ตำแหน่งเหล่านี้ในการเปรียบเทียบกับ การคำนวณจาก CFD

จากการทดลองครั้งที่สองของ (Ishihara and Hibi, 2002) ได้ กำหนดค่าดังนี้  $u_* = 0.32 \text{ m/s}$ ,  $z_0 = 0.3 \text{ mm}$  และ  $d = 3 \text{ mm}$  อัตราส่วนอยู่ที่ 1/1000 ขนาดจริง  $z_0 = 0.3 \text{ m}$  และ  $d = 3 \text{ m}$  เป็นลักษณะของภูเขาที่ถูกปกคลุมไปด้วยป่าไม้ (Brusaert, 1982) ค่าความสูงประสิทธิผลของต้นไม้อยู่ที่ประมาณ 6-8 เมตร ขนาดของโดเมนการคำนวณมีดังนี้ ความยาวประมาณ 60h ความกว้างประมาณ 20.5h และความสูงประมาณ 22.5h ซึ่งทำให้ประกอบไปด้วย 80000 nodes  $70 \times 32 \times 35$  ในทิศทาง  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ ได้ทำการศึกษาผลการทดลองโดยให้ไหลผ่านพื้นผิวที่เป็นป่า

### Numerical Modeling

สมการ RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stoke) เป็นการเฉลี่ย สมการนาเวียร์-สโตก เพื่อให้เหมาะสำหรับการใช้งานในด้านวิศวกรรม สามารถแบ่งได้สองกลุ่ม คือ

1. Eddy-Viscosity Model (EVM) จะอ้างอิงตามสมมติฐานของ Boussinesq (1877)
2. Reynolds Stress Model (RSM) Reynolds Stress จะแปรผันตรงกับ Rate of strain

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (16)$$

$\mu_t$  คือ Eddy viscosity  $k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$  คือ พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน

สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ คือ

1. Zero Equation
2. One Equation
3. Two Equations
4. More than two equations

**Eddy-viscosity Model (EVM) จะอ้างอิงตามสมมติฐานของ Boussinesq**

จากสมการของ Reynolds Stress ข้างบน  $\mu_t$  จะเป็นตัวเดียวที่ไม่ทราบค่าในสมการ RANS ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป

$$\frac{\mu_t}{\rho} = \nu_t = u^* \ell^* \quad (17)$$

$\ell^*$  คือ Length scale

$u^*$  คือ Velocity scale

### Zero Equation

เป็นแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนอย่างง่ายที่สุด ไม่ต้องการใช้สมการการถ่ายเท โดยมี การสมมติค่า Eddy Viscosity ขึ้นมาเปลี่ยน จาก  $\ell^*$  เป็น  $\ell_m$  (Mixing Length) ไม่ขึ้นอยู่กับการรูปร่าง ของการไหล ดังจึงได้มีการกำหนด  $u^*$  ขึ้นมาเป็น ดังนี้

Samagorinsky (1963)

$$u^* = \ell_m \sqrt{2\overline{S_{ij}S_{ij}}} \quad (18)$$

เมื่อ  $\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$  คือ Mean Rate of Strain Tensor (19)

Baldwin and Lomax (1978)

$$u^* = \ell_m \sqrt{2\overline{\Omega_{ij}\Omega_{ij}}} \quad (20)$$

เมื่อ  $\overline{\Omega_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$  คือ Mean Rate of Rotation Tensor (21)

การใช้งานนั้นเหมาะสำหรับการใช้ในด้านอากาศยานศาสตร์ การไหลผ่านปีกเครื่องบิน การไหลอย่างง่าย

### One Equation

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนของ Spalart-Allmaras (S-A) ค่อนข้างจะแน่นอนและมีประสิทธิภาพสำหรับการใช้ในด้านอากาศยานศาสตร์  $\mu_t$  สามารถหาได้จากสมการการถ่ายเทเพียงสมการเดียว โดยจะนิยมใช้การไหลที่แยกตัวจากกัน ไม่เหมาะสำหรับการไหลที่ซับซ้อน เพราะว่ามีปัญหาจากการไหลที่บริเวณใกล้พื้นผนัง

$$\frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = c_{bl}\tilde{S}\tilde{\nu} - c_w f_w \left(\frac{\tilde{\nu}}{d}\right)^2 + \frac{1}{\sigma} [\text{div}([\tilde{\nu} + \nu] \text{grad} \tilde{\nu}) + c_{b2} \text{grad} \tilde{\nu} \cdot \text{grad} \tilde{\nu}] \quad (22)$$

เมื่อ  $d$  คือ ระยะที่ใกล้ผนังที่สุด

$$\tilde{\nu} = u_\tau \kappa d, \quad \tilde{S} = \frac{u_\tau}{\kappa d}$$

เมื่อ  $u_\tau$  คือ Friction velocity ขึ้นอยู่กับ ความเสียดทานที่ผนัง (Wall friction)

$$\tau_w \left( u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \right), \quad \kappa \text{ คือ ค่าคงที่ของ Karmann}$$

$$\nu_t = f_v \tilde{\nu}, \quad f_v = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3}, \quad \chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu}$$

$$\tilde{S} = S + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}, \quad f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}$$

$$f_w \text{ เป็นความล้มพันธ์ของอัตราส่วน } r \equiv \tilde{\nu} / (\tilde{S} \kappa^2 d^2)$$

$$c_{wl} = c_{bl} / \kappa^2 + (1 + c_{b2}) / \sigma$$

การใช้งานนั้นเหมาะสำหรับการไหลผ่านพื้นผิวเรียบ แพนอากาศ การไหลของอากาศผ่านใบจักรของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ และการไหลของอากาศผ่านรูปทรงกระบอก สำหรับการไหลแบบแยกตัวจากผิว (Separated flow) เหมาะสำหรับการไหลผ่านตัวปีกอากาศยานรูปร่างต่างๆ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการคำนวณการไหลที่มีผลจากการหมุน และการเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งได้ แต่ต้องมีการปรับปรุงค่า Reynolds Stress model ของ S-A ให้เป็นแบบไม่เชิงเส้น จะทำให้ผลการคำนวณมีค่าแม่นยำมากขึ้น และนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในด้านอุตสาหกรรม

### Two Equation Model

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับหลายๆสถานการณ์ มีความแม่นยำพอยอมรับได้ ใช้ได้ค่อนข้างกว้าง ใช้เวลาในการแก้สมการไม่นาน จึงเหมาะกับปัญหาในทางวิศวกรรม โดยสมการจะอยู่ในรูป  $k - \varepsilon$  สามารถแบ่งได้สองแบบคือ

- High Reynolds Number  $k - \varepsilon$  (Standard  $k - \varepsilon$ ) เหมาะสำหรับการไหลที่ไม่ต้องการความแม่นยำในบริเวณใกล้ผนังมากนัก เพราะมีการใช้ฟังก์ชันที่ผนัง (Wall function) เพื่อจำลองการไหลใกล้ผนัง แต่ยังไม่เหมาะสำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง

- Low Reynolds Number  $k - \varepsilon$  ต้องแก้สมการไปจนถึงผนัง

High Reynolds Number  $k - \varepsilon$  (Standard  $k - \varepsilon$ )

ประกอบไปด้วยสองสมการเขียนได้ออยู่ในรูป

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P - \tilde{\varepsilon} - D \quad \text{สมการการเคลื่อนที่ของความปั่นป่วน } k$$

$$\frac{D\tilde{\varepsilon}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_j} \right\} + C_{\varepsilon 1} f_{\varepsilon 11} P \frac{\tilde{\varepsilon}}{k} - C_{\varepsilon 2} f_{\varepsilon 2} P \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{k} + E \quad \text{สมการการเคลื่อนที่}$$

ของอัตราการผลิตของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน  $\varepsilon$

$$\nu_t = C_\mu f_\mu P \frac{k}{\varepsilon} \Rightarrow \text{ความหนืดหมุนวน (Eddy or Turbulent Viscosity)}$$

$$P = \nu_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Rightarrow \text{Production rate of turbulence kinetic energy, } k$$

เมื่อ  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_{\varepsilon 1}$  และ  $C_{\varepsilon 2}$  เป็นค่าคงที่ ในการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่าเรย์โนลด์สสูง สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนค่าเรย์โนลด์สต่ำ ขอบเขตของความหนืดมีค่าใกล้เคียงอย่างมาก ค่า  $C_{\varepsilon 1}$  และ  $C_{\varepsilon 2}$  จะใช้เป็นค่า  $f_{\varepsilon 1}$  และ  $f_{\varepsilon 2}$  (Damping function) และ  $D$  และ  $E$  เป็นค่าที่ไม่ใช่ศูนย์ และค่า  $\tilde{\varepsilon}$  (Isotropic dissipation) มีความแตกต่างจากค่า  $\varepsilon$  สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่าเรย์โนลด์สสูงจะทำการแก้สมการ  $k - \varepsilon$  เฉพาะช่วงที่ไกลจากผนังเท่านั้น แต่ว่าการไหลชนิดผนังจะใช้ Wall Function เพื่อจะหลีกเลี่ยงการใช้กริดที่ละเอียดมากเกินไปจะใช้สองค่านี้

$$k = \frac{u_\tau^2}{C_\mu^{1/2}} \quad \varepsilon = \frac{u_\tau^3}{0.41y}$$

เมื่อ  $u_\tau$  (Friction velocity) สามารถหาได้จากสมการใกล้เคียงในเทอมของฟังก์ชันลอการิทึม ดังสมการ

$$\frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{0.41} \ln \left( \frac{yu_\tau}{\nu} \right) + 5.2 \quad (23)$$

$$\text{และ } u_\tau = (\tau / \rho)^{1/2}$$

Low Reynolds Number  $k - \varepsilon$  (Standard  $k - \varepsilon$ )

สำหรับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่าเรย์โนลด์สต่ำ เทอมของ  $\nu_t$  และแบบจำลองการไหลสำหรับ  $k$  และ  $\tilde{\varepsilon}$  จะสามารถเขียนได้ในรูปของสมการอนุกรมมวล สมการโมเมนต์ ซึ่งจะมีค่าคงที่  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $C_\mu$  และ Damping function  $f_{\varepsilon 1}$ ,  $f_{\varepsilon 2}$ ,  $f_\mu$  และเทอมที่พิเศษเพิ่มขึ้นมา คือ  $D$  และ  $E$

สำหรับเวอร์ชันที่ใช้ในที่นี้ เป็นของ Launder and Sharma เพราะว่า ค่าของ  $f_\mu$  ถูกเขียนอยู่ในรูปของ ค่าเรย์โนลด์ความปั่นป่วน (Turbulence Reynolds Number)  $Re_t = \frac{k^2}{\nu \varepsilon}$  และ  $f_\mu$  จะอยู่ในเทอมของระยะห่างจากผนัง  $y^+ \left( = \frac{y U_\tau}{\nu} \right)$  มีค่าต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2-3 ดังนี้

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของแบบจำลอง Low Reynolds Number  $k - \varepsilon$  (Standard  $k - \varepsilon$ )

| $\sigma_k$                                                               | $\sigma_\varepsilon$     | $C_{\varepsilon 1}$ | $C_{\varepsilon 2}$                                              | $C_\mu$ |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------|---------|
| 1.0                                                                      | 1.3                      | 0.09                | 1.44                                                             | 1.92    |
| $f_{\varepsilon 1}$                                                      | $f_{\varepsilon 2}$      |                     | $f_\mu$                                                          |         |
| 1.0                                                                      | $1-0.3exp(-Re^2_\gamma)$ |                     | $\exp\left(\frac{-3.4}{\left(1+\frac{Re_t}{50}\right)^2}\right)$ |         |
| E                                                                        |                          |                     | D                                                                |         |
| $2\nu v_t\left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k\partial x_m}\right)^2$ |                          |                     | $2\nu\left(\frac{\partial\sqrt{k}}{\partial x_i}\right)^2$       |         |

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้เหมาะสำหรับวิเคราะห์การไหลผ่านใบจักรของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ เพราะว่าประมาณ 40-80% ของความยาวคอร์ด ชั้นขีดผิวของการไหลผ่านใบจักรจะเป็นแบบ Transition สำหรับการไหลแบบแยกตัว (Separation flow) แบบจำลอง Non linear eddy viscosity สามารถอธิบายการไหลแบบแยกตัวได้ดีกว่า แบบจำลองแบบ Linear  $k - \varepsilon$

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าเนื่องจาก Eddy viscosity turbulence model มีความแม่นยำในการคำนวณ และความต้องการทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณน้อย ไม่ว่าจะเป็นหน่วยความจำหรือว่าราคา เมื่อเทียบกับแบบจำลอง Reynolds Stress ดังนั้น จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านอุตสาหกรรม

1. One equation turbulence model ที่มีการปรับปรุงบางค่า สามารถใช้สำหรับการจำลองการไหลที่มีการหมุน (Rotational Flows)

2. Two equation turbulence model เนื่องจากว่าแบบจำลองนี้ง่าย มีความแม่นยำ สำหรับการใช้งานในทางปฏิบัติ

3. Non linear Two equation turbulence model เหมาะสำหรับการไหลในทางวิศวกรรม ที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

4. Three equation turbulence model เหมาะสำหรับการจำลองการไหลในช่วงที่เป็น Transition

5. Four equation turbulence model มีความแม่นยำมากที่สุดเมื่อเทียบกับ แบบจำลอง Eddy viscosity turbulence model แบบอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีปัญหาในการไหลใกล้ผนัง

### Reynolds Stress Model (RSM)

บางครั้งเราเรียกสมการนี้ว่า Second-Moment Closures (SMCs) หรือ Second Order Turbulence Model สำหรับการไหลที่อัดตัวไม่ได้ และการไหลคงตัว โดยที่ไม่มีผลของความหนืด และแรงภายใน สมการการเคลื่อนที่ของ RSM  $\overline{u_i u_j}$  สามารถเขียนได้ในรูป Tensor ได้ดังนี้

$$C_{ij} = D_{ij} + P_{ij} + \phi_{ij} - \varepsilon_{ij}$$

เมื่อ  $C_{ij} = U_k \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k}$ , Convection

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( -\overline{u_i u_j u_k} - \frac{\overline{u_j p}}{\rho} \delta_{ik} - \frac{\overline{u_i p}}{\rho} \delta_{jk} \right), \text{ Diffusion}$$

$$P_{ij} = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \overline{u_k u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_k}, \text{ Production}$$

$$\phi_{ij} = \frac{p}{\rho} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \text{ Pressure strain}$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k}, \text{ Dissipation}$$

การประยุกต์ใช้งานของ RSM นั้นสามารถใช้สำหรับ การไหลแบบ Rotating and Swirl Flows การไหลประเภทนี้เกิดขึ้นที่ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ การไหลของผงถ่านหินผ่านหัวเผา (Burner) เครื่องแยกสิ่งแปลกปลอมและอนุภาคต่างๆ เพราะการไหลที่เกิดเหล่านี้มีผลของแรงโคริโอลิส และแรงเหวี่ยงมาเกี่ยวข้อง และแบบจำลอง RSM สามารถใช้ในการทำนายการหมุนที่ขาดช่วง (Vortex Breakdown) ได้ดี กว่าแบบจำลอง High Reynolds Number  $k - \epsilon$  ซึ่งไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้

### Closure Remark

1. ระหว่างแบบจำลองการไหลความปั่นป่วนแบบ One Equation แบบจำลองของ Spalart Allmaras เป็นแบบจำลองที่เป็นที่นิยมสำหรับงานด้านอากาศยานศาสตร์
2. แบบจำลองการไหลความปั่นป่วนที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือแบบ  $k - \epsilon$  เป็นแบบจำลองที่อยู่ระหว่างประสิทธิภาพและความแม่นยำเป็นกลางๆ
3. แบบจำลองที่มีความซับซ้อนอยู่ในตัว คือ แบบจำลอง Three Equation  $k - \epsilon - \gamma$  เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการไหล ราบเรียบ-Transition-ปั่นป่วน แต่อย่างไรก็ตามก็มีแบบจำลองแบบ Four Equation  $k - \epsilon - V^2 - f$  สามารถใช้ได้กว้าง

RSM มีอยู่สามแบบ คือ Launder, Hanjalic (1994) และ Shima เหมาะสำหรับการไหลเฉพาแบบ

### การบินตามลักษณะทางภูมิประเทศ

กระแสลมลง หรือการไหลวนของกระแสอากาศที่อาจจะไม่เสี่ยงต่ออันตรายต่อการบิน โดยอาศัยลักษณะภูมิประเทศ ในพื้นที่ที่ไม่เป็นภูเขา หรือทำการบินในภูเขาที่ไม่ใช่การกีดขวางยุทธวิธี แต่อาจจะเป็นอันตรายต่อการบิน โดยอาศัยลักษณะภูมิประเทศ ในบริเวณภูเขาที่มีความสูงต่ำๆ จะต้องคาดหมายได้ถึงสภาพลม และพร้อมที่จะปฏิบัติการแก้ไขการควบคุมการเคลื่อนไหวจะต้องให้มีน้อยที่สุด แม้ว่าเครื่องวัดทำบินจะเป็นหลักในการอ้างอิงเพื่อรักษาท่าทางของอากาศยาน แต่ส่วนใหญ่ก็ต้องอาศัยการมองเห็นและใช้ความรู้สึก การปฏิบัติในกรณีฉุกเฉินจะต้องเป็นไป

โดยอัตโนมัติและปฏิบัติโดยปราศจากความลังเล เพื่อให้เกิดความเชี่ยวชาญในการปฏิบัติการบิน โดยอาศัยลักษณะภูมิประเทศในพื้นที่ที่เป็นภูเขา นักบินจะต้องรู้ถึงหลักการเบื้องต้นของการบิน โดยอาศัยลักษณะภูมิประเทศและนำไปใช้ในการบินในพื้นที่ที่เป็นภูเขา

### เทคนิคการบินตามเส้นทางบิน

ก่อนที่จะทำการวิ่งขึ้น ควรจะทำการลาดตระเวนอย่างละเอียด เลือกเส้นทางบินสำรอง การบินที่แท้จริงควรจะยืนยันกับที่วางแผนไว้เมื่อทำการบินจริงตามเส้นทางที่วางแผนไว้ หากพบว่าไม่อำนวยให้เกิดการปิดช่องร่นอย่างดีที่สุด อาวุธข้าศึกอาจจะติดพันได้ตามเส้นทางบิน หรือลักษณะภูมิประเทศ หรือสภาพอากาศจะทำให้ฝ่าอันตราย ผลก็จะต้องทำให้เปลี่ยนเส้นทางบิน โดยไม่คำนึงถึงเส้นทางที่จะทำการเคลื่อนที่ จะมีหลักการขั้นพื้นฐานที่แน่นอนที่จะต้องปฏิบัติ เพื่อให้รอดจากอันตราย หรือรอดจากอำนาจการทำลายของปืนอาวุธข้าศึก แบบของการบิน โดยอาศัยลักษณะภูมิประเทศที่สามารถจะทำการบินได้ จะขึ้นอยู่กับ การคุกคามและการกำบังจาก ลักษณะภูมิประเทศ ยิ่งกว่านั้นแบบของการบินโดยอาศัยลักษณะภูมิประเทศที่นำมาใช้ก็อาจจะต้อง มีการปรับปรุงเพื่อมิให้เสี่ยงอันตรายจากสภาพอุตุนิยมวิทยา และให้ถือเป็นกฎว่า การบินจะต้องให้ สูงเท่าอำนาจการคุกคามจะอำนวยให้ เพราะจะทำการบินในลักษณะภูมิประเทศที่เป็นภูเขานักบิน จะต้องทำการบินตามความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปและใช้เทคนิคการบินแบบต่างๆ สำหรับความมุ่งหมาย ในเรื่องนี้จะพิจารณาเฉพาะการบินแนบผิวพื้น การบินลัดเลาะ และการบินระดับต่ำ

### การบินแนบผิวพื้นและการบินลัดเลาะ

การบินแบบนี้จะนำมาใช้เมื่อบินเหนือภูมิประเทศที่ไม่คุ้นเคย ที่น่าจะถูกรวดตรวจพบโดยข้าศึก ความสูงในการบินทั่วไปจะตั้งแต่ระดับผิวพื้นจนถึง 50 ฟุต ต่อไปนี้เป็นข้อพิจารณาเกี่ยวกับ เส้นทางบิน

1. การบินโดยทั่วไป จะกระทำที่ส่วนที่ต่ำที่สุดของหุบเขา ซึ่งให้ความปกปิดกำบังและ ช่องร่น การไหลวนของกระแสอากาศอาจจะพบซึ่งขึ้นอยู่กับความกว้างของหุบเขาและอัตราเร็ว ของลมอากาศที่มีเสถียรภาพจะพบตามส่วนล่างของด้านที่ยกขึ้นของหุบเขา ดังนั้น ถ้าได้รับความปกปิดกำบังเพียงพอ เส้นทางบินจะวางแผนไปตามพื้นที่ลักษณะนี้

2. เมื่อพบกับกระแสมลง ใช้กำลังเครื่องยนต์สูงสุด รักษาความสูง จะขึ้นอยู่กับความรุนแรงของกระแสมลงและความเร็วของเฮลิคอปเตอร์ อาจจำเป็นต้องใช้ Cyclic มาข้างหลังเพื่อลดความเร็วอากาศไปข้างหน้าและให้ได้ความสูง ข้อควรระวังจะต้องปฏิบัติให้มั่นใจได้ว่าข้ามพ้นสิ่งกีดขวางสำหรับโรเตอร์หาง ถ้าหากการลดลงของระยะสูงไม่สามารถจะหยุดได้และปรากฏว่าจะลงสู่พื้น ทำการ Decelerated ให้อากาศยานมีความเร็วอากาศไปข้างหน้าน้อยที่สุด ณ จุดลงสัมผัสพื้น

3. หลีกเลี่ยงการบินใกล้ลักษณะภูมิประเทศที่เปลี่ยนแปลงมากๆ เพราะกระแสมลงอาจจะมีอยู่ในพื้นที่เหล่านี้ การเปลี่ยนเส้นทางก็ควรจะทำก่อนเข้าไปถึง ถ้าหากการบินต้องกระทำใกล้พื้นที่ที่ทราบว่าจะเกิดการไหลวนของกระแสอากาศ จะต้องลดความเร็วอากาศลงก่อนเข้าไปถึงบริเวณนั้น

4. หลีกเลี่ยงการบินข้ามปากทางหุบเขาที่อยู่ข้างเคียง เพราะการไหลวนของกระแสอากาศที่ปากทางทั้งสองแห่งจะผสมกัน ถ้าสามารถทำได้ ควรเปลี่ยนเส้นทางบินออกไปให้ไกลจากปากทางเข้าหุบเขาที่อยู่ข้างเคียง

5. เมื่อข้ามสันเขา บินตามเส้นทางบินที่จะช่วยให้ข้าม ณ จุดที่ต่ำที่สุดและเวลาเปิดเผยตัวน้อยที่สุด ก่อนถึงสันเขาเล็กน้อยปรับทิศทางหัวเครื่องให้หมุนข้ามสันเขา 45 องศา

6. เมื่อทำการไต่ขึ้นสู่ระยะสูงเพื่อข้ามสันเขา หรือจะเข้าไปสู่เขตส่งลง ทำการบินขนานกับด้านที่ยกขึ้นของลักษณะภูมิประเทศและให้เข้าไปใกล้ๆ เทาที่สภาพต่างๆ จะอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติลักษณะนี้จะช่วยให้ได้รับความเกื้อกูลจากกระแสมขึ้น และลดขีดความสามารถในการตรวจค้นของข้าศึก

7. สถานการณ์ที่ต้องการเพิ่มความสูงอย่างรวดเร็วจากหุบเขา ควรหลีกเลี่ยงการไต่ออกจากพื้นหุบเขาและควรวางแผนให้เริ่มทำการไต่ในเวลาที่จะเพียงพอให้สามารถข้ามพ้นลักษณะภูมิประเทศและสิ่งกีดขวาง

8. หลีกเลี่ยงการเลี้ยวปีกเล็ก (มุมเอียงเกิน 30 องศา) ที่ความสูงต่ำๆ การลดความเร็วอากาศอาจจำเป็นเพื่อให้สามารถทำการเลี้ยวได้ภายในบริเวณที่ว่างที่มี และต้องใช้ความระมัดระวังอย่างที่สุด ถ้าเป็นการเลี้ยวตามลมและลดความเร็วอากาศลงต่ำกว่า Effective Translational Lift

9. เมื่อเข้าสู่ลักษณะภูมิประเทศที่ต่ำลงอย่างรวดเร็ว ทางลาดด้านตรงกันข้ามจะต้องคาดหมายถึงสภาพลักษณะนี้และลดความเร็วอากาศลงก่อนข้าม เทคนิคการบินนี้จะช่วยให้การบินไปตามลักษณะภูมิประเทศระยะลง ไม่เกิดการตัดกับแนวขอบฟ้า

10. ถ้าหากหุบเขาแคบมาก อาจจำเป็นต้องหยุด และทำการเลี้ยวด้วยกระเดื่องเท้า ถ้ากำลังเครื่องยนต์ไม่เพียงพอห้ามใช้วิธีนี้ ใช้ Cyclic กับกระเดื่องเท้าในการเลี้ยวขณะที่มีความเร็วไปข้างหน้า

### การบินระดับต่ำ

การบินระดับต่ำเป็นการบินโดยอาศัยลักษณะภูมิประเทศที่อำนวยให้เกิดการกำบังจากการตรวจค้นด้วยเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์และคาดว่าจะไม่มีการติดพันด้วยขีปนาวุธประทับบ่ายิง เทคนิคการบินระดับต่ำตามเส้นทางบิน จะพิจารณาใช้ความสูง 50 ฟุตเหนือภูมิประเทศ แต่ต่ำกว่า 200 ฟุตเหนือภูมิประเทศ เทคนิคต่างๆ ในการบินในเส้นทางบินที่กล่าวมาแล้วในการบินแนบผิวพื้น และการบินลัดเลาะ จะนำมาใช้ในการบินระดับต่ำ ข้อพิจารณาเกี่ยวกับเส้นทางบินที่จะใช้เฉพาะการบินระดับต่ำ จะมีดังต่อไปนี้

1. เมื่อทำการบินในหุบเขา แนวบินในหุบเขา แนวบินควรจะให้ใกล้ด้านที่ยกขึ้นให้มากที่สุดเท่าที่สภาพต่างๆ จะอำนวยให้จากการบินทางด้านเดียวของหุบเขา จะมีที่ว่างมากพอสำหรับการเลี้ยว จะพบกับการไหลวนของอากาศร้อน และใช้ผลกระแสลมขึ้นได้มากที่สุดตลอดจนเข้าศึกจะตรวจพบได้ยาก

2. เมื่อประสบกับกระแสลมลง รักษาหรือเพิ่มความเร็วอากาศขึ้นเล็กน้อยเพื่อให้พื้นกระแสลมลงโดยเร็วที่สุดเท่าที่จะเร็วได้ ต้องเพิ่ม Torque ให้เพียงพอที่จะลดความสูง หลังจากพบกระแสลมลงแล้ว เพิ่มกำลังเครื่องยนต์ตามความต้องการเพื่อไต่กลับไปสู่ความสูงที่ต้องการในเส้นทางบิน

3. ข้ามแนวสันเขาตรงที่คาดว่าจะมีการไหลวนของอากาศน้อยที่สุด และด้วยความสูงต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ ก่อนถึงสันเขาเล็กน้อยปรับทิศทางหัวเครื่องให้ข้ามมุมกับแนวสันเขา 45 องศา

#### 4. หลีกเลี่ยงการเลี้ยวเหนือภูมิประเทศที่ต้องเพิ่มความสูงในขณะเลี้ยว

5. เมื่อปฏิบัติการหลายเครื่อง ปกติจะใช้รูปแบบ Staggered Trail และต้องการระยะต่อระยะเคียงน้อยกว่าการบินแบบผิวพื้นและการบินลัดเลาะ แต่ลูกหมู่จะต้องมีเสรีในการปฏิบัติการบิน และควรหลีกเลี่ยงการบินตามแนวเดียวกับอากาศยานเครื่องนำ

#### ข้อพิจารณาเกี่ยวกับสภาพลมในเส้นทาง

ควรจะทำทุกวิถีทางเพื่อให้ทราบสภาพลมทั้งก่อนวิ่งขึ้นและขณะบินในเส้นทางบิน การพยากรณ์อากาศจะให้ข่าวสารต่างๆ ไป แต่จะไม่มีข่าวสารเกี่ยวกับพื้นที่ระบุเฉพาะ ในพื้นที่ที่มีการติดต่อสื่อสารทางพื้นดิน ติดต่อกับหน่วยต่างๆ ในพื้นที่ปฏิบัติการทำการติดต่อเพื่อให้ทราบสภาพลม นักบินที่ทำการบินในพื้นที่แล้วกลับมาจะใช้ข่าวสารเกี่ยวกับสภาพลมที่มีค่า อย่างไรก็ตามแหล่งข่าวเกี่ยวกับสภาพลมเหล่านี้อาจไม่มีสม่าเสมอ เพราะฉะนั้นนักบินจะต้องเรียนรู้การประมาณทิศทางและความเร็วลมด้วยการตรวจดูด้วยสายตา การประมาณจะแบ่งออกได้เป็นสองประการ

1. สิ่งชี้บอกบนพื้นดิน เมื่อใช้สิ่งชี้บอกบนพื้นดินพิจารณาสภาพลม ควรจำไว้ว่าลมผิวพื้นจะระบุเฉพาะบริเวณเท่านั้น ลักษณะของสภาพลมที่ห่างออกไปในระยะไกลๆ ก็อาจจะแตกต่างออกไป

1.1 ผิวน้ำทางด้านต้นลมจะราบเรียบ ส่วนทางด้านใดลมจะพลีวเป็นระลอกความเร็วลมจะสังเกตได้จากการไหลวนของผิวน้ำ ถ้าระลอกน้ำแตกเป็นฟอง ความเร็วลมจะมีค่าถึง 20 ไมล์/ชั่วโมง

1.2 ควันจะบอกทิศทางลมได้แน่นอนมาก ส่วนความเร็วลมจะสังเกตได้จากแบบรูปแบบของควันบนพื้นดิน ในลมอ่อนควันจะยกตัวขึ้นทางดิ่งและเคลื่อนที่ไปทางระดับน้อย ในลมแรงควันจะกระจายไปทางระดับและมีการเคลื่อนที่ในทางดิ่งน้อย

1.3 ชงหรือวัสดุใดๆ ที่ปลิวสะบัดได้ จะบอกได้ทั้งทิศทางและความเร็วลม

1.4 ลีของใบไม้ดันไม่ผลัดใบ จะบอกทิศทางลม ถ้าลีของใบไม้อ่อนแสดงว่ากำลังบินตามลม ถ้าลีของใบไม้แข็งก็แสดงว่ากำลังบินทวนลม

1.5 ลมที่พัดผ่านต้นหญ้าสูงในที่โล่งจะเห็นเป็นระลอก ทิศทางลมจะทราบได้จากการเคลื่อนที่ขึ้นขึ้น ถ้าเป็นระลอกถี่ลมจะแรง

1.6 สิ่งที่สูงขึ้น เช่น กระบอกทางลมหรือระเบิดควันจะบอกทิศทางและความเร็วลมได้

2. การบอกจากอากาศยาน จะต้องใช้ความชำนาญมากโดยสังเกตจากความรู้ในการบิน เฮลิคอปเตอร์ และการเคลื่อนที่ที่ปรากฏเหนือพื้นดิน ความเร็วลมและทิศทางจะพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

2.1 การเชออกจากเส้นทางของอากาศยาน ปริมาณและทิศทางในการบินด้านลมที่ต้องการจะแสดงให้ทราบถึงทิศทางและความเร็วลม

2.2 ความเร็วที่ปรากฏบนพื้นดินกับความเร็วอากาศยานจะแสดงทิศทางลม

### ข้อพิจารณาทั่วไป

1. ในระหว่างการฝึกบินขึ้นต้นในพื้นที่ที่เป็นภูเขา นักบินจะได้รับการฝึกให้ใช้มุม Approach ธรรมดา ทั้งนี้ จะขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศตามธรรมชาติและการม้วนของกระแสอากาศ การ Approach ด้วยวิธีดังกล่าว จะกระทำจากระยะที่สูงกว่าเขตส่งลงซึ่งจะนำไปสู่การถูกข้าศึกตรวจพบ แต่สงครามในอนาคตนักบินจะต้องให้อากาศยานเปิดเผยตัวน้อยที่สุด การเข้ามาลงจึงต้องเป็นแบบ Terrain Approach ซึ่งโดยทั่วไปจะเริ่ม ณ จุดที่ต่ำกว่าเขตส่งลงทำให้รู้สึกรู้สีกว่าจะเป็นอันตรายมากเนื่องจากสภาพลมหรือจะต้องการกำลังเครื่องยนต์มาก แต่เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างความปลอดภัยในการบินและการคุกคามของข้าศึกแล้วจะเห็นว่าอะไรมีอันตรายมากที่สุด เพราะฉะนั้นจากการใช้ Performance Chart นักบินสามารถจะทราบได้ว่า Torque สูงสุดมีเท่าใดก่อนจะทำการวิ่งขึ้น ความปลอดภัยในการบินจึงมีมาก

2. การปฏิบัติอื่นๆ ที่มีใช้การปฏิบัติการทางยุทธวิธี ซึ่งไม่สามารถจะนำมาปฏิบัติได้ในสภาพแวดล้อมทางยุทธวิธี คือ การลาดตระเวนเขตส่งลง การปฏิบัติการณ์จะถูกข้าศึกตรวจพบ การตรงเข้ามาลงจากจุดตามเส้นทางบินจะทำให้การป้องกันอย่างสูงสุดจากการค้นพบจากข้าศึก ซึ่งควรจะนำมาใช้เมื่อสภาพลมอำนวยให้ ถ้าหากมีการมวนวนของอากาศและกระแสลมแรงบริเวณใกล้เขตส่งลงและการมวนวน เมื่อทำเช่นนี้พยายามหลีกเลี่ยงอย่าให้อากาศยานปรากฏตัวตัดกับขอบฟ้าและให้ห่างออกไปจากเขตส่งลงแล้วจึงเลี้ยวกลับมาในอีกทางหนึ่งที่จะไม่ทำให้เปิดเผยที่ตั้งของเขตส่งลง

### เทคนิคในการเข้ามาลง

เมื่อทำการบินที่ความสูงของการบินโดยอาศัยลักษณะภูมิประเทศ การเข้ามาลงโดยทั่วไปจะเริ่มจากความสูงที่ต่ำกว่าจุดลงสัมผัสพื้น เทคนิคการเข้ามาลงสำหรับแต่ละแบบของการบินโดยอาศัยลักษณะภูมิประเทศ จะเป็นดังต่อไปนี้

1. การเข้ามาลงในการบินแบบผิวพื้นและการบินลัดเลาะ การเข้ามาลงลักษณะนี้จะเข้ามาลงมากที่สุดและเสี่ยงต่ออันตรายในการการบินเป็นเวลานานที่สุด ก่อนที่จะพยายามทำการเข้ามาลงแบบนี้นักบินจะต้องทราบว่ากำลังเครื่องยนต์มีเพียงพอที่จะทำการลง ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ การเดินอากาศต้องการเข้ามาลงโดยอาศัยลักษณะภูมิประเทศจะเริ่มจากกันหุบเขาและจุดสุดท้ายอยู่บนแนวสันเขา เพื่อให้การไต่เริ่มได้ทันเวลา และ Decelerated ได้ ณ เวลาที่ต้องการ จำเป็นต้องทำการเดินอากาศอย่างประณีตเมื่อทำการเข้ามาลงจะเหมือนกับคราวที่แล้ว เทคนิคในการเข้ามาลงจากการบินแบบผิวพื้นและการบินลัดเลาะ

1.1 พื้นที่ที่มาถึงจุดที่เลือกขึ้น ให้เริ่มทำการเข้ามาลง ในขั้นนี้จะประกอบด้วย การเลี้ยวไปทางทิศทางหัวเครื่องที่พิจารณาไว้ ลดความเร็วอากาศหรือเริ่มไต่หรือร่อน พิจารณากระแสลมลงและการมวนวนของอากาศที่จะพบเพื่อเลือกที่จะตรงเข้ามาลงหรือบินต่ำผ่านเหนือเขตส่งลงที่ต้องการไปก่อน ถ้าหากว่าต้องการไต่ควรจะเริ่มให้มีเวลาพอ สำหรับอัตราไต่สูงสุด 1,000 ฟุต/นาที และความเร็วอากาศต่ำสุด 40 นอต จะช่วยให้ทำการไต่ไปถึงตำแหน่งที่ต้องการตามเส้นทางเข้ามาลงโดยไม่ทำให้สภาพการบินเครียดมากเกินไป

1.2 ขณะที่เข้ามาลงในเขตส่งลง เลือกจุดๆ หนึ่งในแนวการเข้ามาลงที่ใกล้ Landing zone ประมาณ 100 เมตร จุดนี้จะเป็นจุดตกลงใจขั้นแรก สำหรับการเข้ามาลงโดยอาศัยลักษณะภูมิประเทศ ควรจะอยู่เหนือลักษณะภูมิประเทศที่สูงที่สุด ประมาณ 50 ฟุต ในแนวเข้ามาลง และที่ความเร็วอากาศในการเข้ามาลงที่ต้องการ เมื่อถึงจุดตกลงใจ ให้ตกลงใจว่าจะทำการเข้ามาลงต่อไปหรือทำการไปใหม่ตามปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณา ดังต่อไปนี้

- ทิศทางและความเร็วลมปลอดภัยที่จะทำการลงหรือไม่
- Torque ที่มีเพียงพอหรือไม่ ในการเข้ามาลงต่อไป
- จะพบกระแสลมลงที่ทำให้อากาศยานเสียระยะสูงสุดหรือไม่

1.3 ถ้าหากการเข้ามาลงต้องยกเลิก เนื่องจากปัจจัยในข้อหนึ่งข้างต้น ต้องทำการไปใหม่ทันที จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่ต้องการไปใหม่ นักบินจะต้องตกลงใจว่าควรจะทำกรเข้ามาลงได้อีกหรือไม่

1.4 ขณะที่บินผ่านจุดตกลงใจ ทำการ Decelerated ต่อไปจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการถ่ายแรงยก เพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายจากโรเตอร์หางกระแทก ควรจะปฏิบัติเหมือนกับการทำ Non Quick stop เมื่อใกล้ด้านหน้าของ Landing Zone ความเร็วไปข้างหน้าควรจะลดลงถึงขนาดคนเดินอย่างรวดเร็วและกำลังเครื่องยนต์สูงสุดจะต้องการ ณ จุดนี้ในการเข้ามาลง ถ้าหากเกิดการ Lose of rotor RPM. มันก็จะเกิดขึ้นที่จุดนี้ของการเข้ามาลง นี่ก็จุดตกลงใจจุดสุดท้าย นักบินจะต้องตกลงใจถ้าจะทำการเข้ามาลงต่อไป ถ้าหากจะทำการเข้ามาลงต่อไปถึงพื้นใช้ Cyclic ไปข้างหน้า และลด Collective ตามความจำเป็นเพื่อรักษามุมร่อนที่ถูกต้อง ถ้าหากต้องทำการลง OGE เพิ่ม Torque ขึ้นตามความจำเป็น ใช้ Cyclic ไปข้างหน้าเพื่อให้อากาศยานเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ขณะที่อากาศยานเคลื่อนที่ไปเหนือ Landing Zone และไม่มีสิ่งกีดขวาง เริ่มลดระยะสูงลงสัมผัสพื้นบนจุดลงสัมผัสพื้นที่ต้องการ ถ้าหากอากาศยานไม่สามารถทำการลงได้ เนื่องจากภูมิประเทศไม่สม่ำเสมอ หรือมีสิ่งกีดขวางอยู่ใน Landing Zone ปรับตำแหน่งของอากาศยานใน Landing Zone ใหม่ หรือทำการเลิกระบทุกขณะทำการบินลอยตัว

1.5 เมื่อปฏิบัติการเข้ามาลงตามวิธีที่กล่าวมาแล้วข้างต้นที่ระดับความสูงและน้ำหนักรวมสูงการควบคุม Anti torque อาจจะไม่เพียงพอในการรักษาทิศทางหัวเครื่องที่ต้องการ ถ้าขณะใดก็ตามเกิดการการสูญเสียการควบคุมทิศทางหัวเครื่องอย่างมีผล พยายามให้ความเร็วอากาศหรือทำ

การลงพื้นโดยทันที เมื่อพยายามให้ได้ความเร็วอากาศ อย่าพยายามเพิ่มกำลังเครื่องยนต์เพื่อไต่ขึ้น ถ้าสามารถทำได้เลี้ยวออกไปจากภูเขาและเพิ่มความเร็วอากาศขณะที่ความสูงลดลง

2. การเข้ามาลงในการบินระดับต่ำ เทคนิคการบินระดับต่ำจะใช้เทคนิคประกอบกับทั้ง การเข้ามาลงแบบการบินแนบผิวพื้นและการบินลัดเลาะ และการเข้ามาลงที่ไม่ใช่การเข้ามาลงทาง ยุทธวิธี ปกติการเข้ามาลงจะเริ่มจากความสูงกว่าจุดลงสัมผัสพื้น แต่อย่างไรก็ตามในขาสุดท้ายของ การเข้ามาลงจะเริ่มจากความสูงเหนือจุดลงสัมผัสพื้น (100 ถึง 200 ฟุต AGL) การเข้ามาลงในการบิน ระดับต่ำ เป็นดังต่อไปนี้

2.1 ในระหว่างการวางแผนก่อนการบิน จุดเริ่มต้น (IP) ควรจะกำหนดให้อยู่ในที่ที่ การเข้ามาลงจะเริ่มขึ้น เมื่ออยู่เหนือ IP การเปลี่ยนความเร็วอากาศ ทิศทางหัวเครื่อง หรือความสูง อาจจะเป็นอันตรายได้และความเร็วอากาศต่ำสุดไม่ควรจะเกินที่จำกัดไว้ในการเข้ามาลงแนบผิวพื้น และการบินลัดเลาะ ขณะที่มาลงยัง Landing Zone สภาพลม (การมวสวนและกระแสลม) จะต้อง ประเมินค่าเพื่อพิจารณาถ้าต้องบินผ่านระยะต่ำ การปฏิบัติในการบินต่ำและการทำการลง จะเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วในการลงแนบผิวพื้นและการบินลัดเลาะ

2.2 ขณะที่เข้าใกล้ Landing Zone เลือกจุดอ้างอิงตามแนว Approach ประมาณ 400 เมตร จาก Landing Zone เมื่อผ่านเหนือจุดอ้างอิง ควรจะได้ความสูงในการเข้ามาลง และความเร็ว อากาศที่ต้องการ (ประมาณ 60 นอต สำหรับ สท. 1) ทันทีที่สกดมุมในการเข้ามาลงตื้นๆ เริ่มร่อนลง และ Decelerated ส่วนการ Approach ต่อไปในส่วนที่เหลือจะปฏิบัติเช่นเดียวกับการเข้ามาลง ที่มีใช้ทางยุทธวิธี

### การวิ่งขึ้น

เนื่องจากภูมิประเทศจะลาดลงอย่างรวดเร็วมาก รอบๆ Landing Zone บนภูเขา การให้ ความเร็วอากาศจะมีความสำคัญยิ่งกว่าการไต่ความสูงหลังจากวิ่งขึ้น เรียกว่า “Airspeed Over Altitude Take-off” ปัจจัยในการวางแผนและเทคนิคการบินในการปฏิบัติการในพื้นที่ที่เป็นภูเขา จะมีดังต่อไปนี้

1. ประเมินค่าสภาพลมและธรรมชาติของภูมิประเทศเพื่อพิจารณาทิศทางการวิ่งขึ้น ทิศทางวิ่งขึ้นควรจะเป็นทิศทางทวนลม และไปเหนือสิ่งกีดขวางที่ต่ำที่สุดและเหนือภูมิประเทศที่เป็นจุดต่ำ

2. ก่อนทำการวิ่งขึ้นการตรวจ Hover Torque โดยทำการบินลอยตัวสูง 5 ฟุต Torque ที่ต้องการในการบินลอยตัวที่ความสูง 5 ฟุต เท่ากับเกณฑ์จำกัดหรือต่ำกว่าสำหรับเขตส่งลงอันนั้น การวิ่งขึ้น OGE ก็สามารถทำได้อย่างปลอดภัย

3. การวิ่งขึ้นบนภูเขา จะเริ่มจากพื้นดินทันทีที่ลอยตัวขึ้น ใช้ Torque สูงสุดและเร่งไปข้างหน้า ขณะที่ความสูงพอที่จะข้ามพื้นสิ่งกีดขวางตามแนวทางวิ่งขึ้น ถ้าหากการบินแนบผิวพื้น และการบินลัดเลาะจะต้องกระทำหลังจากพื้น Landing Zone แล้ว ลดระยะสูงไปตามภูมิประเทศ และให้ได้ความเร็วอากาศตามต้องการ ถ้าหากเป็นการบินระดับต่ำ หลังจากได้ความเร็วพอไต่โรเตอร์แล้ว ปรับท่าบินและเริ่มไต่หาความสูงที่ต้องการ

### กระแสน้ำอากาศปั่นป่วนกับการบินทหารบก

กระแสน้ำอากาศปั่นป่วนในบรรยากาศ เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศอย่างทันทีทันใด ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสน้ำอากาศอย่างรุนแรง และไม่เป็นไปตามปกติ มีผลต่ออากาศยาน คือ มีการโยนไปมาเบาๆ ไปถึงการกระเทือนอย่างรุนแรง จนทำให้โครงสร้างของอากาศยานชำรุดเสียหายได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงชนิดต่างๆ ของสภาพอากาศปั่นป่วน และสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาพอากาศชนิดนี้ เพื่อหลีกเลี่ยงหรือลดอันตรายจากสภาพอากาศชนิดนี้ให้น้อยที่สุด เมื่อเข้าไปอยู่ในสภาพอากาศชนิดนี้แล้ว ความยุ่งยากหรืออันตรายที่จะเกิดขึ้นย่อมจะมีอย่างแน่นอน โดยทั่วไปแล้วอากาศปั่นป่วนสามารถอธิบายได้จากสาเหตุการเกิด และชั้นแห่งความรุนแรง หน่วยบริการข่าวอากาศ กองทัพอากาศสหรัฐ (Air weather service) ได้รวบรวมชั้นของความรุนแรงของอากาศปั่นป่วนได้ 4 ชั้น คือ

1. ชั้นเบา (Light)
2. ชั้นปานกลาง (Moderate)
3. ชั้นรุนแรง (Severe)
4. ชั้นรุนแรงมาก (Extreme)

### กระแสน้ำอากาศปั่นป่วนขั้นเบา

จะเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ซบซบ เช่น ตึกกรามบ้านช่องหรือเนินเขาเตี้ยๆ เมื่อมีลมพัดผ่านด้วยความเร็วต่ำกว่า 25 นอตและมักพบในกลุ่มเมฆ Cu ขนาดเล็กๆ ในระดับที่ต่ำ ในวันที่อากาศร้อนหรือในเวลากลางวันเหนือผิวน้ำที่อุ่นๆ

### กระแสน้ำอากาศปั่นป่วนขั้นปานกลาง

จะเกิดขึ้นเมื่อมีลมพัดตั้งฉากกับสันเขาด้วยความเร็ว 20-50 นอต หรือมากกว่า และจะเกิดขึ้นตั้งแต่ผิวพื้นไปจนถึงระดับ 10,000 ฟุต เหนือระดับโทรโปพอสและแผ่ยาวออกไปถึง 300 ไมล์ทางด้านหลังเขา หรืออาจพบในกลุ่มเมฆ Ci หรือเมื่อมีลมผิวพื้นเกิน 25 นอต

### กระแสน้ำอากาศปั่นป่วนขั้นรุนแรง

จะเกิดขึ้นเมื่อมีลมพัดตั้งฉากกับสันเขาด้วยความเร็ว 25-50 นอต หรือมากกว่า เกิดตั้งแต่ผิวพื้น จนถึงบรรยากาศชั้นโทรโปพอส และมีความยาวออกไปทางด้านหลังเขา 150 ไมล์ หรืออาจพบในกลุ่มเมฆ Ci นอกจากนี้ยังพบในบริเวณที่เกิด Thunderstorms, Jet stream, Towing cumulus

### กระแสน้ำอากาศปั่นป่วนขั้นรุนแรงที่สุด

จะเกิดขึ้นเมื่อมีลมพัดตั้งฉากกับสันเขาด้วยความเร็ว 50 นอต หรือมากกว่า จะเกิดขึ้นใกล้ๆ กับผิวพื้นทางด้านหลังเขาหรืออยู่ใกล้ๆ กับเมฆม้วนตัว ถ้าความเร็วลมเพียง 50 นอต จะเกิดกระแสน้ำอากาศปั่นป่วนที่ระดับต่ำบริเวณด้านหลังภูเขาเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบในบริเวณที่เกิด Thunderstorms ขณะที่เกิดลูกเห็บ, ฝนตกหนัก รวมถึงการเกิด windshear อย่างรุนแรง

สาเหตุที่ทำให้เกิดกระแสน้ำอากาศปั่นป่วน สามารถแยกออกได้ 4 อย่าง คือ

1. เนื่องจากความร้อน (Thermal causes)
2. เนื่องจากลักษณะผิวพื้น (Mechanical causes)

3. เนื่องจากแนวปะทะ (Frontal causes)
4. Wind shear (Wind shear causes)

### สาเหตุเนื่องจากความร้อน (Thermal cause)

กระแสอากาศปั่นป่วนเกิดจากการยกตัวขึ้นของอากาศในทางดิ่ง ซึ่งเรียกว่ากระแสอากาศไหลขึ้นในทางดิ่งเนื่องจากความร้อน (Convective current) มักเกิดขึ้น เนื่องจากอากาศสัมผัสกับผิวพื้นที่อุ่นกว่า อากาศดังกล่าวมักจะเกิดอากาศที่เคลื่อนที่ทางระดับ (Advection) ไปยังพื้นที่อุ่นกว่า หรือพื้นดินที่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ความรุนแรงของกระแสอากาศไหลขึ้นในทางดิ่งเนื่องจากความร้อนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผิวพื้น เช่น พื้นที่ที่เป็นทราย เป็นหิน หรือทุ่งนาที่ทำการไถแล้ว เหล่านี้มักจะร้อนเร็วกว่าพื้นน้ำ ทุ่งหญ้าหรือพื้นที่ที่มีพืชผักปกคลุม ดังนั้น พื้นที่ที่โล่งเตียนไม่มีหญ้าจึงเกิดกระแสอากาศไหลขึ้นในทางดิ่งเนื่องจากความร้อนมากกว่า นักบินควรระวังโดยอัตโนมัติถึงเรื่องนี้ทันที ซึ่งมักจะสังเกตได้จากเมฆ CU และ CB ถ้าหากอากาศนั้นแห้งแล้งและไม่มีเมฆดังกล่าว กระแสอากาศไหลขึ้นในทางดิ่งเนื่องจากความร้อนมักจะมีน้อย แต่บนพื้นน้ำในเวลากลางวันจะมีมากกว่าเพราะพื้นน้ำอุ่นกว่าอากาศที่อยู่เหนือผิวน้ำ

อีกประการหนึ่งที่ทำให้เกิดกระแสอากาศไหลขึ้นในทางดิ่ง เนื่องจากความร้อน คือ ในตอนเปลี่ยนฤดูเข้าสู่ฤดูหนาว พื้นดินยังคงมีความร้อนอยู่ เมื่ออากาศที่เย็นกว่าจากขั้วโลกไหลเข้ามาทับจึงเป็นเหตุ ทำให้เกิดลักษณะกระแสอากาศไหลขึ้นทางดิ่ง (Convective activity) การบินในอากาศลักษณะนี้จะไม่ราบเรียบ

สำหรับการบินเพื่อหลีกเลี่ยงอากาศชนิดนี้ต้องบินเหนือระดับที่มีกระแสอากาศไหลขึ้นทางดิ่ง เนื่องจากความร้อนจะเคลื่อนตัวขึ้นไปถึง ซึ่งสังเกตได้จากยอดเมฆก้อนที่เกิดในบริเวณนั้น และทำการบินเหนือเมฆก้อนนั้น ซึ่งจะพบกับการบินที่ราบเรียบ

### สาเหตุเนื่องจากลักษณะของผิวพื้น (Mechanical Causes)

เมื่ออากาศใกล้ๆ กับผิวพื้นโลกไหลผ่านสิ่งกีดขวาง เป็นต้นว่าภูเขาหรือสิ่งก่อสร้างทั้งหลาย ทำให้การไหลของอากาศถูกรบกวนจึงไหลไปไม่ได้ตามปกติ ถ้าตามบริเวณนั้นมีสิ่งก่อสร้างใหญ่มากจะยิ่งเป็นเหตุให้เกิดการปั่นป่วนของกระแสอากาศได้ยิ่งขึ้น ความรุนแรงที่เกิดขึ้นอยู่กับ

ความเร็วลม ความขรุขระของผิวพื้นและการทรงตัวของอากาศ การทรงตัวของอากาศจะเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการกำหนดความรุนแรงของการปั่นป่วนของกระแสอากาศชนิดนี้ การปั่นป่วนของกระแสอากาศ เนื่องจากลักษณะของผิวพื้นมีความสำคัญเพียงเล็กน้อย ถ้าหากความเร็วลมอ่อนๆ จะเกิดขึ้นสูงประมาณ 200-300 ฟุตเหนือผิวพื้นเท่านั้น เมื่อความเร็วลมมากขึ้นและยิ่งกีดขวางสูงขึ้นการปั่นป่วนของกระแสอากาศชนิดนี้ก็จะรุนแรงและขยายตัวสูงขึ้นด้วย

คลื่นภูเขา (Mountain Wave) เมื่อมีกระแสลมแรงพัดเกือบตั้งฉากกับเทือกเขามักจะทำให้กระแสลมพัดปัดขึ้น ถึงแม้ว่าภูเขานั้นจะเป็นเนินเตี้ยแต่การปั่นป่วนของกระแสอากาศจะแผ่ขยายสูงขึ้นไป เมื่ออากาศเคลื่อนที่ขึ้นตามลาดเขา ถ้าหากอากาศนั้นมีการทรงตัวดีก็จะเกิดลักษณะเป็นคลื่นขึ้นทางด้านอับลม (Lee side) เพราะขณะที่อากาศไหลผ่านสันเขาการไหลของอากาศขึ้นลง ลับสนและหรือด้านอับลม (มีกระแสอากาศบางส่วนไหลลงตามลาดเขาทางด้านอับลมและบางส่วนก็จะไหลขึ้นสู่เบื้องบน ในเวลาต่อมาลักษณะการไหลเช่นนี้ มีรูปร่างคล้ายคลื่นที่ต่อเนื่องกันไปทางด้านหลังเขา หรือด้านอับลมที่ตรงข้ามกับด้านรับลม (Windward side) แต่ความรุนแรงจะสูงที่คลื่นหัวแรกและลดน้อยลงไปตามลำดับ คลื่นของกระแสอากาศชนิดนี้เรียกว่า คลื่นภูเขา (Mountain wave) หรือคลื่นประจำที่ หรือคลื่นจากภูมิประเทศ (Orographic wave) หรือคลื่นหลังเขา (Lee wave) ซึ่งมีระยะทางยาวออกไปถึง 20 ไมล์

ภาวะที่ทำให้เกิดคลื่นภูเขา ดังที่ทราบแล้วว่าคลื่นภูเขา เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติอย่างหนึ่งที่มีสภาพอากาศรุนแรงในบริเวณที่เกิด และส่วนมากจะเกิดในพื้นที่ภูมิประเทศที่เป็นภูเขาเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น จึงควรทำความเข้าใจศึกษาถึงลักษณะการเกิดและข้อสังเกต ตลอดจนการปฏิบัติการบินเมื่อผ่านเข้าไปในบริเวณดังกล่าวเพื่อลดอุบัติเหตุที่จะเกิดกับอากาศยาน มีผู้ทำการค้นคว้าเกี่ยวกับการเกิดคลื่นภูเขาหลายคนด้วยกัน ซึ่งจากผลการค้นคว้านั้นสามารถสรุปภาวะที่ทำให้เกิดคลื่นภูเขาได้ดังนี้

1. ลักษณะภูมิประเทศ ภูมิประเทศที่ทำให้เกิดคลื่นภูเขาได้ คือ ภูมิประเทศที่เป็นภูเขา ความสูงของคลื่นภูเขา (Amplitude) ขึ้นอยู่กับขนาดและความสูงของสันเขา กล่าวคือ ถ้าสันเขาสูงและมีความกว้างมาก ความสูงของคลื่นก็จะมากตามไปด้วย
2. การทรงตัวของบรรยากาศ เมื่อกระแสอากาศไหลผ่านสันเขา จะทำให้อากาศถูกยกตัวขึ้นตามภูเขา ถ้าอากาศมีการทรงตัวไม่ดี อากาศที่ยกตัวขึ้นนั้นก็จะลอยตัวต่อไปโดยอิสระ

ลักษณะของคลื่นจึงไม่เกิดขึ้น แต่ถ้าอากาศมีการทรงตัวดี อากาศที่ถูกยกตัวขึ้นก็จะไหลลงมายังระดับเดิมจึงทำให้เกิดคลื่นขึ้น การที่จะบอกว่าขณะนั้นมีการทรงตัวเป็นอย่างไร สังเกตได้จากการตรวจอากาศชั้นบน ซึ่งจะมีระดับของอากาศที่มีอุณหภูมิอมตัวดี คลื่นภูเขาที่เกิดขึ้น

3. ทิศทางลม นอกจากการทรงตัวของอากาศเป็นปัจจัยอันหนึ่งที่ทำให้เกิดคลื่นภูเขาแล้วยังมีทิศทางลมที่พัดเข้าไปปะทะสันเขาอีก ได้มีผู้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับคลื่นภูเขาจากนักบิน เครื่องร่อน และสังเกตจากเมฆ ควัน และนกชนิดต่างๆ พบว่าแม้ว่าอากาศขณะนั้นจะมีการทรงตัวดี แต่คลื่นภูเขาก็ไม่เกิดขึ้น นอกจากทิศทางลมพัดตั้งฉากกับสันเขา และทิศทางลมจะไม่เปลี่ยนแปลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามความสูงที่เพิ่มขึ้น และมีผู้สนับสนุนความคิดนี้หลายคนด้วยกัน และได้ให้แนวคิดเพิ่มเติมอีกว่า แม้ทิศทางลมจะไม่พัดตั้งฉากกับสันเขาก็ตาม แต่ถ้ามีทิศทาง  $30^{\circ}$  กับแนวตั้งฉากกับก็สามารถเกิดคลื่นภูเขาได้

4. ความเร็วลม ความเร็วลมเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดคลื่นภูเขาได้ พบว่าความเร็วลมที่ระดับสูง 600 เมตร อย่างน้อยต้อง 15 นอตขึ้นไป จึงจะเกิดคลื่นภูเขา ลาร์สัน (Larson) พบว่า ลมเหนือระดับแรงเสียดทาน (ประมาณ 100 เมตร) มีความเร็วอย่างน้อย 20 นอต จึงจะเกิดคลื่นได้ ในลักษณะเดียวกัน Kuttner and Jenkins กล่าวว่า ความเร็วลมจะต้องมากกว่า 25 นอตขึ้นไปที่ยอดภูเขา จึงจะทำให้เกิดคลื่นได้ จากการที่มีผู้ให้แนวคิดหลายคนด้วยกัน และผลที่สุดสรุปออกมาได้ว่าความเร็วลมที่จะทำให้เกิดคลื่นภูเขาได้นั้น ความเร็วลมจะต้องเพิ่มขึ้นหรืออย่างน้อยต้องคงที่ตามความสูงที่เพิ่มขึ้น ตั้งแต่ระดับยอดเขาไปจนถึงระดับสูงของบรรยากาศ ชั้นโทรโปสเฟีย

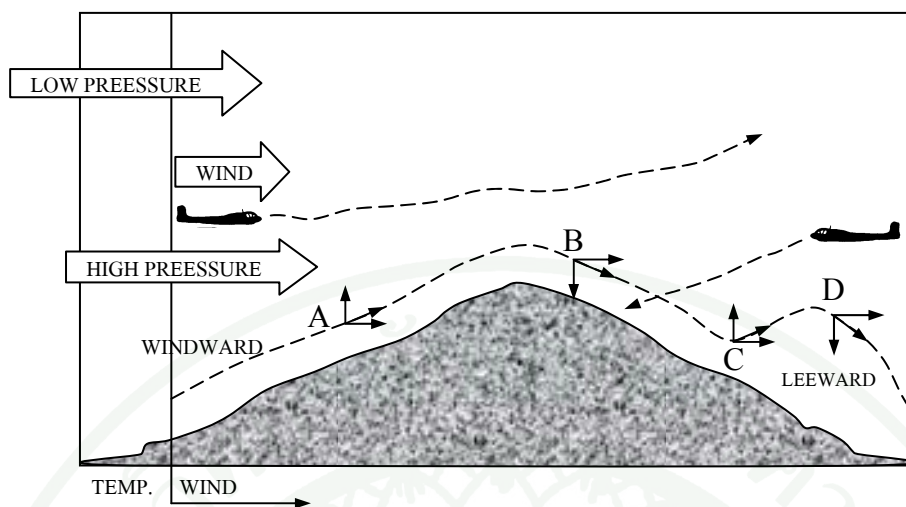
### แนวความคิดในการเกิดคลื่นภูเขา

เมื่อกระแสอากาศไหลไปปะทะกับภูเขา อากาศจะถูกกั้นไม่ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดิมได้ อากาศจะถูกอัดตัวทางด้านหน้าภูเขา (Windward side) ทำให้บริเวณนั้นมีความกดอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกว่า บริเวณความกดอากาศสูง (High pressure area) เหนือภูเขาขึ้นไปกระแสอากาศเคลื่อนที่ต่อไปได้โดยตลอด ไม่มีอะไรกั้นเอาไว้ เมื่อเปรียบเทียบความกดอากาศเบื้องล่างและเบื้องบนแล้ว จะพบว่าอากาศเบื้องล่างจะมีความกดอากาศสูง ส่วนเบื้องบนจะมีความกดอากาศต่ำกว่า ดังนั้นอากาศจึงไหลจากเบื้องล่างสู่เบื้องบน (ไหลจากบริเวณความกดอากาศสูงไปหาบริเวณความกดอากาศต่ำ) ทำให้เกิดกระแสอากาศไหลขึ้น (Updraft) ที่ด้านหน้าของภูเขา (Leeside)

จากคำจำกัดความของการทรงตัวของอากาศ กล่าวไว้ว่า อากาศเมื่อถูกแรงใดยกให้สูงขึ้น เมื่อหมดแรงที่กระทำให้อากาศยกตัวขึ้นแล้ว ถ้าหากอากาศก่อนนั้นยังเคลื่อนที่ต่อไปโดยไม่หยุด และโดยไม่ต้องอาศัยแรงภายนอกมากระทำ อากาศก่อนนั้นเรียกว่า อากาศมีการทรงตัวไม่ดี ในทางตรงกันข้าม ถ้าหมดแรงยกที่ให้อากาศลอยตัวสูงขึ้นแล้ว อากาศจะตกลงมาที่เดิม เรียกอากาศนั้นว่าอากาศมีการทรงตัวดี จากภาพที่ 5 ที่จุด A ลูกศรที่ชี้ขึ้นในแนวดิ่ง แทนกระแสอากาศไหลขึ้น ลูกศรในแนวนอนแทนลมชั้นบนเหนือภูเขา จากการแตกแรงจะได้แรงรวม (ลูกศรเส้นประ) ระหว่างแรงทั้งสอง ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าเมื่อกระแสอากาศเคลื่อนที่ขึ้นสู่ยอดเขาในทางดิ่ง จะไปรวมกับแรงในแนวนอนเหนือยอดเขาทำให้กระแสอากาศเปลี่ยนทิศทางแรงรวม เมื่อพ้นอิทธิพลของแรงที่มากระทำให้กระแสอากาศไหลขึ้น ถ้าอากาศนั้นมีการทรงตัวดี อากาศจะไหลกลับลงมาเบื้องล่างที่จุด B ลูกศรที่ชี้ลงในแนวดิ่ง แทนแรงที่เกิดจากการไหลลงของอากาศ ลูกศรที่ชี้ในแนวนอนแทนแรงที่เกิดจากกระแสลมเบื้องบน แรงรวมที่ได้จากแรงทั้งสองแสดงด้วยลูกศรเส้นประ ซึ่งจะเป็นทิศทางที่กระแสอากาศเคลื่อนที่ต่อไปทางด้านหลังลม (Leeward) ต่อไปลองพิจารณาที่จุด C และ D ซึ่งซ้ำกับจุด A และจุด B ตามลำดับ จะได้เส้นทางเดินของกระแสอากาศเป็นเส้นประ ซึ่งการไหลของกระแสอากาศมีรูปร่างยกตัวขึ้นและกดตัวลงนี้เรียกว่า “คลื่น” แต่เนื่องจากเกิดในบริเวณที่เป็นภูเขา จึงเรียกว่า คลื่นภูเขา

ถ้าลมที่ไหลมาปะทะภูเขามีกำลังแรงในระดับต่ำ และกำลังลดลงตามระยะสูงจนลมอ่อนที่ระดับยอดภูเขาแล้วลูกศรที่แทนแรงในแนวนอนจะไม่มีหรือมีขนาดเล็กมาก จึงมีแต่แรงไหลขึ้นของกระแสอากาศแต่เพียงอย่างเดียว คลื่นก็จะไม่เกิดขึ้น

ถ้าอากาศมีการทรงตัวไม่ดี เมื่อเคลื่อนที่สู่เบื้องบนพ้นอิทธิพลของแรงส่งแล้วอากาศก่อนนั้นยังคงไหลขึ้นอีกต่อไปที่ตำแหน่ง B ลูกศรชี้ลงทางดิ่งก็ไม่มีคลื่นก็จะไม่เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5 ลักษณะของการเกิดคลื่นภูเขา

#### ลักษณะของคลื่นภูเขา

เมื่อกระแสอากาศไหลขึ้นทางด้านหน้าของภูเขาและมีความเร็วลมเพิ่มขึ้นตามระยะสูงและมีความแรงที่สุดบริเวณยอดภูเขา เมื่อกระแสอากาศไหลผ่านยอดภูเขาไปแล้ว กระแสอากาศจะไหลลงตามลาดเขา เกิดเป็นกระแสอากาศไหลลง (Downdraft) อาจเกิดเป็นระยะทางไกลออกไปทางด้านหลังภูเขาได้ถึง 5-10 ไมล์จากยอดเขา จากนั้นกระแสอากาศจะไหลขึ้น และไหลลงสลับกัน กลายเป็นคลื่น ตามปกติแกนของคลื่นจะเอียงเข้าหาภูเขาหรือเอียงเข้าหาด้านหลังที่ลมพัดเข้าสู่ภูเขา

กระแสอากาศที่ไหลขึ้นทางด้านหน้าของภูเขาจะขึ้นได้สูงกว่ายอดเขาดังแต่ 2 เท่าไปจนถึง 20 เท่าของความสูงของภูเขาก็มิ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับกำลังลมที่พัดเข้าปะทะกับภูเขา ถ้าลมแรงกระแสอากาศก็ไหลขึ้นไปได้สูง ถ้าลมอ่อนกระแสอากาศก็จะไหลขึ้นไม่ได้สูง ดังนั้น ความสูงของคลื่น (Amplitude) จึงขึ้นอยู่กับลมที่พัดเข้าปะทะกับภูเขา คลื่นที่เกิดอาจสูงขึ้นไปได้ถึงบรรยาศชั้น (Tropopause) และเกิดเป็นระยะทางไกลออกไปด้านหลังภูเขาเป็นร้อยๆ ไมล์

สภาพอากาศที่ปรากฏในคลื่นภูเขาที่เป็นอันตรายต่อการบินของอากาศยานโดยเฉพาะในแง่การบินของเฮลิคอปเตอร์ คือ กระแสอากาศไหลขึ้นและไหลลง นักบินส่วนมากทราบแต่เพียงว่าด้านหลังภูเขามีกระแสอากาศไหลขึ้น ซึ่งตามความจริงแล้วภายในคลื่นนั้นการไหลของอากาศมีทั้งขึ้นและลง จึงเป็นอันตรายต่อการบินที่ทำการบินบริเวณภูเขาเป็นอย่างมาก

การที่กระแสอากาศไหลลงแต่ไม่ทราบถึงความเร็วของกระแสอากาศนั้นว่า มีมากน้อยเพียงใด COLSON ได้กล่าวถึงนักบินผู้หนึ่ง ซึ่งบินเครื่อง P-38 เกือบจะเกิดอุบัติเหตุ เนื่องจากกระแสอากาศไหลขึ้นในคลื่นภูเขา ขณะกำลังจะทำการบินลงสนามบินที่บิสซอป ในแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นสนามบินอยู่ในหุบเขา ตรงสนามบินเบื้องล่างนั้นนักบิน สังเกตเห็นฝุ่นกระจายฟุ้งอยู่ทั่วไป นักบินรู้สึกว่ามีแรงมาพยุงเครื่องบินของเขาให้ลอยตัวสูงขึ้น เขาจึงใช้ความพยายามเป็นเวลานานประมาณชั่วโมงเศษจึงสามารถนำเครื่องบินลงสู่สนามได้สำเร็จ จากการรายงานหลังเหตุการณ์นั้นพบว่า เกิดคลื่นภูเขาอย่างน้อยทำให้กระแสอากาศไหลขึ้น 40 เมตร/วินาที (80 นอต) ขณะเดียวกันก็มีกระแสอากาศไหลลงในด้านอับลมหรือด้านหลังลม (Leeward) ด้วย

กระแสอากาศไหลลงในอัตราดังกล่าว จะเป็นอันตรายต่อการบินโดยเฉพาะเฮลิคอปเตอร์เป็นอย่างมาก ถ้าหากเฮลิคอปเตอร์ทำการบินในระยะชิดกับสันเขา และขนานไปตามสันเขาแล้ว จะพบอากาศไหลลงตลอดแนวสันเขา จนกระทั่งผ่านสันเขาเหล่านั้นไป เมื่อเป็นเช่นนี้ก็อาจจะเกิดอันตรายแก่เฮลิคอปเตอร์ได้

มีคลื่นภูเขา บริเวณที่มีกระแสอากาศไหลลงมักจะพบใกล้ๆ กับสันเขาทางด้านหลังภูเขา (Leeward) ถ้าหากเครื่องบินทำการบินสวนกับทิศทางลม โดยเมื่อบินผ่านสันเขาอาจจะไม่มีเวลาพอหรือไม่สามารถดึงเครื่องให้พ้นสันเขาได้ จึงทำให้ชนกับภูเขาเกิดเป็นอันตรายจนนำไปสู่อุบัติเหตุใหญ่ขึ้น

การสังเกตคลื่นภูเขาว่าจะเกิดขึ้นบริเวณใดให้ดูที่เมฆ ซึ่งเมฆเหล่านี้แบ่งออกได้เป็น 4 แบบใหญ่ๆ คือ

#### 1. เมฆคลุมสันเขา (Cap clouds)

เมื่ออากาศมีไอน้ำมากพอ จึงจะเกิดเมฆชนิดนี้ปกคลุมบริเวณยอดเขา เมฆชนิดนี้จะมียอดราบเรียบและสูงประมาณ 2,000-3,000 ฟุตเหนือสันเขา เมฆชนิดนี้จะเกิดทางด้านหน้าของภูเขาที่ลมพัดเข้าหาและยาวเป็นพืดออกไปทางด้านหลังเขาหรือด้านอับลม

## 2. เมฆรูปเลนส์ (Lenticular clouds)

เมฆชนิดนี้จะเกิดตรงที่มีกระแสอากาศไหลขึ้น มีลักษณะคล้ายเลนส์ จะเกิดเป็นก้อนโตเดี่ยว สามารถมองเห็นได้ชัดเจนด้วยสายตา บางทีอาจมีรูปร่างฉีกขาดไปบ้าง อันเนื่องมาจากกระแสอากาศปั่นป่วน เมฆชนิดนี้จะพบอยู่เสมอเหนือระดับ 20,000 ฟุต ขึ้นไป ส่วนมากเกิดในโซนอบอุ่น

## 3. เมฆม้วนตัว (Rotor clouds or roll clouds)

บริเวณตอนล่างของคลื่น เป็นบริเวณที่มีการหมุนของกระแสอากาศเป็นวงเล็กๆ ซึ่งเป็นบริเวณที่จะเกิดเป็นเมฆม้วนตัวขึ้น ถ้ามองจากระดับที่สูงๆ ลงมา จะมองเห็นลักษณะคล้ายๆ กลุ่มของเมฆก้อน (Cu) ความสูงของเมฆจะอยู่ประมาณระดับเดียวกับยอดภูเขา ตอนบนของเมฆจะมีลักษณะเคลื่อนที่ไปทางด้านหลัง จึงมีลักษณะของเมฆม้วนตัวในด้านอัฒม (Leeside)

## 4. เมฆสีมุก (Mother of pearl)

จะเกิดในบริเวณอาร์คติกเท่านั้น เป็นเมฆที่มีลักษณะค่อนข้างยาวและกว้าง จะปรากฏในระดับสูงประมาณ 90,000 ฟุต ถ้าอากาศแห้งมากๆ เมื่อมีคลื่นภูเขาจะไม่ปรากฏเมฆให้เห็นในกรณีนี้จะสังเกตได้จากการเสีระยะสูงหรือการเพิ่มระยะสูงของเครื่องบินในขณะที่ทำการบินเข้าไปในบริเวณนั้น นอกจากนี้ยังสังเกตได้จากควัน หรือฝุ่นที่ฟุ้งกระจายอยู่ในบริเวณนั้น อาจจะช่วยเป็นสิ่งบอกเหตุให้ทราบถึงว่าขณะนั้นมีคลื่นภูเขาเกิดขึ้น

นอกจากอันตรายอันเกิดจากคลื่นภูเขาที่ทำให้เครื่องบินอาจจะชนกับยอดเขาได้แล้ว คลื่นภูเขายังมีผลกระทบเล็กๆ น้อยๆ คือ ทำให้การคำนวณหาเวลาเดินทางผิดพลาดไปได้ เนื่องจากความเร็วลมเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจทำให้การปฏิบัติการทางอากาศไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ตามภารกิจที่ได้รับมอบ

เนื่องจากคลื่นภูเขาเป็นลักษณะอากาศที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความรุนแรงมากและเป็นอันตรายต่อการบินเป็นอย่างมาก จากสถิติอุบัติเหตุของอากาศยานพบว่า อากาศยานที่ประสบอุบัติเหตุเนื่องจากคลื่นภูเขาได้แก่ เฮลิคอปเตอร์ มีสถิติสูงกว่าอากาศยานชนิดอื่น เนื่องจากต้องปฏิบัติการติดตาม

ภูมิประเทศที่เป็นป่าเขาเป็นส่วนใหญ่ บริเวณที่เกิดอุบัติเหตุที่พบมากได้แก่ บริเวณภูเขาในภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งยังผลให้นักบินเสียชีวิตเป็นจำนวนมาก ทั้งยังสูญเสียทรัพยากร วัสดุ และกำลังพลไปอย่างมากมาย

เพื่อเป็นการหาหนทางลดอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากคลื่นภูเขา ดังนั้น ถ้าหากว่า ไม่จำเป็นแล้ว อย่าบินผ่านบริเวณคลื่นภูเขา แต่ถ้าหากมีความจำเป็นที่จะต้องบินผ่านให้ปฏิบัติ ดังนี้

1. ให้บินเข้าหาแนวสันเขา โดยทำมุมประมาณ 45 องศา กับแนวสันเขา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรณีที่ต้องบินทวนลม ทั้งนี้ เพื่อสะดวกในการหลบหลีกเมื่อคาดว่าจะเกิดอันตรายเนื่องจากคลื่น ภูเขา
2. ให้เผื่อสังเกตดูเครื่องวัดสูงไว้บ่อยครั้งที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเวลาดบินกลางคืน หรือบินเข้าหาเมฆในคลื่นภูเขา ซึ่งเครื่องวัดสูงอาจจะผิดพลาดจากความเป็นจริงหลายพันฟุต (เปรียบเทียบความสูงในเครื่องวัดกับยอดเขา)
3. กรณีที่เครื่องบินเลี้ยวระยະสูงมากทันทีทันใด ในขณะที่บินขนานกับสันเขาให้ระลึกว่า ขณะนั้นกำลังบินอยู่บริเวณกระแสอากาศไหลลง ดังนั้น ให้รีบเปลี่ยนทิศทางบินทันที เพื่อจะได้ เข้าไปสู่ในพื้นที่ของกระแสอากาศไหลขึ้น
4. อย่าบินเข้าไปในเมฆม้วนตัวและเมฆรูปเลนส์ โดยเฉพาะเมื่อปรากฏเห็นตอนปลาย ของเมฆรูปเลนส์หรือเมฆม้วนนั้น มีลักษณะฉีกขาดหรือไม่ราบเรียบ (edges are ragged )
5. ถ้ามีความจำเป็นต้องเพิ่มความสูงให้แก่เครื่องบิน ให้บินเข้าหาด้านหน้าของเมฆ ม้วนตัวหรือเมฆรูปเลนส์ เพราะบริเวณนั้นจะมีกระแสอากาศไหลขึ้น
6. ความสูงที่ใช้ในการบินข้ามสันเขาต้องบวกอีกไม่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของความสูง ของยอดเขา

จากข้อแนะนำในการบินเมื่อพบคลื่นภูเขาที่กล่าวมานี้ คิดว่าคงจะเป็นประโยชน์แก่ผู้ปฏิบัติงานในอากาศโดยตรง และเป็นประโยชน์ในทางอ้อมแก่กองทัพอากาศในการหาหนทางป้องกันและหลีกเลี่ยงอุบัติเหตุของอากาศยานอันเนื่องมาจากสภาพอากาศอีกทางหนึ่งด้วย

### เหตุจากแนวปะทะ (Frontal causes)

แนวปะทะทำให้เกิดอากาศปั่นป่วน ซึ่งเกิดจากการยกตัวขึ้นของอากาศอุ่น โดยแนวปะทะที่ผิวพื้นทำให้อากาศเกิดการไม่ทรงตัวและเกิดเป็น shear line ระหว่างอากาศอุ่นและอากาศเย็น กระแสอากาศอุ่นที่ยกตัวขึ้นในทางนี้จะมีแรงดันที่รุนแรงที่สุดเมื่ออากาศมีความชื้นสูงและไม่ทรงตัวสาเหตุของแรงดันทั้งหมดมาจากแนวปะทะทำให้เกิดกระแสอากาศปั่นป่วน โดยทั่วไปแล้วอยู่ในกลุ่มของแนวปะทะอากาศเย็น ทำให้แนวปะทะเคลื่อนตัวได้อย่างรวดเร็ว ในกรณีนี้การไม่ผสมกันของมวลอากาศสองชนิด คือ มวลอากาศเย็น และมวลอากาศอุ่น ทำให้เกิดความเร็วและทิศทางลมแตกต่างกันขึ้นรวมกันเป็นความรุนแรงของกระแสอากาศปั่นป่วน

### WIND SHEAR (Wind shear causes)

ต้นเหตุจาก wind shear ความรุนแรงของ wind shear สามารถเปรียบเทียบจากเส้นความชันของความเร็วม (steep gradient in wind velocity) ตามแนวยาวของแนวปะทะทั้งทางตั้งและทางระดับ ผลที่ได้ทำให้ทราบถึงการไหลวนของกระแสอากาศซึ่งเป็นผลจากกระแสอากาศปั่นป่วน มีบ่อยครั้งที่การบินต้องเผชิญกับสภาพอากาศเช่นนี้ ซึ่งเป็นบริเวณอยู่ใกล้กับ jet stream การเกิดของกระแสอากาศเช่นนี้อาจเกิดในสภาพอากาศแจ่มใส (clear air) ที่ปราศจากการเตือนล่วงหน้า หรือมีสิ่งบอกเหตุให้เห็น เช่น เมฆต่างๆ (No Vision Warning) กระแสอากาศปั่นป่วนนี้เรียกว่า Clear Air Turbulence = CAT

CAT ไม่จำเป็นว่าจะจำกัดอยู่ที่บริเวณใกล้กับ jet stream เท่านั้น แต่อาจจะเกิดขึ้นในส่วนอื่นๆ ของบรรยากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาในค่าบดต่างๆ ได้ ตัวอย่างเช่น กระแสอากาศปั่นป่วนที่เกิดจากคลื่นภูเขา (mountain wave) ก็สามารถจัดอยู่ใน CAT ได้ แต่การมีเมฆที่เกิดจากคลื่นภูเขาที่ไม่จำเป็นว่าจะมีการเกิด CAT ในขณะนั้นก็ได้

ในพื้นที่แคบๆ ที่เกิด wind shear จะมีกระแสอากาศปั่นป่วนตามมาด้วย บางครั้งอากาศยานจะต้องเผชิญในขณะที่ไต่ขึ้นหรือร่อนลง wind shear ชนิดนี้เกิดจากอุณหภูมิของอากาศที่ยกตัวขึ้นเพิ่มขึ้นตามความสูง เรียกว่า Temperature inversion ซึ่งสามารถเกิดได้ทุกแห่งตั้งแต่ผิวพื้นโลกไปจนถึงบรรยากาศชั้น Tropopause

ความรุนแรงของ wind shear เป็นสิ่งสำคัญมากต่อนักบินในขณะที่ Landing และ Take off ความรุนแรงนี้จะอยู่ในบริเวณที่ใกล้พื้นดินมาก เรียกว่า หลุมเงียบ (pocket of calm) ตัวอย่างอากาศเย็นในหุบเขาคือเป็นผลจากการคลายความร้อนออกในเวลากลางคืนทำให้อากาศที่อยู่ติดกับพื้นผิวดินเย็นและสูงขึ้นไปเพียง 200-300 ฟุตเท่านั้น อากาศส่วนที่ถัดขึ้นไปยังเก็บความร้อนไว้ ทำให้อากาศอุ่นกว่าส่วนที่อยู่ข้างล่าง ดังนั้น จึงเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศอุ่นและอากาศเย็น ทำให้อากาศทั้งสองเคลื่อนตัวมีความเร็วแตกต่างกัน เกิดเป็นแนวแคบๆ ของกระแสอากาศปั่นป่วนอย่างรุนแรงขึ้น เรียกว่า Inversion

อากาศยานที่กำลังไต่ขึ้น หรือกำลังร่อนลงเช่นนี้ จะเผชิญกับกระแสอากาศปั่นป่วน ผลคือทำให้อากาศยานยกตัวขึ้นเองด้วยแรงลมและถูกกดลงอีกครั้ง ซึ่งขณะนั้นระยะสูงของอากาศยานน้อยลงจะเป็นเหตุให้อากาศยานกระแทกกับพื้นเกิดอุบัติเหตุได้

กระแสอากาศปั่นป่วนอีกชนิดหนึ่งที่อาจจะพบได้ คือ Wake turbulence ที่เกิดจากกระแสอากาศปั่นป่วนตามหลังอากาศยานขนาดใหญ่ หรืออากาศยานที่มีความเร็วสูงในขณะที่วิ่งขึ้นหรือร่อนลง ดังนั้นนักบินที่บินกับอากาศยานขนาดเล็กจะต้องจัดระยะในการวิ่งขึ้นหรือร่อนลงตามหลังอากาศยานขนาดใหญ่ ให้มีระยะห่างพอสมควร เพื่อหลีกเลี่ยงการเผชิญกับ Wind shear อันเนื่องมาจาก Wake turbulence ของอากาศยานขนาดใหญ่

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

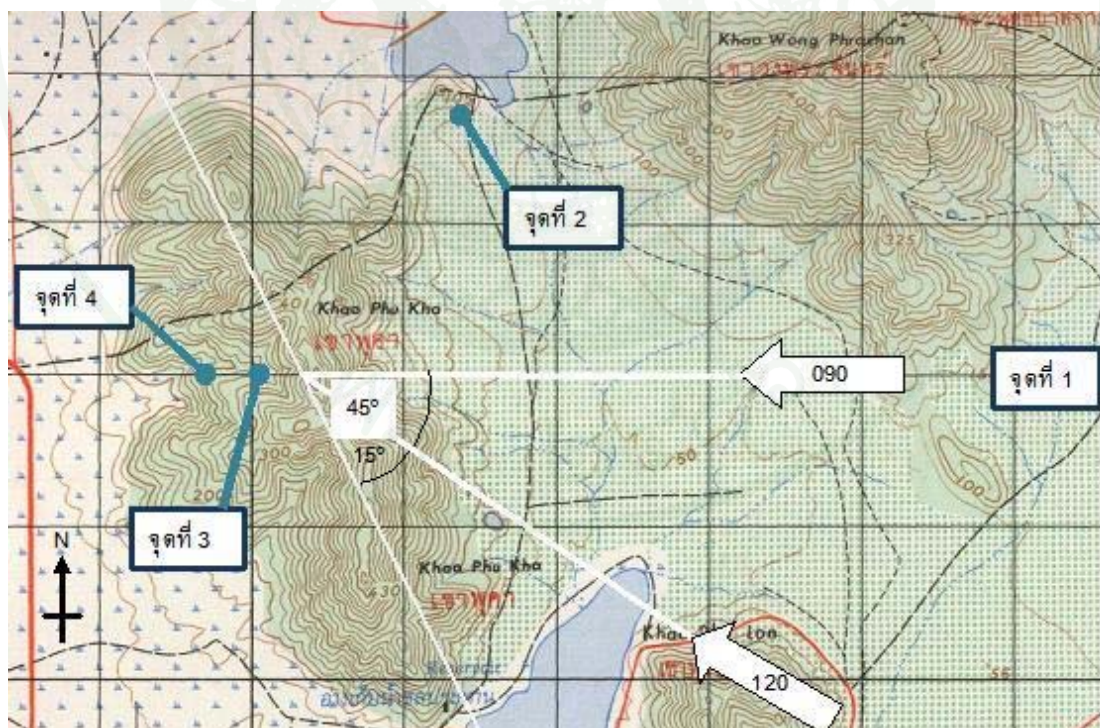
1. คอมพิวเตอร์ CPU Intel Centrino 1.7 GHz, RAM 1024 MB
2. อุโมงค์ลมของโรงเรียนนายเรืออากาศ ภาพที่ 6 มีส่วนทดลอง กว้าง 1.2 เมตร สูง 1.5 เมตร ความเร็วลมสูงสุด 80 เมตรต่อวินาที
3. แบบจำลองภูมิประเทศ ส่วนที่สูงที่สุด 120 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ดังภาพที่ 7 ซึ่งย่อจากขนาดจริง อัตราส่วน 1: 1000
4. เครื่องวัดความเร็วลม Hot wire 1- D, DANTEC Dynamics Probe type 55 P15



ภาพที่ 6 อุโมงค์ลม โรงเรียนนายเรืออากาศ



ภาพที่ 7 แบบจำลอง, จุดวัด และทิศทางลมในอุโมงค์ลม



ภาพที่ 8 พื้นที่เขาพุกา ภูมิประเทศโดยรอบจุดวัดความเร็วลม และทิศทางลมเข้าปะทะเมื่อเทียบกับแนวยาวของภูเขา

## วิธีการ

1. ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลความเร็วลมจากเขาพุคา และข้อมูลความเร็วลมประจำถิ่นบริเวณ เขาพุคา จังหวัดลพบุรี จากกองสนามบิน ศูนย์การบินทหารบก

### 2. การทดลองในอุโมงค์ลม

2.1 สร้างแบบจำลองภูมิประเทศขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดลองในอุโมงค์ลม แบบจำลองนี้ทำมาจากโฟม เคลือบด้วยฟิวทราล ขนาด 0.5 มิลลิเมตร อัตราส่วน 1: 1000

2.2 ทำการทดลองในอุโมงค์ลมเพื่อเก็บข้อมูล ความเร็วลม ใช้จุดวัด 4 จุด ดังภาพที่ 7 โดยในแต่ละจุดนั้น จะบันทึกความเร็วจนถึงความสูงที่มีความเร็วลมเท่ากับความเร็วลมด้านเข้า ความเร็วลม 30, 40, 50 เมตรต่อวินาที โดยมีทิศทางลม 90 องศา (ลมพัดจากทิศตะวันออก) และ 120 องศา (ลมพัดจากทิศตะวันออกเฉียงใต้) ดังภาพที่ 8

### 3. คำนวนโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

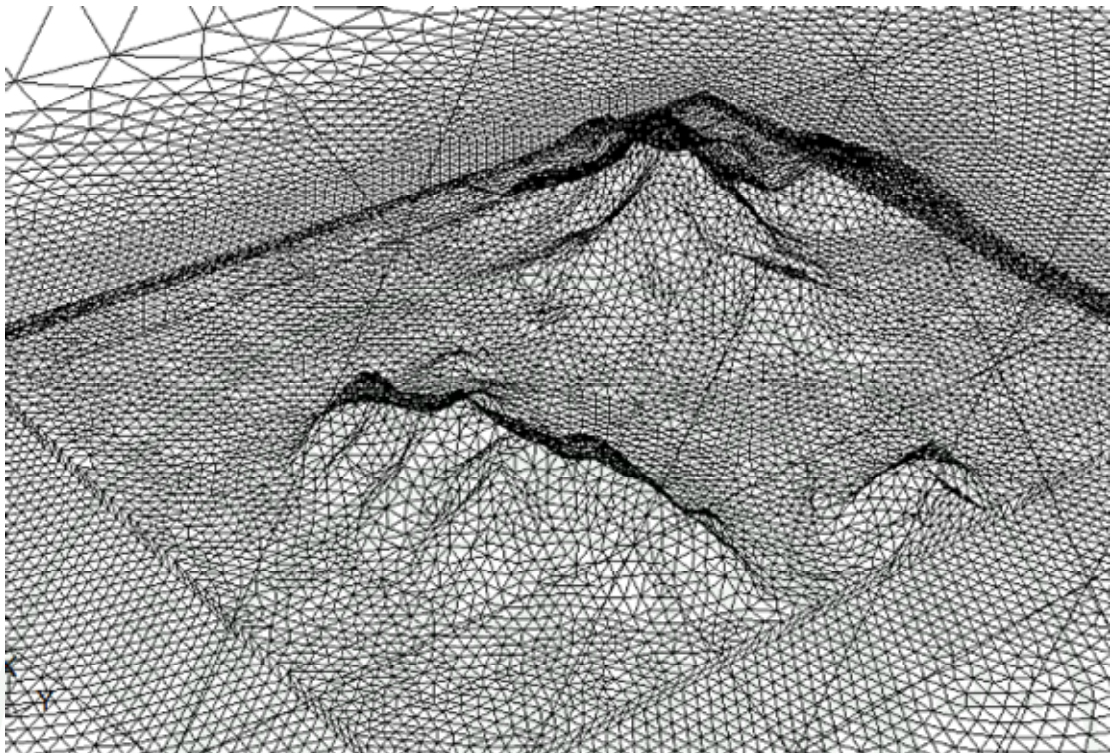
3.1 สร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับคำนวณในโปรแกรม Fluent 6.2 โดยใช้วิศวกรรมย้อนรอย จากแบบจำลองที่ใช้ในอุโมงค์ลม

3.2 สร้างกริดโดยใช้โปรแกรม GAMBIT 2.2.30 ทำการสร้างกริดที่พื้นผิวก่อน โดยใช้กริดแบบ Tri มี Spacing 0.02 เมตร กริดสามมิติแบบ Tet/Hybrid Growth rate 1.125 , 1.5 ทำให้ได้ 218992 Nodes และ 481328 Nodes ตามลำดับ Spacing 0.01 เมตร Growth rate 1.125 , 1.5 ทำให้ได้ 713036 Nodes และ 869974 Nodes ตามลำดับ ดังภาพที่ 9

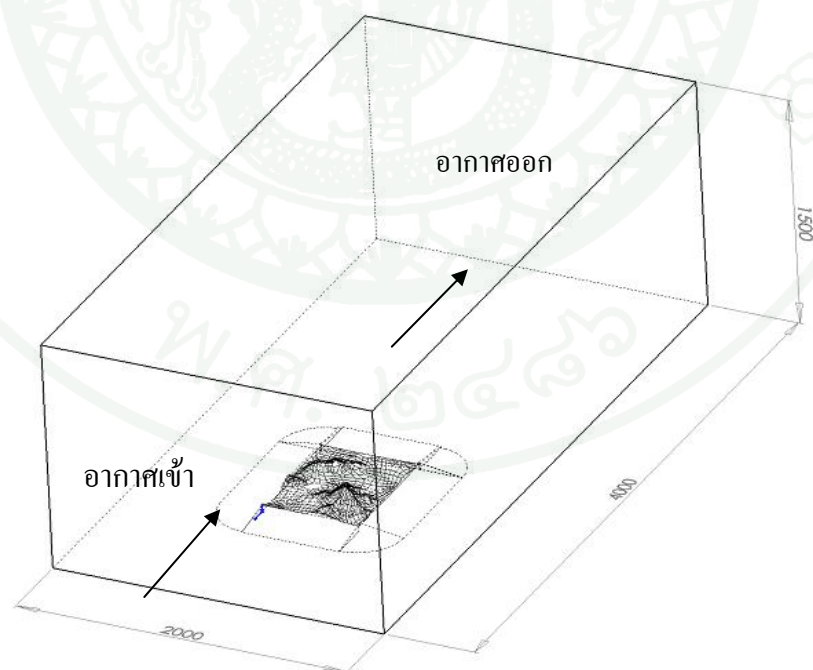
3.3 ขอบเขตของแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 10

3.4 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบ ดังแสดงในตารางที่ 4

3.5 คำนวนโดยใช้โปรแกรม Fluent 6.2 เพื่อดูทิศทางลม ความเร็วลม ลักษณะการไหลของอากาศ ใช้จุดวัด 4 จุด ความเร็วลม 30, 40, 50 เมตรต่อวินาที ทิศทางลม 90 องศา และ 120 องศา



ภาพที่ 9 กริดที่ใช้ในโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ภาพที่ 10 ขอบเขตของแบบจำลองในโปรแกรม (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

ตารางที่ 4 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบ

| เงื่อนไขขอบ                  | ลักษณะ                         |                               |
|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|                              | Model                          | Full Scale                    |
| ทางเข้า                      | Velocity inlet 30, 40, 50 m/s  | Velocity inlet 7 m/s          |
| ทางออก                       | Out flow                       | Out flow                      |
| ด้านข้าง                     | Wall                           | Farfield                      |
| แบบจำลอง                     | Wall, surface roughness 0.5 mm | Wall, surface roughness 0.5 m |
| Turbulent model              | RNG k- $\epsilon$              |                               |
| Pressure velocity coupling   | SIMPLEC                        |                               |
| Discretization               |                                |                               |
| - Pressure                   | Second order                   |                               |
| - Momentum                   | Second order upwind            |                               |
| - Turbulent kinetic energy   | Second order upwind            |                               |
| - Turbulent dissipation rate | Second order upwind            |                               |

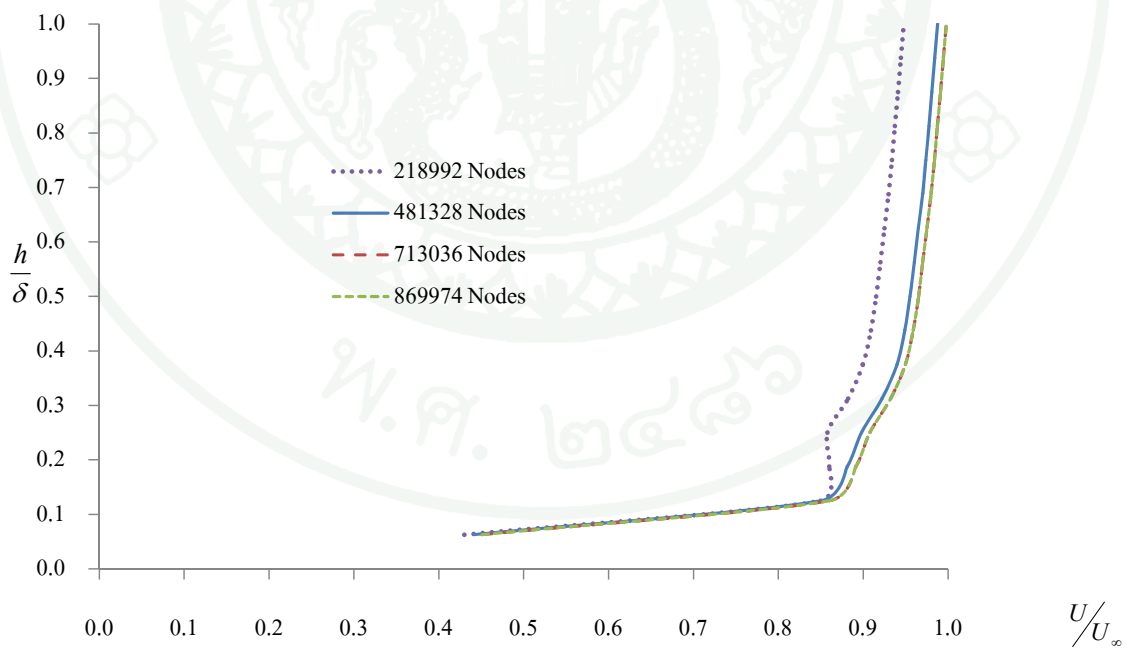
4. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ ผลที่ได้จากการทดลองในอุโมงค์ลม กับการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

5. สรุปผล

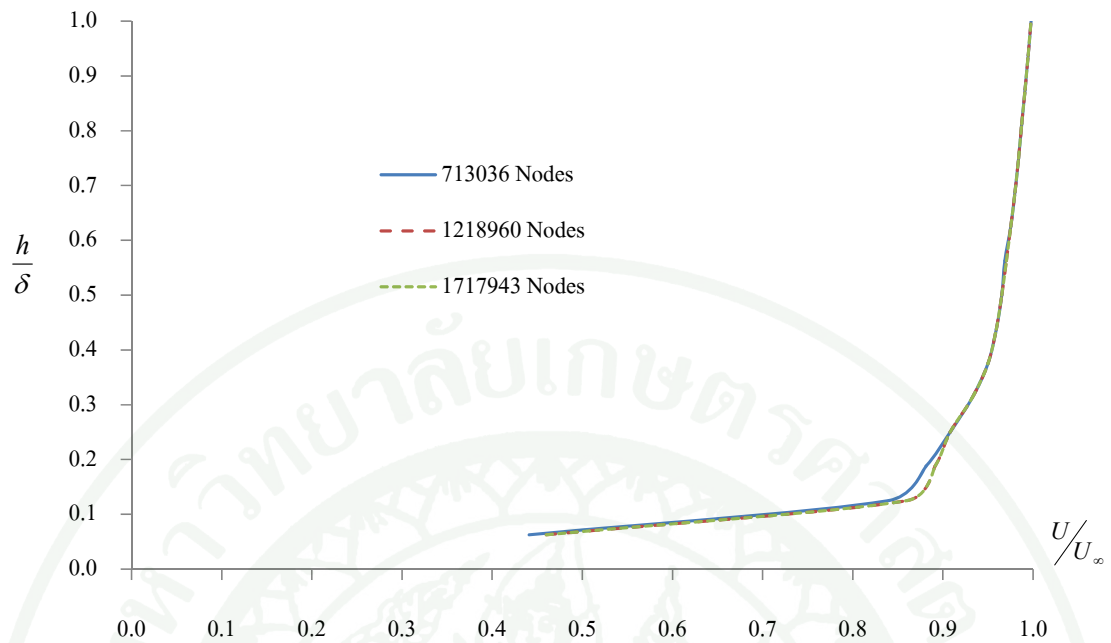
## ผลและวิจารณ์

### ผล

จากภาพที่ 11 เป็นโพรไฟล์ความเร็วลม ซึ่งแสดงโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหล CFD ในการคำนวณบริเวณ จุดวัดที่ 1 ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที พบว่าถ้าใช้ความละเอียดกริดมากในการคำนวณจะทำให้กราฟดูเข้าคำตอบมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มความละเอียดของกริดจนถึงค่าหนึ่ง พบว่า ผลการคำนวณที่ได้ก็ให้คำตอบใกล้เคียงกัน ความเร็วของอากาศเฉลี่ยต่างกันไม่เกิน 5% แต่ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นด้วย ดังตารางที่ 5 ดังนั้น จำนวนกริดที่เลือกใช้ในการคำนวณทุกจุดจะเป็น 481328 Nodes แต่จากแผนภาพที่ 12 เป็นการคำนวณในโปรแกรมพลศาสตร์ของไหล CFD Full scale ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที ได้มีการเพิ่มความละเอียดกริดให้สูงขึ้น โดยผลการคำนวณที่ได้ความละเอียด 1218960 Nodes และ 1717943 Nodes ก็ให้คำตอบที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น จึงเลือกความละเอียดกริด 1218960 Nodes ในการคำนวณแบบ Full scale เพราะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าดังตารางที่ 6



ภาพที่ 11 การเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที ที่ความละเอียดกริดต่างๆ



**ภาพที่ 12** การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม แบบ Full scale ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 90 องศา  
ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที ที่ความละเอียดกริดต่างๆ

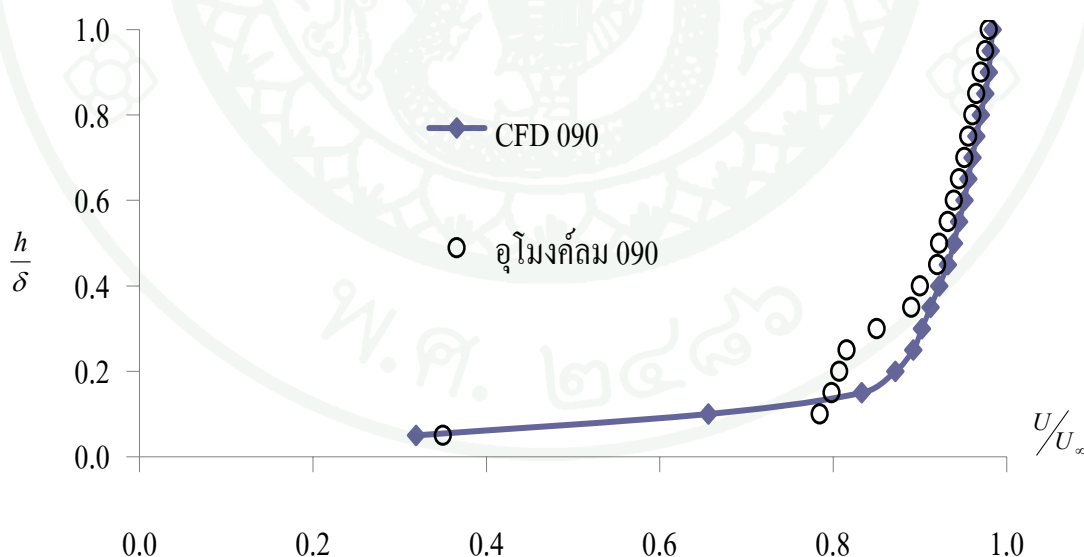
**ตารางที่ 5** เวลาในการคำนวณของความละเอียดกริดต่างๆ ของจุดวัดที่ 1 ความเร็วอากาศเข้า  
50 เมตรต่อวินาที

| ความละเอียดกริด | เวลาในการคำนวณ (ชั่วโมง) |
|-----------------|--------------------------|
| 218992 Nodes    | 5                        |
| 481328 Nodes    | 12                       |
| 713036 Nodes    | 27                       |
| 869974 Nodes    | 35                       |

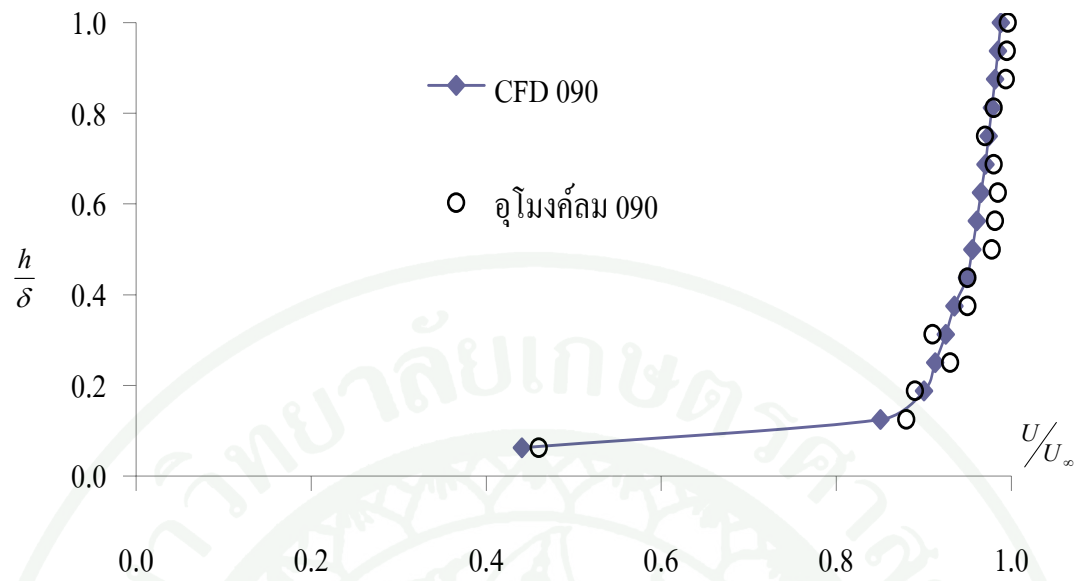
ตารางที่ 6 เวลาในการคำนวณของความละเอียดกริดต่างๆ ของจุดวัดที่ 1 Full scale ความเร็ว  
อากาศเข้า 7 เมตรต่อวินาที

| ความละเอียดกริด | เวลาในการคำนวณ (ชั่วโมง) |
|-----------------|--------------------------|
| 713036 Nodes    | 27                       |
| 1218960 Nodes   | 40                       |
| 1717943 Nodes   | 48                       |

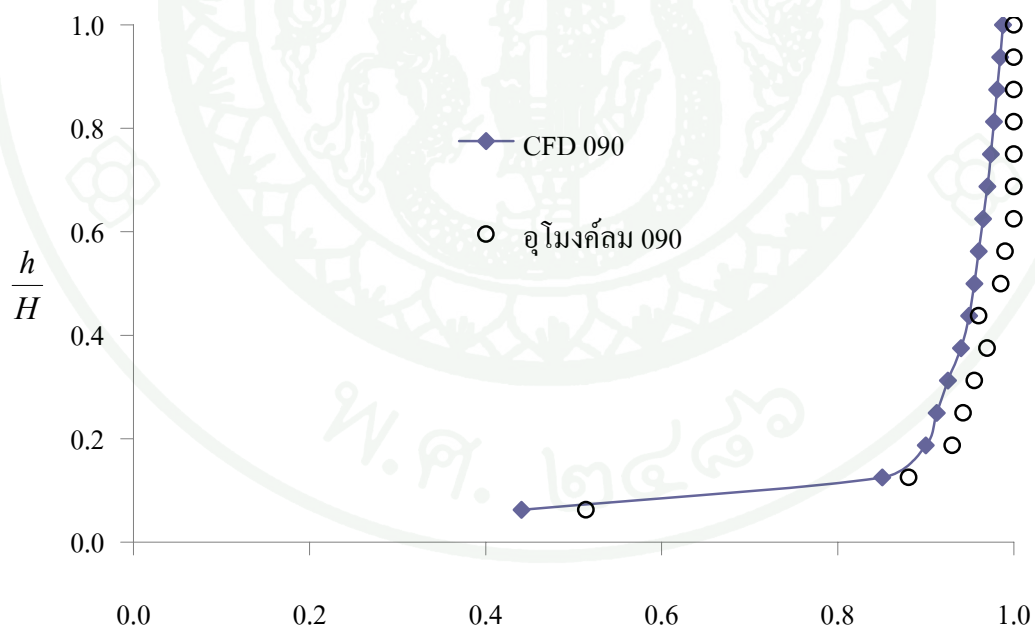
จากผลการศึกษาทั้งการใช้โปรแกรม Fluent 6.2 และการทดลองในอุโมงค์ลม ได้มีการนำ  
โปรไฟล์ของความเร็วลมมาเปรียบเทียบกัน โดยภาพที่ 13-15 เป็นการแสดงโปรไฟล์ของความเร็วลม  
ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 90° ซึ่งเป็นจุดวัดความเร็วของอากาศด้านเข้า ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที  
มีความหนาชั้นขีดยาว ( $\delta$ ) = 100 มิลลิเมตร ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที มีความหนาชั้นขีดยาว  
( $\delta$ ) = 80 มิลลิเมตร ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที มีความหนาชั้นขีดยาว ( $\delta$ ) = 78 มิลลิเมตร  
จะเห็นว่าโปรไฟล์ความเร็วมีแนวโน้มเหมือนกัน และใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อระดับความสูง  $\frac{h}{\delta}$   
ประมาณ 0.5 ขึ้นไป



ภาพที่ 13 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม  
30 เมตรต่อวินาที

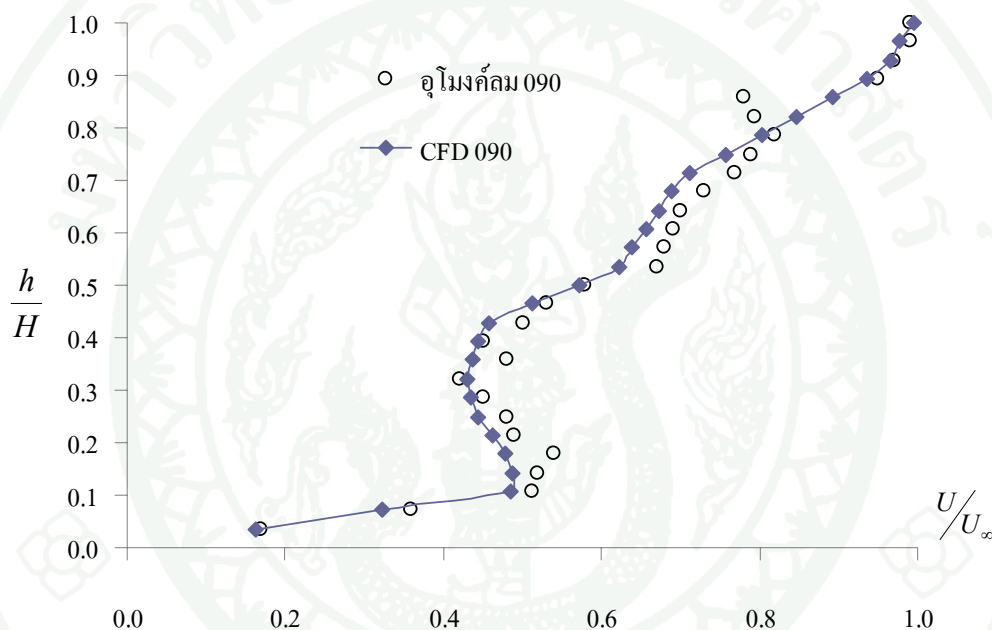


ภาพที่ 14 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็ว ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที

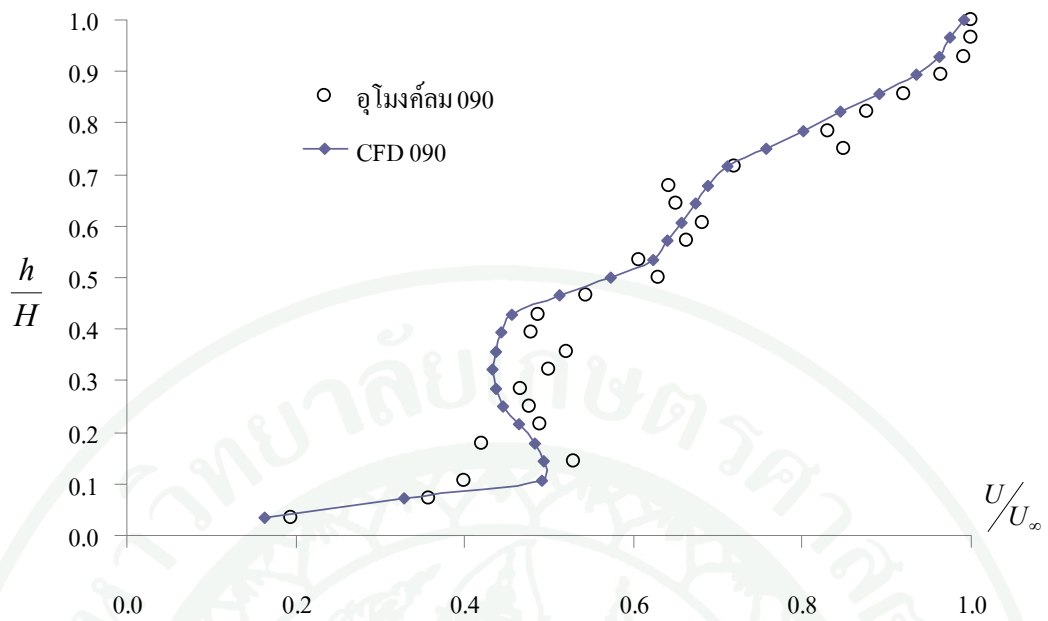


ภาพที่ 15 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็ว ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที

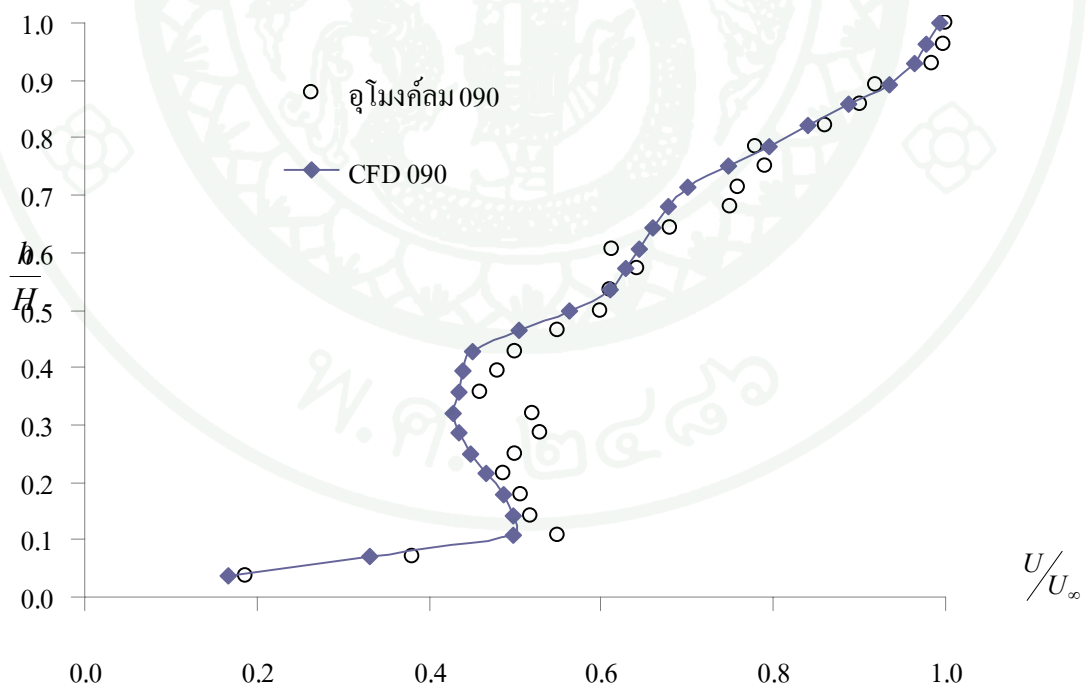
จุดวัดที่ 2 ตามภาพที่ 16-18 แกนตั้งของแผนภาพนั้นได้ใช้อัตราส่วนของ  $\frac{h}{H}$  เพราะอากาศที่เข้ามายังบริเวณจุดที่ 2 นี้จะปะทะเขาวงพระจันทร์ก่อนจึงมีผลของความสูงของเขาวงพระจันทร์มากกว่าความหนาชั้นซิดผิว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าความสูงของเขาวงพระจันทร์ ( $H$ ) = 140 มิลลิเมตร แทนที่ความสูงตั้งแต่พื้นจนถึงความสูง 0.9 เท่าของภูเขานั้น อากาศมีการสูญเสียความเร็วเนื่องจากความสูงของภูเขา ไม่ว่าจะเป็นความเร็ว 30, 40 และ 50 เมตรต่อวินาที มีโปรไฟล์ความเร็วลมที่ได้จากการทดลอง และจาก CFD เมื่อค่า  $\frac{h}{H} \leq 0.5$  ถึง 0.9 มีความแตกต่างกันแต่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน



ภาพที่ 16 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที

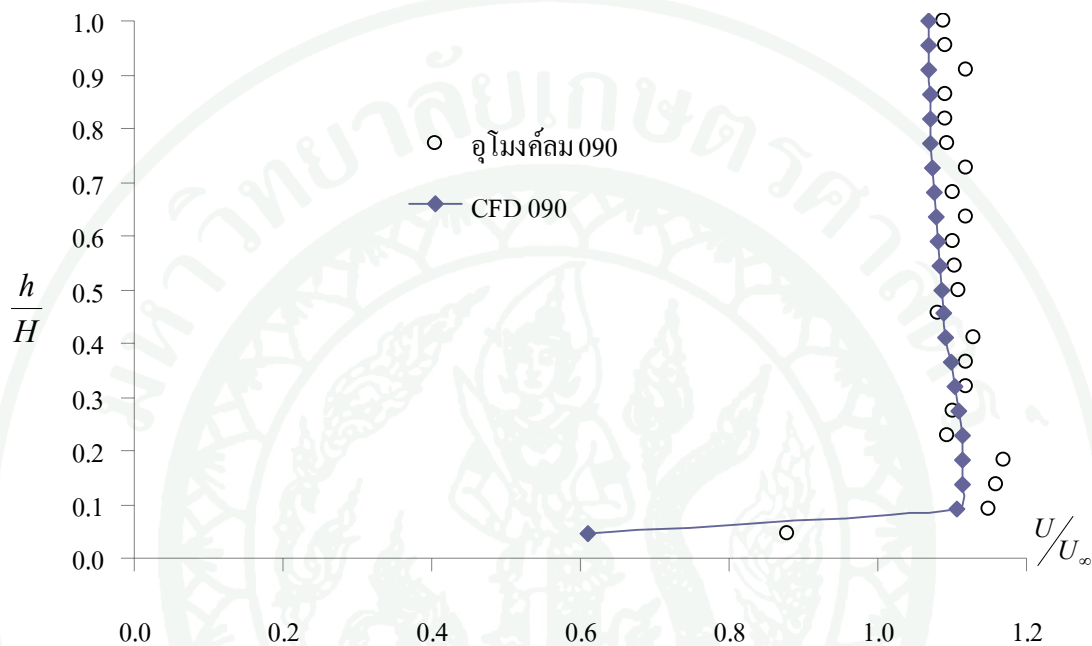


ภาพที่ 17 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที

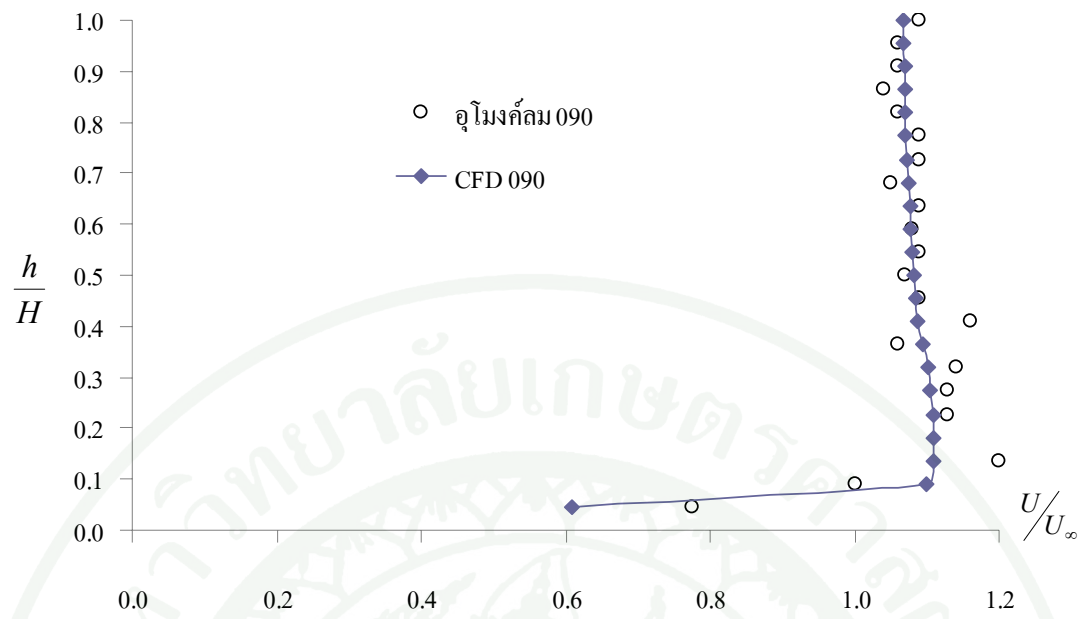


ภาพที่ 18 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที

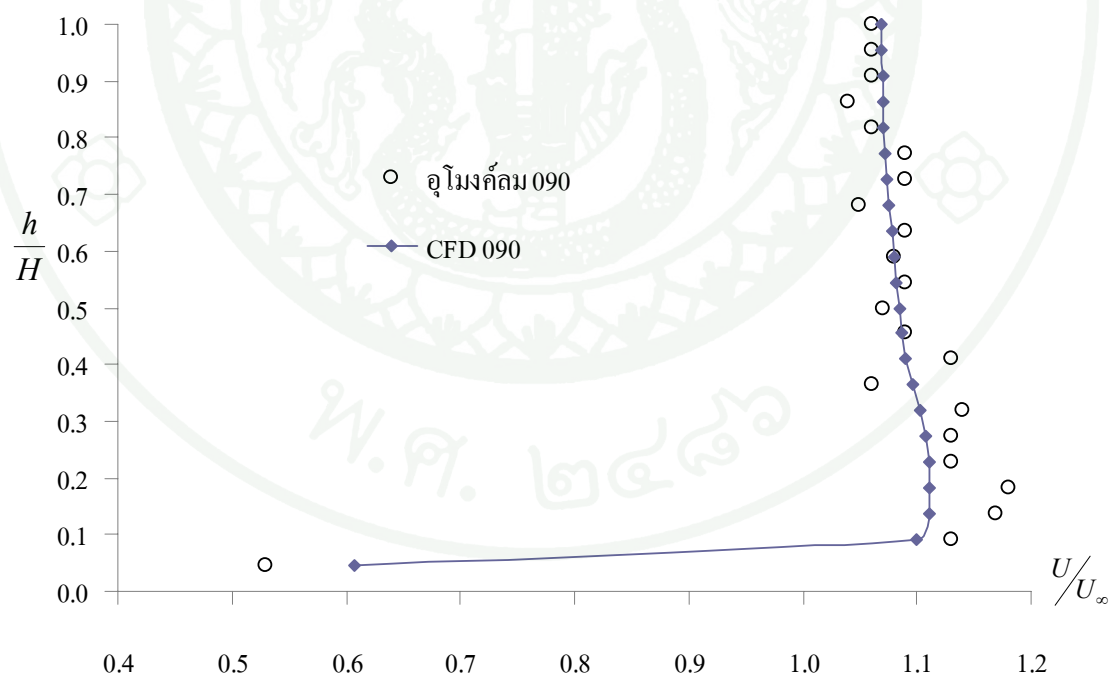
จุดวัดที่ 3 ตามภาพที่ 18-21 เป็นจุดลงจอดบนยอดเขา ค่าความสูงของภูเขา ( $H$ ) = 110 มิลลิเมตร ความเร็วของอากาศบริเวณใกล้ยอดเขานั้นผลการทดลองจากอุโมงค์ลมมีความเร็วสูงสุดประมาณ 1.2 เท่าของความเร็วมหาเข้า แต่ผลจาก CFD มีค่าสูงสุดที่ประมาณ 1.1 เท่าของความเร็วมหาเข้า ณ ความสูงตั้งแต่  $\frac{h}{H} = 0.05-0.15$  โดยจะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น



ภาพที่ 19 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที

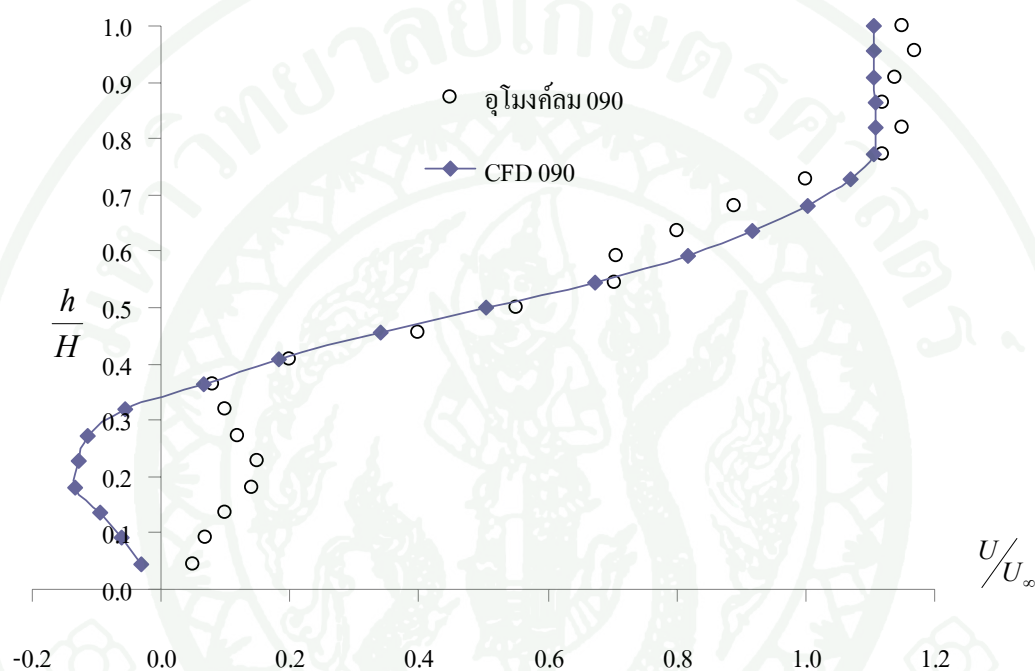


ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที

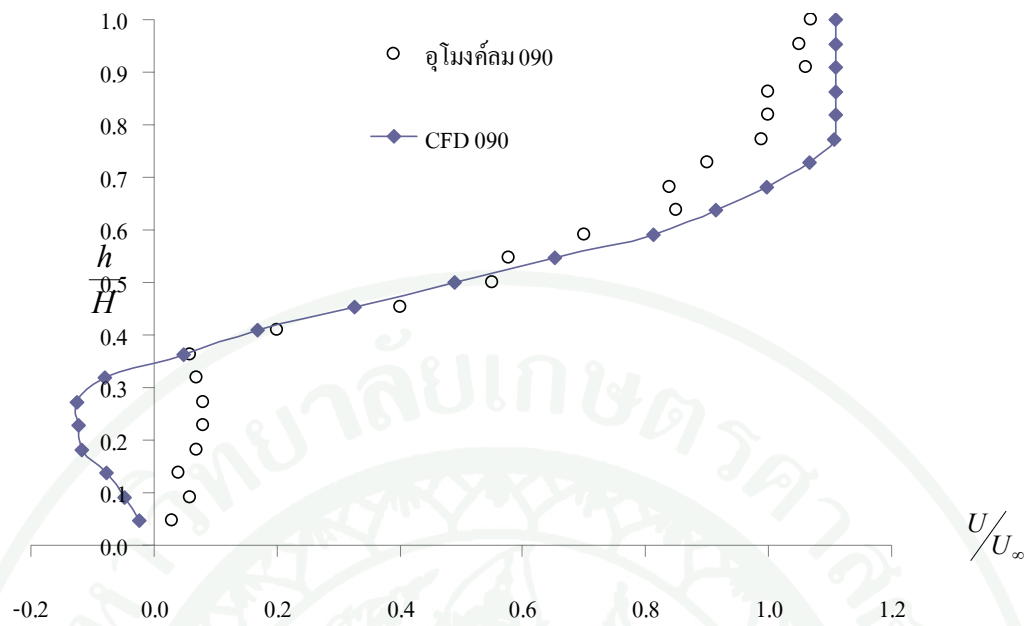


ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที

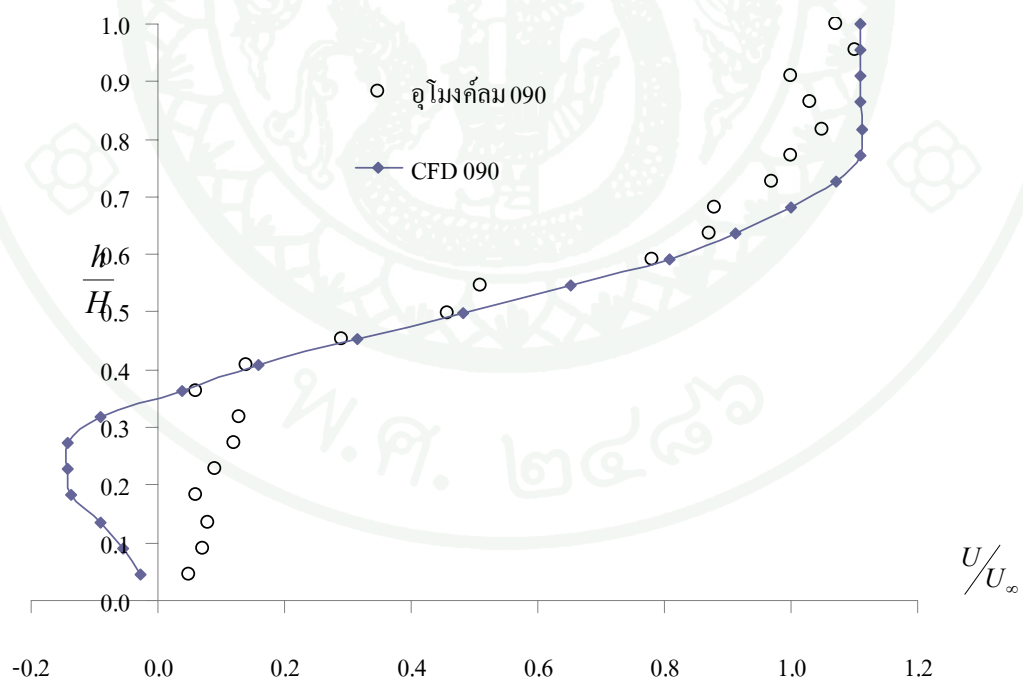
จุดวัดที่ 4 ตามภาพที่ 22-24 นั้น เป็นจุดด้านหลังภูเขาที่ใกล้พื้นผิวซึ่งมีอากาศหมุนวน โดยทิศทางของลมมีทิศตรงข้ามกับทิศทางลมที่เข้ามา แต่ว่า Hot wire ที่ใช้ในอุโมงค์ลมนั้น วัดเฉพาะขนาดของความเร็วลมเฉลี่ยเพียงแกนเดียว อย่างไรก็ตามที่ความสูงตั้งแต่ 0.4 เท่าของภูเขา ขึ้นไปนั้น เนื่องจากการไม่มีการไหลแบบหมุนวน ทำให้ความเร็วของอากาศที่ได้จากการทดลองใน อุโมงค์ลมและที่ได้จากโปรแกรม CFD มีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 4 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที

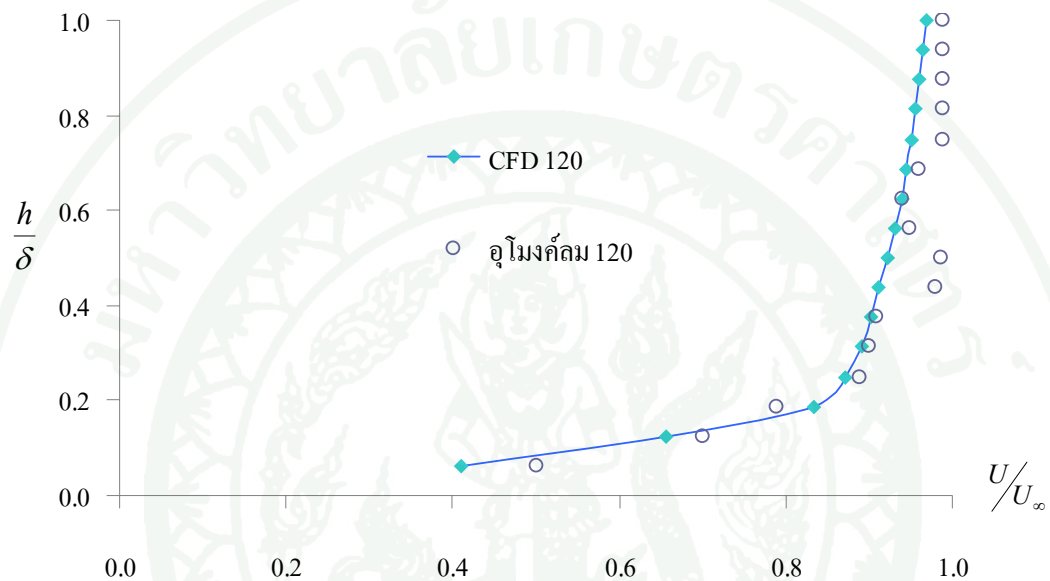


ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 4 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที

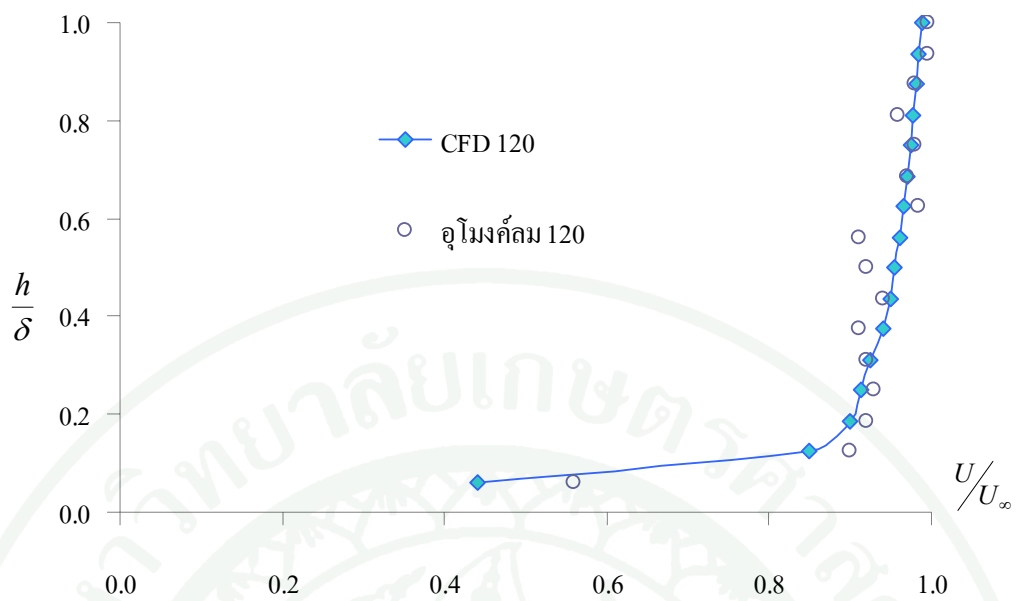


ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 4 ทิศทางลม 90 องศา ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที

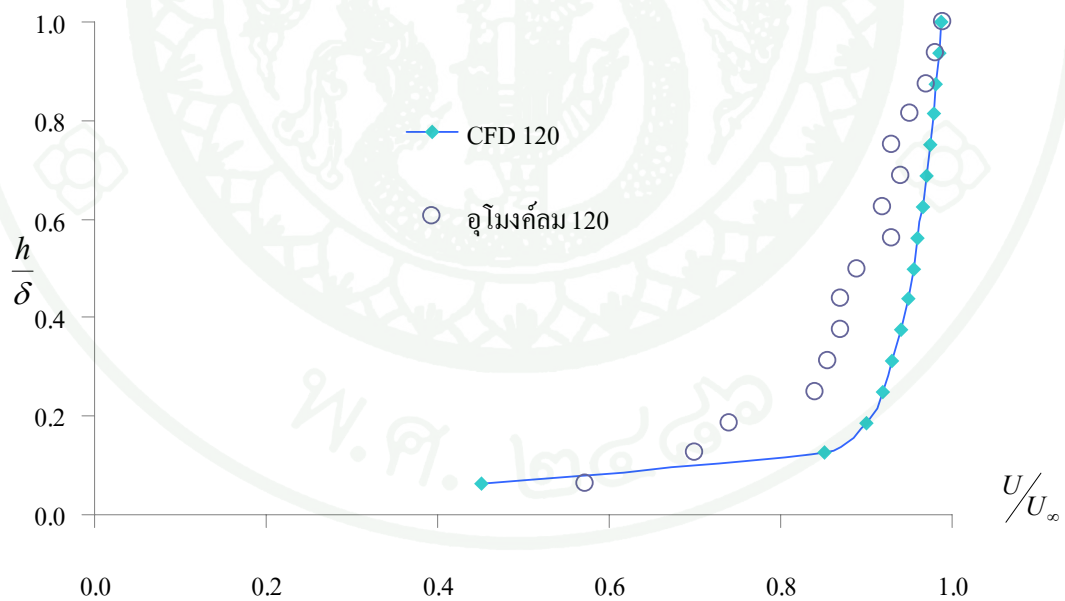
จากภาพที่ 25-27 เป็นการทดลองที่จุดวัดที่ 1 ทิศทางลมเข้ามาปะทะ ทิศทาง 120 องศา ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที มีความหนาชั้นซิดผิว 98 มิลลิเมตร ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที มีความหนาชั้นซิดผิว 80 มิลลิเมตร ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที มีความหนาชั้นซิดผิว 77 มิลลิเมตร จากทั้งสามภาพจะเห็นว่าโปรไฟล์ความเร็วลมด้านเข้าระหว่าง การทดลองในอุโมงค์ลม และ CFD มีแนวโน้มเหมือนกัน



ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 120 องศา ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที

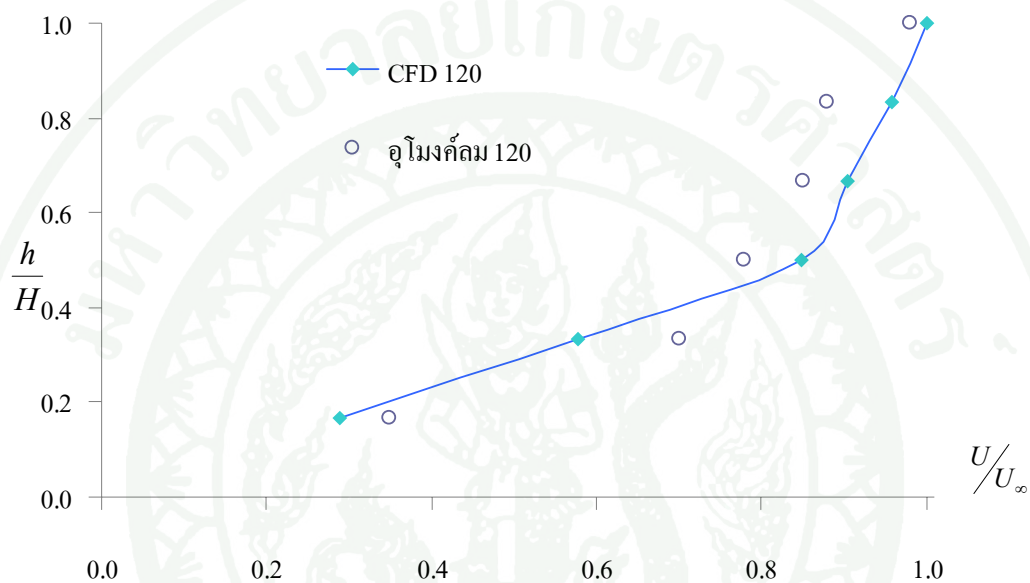


ภาพที่ 26 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 120 องศา ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที

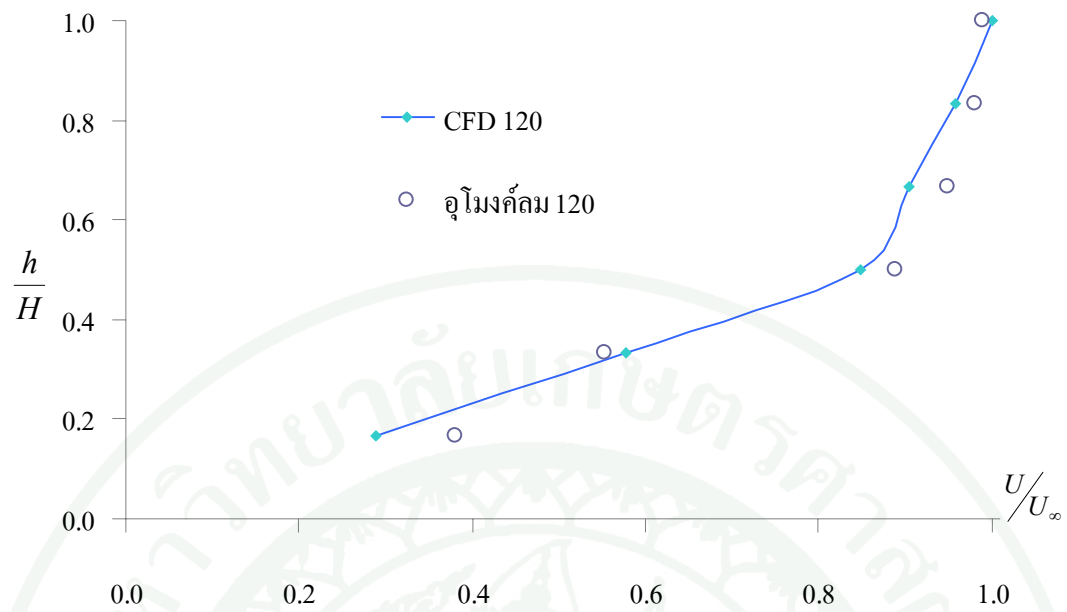


ภาพที่ 27 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 1 ทิศทางลม 120 องศา ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที

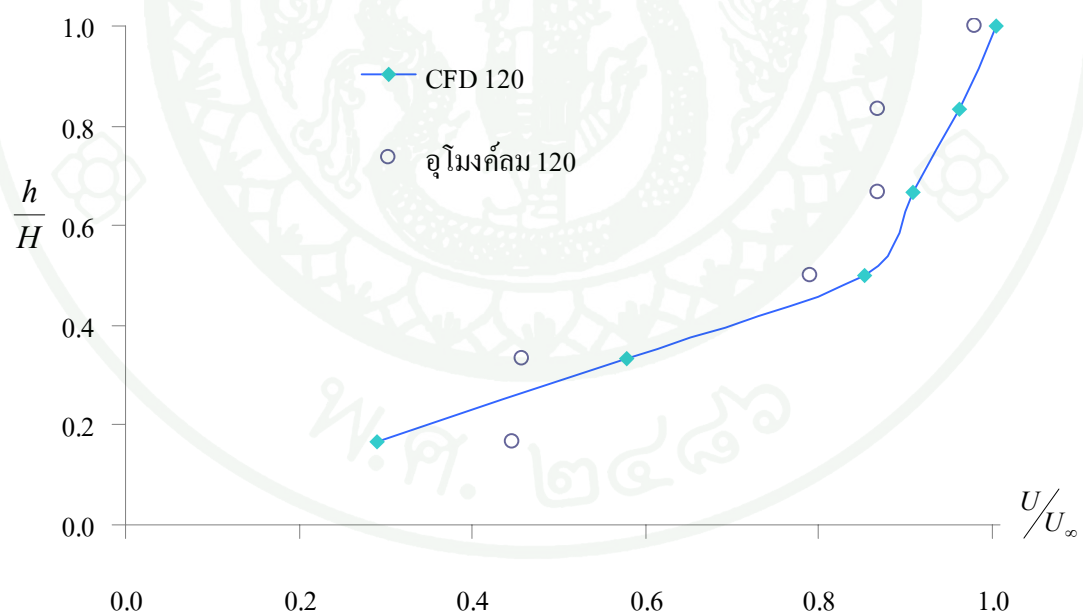
จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 120 องศา ตามภาพที่ 28 และ 30 ความเร็วลม 30 และ 40 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ โปรไฟล์ความเร็วลมระหว่างการทดลองในอุโมงค์ลม และ CFD มีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มเหมือนกัน แต่ว่าจากภาพที่ 29 ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาทีนั้น ค่าโปรไฟล์ความเร็วลมระหว่างการทดลองในอุโมงค์ลม และ CFD เริ่มมีความแตกต่างกัน เพราะว่าขณะที่ทำการทดลองในอุโมงค์ลมนั้น Probe วัดมีการสั่นเกิดขึ้น



ภาพที่ 28 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 120 องศา ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที

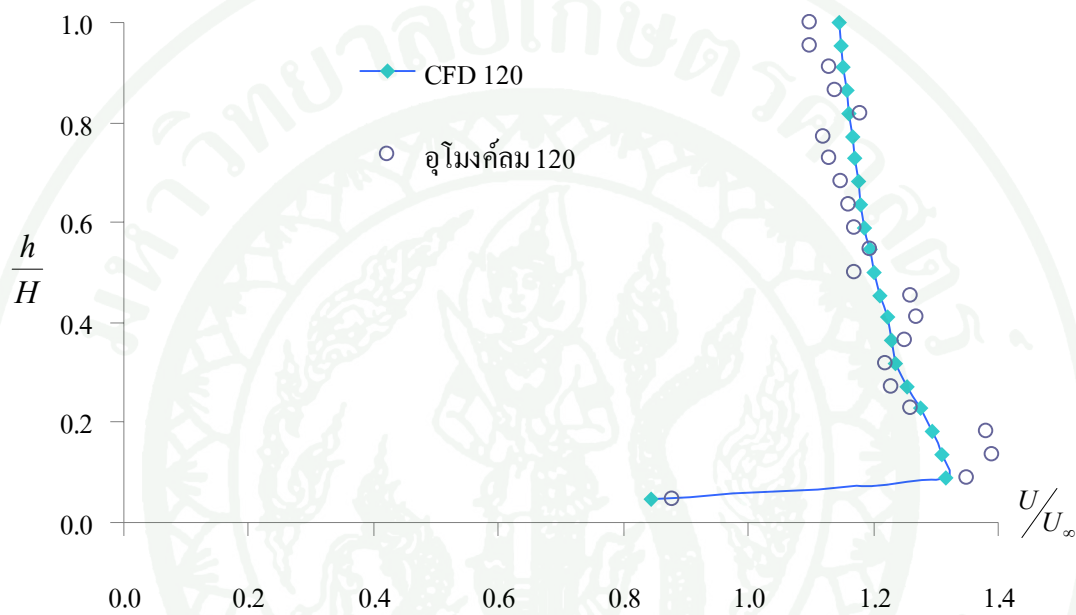


ภาพที่ 29 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 120 องศา ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที

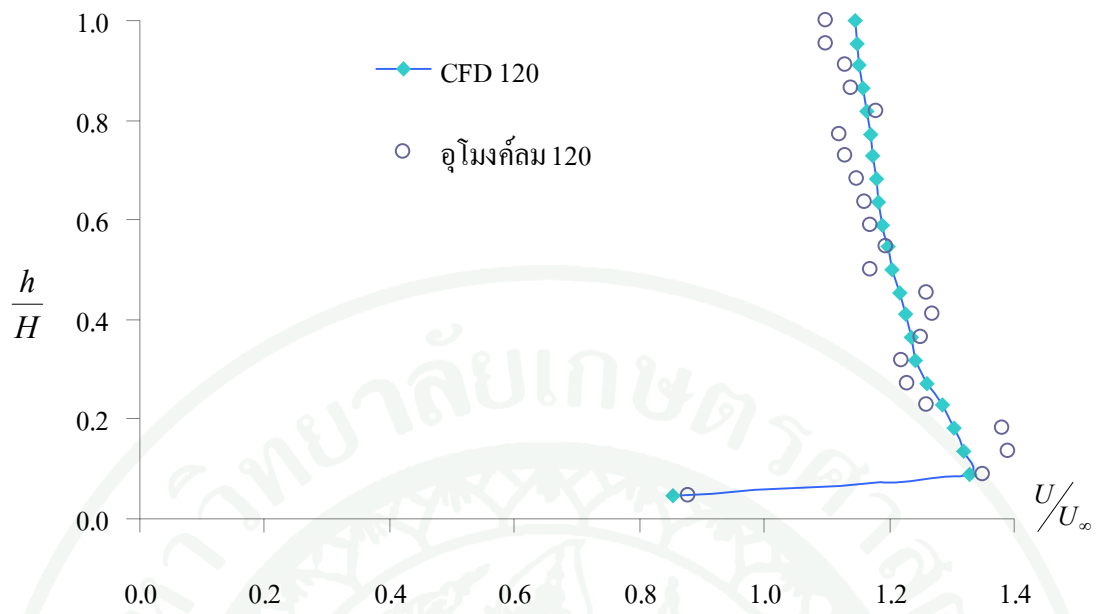


ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 2 ทิศทางลม 120 องศา ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที

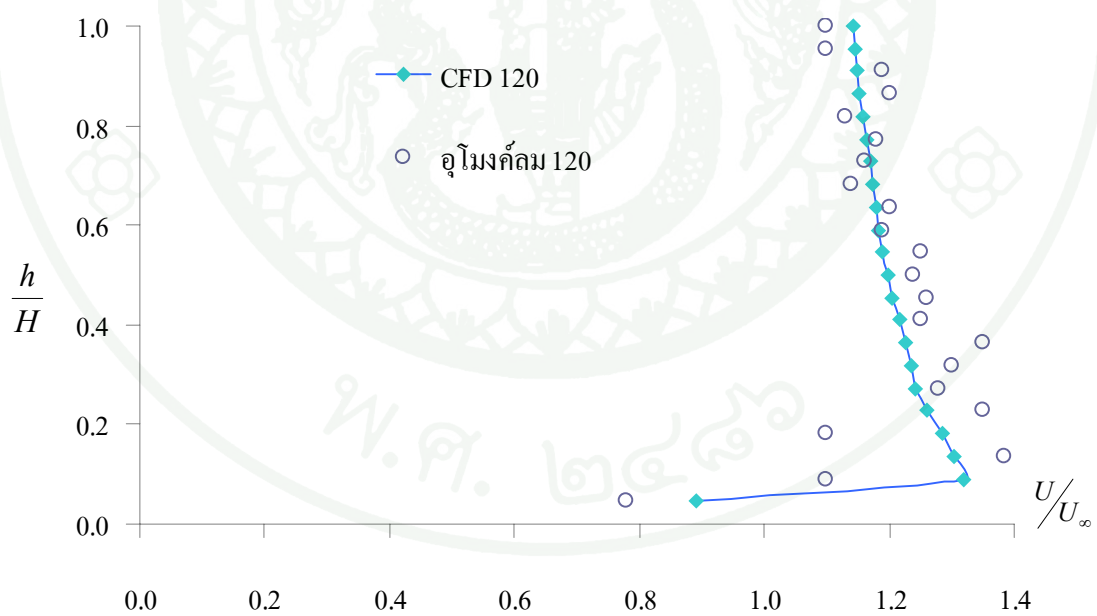
จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 120 องศา ตามภาพที่ 31 และ 32 ความเร็วลม 30 และ 40 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ โปรไฟล์ความเร็วลมระหว่าง การทดลองในอุโมงค์ลม และ CFD มีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มเหมือนกัน แต่จากภาพที่ 33 ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาทีนั้น ค่าโปรไฟล์ความเร็วลมระหว่างการทดลองในอุโมงค์ลม และ CFD เริ่มมีความแตกต่างกันเพราะว่าขณะที่ทำการทดลองในอุโมงค์ลมนั้น Probe วัดมีการสั่นเกิดขึ้น



ภาพที่ 31 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 120 องศา ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที

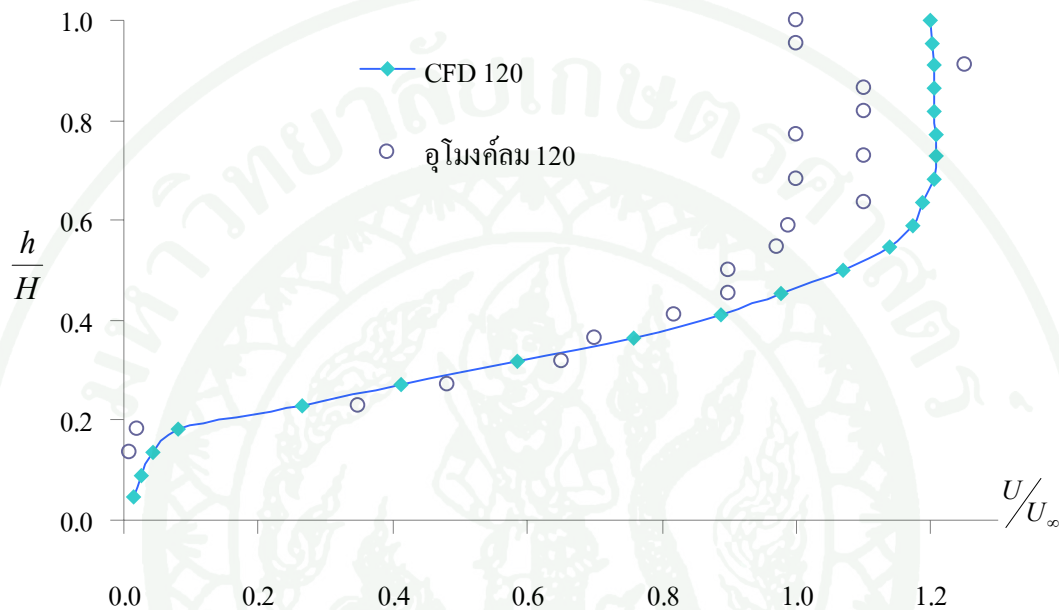


ภาพที่ 32 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 120 องศา ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที

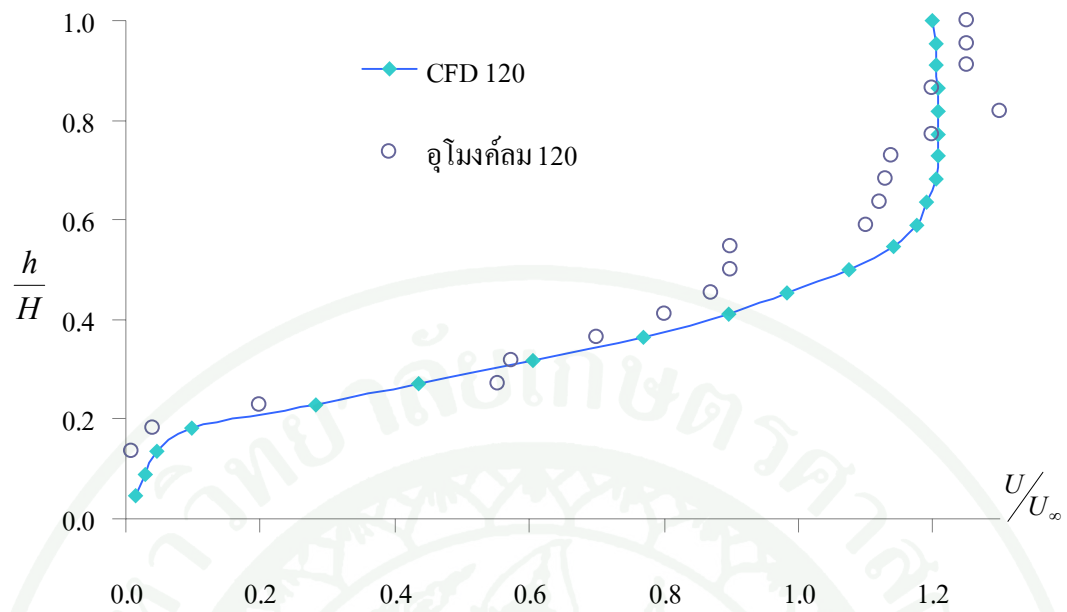


ภาพที่ 33 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 3 ทิศทางลม 120 องศา ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที

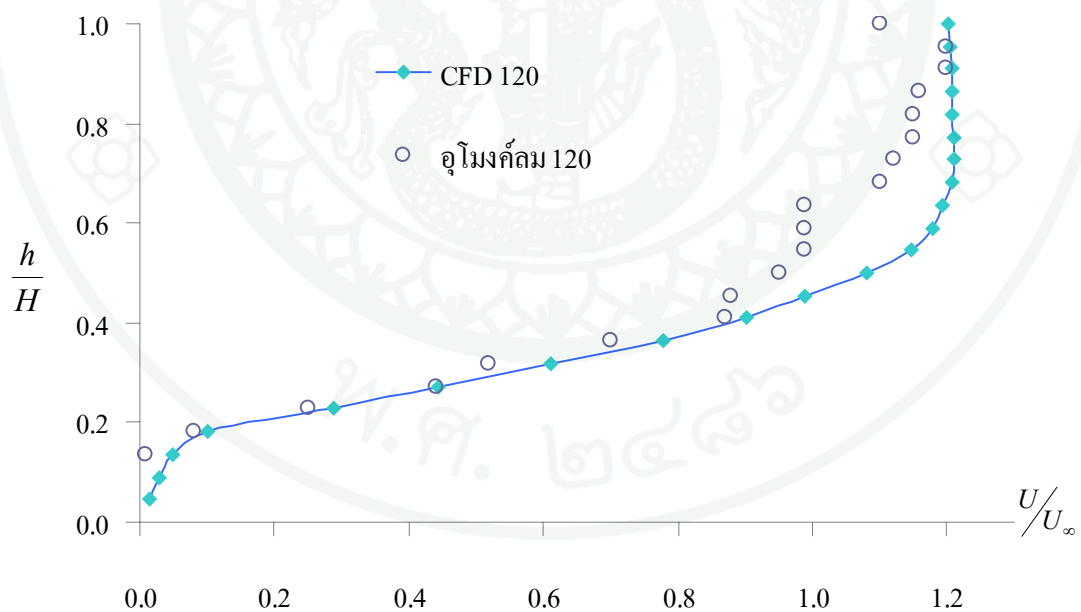
จุดวัดที่ 4 ตามภาพที่ 4-24 นั้นเป็นจุดด้านหลังภูเขาที่ใกล้พื้นผิว แต่ที่ความสูงตั้งแต่ 0.4 เท่าของภูเขาขึ้นไปนั้นมีความเร็วของอากาศที่ได้จากอุโมงค์ลมและ CFD เริ่มมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เพราะว่า ขณะทดลองเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องทำให้อุโมงค์ลมปิดตัวลงอย่างกะทันหัน เมื่อทำการแก้ไขและเริ่มเดินเครื่องอุโมงค์ลมอีกครั้ง ความเร็วลมที่ออกจากอุโมงค์ลมจึงไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 34 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 4 ทิศทางลม 120 องศา ความเร็วลม 30 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 35 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 4 ทิศทางลม 120 องศา ความเร็วลม 40 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วลม ณ จุดวัดที่ 4 ทิศทางลม 120 องศา ความเร็วลม 50 เมตรต่อวินาที

## วิจารณ์

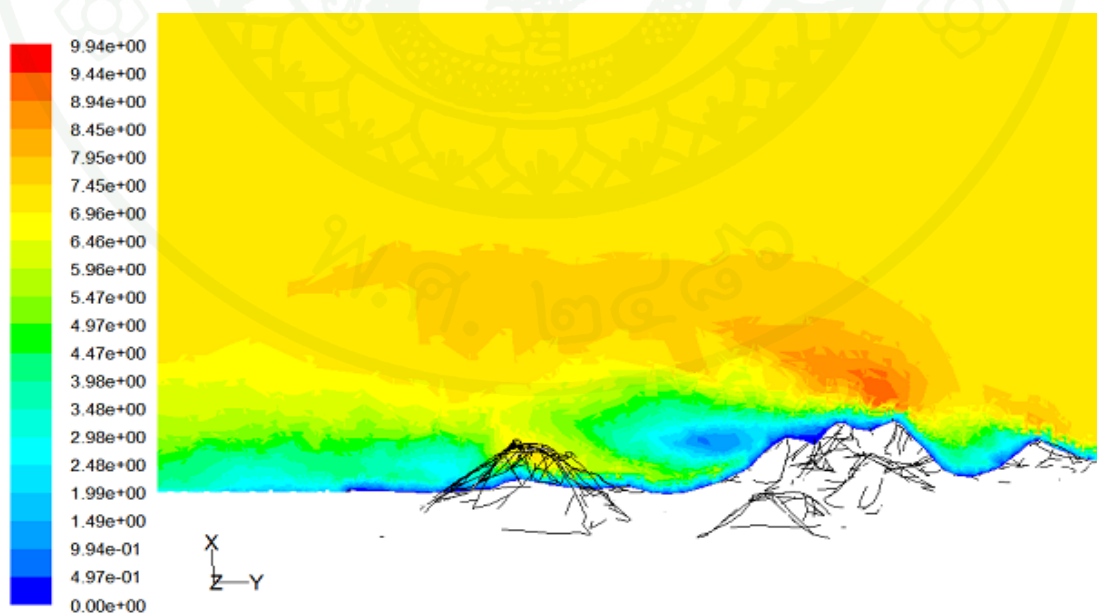
จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหล CFD และผลการทดลองในอุโมงค์ลม สำหรับค่าโพไรไฟลัความเร็วลม พบว่า หลายจุดมีค่าความคลาดเคลื่อนกัน โดยเฉพาะบริเวณที่เกิดการไหลย้อนกลับหรือไหลวน ทั้งนี้ มีสาเหตุอันเนื่องมาจาก Hot wire นั้น สามารถวัดความเร็วลมเฉลี่ยได้เพียงแกนเดียว เมื่อทำการทดลองในอุโมงค์ลมเป็นเวลานานจะทำให้ Hot wire เกิดความล้า และการทดลองแต่ละครั้งที่มีการเปลี่ยนจุดวัดจะต้องหยุดการทำงานของอุโมงค์ลม เพราะอุโมงค์ลมไม่สามารถเลื่อนตามยาวโดยอัตโนมัติได้ แล้วต้องรอให้เครื่องทำงานจนความเร็วลมคงที่ก่อน ประมาณ 20 นาที ในส่วนของการจำลองการไหลในโปรแกรม Fluent นั้น ก็อาจจะเนื่องจากความซับซ้อนของส่วนโค้งของภูเขา ทำให้การสแกนภูเขาสามมิติให้เป็นไฟล์ที่ใช้จำลองในโปรแกรมนั้น บางจุดมีพื้นผิวที่ไม่สามารถสแกนได้ ทำให้การไหลของอากาศผ่านจุดนั้น มีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามในภาพรวมและค่าโพไรไฟลัความเร็วที่ได้ส่วนใหญ่มีค่าสอดคล้องกัน ดังนั้น การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน รวมถึงการตั้งค่าขอบเขตเงื่อนไขในการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม CFD จึงมีความถูกต้องแม่นยำ

จากผลการวิเคราะห์และจำลองการไหลของอากาศแบบ Full scale ทำให้สามารถวิเคราะห์จุดที่จะทำการบินผ่านหรือลงจอดได้ดังต่อไปนี้

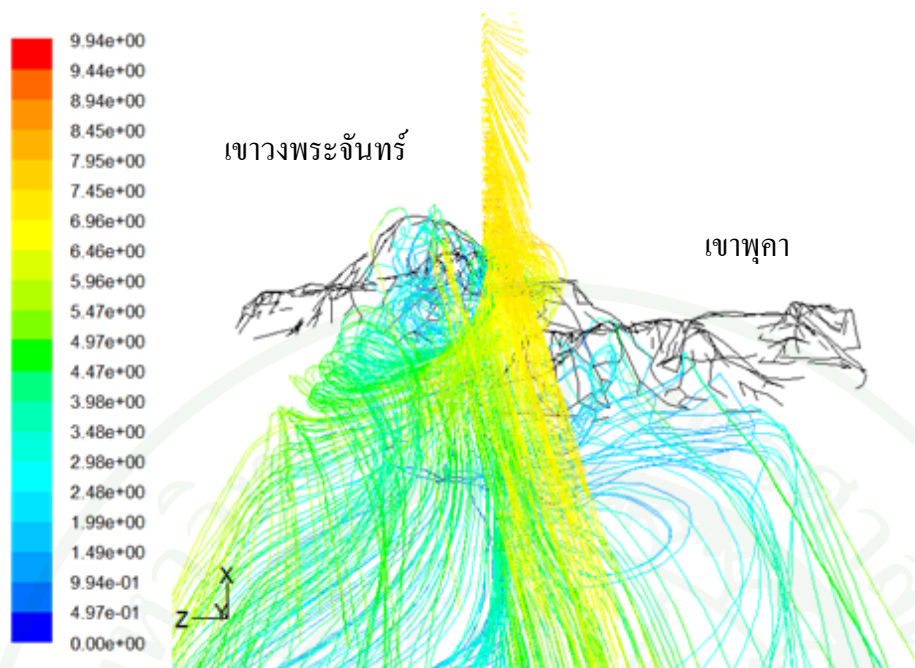
ณ จุดที่ 2 เป็นจุดที่ทำการฝึกซ้อม ตามภาพที่ 4-27 ความเร็วของอากาศที่เป็น Free Stream อยู่ที่ 7 เมตรต่อวินาที (13.6 นอต) ช่วงความสูงตั้งแต่ผิวพื้นจนถึงประมาณ 84 เมตร ความเร็วลมประมาณ 4-6 เมตรต่อวินาที (7-11.7 นอต) ดังภาพที่ 41 ซึ่งเป็นภาพมองจากด้านบนที่ความสูงประมาณ 70 เมตร จากพื้นนั้นมีผลกระทบต่ออากาศยานไม่มากแต่ก็ควรบินและนำเครื่องลงจอดด้วยความระมัดระวัง เพราะอากาศมีการหมุนวนและมีทิศทางพุ่งลง ดังภาพที่ 38 และที่ความสูงไม่เกิน 84 เมตรนั้น สามารถทำการบินลัดเลาะดังภาพที่ 40 ได้ แต่ถ้าความสูงเกินกว่านี้จะเป็นอันตรายต่อการบิน เนื่องจากความเร็วของอากาศมีค่าสูงขึ้นประมาณ 7-8 เมตรต่อวินาที (13.6-15.5 นอต) กระเจายออกเป็นพื้นที่กว้าง ดังภาพที่ 42 และ 43 อาจส่งผลทำให้อากาศยานเสียท่าทางการบินได้

ณ จุดที่ 3 ด้านบนยอดเขาพูคา และ 4 ด้านบนยอดเขาพูคา และด้านหลังเขาพูคา ตามลำดับ เป็นจุดสำหรับฝึกการลงจอด ตามภาพที่ 44 นั้น แสดง Contours ของความเร็วอากาศ Full Scale ความเร็วของอากาศที่เป็น Free Stream 7 เมตรต่อวินาที (13.6 นอต) จากภาพจะเห็นว่ามุมในการร่อนลงจอดอากาศยานนั้นควรเป็นมุม Shallow (ประมาณ 5-12 องศา กับแนวระดับ) เพราะความเร็วของอากาศประมาณ 4-7 เมตรต่อวินาที (7.7-13.6 นอต) แต่เมื่อลงมาที่ระยะความสูงประมาณ 1.5H (210 เมตร หรือ 688 ฟิต) ห่างจากยอดเขาตามแนวราบประมาณ 2H (280 เมตร หรือ 918 ฟิต) นักบินควรระมัดระวัง เพราะที่ความสูงตั้งแต่ยอดเขาถึงความสูง 220 เมตร จะมีความเร็วของอากาศประมาณ 8-10 เมตรต่อวินาที เป็นบริเวณกว้างตลอดแนวความยาวของเขาพูคา ดังภาพที่ 42 และ 43 อีกทั้งต้องระวังอากาศยานไถลออกนอกแนวร่อนเพราะอากาศช่วงนี้เริ่มมีการไหลวน ดังภาพที่ 45 และภาพที่ 46 แต่ไม่เป็นอันตรายมากนัก เพราะความเร็วของอากาศไม่ถือว่าสูงมาก ประมาณ 3-4 เมตรต่อวินาที (5.8-7.7 นอต) จากภาพที่ 46 การบินลอยตัวที่จุดที่ 4 จะค่อนข้างลำบากเพราะอากาศบริเวณนี้มีทิศทางพุ่งขึ้น

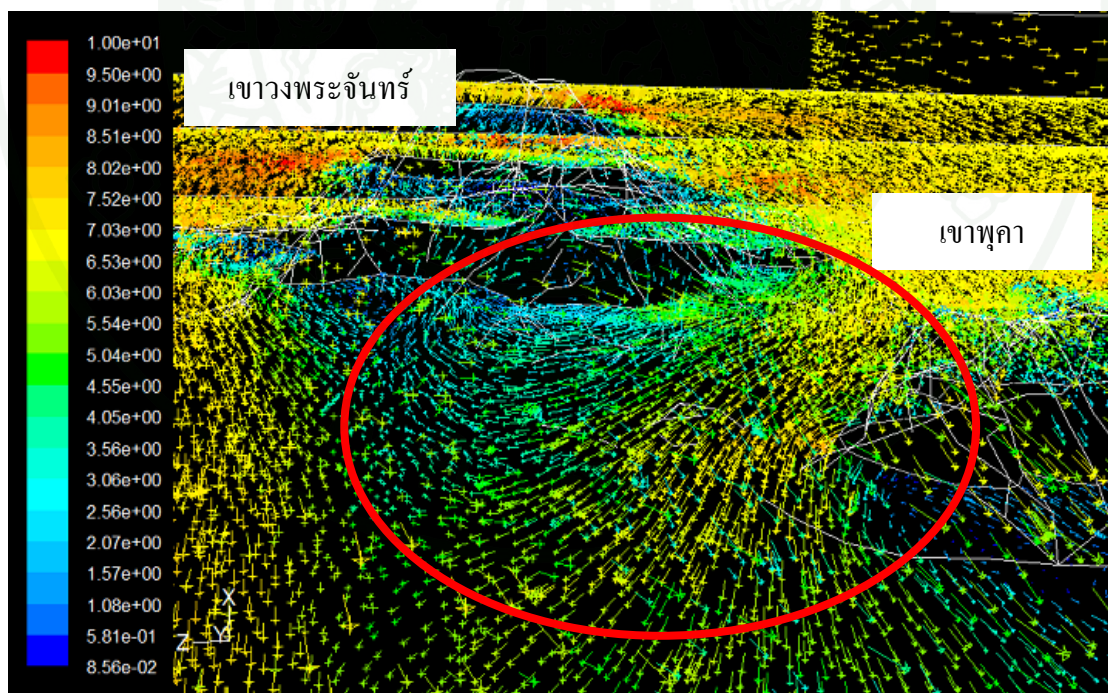
นอกจากนี้นักบินควรหลีกเลี่ยงการร่อนลงด้วยมุม Steep (ประมาณ 15-20 องศา กับแนวตั้ง) ดังภาพที่ 44 เนื่องจากว่าอากาศที่ผ่านเขาพูคาในช่วงความสูง จากยอดเขา ถึง 4H (440 เมตร หรือ 1443.6 ฟิต) มีความเร็วประมาณ 7.5-8 เมตรต่อวินาที (14.6-15.6 นอต) เพราะต้องใช้กำลังเครื่องยนต์สูง เปิดมุมปะทะของใบพัดหลักอากาศยานจนสุด ใบพัดหลักอาจเกิดการสูญเสียแรงยก ทำให้ที่ระยะ 50 ฟิต ก่อนถึงยอดเขา มีโอกาสสัมผัสพื้นโดยการกระแทก



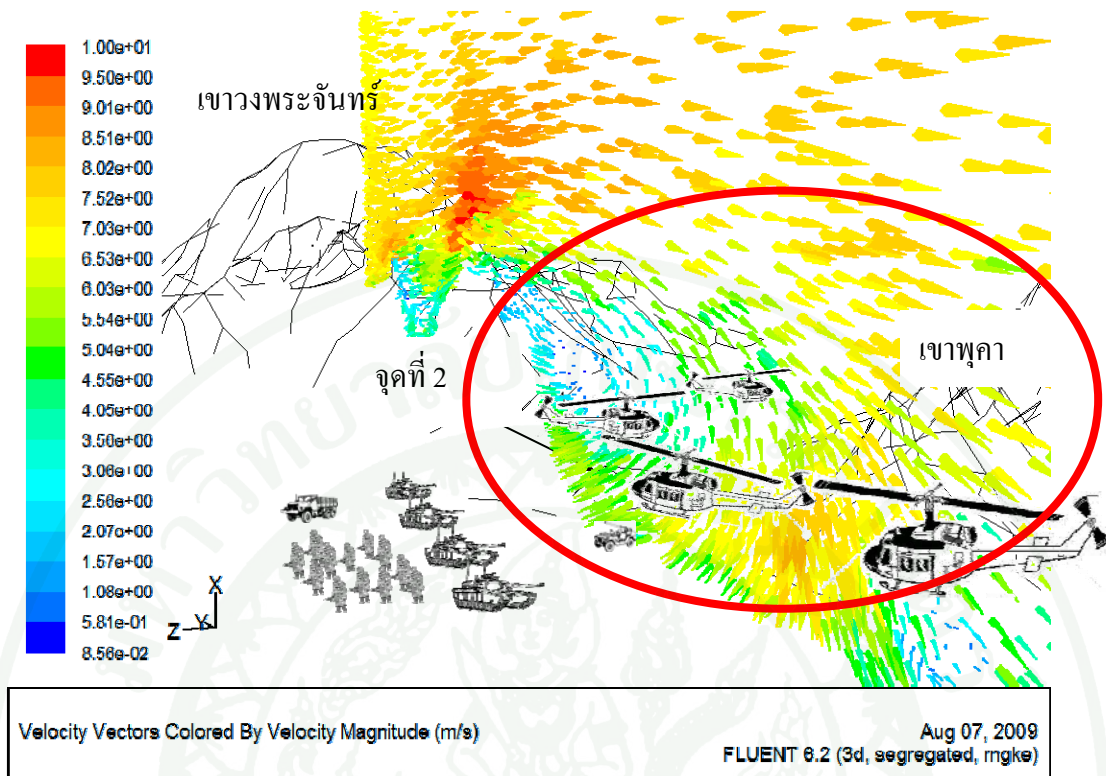
ภาพที่ 37 ภาพ Contours of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg plane 2



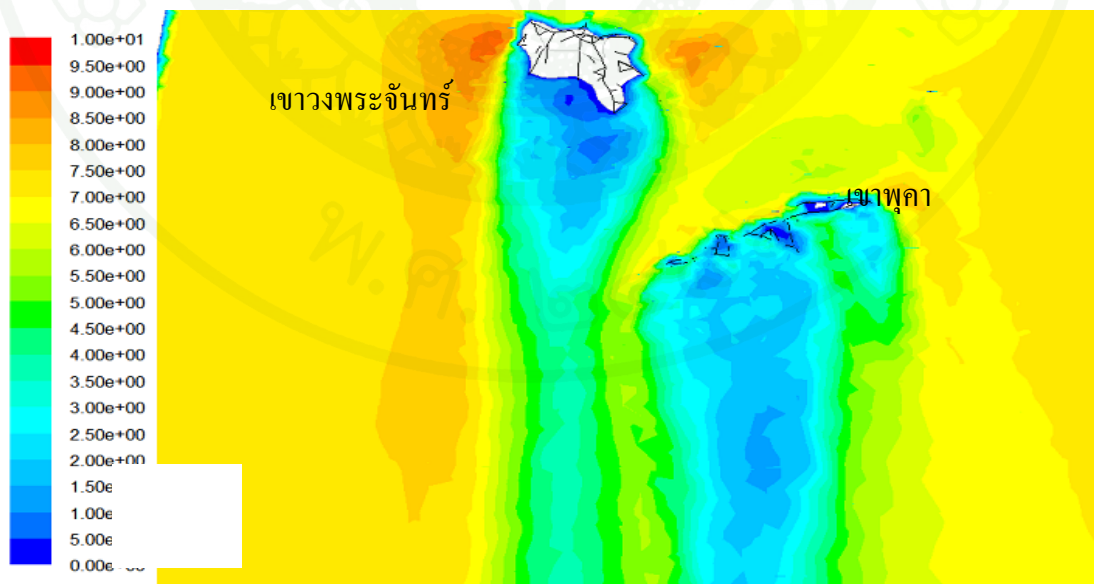
ภาพที่ 38 ภาพ Path line of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg plane 2



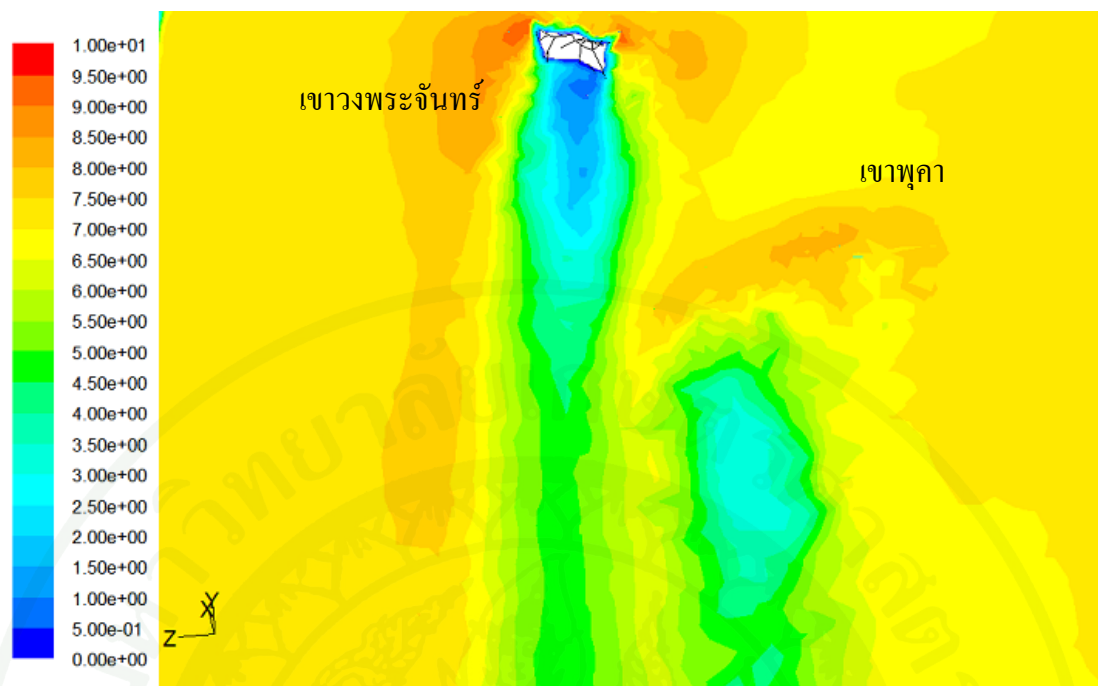
ภาพที่ 39 ภาพ Vector of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg ระหว่างเขาพุกาและ  
เขาวงพระจันทร์ บริเวณ จุดวัดที่ 2



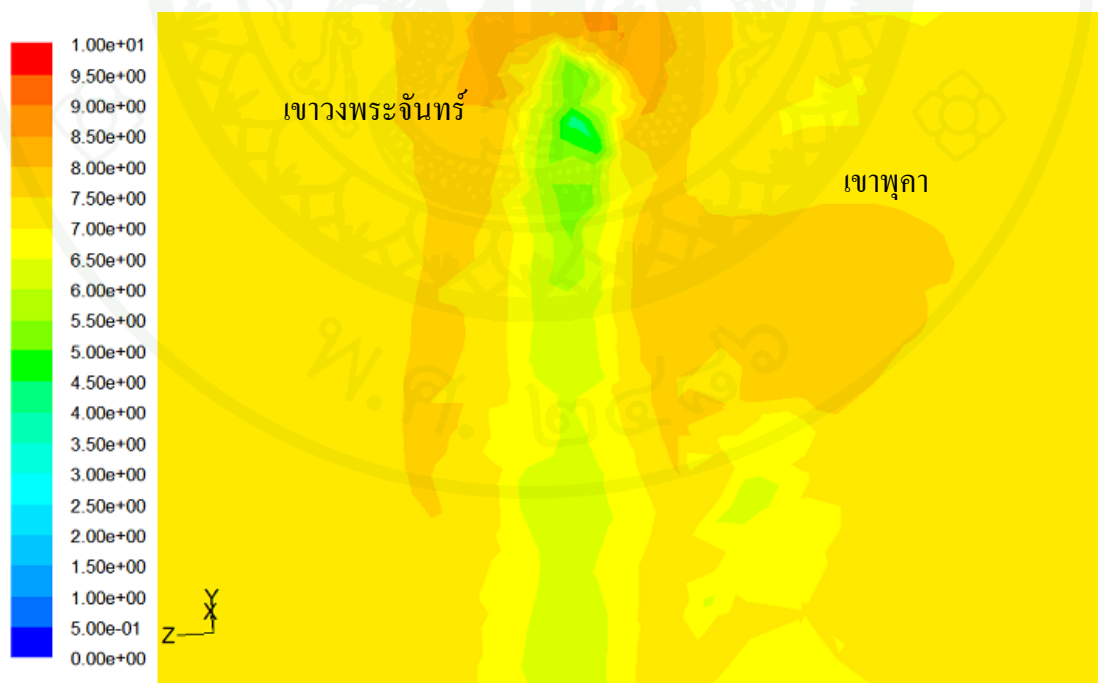
ภาพที่ 40 ภาพ Vector of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg และแสดงลักษณะการบิน ลัดเลาะตามภูมิประเทศ บริเวณ จุดวัดที่ 2



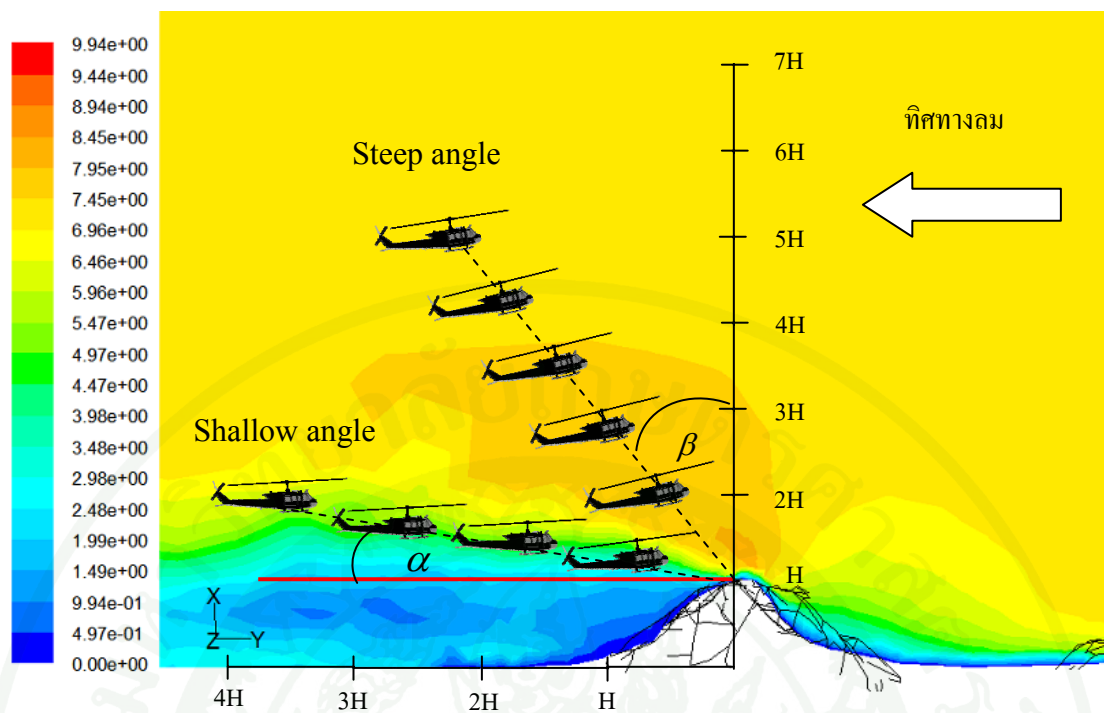
ภาพที่ 41 ภาพ Contours of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg มองจากด้านบน ความสูง 70 เมตร จากพื้นดิน



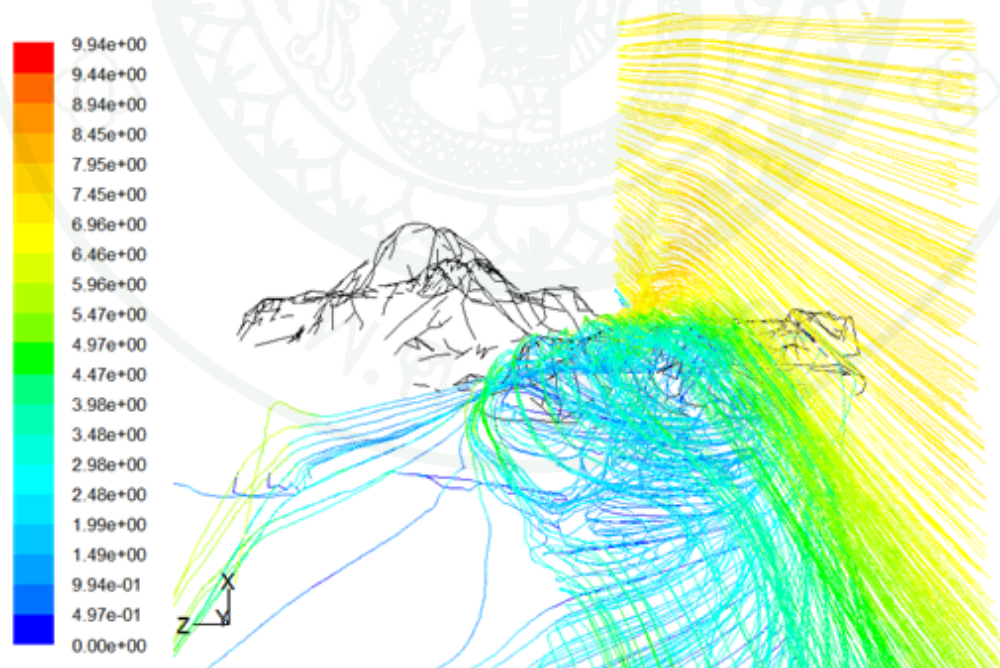
ภาพที่ 42 ภาพ Contours of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg มองจากด้านบน  
ความสูง 110 เมตร จากยอดเขาพูกา



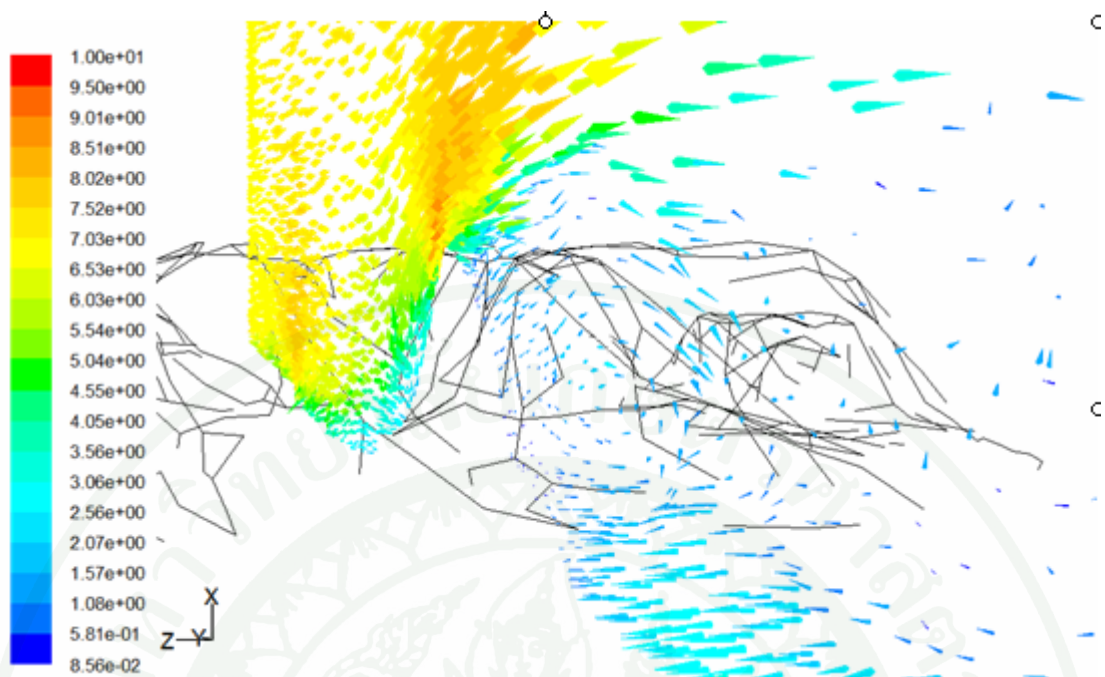
ภาพที่ 43 ภาพ Contours of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg มองจากด้านบน  
ความสูง 220 เมตร จากยอดเขาพูกา



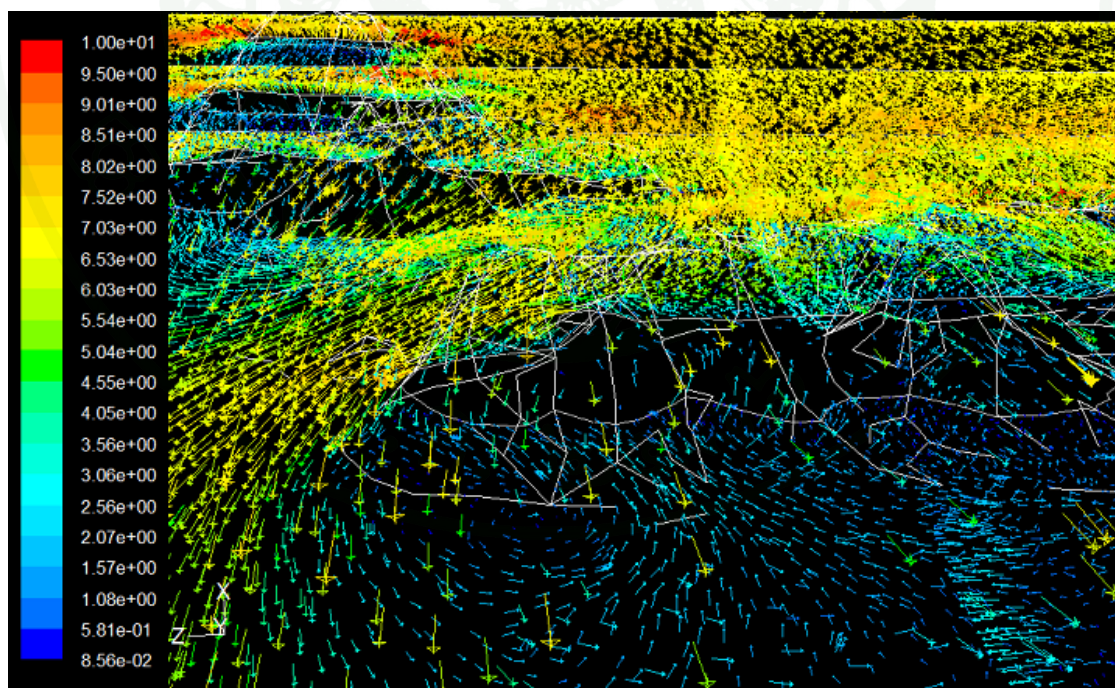
ภาพที่ 44 ภาพ Contours of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg plane 3 และแนวการร่อนลงจอดที่ Shallow angle ( $\alpha$ ) มีค่าระหว่าง 5-12 องศา และ Steep angle ( $\beta$ ) มีค่าระหว่าง 15-20 องศา



ภาพที่ 45 ภาพ Path line of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg plane 3



ภาพที่ 46 ภาพ Vector of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg plane 3



ภาพที่ 47 ภาพ Vector of velocity magnitude Full scale 7 m/s 90 deg ด้านหลังเขาพูกา

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า จากแบบจำลองอัลกอริทึม RNG k-E กับ standard and SIMPLEC ในการคำนวณ การไหลของอากาศผ่านเขาพุคา ซึ่งมีทิศทางลมที่มาปะทะเขาพุคา 90 และ 120 องศา ความเร็วลมในแบบจำลอง 30, 40 และ 50 เมตรต่อวินาที ณ จุดลงจอดสามจุด จากผลการศึกษาวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าโปรไฟล์ความเร็วของอากาศที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ กับการทดลองในอุโมงค์ลม นั้น มีแนวโน้มที่สอดคล้องไปในทางเดียวกัน แต่ไม่สามารถระบุได้ถึงความเร็วที่แม่นยำได้ จึงสรุปได้ว่าสามารถนำเอาผลที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ไปทำนายแนวโน้มการไหลของอากาศผ่านเขาพุคาได้ดังนี้

1. จุดวัดที่ 2 ควรทำการบินและนำเครื่องลงจอดด้วยความระมัดระวัง สามารถทำการบินลดละได้ที่ความสูงไม่เกิน 84 เมตร (275 ฟุต) โดยประมาณ
2. จุดวัดที่ 3 และ 4 ด้านบนยอดเขาพุคา และด้านหลังเขาพุคา มุมในการร่อนลงจอด อากาศยานนั้น ควรเป็นมุม Shallow (ประมาณ 5-12 องศา กับแนวระดับ) ที่ระยะความสูงประมาณ 1.5H (210 เมตร หรือ 688 ฟุต) ห่างจากยอดเขาตามแนวราบประมาณ 2H (280 เมตร หรือ 918 ฟุต) นักบินควรระมัดระวังอากาศยานไถลออกนอกแนวร่อนเพราะอากาศช่วงนี้เริ่มมีการไหลวน นักบินควรหลีกเลี่ยงการร่อนลงด้วยมุม Steep (ประมาณ 15-20 องศา กับแนวตั้ง) ช่วงความสูง จากยอดเขา ถึง 4H (440 เมตร หรือ 1443.6 ฟุต) เพราะจะต้องใช้กำลังเครื่องยนต์สูง ต้องเปิดมุมปะทะของใบพัดหลักอากาศยานจนสุด ใบพัดหลักเกิดการสูญเสียแรงยก ทำให้มีโอกาสสัมผัสพื้นโดยการกระแทก

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรจะมีการใช้ Hot wire ที่สามารถวัดความเร็วของอากาศได้ 3 แกน เพื่อจะสามารถเปรียบเทียบความเร็วกับแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้ดีและแม่นยำยิ่งขึ้น
2. ในการทำแบบจำลองภูเขาควรต้องมีการเคลือบผิวทราซของแบบจำลองให้มีความสม่ำเสมอ
3. แบบจำลองที่ใช้ในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เมื่อได้มีการสแกนจากแบบจำลองภูเขาแล้ว มีการแก้ไขพื้นผิวบางส่วนที่มีการซ้อนทับกัน และการสร้างพื้นผิวขึ้นมาใหม่นั้นไม่มีความละเอียดมากนัก ซึ่งจะต้องปรับพื้นผิวในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ใหม่ให้มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด
4. สำหรับการทดลองในอุโมงค์ลมการใช้ Hot wire ไม่ควรใช้ติดต่อเนื่องกันเป็นเวลานาน ต้องมีการหยุดเพื่อให้ Hot wire เย็นตัวลง

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

แผนกวิชาทั่วไป กองการศึกษา โรงเรียนการบินทหารบก. 2549. อุดุนิยมวิทยาการการบินทหารบก.  
โรงเรียนการบินทหารบก, ลพบุรี.

แผนกวิชายุทธวิธี กองการศึกษา โรงเรียนการบินทหารบก. 2546. การบินโดยอาศัยลักษณะ  
ภูมิประเทศ. โรงเรียนการบินทหารบก, ลพบุรี.

วรารัตน์ จันทสาโร. 2548. วิธีปริมาตรจำกัดสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Abe, K., Y. Nagano and T. Kondoh. 1993. Numerical prediction of separating and reattaching  
flows with a modified low-Reynolds-number  $k-\epsilon$  model. **Journal of Wind  
Engineering and Industrial Aerodynamics** 47: 85-94.

Boussinesq. 1877. Theorie de l'ecoulement tourbillant. **Mem. Presentes par divers Savants  
Acad. Sci. Inst. Fr.** 23: 45-50.

Britter, R.E., J.C.R. Hunt and K.J. Richards. 1981. Air flow over a two-dimensional hill: Studies  
of velocity speed-up, roughness effects and turbulence. **Quarterly Journal of  
the Royal Meteorological Society** 107: 91-100.

Brutsaert, W.H. 1982. **Evaporation into the Atmosphere**. D. Reidel, New York.

Calder, K.L. 1949. Eddy diffusion and evaporation in flow over aerodynamically smooth and  
rough surfaces: A treatment based on laboratory laws of turbulent flow with special  
reference to conditions in the lower atmospheres. **Quarterly Journal of Mechanics and  
Applied Mathematics** 2 (2): 154-125.

- Castro, I.P. and W.H. Snyder. 1982. A wind tunnel study of dispersion from sources downwind of three-dimensional hills. **Atmospheric Environment** 16: 1869-1887.
- Clarke, R.H. and G.D. Hess. 1973. On the appropriate scaling for velocity and temperature in The planetary boundary layer. **Journal of Atmospheric Science** 30: 1346-1353.
- Derbyshire, S.H. and N. Wood. 1994. The sensitivity of stable boundary layers to small slopes And other influences. **Institute of mathematics and its applications conference series**. 52: 105-118.
- Derickson, R.G. and J.A. Peterka. 2004. **Development of a powerful hybrid tool for evaluating wind power in complex terrain: Atmospheric numerical models and wind tunnels**. AIAA.
- Durbin, P.A. 1993. A Reynolds stress model for near-wall turbulence. **Journal of Fluid Mechanics** 249: 465-498.
- Eidsvik, K.J. and T. Utnes. 1997. Flow separation and hydraulic transitions over hills modeled by the Reynolds equations. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 67-86: 404-363.
- Farell, C. and A.K.S. Iyengar. 1999. Experiments on wind tunnel simulation of atmospheric boundary layers. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. 79: 11-35.
- Garratt, J.R. 1992. **The Atmospheric Boundary Layer**. Cambridge University Press, New York.

- Gosman, A.D. 1999. Developments in CFD for industrial and environmental application in wind engineering. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 81: 21-39.
- Hanjalic, K. 1994. Advanced turbulence closure models: a view of current status and future trends. **International Journal of Heat and Fluid Flow** 15: 178.
- Hunt, J.C.R. and J.M.R. Snyder. 1980. Free stream turbulence near plane boundaries. **Journal of Fluid Mechanics** 212: 497-532.
- \_\_\_\_\_, S. Leibovich and K.J. Richards. 1991. Turbulent shear flow over low hills. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society** 114: 1435-1470.
- Ishihara, T. and K. Hibi. 2000. Numerical study of turbulent wake flow behind a three-dimensional steep hill. **Computational Wind Engineering** 2000.
- \_\_\_\_\_. 2002. Numerical study of turbulent wake flow behind a three-dimensional steep hill. **Wind and structures** 5: 317-328.
- \_\_\_\_\_ and S. Oikawa. 1999. A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional steep hill. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 83: 95-107.
- Iyengar, A.K.S. and C. Farrell. 2001. Experimental issues in atmospheric boundary layer simulations: roughness length and integral length scale determination. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 89: 1059-1080.
- Kaimal, J.C. and J.J. Finnigan. 1994. **Atmospheric Boundary Layer Flows: Their structure and measurement**. Oxford University Press, New York.

- Kim, H.G., C.M. Lee, H.C. and N.H. Kyong. 1997. An experimental and numerical study on the flow over two-dimensional hills. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 66: 17-33.
- Kim, H.G. and V.C. Patel. 2000. Test of turbulence models for wind flow over terrain with separation and recirculation. **Boundary Layer Meteorology**. 94: 5-21.
- Kim, H.G., V.C. and C.M. Lee. 2000. Numerical simulation of wind flow over hilly terrain. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 87: 45-60.
- Kim, S.E. and F. Boysan. 1999. Application of CFD to environmental flows. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 81: 145-158.
- Kustas, W.P. and W. Brutsaert. 1986. Wind profile constants in a neutral atmospheric boundary layer over complex terrain. **Boundary Layer Meteorology** 34: 35-54.
- Launder, B.E. and B.I. Sharma, B.I. 1974. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. **International Communications in Heat and Mass Transfer** 1: 131-137.
- Lee, S.J., H.C. Lim and K.C. Park. 2002. Wind flow over sinusoidal hilly obstacles located in a uniform flow. **Wind and Structures** 5 (6): 515-526.
- Lun, Y.F., A. Mochida, S. Murakami, H. Yoshino and T. Shirasawa. 2003. Numerical simulation of flow over topographic features by revised k- $\epsilon$  models. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. 91: 231-245.
- Mason, P.J. and J.C. King. 1985. Measurements and prediction of flow and turbulence over and isolated hill of moderate slope. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society** 111: 917-640.

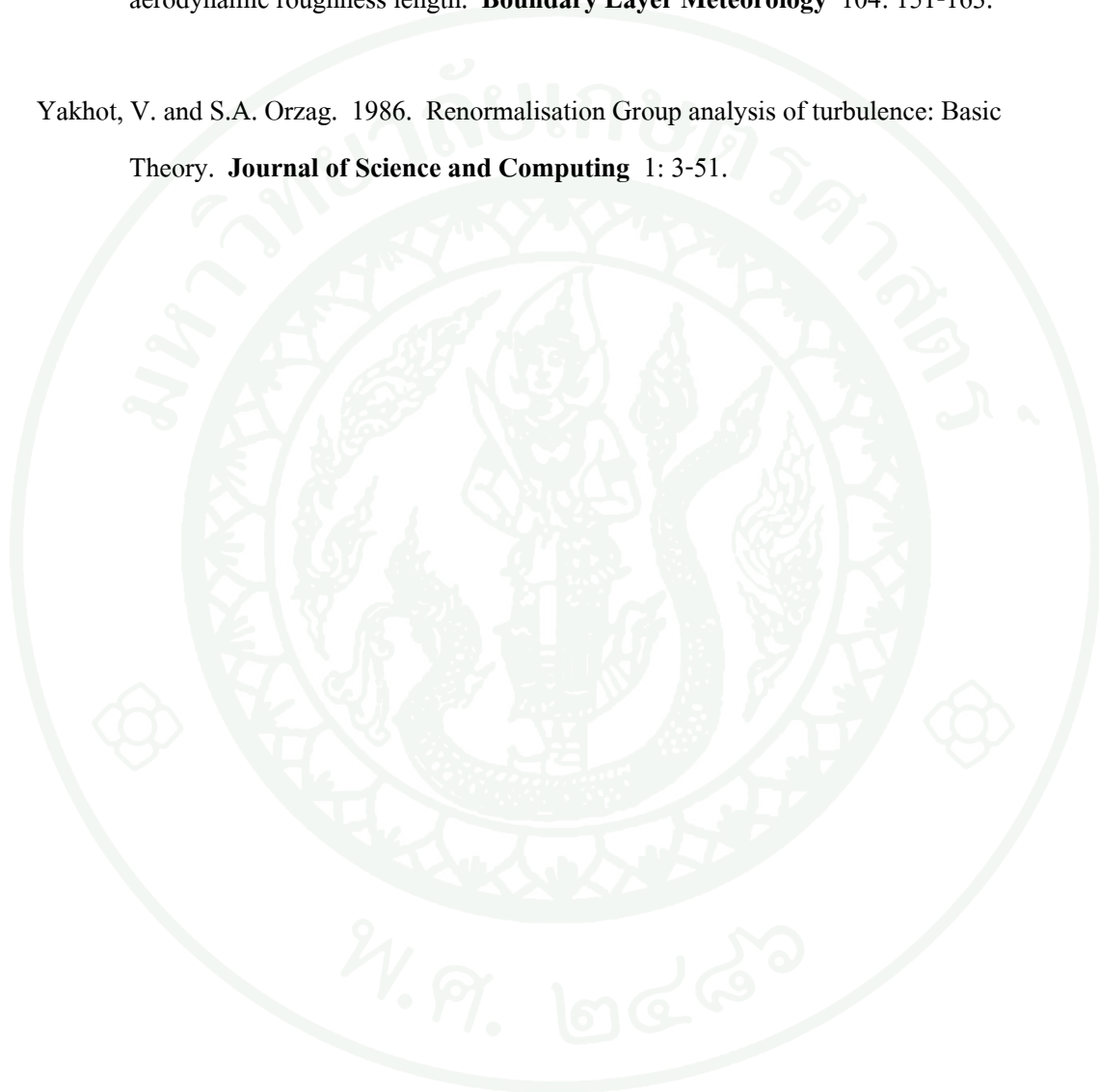
- McNaughton, K.G. and Y. Brunet. 2002. Townsend's hypothesis, coherent structures and Monin-Obukhov similarity. **Boundary Layer Meteorology** 102: 161-175.
- Montavon, C. 1998. **Simulation of Atmospheric Flows over Complex Terrain for Wind Power Potential Assessment**. Hemisphere, Washington, DC.
- Paeschke, W. 1937. Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeits-und Stabilitats problem in der bodennahen Luftschicht. **Beitrage z. Phys. d. freien. Atmos.** 24: 164-139.
- Patel, V.C., W. Rodi and G. Scheuerer. 1985. Turbulence models for near wall and low Reynolds number flows: A review. **AIAA**. 23: 1308-1319.
- Schlichting, H. 2000. **Boundary Layer Theory**. 8<sup>th</sup> ed. Springer.
- Shih, T.H., J. Zhu and J.L. Lumley. 1995. A new Reynolds stress algebraic equation model. **Computational Methods Applied to Mechanical Engineering** 125: 287-302.
- Snyder, W.H. and I.P. Castro. 2002. The critical Reynolds number for rough-wall flows. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 90: 41-54.
- Strangroom, P. 2004. **CFD Modeling of Wind Flow over Terrain**. Hemisphere, Washington, DC.
- Stubley, G.D. and G. Riopelle. 1988. The influence of the Earth's rotation on planetary boundary layer turbulence. **Boundary Layer Meteorology** 45: 307-324.
- Uchida, T. and Y. Ohya. 1999. Numerical simulation of atmospheric flow over complex terrain. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 81: 283.

Wieringa, J. 1993. Representative roughness parameters for homogeneous terrain.

**Boundary Layer Meteorology** 63: 324-314.

Xian, X., W. Tao, S. Qingwei and Z. Weinin. 2002. Field and wind-tunnel studies of aerodynamic roughness length. **Boundary Layer Meteorology** 104: 151-163.

Yakhot, V. and S.A. Orzag. 1986. Renormalisation Group analysis of turbulence: Basic Theory. **Journal of Science and Computing** 1: 3-51.



## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

|                                |                                                                              |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ-นามสกุล                   | ร้อยเอก ชีรพงษ์ บุญเดิม                                                      |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด           | วันที่ 30 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2524                                              |
| สถานที่เกิด                    | จังหวัดกาฬสินธุ์                                                             |
| ประวัติการศึกษา                | ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต<br>สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน   | อาจารย์โรงเรียนการบินทหารบก                                                  |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน           | แผนกวิชาซ่อมบำรุง กองการศึกษา<br>โรงเรียนการบินทหารบก                        |
| ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ | -                                                                            |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ           | -                                                                            |