

การวิเคราะห์และออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่งสำหรับฝึกนักโดดร่ม

ปริญญาานิพนธ์

ของ

ชัยณรงค์ อินประสิทธิ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2550

การวิเคราะห์และออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่งสำหรับฝึกนักโดดร่ม

ปริญญาโท

ของ

ชัยณรงค์ อินประสิทธิ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2550

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การวิเคราะห์และออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่งสำหรับฝึกนักโดดร่ม

บทคัดย่อ

ของ

ชัยณรงค์ อินประสิทธิ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2550

ชัยณรงค์ อินประสิทธิ์ (2550). การวิเคราะห์และออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่งสำหรับฝีกนักโดดร่ม ปรินทิพ
วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการ
ควบคุม : พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โอภาส สุขแสงพนมรุ้ง, พันเอก สุภาโชค สัมปัตตะวนิช.

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข ด้วยโปรแกรม Fluent 6.2 ในการ
ออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่งสำหรับฝีกนักโดดร่ม เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับแบบอุโมงค์ลมทางดิ่ง โดยงานวิจัยนี้จะทำ
การวิเคราะห์สภาพและความเร็วลมภายในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ตัวแปรที่จะทำการศึกษาได้แก่ตำแหน่งการติดตั้งชุดมอเตอร์
พัดลมที่ด้านล่างหรือด้านบนของอุโมงค์ลมทางดิ่ง จำนวนชุดมอเตอร์พัดลมระหว่าง 3 ชุด กับ 5 ชุด และทิศทางท่อ
ลมออกของอุโมงค์ลมทางดิ่งระหว่างแนวดิ่งกับแนวราบ โดยความเร็วลมในการไหลเข้าเป็นแบบสม่ำเสมอ ที่มีค่าเท่ากับ
45 เมตร/วินาที

ผลการวิเคราะห์พบว่า อุโมงค์ลมทางดิ่งที่ติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมด้านบน จะให้กระแสลมที่เรียบและสม่ำเสมอ
มากกว่าแบบที่มีชุดมอเตอร์พัดลมติดตั้งที่ด้านล่าง เพราะว่าช่องว่างเหนือชุดมอเตอร์พัดลมมีความเร็วลมต่ำกว่า 45
เมตร/วินาที ขณะที่ความเร็วลมตรงชุดมอเตอร์พัดลมจะสูงกว่า 45 เมตร/วินาที ดังนั้นความเร็วลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง
จึงไม่สม่ำเสมอ ยกต่อการฝีกลอยตัว สำหรับกรณีติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมด้านบน 3 ชุด กับการติดตั้งชุดมอเตอร์พัด
ลมด้านบน 5 ชุดนั้น ผลของการกระจายของความเร็วไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ส่วนทิศทางท่อลมออกแนวดิ่ง
บริเวณด้านบนของอุโมงค์ลมทางดิ่งนั้น ให้ความเร็วลมสูงกว่าท่อลมออกในแนวราบประมาณ 6.15 เปอร์เซ็นต์ แต่สภาพ
กระแสลมมีความเรียบและสม่ำเสมอน้อยกว่า โดยเฉพาะบริเวณ 0.4 เมตร จากผนังโดยรอบ

**DESIGN AND ANALYSIS OF A VERTICAL WIND TUNNEL
FOR PARACHUTIST'S TRAINING**

AN ABSTRACT
BY
CHAINARONG INPRASIT

Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Engineering degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

May 2007

Chainarong Inprasit. (2007). *Analysis and Design of a Vertical Wind Tunnel for Parachutist's Training*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok : Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee : Lt. Col.Assist. Prof. Dr. Anotai Suksangpanomrung, Col.Supachok Sumputtavanich.

In this research, numerical analysis and design with Fluent 6.2 for a vertical wind tunnel for parachutist's training was investigated by analyzing the condition and wind speed inside the vertical wind tunnel. The position of fans (top or bottom), the number of fans (3 or 5) , and the direction of air outlet (vertical or horizontal) of a vertical wind tunnel were considered with 45 m/s wind velocity.

The analysis result found that the wind tunnel with fans at top position produce smoother and uniform wind than bottom position. Because at bottom position, the wind velocity over gap area between each fans was lower than 45 m/s, while the wind velocity over each fans area was higher than 45 m/s. So that the wind velocity in the vertical wind tunnel was not uniform and difficult for training.

For the case of 3 and 5 fans, the analysis result found that the number of fans showed no difference for velocity distribution between them on the top position.

For the case of air outlet direction, the analysis result found that the wind velocity of vertical direction air outlet was higher than horizontal direction air outlet for 6.15 percent. But the vertical air outlet produced less smooth and constant velocity than the horizontal air outlet. Especially annular area 0.4 m from wall.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การวิเคราะห์และออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่งสำหรับฝึกนักโดดร่ม
ของ
ชัยณรงค์ อินประสิทธิ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญสิริ จีระเดชากุล)

วันที่ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2550

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

..... ประธาน

(พ.ท.ยศ.ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

..... กรรมการ

(พ.อ.สุภโชค สัมปัตตะวนิช)

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน

(น.ต.ดร.โอฐศิลป์ นิลบุล)

..... กรรมการ

(พ.ท.ยศ.ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

..... กรรมการ

(พ.อ.สุภโชค สัมปัตตะวนิช)

..... กรรมการ

(ผศ.วิชิต บัวแก้ว)

ประกาศขอบคุณ

ปริญญาโทฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง ประชานกรรมการควบคุมการทำปริญญาโท พันเอกสุภโชค สัมปัตตะวนิช กรรมการควบคุมการทำปริญญาโท นาวาอากาศตรี ดร.โอฬาสีลป์ นิลุบล ประชานกรรมการสอบปากเปล่า ซึ่งท่านกรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบความถูกต้องเหมาะสมของปริญญาโท รวมทั้งแนวทางดำเนินงานวิจัย การแก้ไขปัญหาต่างๆ และกำลังใจ ผู้วิจัย ขอขอบคุณในความกรุณาจากท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว ดร.ไพศาล นานผล รวมทั้งคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ของสาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้คำปรึกษาและให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม Fluent 6.2 เพื่อใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณ พันเอกอาจศึก สุวรรณธาดา รองผู้อำนวยการโรงเรียนสงครามพิเศษ ศูนย์สงครามพิเศษ และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ให้ความกรุณาเข้าชมเพื่อศึกษาและรับทราบข้อมูลของเครื่องช่วยฝึก เทคโนโลยีสูงอุโมงค์ลมทางดิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ขอขอบคุณ ภรรยา บุตร และเพื่อนร่วมงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตตาก ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจ ขอขอบคุณเพื่อนนิสิตร่วมโครงการความร่วมมือหลักสูตรปริญญาโท มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า สาขาวิศวกรรมเครื่องกล รุ่นที่ 3 ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ

ชัยณรงค์ อินประสิทธิ์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
สมการการไหลต่อเนื่อง.....	5
สมการโมเมนตัม.....	6
สมการพลังงานในการไหลสภาวะคงตัว.....	7
ความสูงลำของไหล.....	7
ชนิดการไหล.....	8
พลังงานสูญเสีย.....	8
ทฤษฎีโมเมนตัมของใบพัด.....	12
สมการแรงจุด.....	15
บทปริทัศน์วรรณกรรม.....	18

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า	
3	วิธีดำเนินการวิจัย	25
	ออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่ง.....	25
	คำนวณหาความเร็วลมที่จะสามารถยกทหารพลร่มให้ลอยทางดิ่งได้.....	25
	คำนวณหาปริมาณลมที่ไหลผ่านอุโมงค์ลมทางดิ่ง.....	27
	คำนวณหากำลังงานชุดมอเตอร์พัดลม.....	28
	ชื่อและความหมายอุโมงค์ลมทางดิ่ง.....	32
	ลักษณะและขนาดอุโมงค์ลมทางดิ่ง.....	34
	จำนวนชุดมอเตอร์พัดลม.....	34
	วิเคราะห์เปรียบเทียบหาขนาดกริดที่เหมาะสม.....	35
	วิธีการตีกริด	36
	การเปรียบเทียบขนาดของกริด	41
	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาขนาดของกริดที่เหมาะสม.....	41
4	ผลการวิเคราะห์ความเร็วลมและสภาพกระแสลมของอุโมงค์ลมทางดิ่ง.....	47
	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาตำแหน่งติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม ระหว่างด้านบน กับด้านล่างของอุโมงค์ลมทางดิ่ง.....	47
	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาจำนวนชุดมอเตอร์พัดลม ระหว่าง 3 ชุด กับ 5 ชุด อุโมงค์ลมทางดิ่ง	54
	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาทิศทางท่อลมออก ระหว่างแนวดิ่งกับแนวราบ อุโมงค์ลมทางดิ่ง.....	60

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	66
สรุปผลการวิจัย.....	66
สรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมด้านบนหรือด้านล่าง.....	67
สรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบจำนวนการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม ด้านบน ระหว่าง 3 ชุด กับ 5 ชุด	67
สรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบทิศทางท่อลมออกกระหว่างแนวราบ กับ แนวตั้ง	68
อภิปรายผล.....	68
ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป.....	68
ข้อเสนอแนะทั่วไป.....	68
ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป.....	68
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก	73
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	81

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ข้อเปรียบเทียบระหว่างการใช้เครื่องยนต์กับมอเตอร์ไฟฟ้าขับใบพัดของอุโมงค์ลมทางดิ่ง	2
2 แสดงข้อมูล เส้นผ่านศูนย์กลางลำลมและกำลังงานที่ใช้ขับใบพัดของอุโมงค์ลมทางดิ่ง.....	20
3 แสดงชุดมอเตอร์พัดลม แบบไหลตามแนวแกนเพลลา.....	23
4 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ชุดมอเตอร์พัดลม ของบริษัทแฟลคท์ วูดส์ กรุ๊ป จำกัด.....	24
5 แสดงมวลนักโดดร่มกับความเร็วลม ลมพัดตั้งฉากกับด้านหน้าตัวคน.....	27
6 แสดงมวลนักโดดร่มกับความเร็วลม ลมพัดขนานกับตัวคน.....	27
7 ชื่อและความหมายอุโมงค์ลมทางดิ่งที่ออกแบบ	32
8 ขนาดกริดและจำนวนกริด	35
9 เปรียบเทียบความเร็วลมแตกต่างที่ขนาดกริดต่างกัน.....	41
10 ตารางเปรียบเทียบความเร็วลมและค่าร้อยละความเร็วลมแตกต่างที่ขนาดกริดต่างกัน.....	46

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แผ่นภาพมูตตี้ใช้สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานการไหล	10
2 แสดงแผ่นภาพความขรุขระ	11
3 แสดงความดันและความเร็วจุดต่างๆ ของชุดพัดลมในอุโมงค์ลม	12
4 แสดงแรงที่เกิดขึ้นกับเครื่องบินที่เคลื่อนที่และอากาศอยู่รอบๆที่	15
5 แสดงแรงกระทำต่อวัตถุที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่	15
6 แสดงแรงที่กระทำกับนักโดดร่ม	17
7 แสดงชุดใบพัดลมเครื่องช่วยฝึกเทคโนโลยีสูงอุโมงค์ลมทางดิ่ง.....	19
8 แสดงชุดเครื่องยนต์ดีเซล 12 สูบ ต้นกำลังของเครื่องช่วยฝึกเทคโนโลยีสูงอุโมงค์ลมทางดิ่ง...	19
9 แสดงเพลาชับและเบร็กรองรับเพลาคือเครื่องช่วยฝึกเทคโนโลยีสูงอุโมงค์ลมทางดิ่ง.....	20
10 แสดงทิศทางการไหลของกระแสลม.....	26
11 แสดงการหาค่าความสูญเสียหลักและความสูญเสียรอง.....	29
12 อุโมงค์ลมทางดิ่งแบบ 3fbe และ 3fte	33
13 อุโมงค์ลมทางดิ่งแบบ 5fte	33
14 อุโมงค์ลมทางดิ่งแบบ 3fteh และ 3ftev.....	34
15 การตีกริดตำแหน่งที่แตกต่างกัน แบบ 3fbe	36
16 แสดงการแบ่งส่วนเพื่อตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 3fbe	37
17 แสดงการตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 3fte.....	37
18 แสดงการตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 5fte.....	38
19 แสดงการแบ่งส่วนเพื่อตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 3fteh	39
20 แสดงการแบ่งส่วนเพื่อตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 3ftev.....	39
21 แสดงการตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 5fte.....	40
22 แสดงการตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 3ftev.....	40
23 เปรียบเทียบความเร็วลมขนาดกริด 0.05 เมตร กับ 0.3 เมตร	43
24 เปรียบเทียบความเร็วลมขนาดกริด 0.05 เมตร กับ 0.1 เมตร.....	43

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
25 เปรียบเทียบความเร็วลมขนาดกริด 0.05 เมตร กับ 0.09 เมตร.....	44
26 เปรียบเทียบความเร็วลมขนาดกริด 0.05 เมตร กับ 0.08 เมตร.....	44
27 เปรียบเทียบความเร็วลมขนาดกริด 0.05 เมตร กับ 0.07 เมตร.....	45
28 เปรียบเทียบความเร็วลมขนาดกริด 0.05 เมตร กับ 0.06 เมตร.....	45
29 แสดงภาพลักษณะอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe กับ แบบ 3fte.....	47
30 ความเร็วลม และสภาพอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 1 เมตร กับ 5 เมตร	50
31 แสดงตำแหน่งที่ความเร็วลมต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที ของอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe	50
32 ความเร็วลม และสภาพอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 2 เมตร กับ 6 เมตร	51
33 ความเร็วลม และสภาพอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 3 เมตร กับ 7 เมตร	51
34 ความเร็วลม และสภาพอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 4 เมตร กับ 8 เมตร	52
35 ความเร็วลม และสภาพอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 5 เมตร กับ 9 เมตร	52
36 ความเร็วลม และสภาพอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 6 เมตร กับ 10 เมตร	53
37 ความเร็วลม และสภาพอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 7 เมตร กับ 11 เมตร	53
38 ความเร็วลม และสภาพอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 8 เมตร กับ 12 เมตร	54
39 แสดงตำแหน่งความสูงของอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte.....	55
40 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 1 เมตร.....	56
41 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 2 เมตร.....	56
42 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 3 เมตร.....	57
43 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 4 เมตร.....	57
44 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 5 เมตร.....	58
45 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 6 เมตร.....	58
46 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 7 เมตร.....	59
47 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 8 เมตร.....	59
48 ตำแหน่งระดับต่างๆ ของอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev และ 3fteh.....	60
49 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 1 เมตร.....	61

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
50 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 2 เมตร.....	62
51 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 3 เมตร.....	62
52 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 4 เมตร.....	63
53 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 5 เมตร.....	63
54 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 6 เมตร.....	64
55 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 7 เมตร.....	64
56 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 8 เมตร.....	65

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล	m^2
$A C_{d1}$	พื้นที่หน้าตัดการดูดคู่กับสัมประสิทธิ์การดูดในทิศทางตั้งฉาก	m^2
$A C_{d2}$	พื้นที่หน้าตัดการดูดคู่กับสัมประสิทธิ์การดูดในทิศทางขนาน	m^2
C_L	สัมประสิทธิ์การยก	-
C_d	สัมประสิทธิ์การดูด	-
D	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	m
E_p	พลังงานปั๊ม	m
F_m	แรงกระทำจากโมเมนตัม	N
F_p	แรงกระทำจากความดัน	N
F_L	แรงยก	N
F_D	แรงดูด	N
F_T	แรงดึง	N
f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานการไหล	-
f_x	แรงที่เกิดจากตัววัตถุแนวแกน x	$\frac{N}{kg}$
f_y	แรงที่เกิดจากตัววัตถุแนวแกน y	$\frac{N}{kg}$
f_z	แรงที่เกิดจากตัววัตถุแนวแกน z	$\frac{N}{kg}$
h_f	พลังงานสูญเสียหลัก	m
h_m	พลังงานสูญเสียรอง	m
h_L	พลังงานสูญเสีย	m
K_L	สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานการไหลผ่านอุปกรณ์	-
L	ความยาวท่อ	m
m	มวลสาร	kg

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวลรวม	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
$\Sigma \dot{m}_1$	ผลรวมอัตราการไหลเชิงมวลทางเข้า	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
$\Sigma \dot{m}_2$	ผลรวมอัตราการไหลเชิงมวลทางออก	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
P	ความดัน	Pa
P _o	กำลังงานลมที่ได้รับจากใบพัด (Power output)	W
P _i	กำลังงานขับใบพัด (Power Input)	W
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตร	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
ΣQ_{in}	ผลรวมอัตราการไหลเชิงปริมาตรทางเข้า	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
ΣQ_{out}	ผลรวมอัตราการไหลเชิงปริมาตรทางออก	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
R _e	ตัวเลขเรย์โนลด์	-
s	ความถี่จำเพาะลม	-
t	เวลา	s
u	ความเร็วในแกน x	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
v	ความเร็วในแกน y	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
w	ความเร็วในแกน z	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
W	น้ำหนัก	N
z ₁	ความสูงทางเข้า	m
z ₂	ความสูงทางออก	m
ρ	ความหนาแน่น	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
V	ความเร็ว	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
ν	ความหนืดจลน์	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
γ	น้ำหนักจำเพาะ	$\frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
τ	แรงเฉือน	kPa
μ	ความหนืดสัมบูรณ์	Pa s
$\frac{\epsilon}{D}$	ความขรุขระสัมพัทธ์	mm
η	ประสิทธิภาพของใบพัด (Froude efficiency)	-
ΔV	ความเร็วลมลดลง	m
$\frac{p_1}{\gamma}$	ความดันในรูปความสูงทางเข้า	m
$\frac{p_2}{\gamma}$	ความดันในรูปความสูงทางออก	m
$\frac{V_1^2}{2g}$	ความเร็วในรูปความสูงทางเข้า	m
$\frac{V_2^2}{2g}$	ความเร็วในรูปความสูงทางออก	m
3fbe	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ติดตั้งที่ด้านล่าง	
3fte	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ติดตั้งที่ด้านบน	
5fbe	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 5 ชุด ติดตั้งที่ด้านล่าง	
5fte	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 5 ชุด ติดตั้งที่ด้านบน	
3fteh	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ติดตั้งที่ด้านบน มีท่อลมออกในแนวราบ	
3ftev	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ติดตั้งที่ด้านบน มีท่อลมออกในแนวดิ่ง	
3fbe-.05-5m	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ติดตั้งที่ด้านล่าง ขนาดกริดสามเหลี่ยม 0.05 เมตร ที่ความสูง 5 เมตร	
3fbe-.06-5m	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ติดตั้งที่ด้านล่าง ขนาดกริดสามเหลี่ยม 0.06 เมตร ที่ความสูง 5 เมตร	

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
3fbc-.07-5m	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ติดตั้งที่ด้านล่าง ขนาดกริดสามเหลี่ยม 0.07 เมตร ที่ความสูง 5 เมตร	
3fbc-.08-5m	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ติดตั้งที่ด้านล่าง ขนาดกริดสามเหลี่ยม 0.08 เมตร ที่ความสูง 5 เมตร	
3fbc-.09-5m	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ติดตั้งที่ด้านล่าง ขนาดกริดสามเหลี่ยม 0.09 เมตร ที่ความสูง 5 เมตร	
3fbc-.1-5m	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ติดตั้งที่ด้านล่าง ขนาดกริดสามเหลี่ยม 0.1 เมตร ที่ความสูง 5 เมตร	
3fbc-.3-5m	อุโมงค์ลมทางดิ่งว่างเปล่ามีชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ติดตั้งที่ด้านล่าง ขนาดกริดสามเหลี่ยม 0.3 เมตร ที่ความสูง 5 เมตร	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

การโดดร่มแบบกระตุกเอง (ดิ่งพสุธา) เป็นยุทธวิธีการทำงานของทหารพลร่มเพื่อจะแทรกซึมเข้าสู่เป้าหมาย หลังแนวของข้าศึก โดยไม่ให้ข้าศึกรู้ตัว เป็นการทำหน้าที่ป้องกันและปราบปรามศัตรูของประเทศ ทหารพลร่มซึ่งใน งามวิจัยนี้จะเรียกว่า นักโดดร่ม จะต้องได้รับการฝึกมาอย่างดี การฝึกกลอยตัวและการฝึกทบทวนให้เกิดความมั่นใจของ นักโดดร่มจะใช้อุโมงค์ลมทางดิ่งเป็นเครื่องมือฝึก นักโดดร่มแบบกระตุกเองในทางทหารเรียกว่า ทหารพลร่ม จะทำ หน้าที่เป็นกำลังรบในพื้นที่เป้าหมายที่เข้าถึงได้ยาก กำลังรบเหล่านี้จะต้องโดดร่มลงสู่พื้นที่เป้าหมาย และใช้เวลาอยู่ใน อากาศให้น้อยที่สุด เพื่อให้รอดพ้นการข่มยิงของศัตรูจากภาคพื้นดิน การโดดร่มจะต้องโดดที่ระดับความสูง 2,400 - 3,200 เมตร เพื่อความปลอดภัยของอากาศยาน จากนั้นทหารพลร่มจะปล่อยตัวตกลงอย่างอิสระ จนถึงระดับความสูง จำกัดคือ 1000 เมตร ที่จะต้องกางร่มลงสู่พื้นอย่างความปลอดภัย ในช่วงก่อนที่จะกางร่มทหารพลร่มจะต้องควบคุม สมดุลของร่างกาย ทิศทางการเคลื่อนที่และระยะห่างให้เหมาะสมถูกต้อง เพื่อความปลอดภัยของตัวทหารพลร่มเองและ เพื่อนร่วมโดดร่มด้วย โดยมีระยะเวลาตกอิสระ 10-40 วินาที การควบคุมสมดุลของร่างกาย ทิศทางการเคลื่อนที่นี้ สำคัญมาก ทหารพลร่มจะต้องได้รับการฝึกมาอย่างดีและมีประสบการณ์ที่เพียงพอ มีความมั่นใจจึงจะมีความปลอดภัย เดิมการฝึกการกลอยตัวจะโดดจากเครื่องบินจริง ซึ่งจะมีความเสี่ยงสูง ไม่มีโอกาสแก้ไขข้อผิดพลาดใดๆ ค่าใช้จ่ายในการ ฝึกสูง ปัจจุบันกองทัพไทยได้จัดหาเครื่องช่วยฝึกการกลอยตัว ซึ่งเรียกว่า เครื่องช่วยฝึกเทคโนโลยีสูงอุโมงค์ลมทาง ดิ่ง แต่ในการใช้งานจริงเกิดปัญหาคือ ล้าลมแคบ จึงทำให้ฝึกการกลอยตัวได้ครั้งละ 1 คน และค่าใช้จ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง ดีเซลมีราคาสูง ในต่างประเทศมีอุโมงค์ลมทางดิ่งใช้กันอยู่แพร่หลายในประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศอังกฤษ ฯลฯ ซึ่ง ใช้สำหรับฝึกทางทหารและการกีฬา เดิมการออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่ง จะใช้การคำนวณและการสร้างอุโมงค์ลมทางดิ่ง จำลอง (Model) เพื่อทดสอบผลการออกแบบ ปัจจุบันนี้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพสูง มีความถูกต้องและ ความเชื่อถือสูง ในงานวิจัยนี้ จะใช้คอมพิวเตอร์ทำการวิเคราะห์ความเร็วและสภาพกระแสลม (Simulation) แล้ว นำมาเปรียบเทียบหาตัวแปรของอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีความเหมาะสมและดีที่สุด ซึ่งตัวแปรของอุโมงค์ลมทางดิ่งที่สนใจ ได้แก่ ตำแหน่งการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม จำนวนชุดมอเตอร์พัดลมและทิศทางท่อลมออก ผลการวิเคราะห์จะได้ ความเร็วลมและสภาพกระแสลม ที่ระดับความสูงต่างๆ โรงเรียนสงครามพิเศษ ศูนย์สงครามพิเศษ สามารถนำ ผลการวิจัยนี้ไปเป็นแนวทางจัดสร้างอุโมงค์ลมทางดิ่งในโอกาสที่เหมาะสมต่อไป ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรดังกล่าว

สามารถทำได้ง่าย ใช้เวลาน้อย ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการสร้างอุโมงค์ลมทางดิ่งจำลอง และยังไม่พบการวิเคราะห์อุโมงค์ลมทางดิ่งที่ออกแบบเหมือนกับงานวิจัยนี้ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในเอกสารใดๆ

ปัจจุบันเทคโนโลยีในด้านต่างๆ ได้พัฒนาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อุโมงค์ลมทางดิ่งจึงถูกออกแบบให้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังงานของการขับใบพัดลม ตามตาราง 1 แสดงข้อเปรียบเทียบระหว่างการใช้เครื่องยนต์ดีเซลกับมอเตอร์ไฟฟ้า ในการขับใบพัดลมของอุโมงค์ลมทางดิ่ง

ตาราง 1 ข้อเปรียบเทียบระหว่างการใช้เครื่องยนต์ดีเซลกับมอเตอร์ไฟฟ้าขับใบพัดของอุโมงค์ลมทางดิ่ง

รายการ	ชนิดเครื่องต้นกำลัง	
	มอเตอร์ไฟฟ้า	เครื่องยนต์ดีเซล
1. ความราบเรียบของกระแสลม ขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ	ราบเรียบ (ขับตรง)	ไม่ราบเรียบ (ผ่านเพลลา ข้อต่อและเพื่องท)
2. ความราบเรียบในการส่งถ่ายกำลังงาน ขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ	ราบเรียบ (ขับตรง)	มีแรงกระตุก (ผ่านเพลลา ข้อต่อและเพื่องท)
3. การกระจายแวนวลม	ดีกว่า (พัดลม 3-5 ชุด)	ต่ำกว่า (พัดลม 1 ชุด)
4. เสียงดังจากการทำงาน	น้อยกว่า (ต่ำกว่า 74 เดซิเบล)	มากกว่า (380 เดซิเบล)
5. มลพิษที่เกิดขึ้น	ไม่มี	ควันไอเสีย เสียงดัง
6. ค่าใช้จ่ายขณะทำงานปกติ	ต่ำกว่า	สูง
7. ค่าการบำรุงรักษา	ต่ำกว่า	สูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อการวิเคราะห์และออกแบบของอุโมงค์ลมทางดิ่งสำหรับฝึกนักโดดร่ม

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออุโมงค์ลมทางดิ่งสำหรับฝึกนักโดดร่ม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ตัวแปรที่ทดสอบสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่ง สำหรับฝึกนักโดดร่ม ประกอบด้วย ตำแหน่งการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมด้านบนหรือด้านล่าง จำนวนชุดของมอเตอร์พัดลม 3 ชุด หรือ 5 ชุด และ ทิศทางท่อลมออกแนวตั้งหรือแนวราบ

1.3.2 การวิเคราะห์อุโมงค์ลมทางดิ่งสำหรับฝึกนักโดดร่ม ใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรม Fluent 6.2

1.3.3 การออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่ง เป็นแบบเปิดในอาคาร นักโดดร่มสามารถฝึกลอยตัวได้พร้อมกันไม่เกิน 4 คน กำหนดมวลสาร 100 กิโลกรัม/คน ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับพัดลมโดยตรง เส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ลม 3.6 เมตร ล่ามสูง 8 เมตร ค่าสัมประสิทธิ์การปะทะลมของนักโดดร่มพิจารณาทิศทางและใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปะทะเต็มตัว แนวตั้งฉากกับทิศทางลม ตามเอกสาร FRANK M. WHITE. (1999).¹⁵

1.3.4 พลังงานการสูญเสียพลังงานรอง (Minor lose) พิจารณาเป็นท่อย้ายขนาดแบบทันที ท่อทางออกคิดค่าเฉลี่ย กรณีติดตั้งชุดพัดลมด้านบน เนื่องจากเป็นรูปกรวยปิด มีท่อลดขนาด 3 ท่อ นำมาคิดค่าเฉลี่ย

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอนดังนี้

1.4.1 ศึกษาทฤษฎี งานวิจัย เอกสารที่เกี่ยวข้องกับอุโมงค์ลมทั้งแนวตั้งและแนวราบ จากสื่ออิเล็กทรอนิกส์ ตำรา เดินทางไปศึกษาอุโมงค์ลมทางดิ่งของ โรงเรียนสงครามพิเศษ ศูนย์สงครามพิเศษ รวบรวมข้อมูลทั้งหมด

1.4.2 กำหนดรูปแบบปัญหาของอุโมงค์ลมแนวตั้ง เสร็จสิ้น ไขข้อจำกัดต่างๆ

1.4.3 กำหนดขนาดอุโมงค์ลมทางดิ่ง กำหนดหาความเร็วลม ที่จะสามารถยกนักโดดร่มให้ลอยได้

1.4.4 กำหนดหาอัตราการไหลเชิงปริมาตร และอัตราการไหลเชิงมวลของลม ที่ไหลใน 1, 3 และ 5 ช่องทาง

1.4.5 กำหนดหาพลังงานสูญเสีย กำลังงานของชุดพัดลม

1.4.6 ศึกษาโปรแกรมที่จะใช้เขียนแบบและโปรแกรมที่จะใช้วิเคราะห์ผลแบบ 3 มิติ เพื่อหาความเร็วลมและสภาพกระแสลมใช้สำหรับเปรียบเทียบหาตัวแปรที่เหมาะสม

1.4.7 เขียนแบบอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3 มิติ ลักษณะต่างๆ ตามที่ออกแบบไว้ จำนวน 5 แบบ

1.4.8 ใช้โปรแกรมวิเคราะห์แบบ 3 มิติ หาขนาดกริดที่เหมาะสม (Grid independent)

1.4.9 ใช้โปรแกรมวิเคราะห์แบบ 3 มิติ กรณีการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม ไว้ด้านบน จำนวน 3 กับ 5 ชุด

1.4.10 ใช้โปรแกรมวิเคราะห์แบบ 3 มิติ กรณีการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม ไว้ด้านบน แบบที่มีท่อลมออกแนวตั้ง และ แบบที่มีท่อลมออกแนวราบ จำนวน 3 ชุด

1.4.11 ใช้โปรแกรมวิเคราะห์แบบ 3 มิติ กรณีการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม ไว้ด้านล่าง จำนวน 3 ชุด

1.4.12 นำผลวิเคราะห์ที่ได้มาเปรียบเทียบหาตำแหน่งการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม จำนวนชุดมอเตอร์พัดลม และทิศทางท่อลมออก

1.4.13 สรุปผลการออกแบบและการวิเคราะห์อุโมงค์ลมทางดิ่ง เพื่อเลือกตัวแปรที่เหมาะสมและข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ได้ข้อมูลและแบบสำหรับการสร้างอุโมงค์ลมทางดิ่ง สำหรับฝึกนักโตดรัม

1.5.2 องค์ความรู้ในการออกแบบและทดสอบอุโมงค์ลมทางดิ่ง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานในสาขาใกล้เคียงได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2 บทปริทัศน์วรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทำวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์และออกแบบขโม้มอเตอร์ทางดิ่งสำหรับฝึกนักโดดร่ม มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย สมการการไหลต่อเนื่อง การไหลในท่อแยก สมการโมเมนตัม สมการพลังงาน ความสูงลำของไหล ชนิด การไหล พลังงานสูญเสีย ทฤษฎีโมเมนตัมของใบพัด และสมการแรงจุด

2.1.1 สมการการไหลต่อเนื่อง (Continuity Equation)

การวิเคราะห์การไหลของของไหลแบบต่อเนื่องด้วย กฎการอนุรักษ์มวลสาร (Conservation of mass) แนวคิดของสมการการไหลต่อเนื่อง จะใช้กฎการอนุรักษ์มวลสาร ประกอบด้วย

“มวลสาร ไม่สามารถทำให้การสูญหายไปหรือสร้างขึ้นใหม่ได้ เพียงแต่เปลี่ยนแปลงสถานะไปเท่านั้น”

อัตราการไหลของมวลสารเข้า = อัตราการไหลของมวลสารออก

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

สำหรับ 2 มิติ $\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$ (2-1)

สำหรับ 3 มิติ ในรูปอนุพันธ์

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$
 (2-2)

การไหลในท่อแยก จะมีช่องทางการไหลเข้าและช่องทางการไหลออกหลายช่องทาง ในกรณีที่เป็นการไหลชนิดอัดตัวไม่ได้จะใช้กฎอนุรักษ์มวลสารในการพิจารณา เพราะว่าของไหลโดยทั่วไปในวิชากลศาสตร์ของไหล จะหมายถึงของไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible Fluid) ดังนั้น จะได้ผลรวมอัตราการไหลเชิงมวลของไหลในช่องทางเข้า เท่ากับผลรวมอัตราการไหลเชิงมวลของไหลในช่องทางออก ท่อทางเข้า 1 และ 2 ท่อทางออก 3, 4, 5 และ 6

$$A_1 V_1 + A_2 V_2 = A_3 V_3 + A_4 V_4 + A_5 V_5 + A_6 V_6$$

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

อัตราการไหลเชิงปริมาตรรวม $\sum Q_{in} = \sum Q_{out}$ (2-3)

2.1.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

โมเมนตัมเป็นพลังงานที่เกิดจากเคลื่อนที่ของวัตถุใดๆ และขนาดของมวลสาร เมื่อวัตถุนั้นเคลื่อนที่จะมีแรงจากโมเมนตัมพยายามรักษาความเร็วและทิศทางในการเคลื่อนที่ไว้ให้เหมือนเดิม โดยแรงจากโมเมนตัมจะหาค่าได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเทียบกับเวลา

โดยที่ $F = \frac{d(mv)}{dt}$ (2-4)

สำหรับ 3 มิติ ในรูปอนุพันธ์

แกน x $u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + v \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]$ (2-5)

แกน y $u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + v \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right]$ (2-6)

แกน z $u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]$ (2-7)

2.1.3 สมการพลังงานในการไหลสถานะคงตัว (Stead Flow Energy Equation)

สมการพลังงานในการไหลสถานะคงตัว เป็นการพิจารณาพลังงานในรูปความสูงลำของไหลในแนวตั้ง ซึ่งเรียกว่าเฮด (head) ที่เกี่ยวข้องกับของไหลทุกๆ อย่าง ที่เข้าสู่ระบบที่พิจารณา ซึ่งพลังงานทางเข้ากับทางออกของการไหลของของไหลจะต้องเท่ากัน พลังงานดังกล่าวได้แก่ เฮดความดัน เฮดความเร็ว เฮดความสูง รวมทั้งเฮดอื่นๆ ที่เข้าสู่หรือออกจากระบบ มีหน่วยเป็น เมตร, มิลลิเมตรปรอท เป็นต้น และจะหาค่ากำลังงาน (Power) ได้จาก $\gamma Q h_L$ เมื่อ h_L คือพลังงานสูญเสีย เปรียบเทียบพลังงานรวมของของไหล ระหว่างจุด 1 และจุด 2 ในขอบเขตที่พิจารณา สมการพลังงาน ประกอบด้วย

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + E_p = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (2-8)$$

2.1.4 ความสูงลำของไหล (Head)

ความสูงลำของไหล ในวิชากลศาสตร์ของไหลโดยทั่วไปจะเรียกทับศัพท์ว่าค่าเฮด ซึ่งเป็นศัพท์ทางวิชาการ ค่าความสูงลำของไหล คือค่าระดับพลังงานในรูปความสูงที่ของไหลยกตัวขึ้นในแนวตั้ง ประกอบด้วย

2.1.4.1 เฮดความดัน (Pressure head) คือพลังงานความดันในรูปความสูงลำของไหล โดยเปรียบเทียบกับความดันบรรยากาศ ค่าเฮดความดันสถิตคำนวณได้จาก $\frac{p}{\gamma}$

2.1.4.2 เฮดความเร็ว (Velocity head) คือพลังงานความเร็วที่แสดงออกมาในรูปความสูงลำของไหล ค่าที่ได้จากการวัดความสูงลำของไหล จะรวมค่าความดันในรูปความสูงของไหลเข้าไว้ด้วย เพราะการที่ของไหลจะมีความเร็วหรือเคลื่อนที่ได้จะต้องมีความดันแตกต่างกัน จะคำนวณค่าเฮดความเร็วได้จาก $\frac{V^2}{2g}$

2.1.4.3 เฮดความสูง (Elevation head) คือพลังงานความสูงของไหลที่เกิดจากความต่างระดับ โดยเปรียบเทียบกับระดับอ้างอิง ค่าเฮดความสูงหาได้จาก z ในตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2

2.1.4.4 เฮดรวม (Total head) คือพลังงานลำความสูงรวมของไหลที่จุดพิจารณา โดยนำค่าพลังงานต่างๆ จากที่กล่าวข้างต้นมารวมกันของแต่ละจุดจะได้พลังงานรวมเท่ากัน นอกจากนี้ยังมีพลังงานอื่นที่ต้องนำมาพิจารณารวมด้วย ถ้าระบบนั้นมีพลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น พลังงานของปั๊มหรือพลังงานกังหัน

2.1.4.5 เฮดสูญเสีย (Head loss) คือค่าความสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการไหลด้วยความเร็ว การไหลผ่านท่อยาวๆ การไหลผ่านท่อเล็กๆ การไหลผ่านผนังท่อขรุขระ และอื่นๆ ความสูญเสียพลังงานจากการไหลถ้ามีค่ามาก จะทำให้ต้องใช้กำลังมากในการขับเคลื่อนของไหล ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงหรือค่าไฟฟ้าต้นกำลังงานมาก ในกรณีของปั๊ม และกรณีกังหันก็จะได้กำลังงานจ่ายออกมาน้อย

2.1.5 ชนิดการไหล (Type of Flow)

การแบ่งชนิดของการไหลมีหลายวิธีที่ใช้เป็นเงื่อนไข เพื่อพิจารณากำหนดชนิดของการไหล การพิจารณากำหนดชนิดของการไหล จากลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหล มีลักษณะการเคลื่อนที่อย่างไร

การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) หมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหล ที่ความเร็วต่ำ อนุภาคของไหลจะคู่ขนานกันเป็นชั้นๆ ตลอดเวลา ความเร็วของไหลในชั้นเดียวกันจะเท่ากัน ความเร็วของของไหลต่างชั้นกันจะไม่เท่ากัน

การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transition flow) หมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหล ที่ความเร็วสูงกว่าการไหลแบบราบเรียบ อนุภาคของไหลแตกตัวออกมาบางส่วน มีการแกว่งขึ้นลงเล็กน้อย อนุภาคของไหลเคลื่อนที่ไม่เป็นเส้นตรงเรียบ มีคลื่นสูงๆ ต่ำๆ

การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) หมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหล ที่ความเร็วสูง ทิศทาง การเคลื่อนที่ไม่แน่นอน อนุภาคของไหลแตกตัวออกทั้งหมด และจะหมุนวนเปลี่ยนทิศทางตลอดเวลา

ออสบอร์น เรย์โนลด์ (Osborn Reynold) เป็นผู้ค้นพบตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งใช้เป็นตัวบอกรูปแบบของการไหล ตัวเลขเรย์โนลด์ หาได้จากอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงจากความหนืดของไหล เป็นตัวเลขไม่มีหน่วย

$$R_e = \frac{\text{Inertia Force}}{\text{Shear Force}} = \frac{m a}{\tau A}$$

$$\text{ตัวเลขเรย์โนลด์} \quad R_e = \frac{\rho \forall D}{\mu} = \frac{\forall D}{v} \quad (2-9)$$

$$R_e \leq 2,300 \text{ เป็นการไหลแบบราบเรียบ}^{\circ}$$

$$R_e > 2,300 \text{ เป็นการไหลแบบปั่นป่วน}^{\circ}$$

2.1.6 พลังงานสูญเสีย (Energy Losses)

การไหลของของไหลภายในท่อเกิดจากความดันแตกต่างกัน และการไหลจะต้องมีพลังงานสูญเสีย (h_L) พลังงานสูญเสียมี 2 ชนิด คือพลังงานสูญเสียหลัก (h_f) และพลังงานสูญเสียรอง (h_m)

$$\text{พลังงานสูญเสีย} \quad h_L = h_f + h_m \quad (2-10)$$

พลังงานสูญเสียหลัก (Major losses) เกิดจากของไหลไหลด้วยความเร็วสูง ความยาวท่อ ขนาดของท่อ ความหนืดของไหล ความขรุขระของผนังท่อ ซึ่งพลังงานสูญเสียหลักจะมีค่ามากกว่าพลังงานสูญเสียรอง ดังนั้นการไหลในท่อจะต้องพิจารณาพลังงานสูญเสียหลักเป็นสำคัญ

$$\text{พลังงานสูญเสียหลัก} \quad h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2-11)$$

$$\text{กรณีการไหลแบบราบเรียบ} \quad f = \frac{64}{R_e}$$

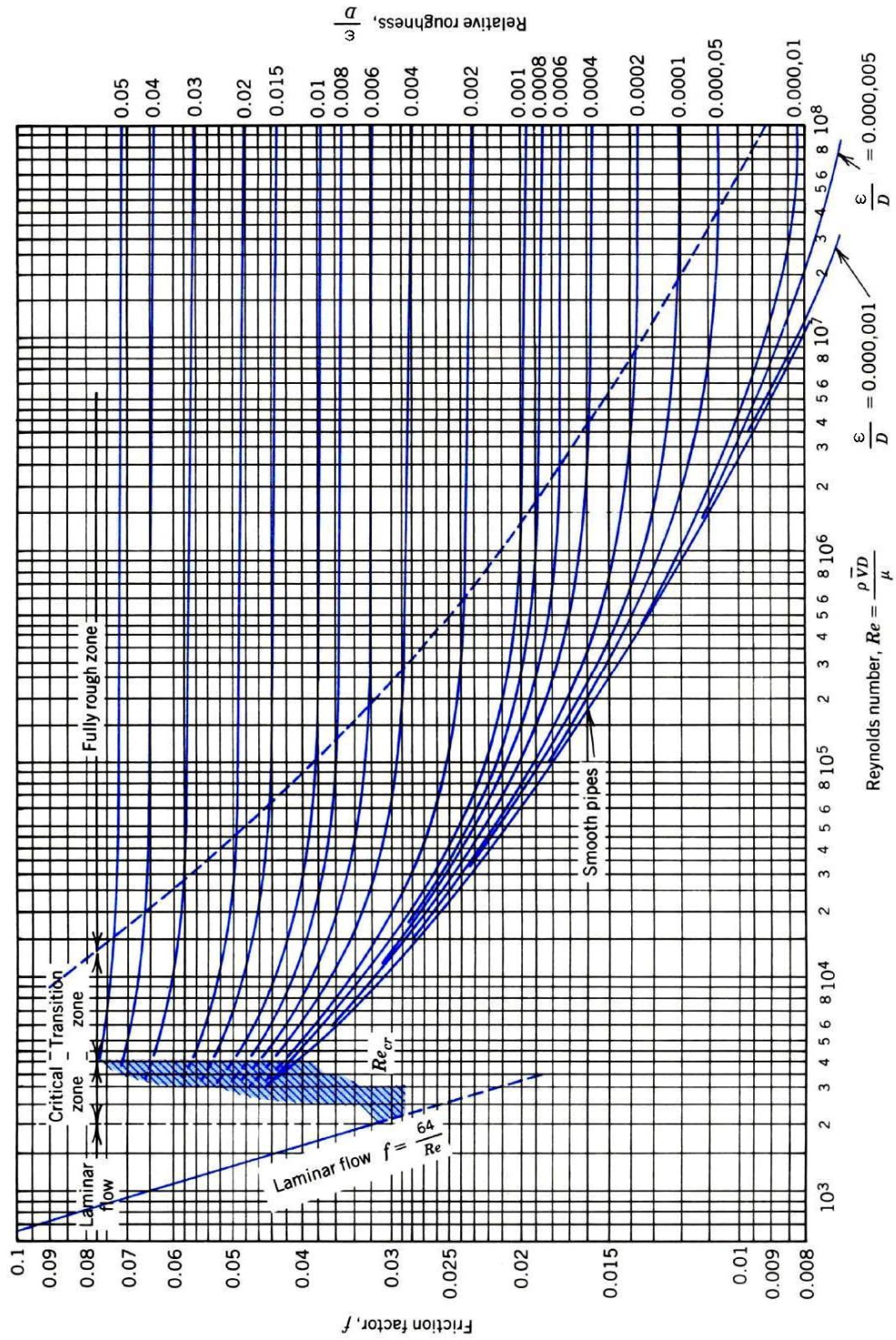
เมื่อ f เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานการไหล (Friction Factor)

กรณีการไหลแบบปั่นป่วน f = หาค่าได้จากการเปิดตารางมูดี้ (Moody Diagram) ตามภาพประกอบ 1 โดยใช้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และค่าความขรุขระสัมพัทธ์ ตามภาพประกอบ 2 ค่าความขรุขระ ได้มาจากตารางความขรุขระของผนังท่อ ได้มาจากการทดลอง

พลังงานสูญเสียรอง (Minor losses) เกิดจากของไหลไหลผ่านลิ้นเปิด-ปิด ข้อต่อ ข้องอ ท่อลดหรือเพิ่มขนาด การไหลเข้าสู่ถังหรือการไหลออกจากถัง พลังงานสูญเสียรองมีค่าไม่มาก บางครั้งพลังงานสูญเสียรองจะถูกตัดทิ้งไปก็ได้

$$\text{พลังงานสูญเสียรอง} \quad h_m = k_L \frac{V^2}{2g} \quad (2-12)$$

เมื่อ k_L เป็นสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของอุปกรณ์ที่ของไหลไหลผ่าน



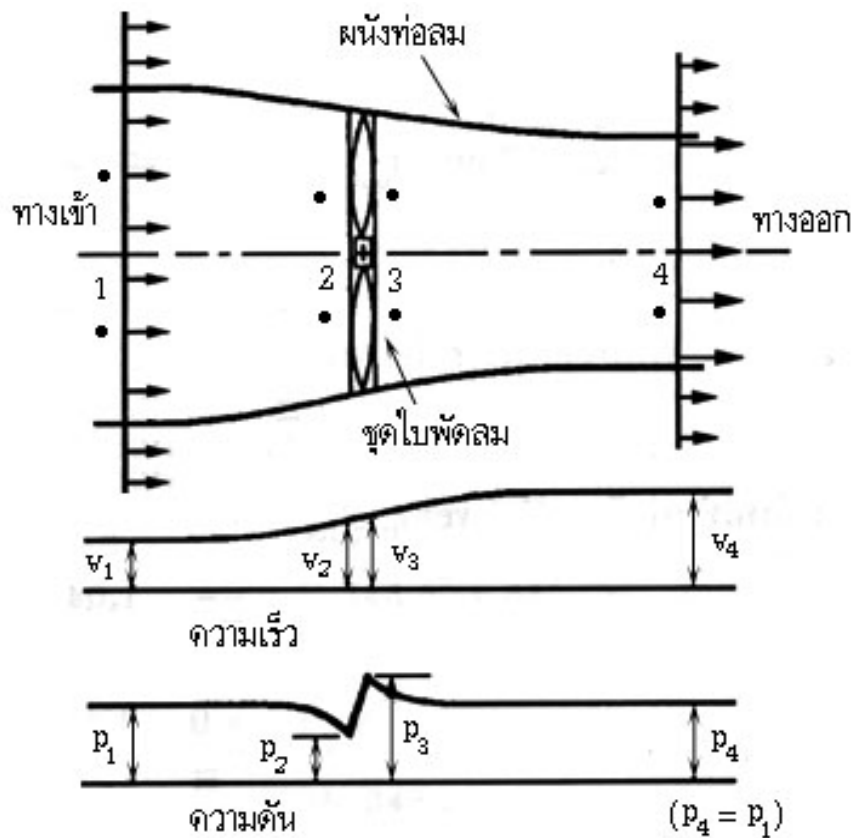
ภาพประกอบ 1 แผนภาพมูดี้ที่ใช้สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานการไหล^{15, 18}

ε					
Material	Condition	ft	mm	Uncertainty, %	
Steel	Sheet metal, new	0.00016	0.05	±60	
	Stainless, new	0.000007	0.002	±50	
Iron	Commercial, new	0.00015	0.046	±30	
	Riveted	0.01	3.0	±70	
	Rusted	0.007	2.0	±50	
	Cast, new	0.00085	0.26	±50	
	Wrought, new	0.00015	0.046	±20	
	Galvanized, new	0.0005	0.15	±40	
	Asphalted cast	0.0004	0.12	±50	
	Drawn, new	0.000007	0.002	±50	
Brass	Drawn tubing	0.000007	0.0015	±60	
Plastic	-	Smooth	Smooth		
Glass	Smoothed	0.00013	0.04	±60	
	Rough	0.007	2.0	±50	
Concrete	Smoothed	0.000033	0.01	±60	
Rubber	Stave	0.0016	0.5	±40	
Wood					

ภาพประกอบ 2 แสดงแผนภาพความขรุขระ¹⁸

2.1.7 ทฤษฎีโมเมนตัมของใบพัด (Momentum Principle Applied To Propellers)

แรงที่ใช้ขับใบพัดให้หมุนคือ กำลังงานจากชุดมอเตอร์ไฟฟ้าโดยตรง แรงหมุนจากใบพัดจะทำให้ลมมีพลังงานเพิ่มขึ้น ความเร็วและความดันเปลี่ยนแปลง ลมที่ออกจากใบพัดจะหมุนตัวรอบแกนใบพัด ตามภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 แสดงความดันและความเร็วจุดต่างๆ ของชุดพัดลมในอุโมงค์ลม^{18, 19}

พิจารณาความเร็ว ความเร็วจุดที่ 2 ความเร็วลมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่จุด 3 ลมไหลผ่านใบพัด ได้รับพลังงานโมเมนตัมเพิ่มทำให้ลมมีความเร็วเพิ่มมากขึ้น และจุดที่ 4 ลมถูกผลักดันออกมาด้วยความเร็วสูง

พิจารณาความดัน ความดันจุดที่ 1 และจุดที่ 4 จะไม่ถูกรบกวนจากใบพัดลม ความดันจึงเท่ากัน ความดันจุดที่ 2 ความดันลมลดต่ำลงเนื่องจากลมที่อยู่หน้าใบพัดถูกดูดเข้าหาใบพัด ความดันจุดที่ 3 อยู่หลังใบพัด ดังนั้นลมจะถูกอัดตัวความดันจะเพิ่มขึ้น

แรงจากโมเมนตัม $F_m = \rho Q (\nabla_4 - \nabla_1)$ (2-13)

แรงจากความดัน $F_p = A (p_3 - p_2)$ (2-14)

สมการ (2-13) = (2-14) $A (p_3 - p_2) = \rho Q (\nabla_4 - \nabla_1)$

$$A (p_3 - p_2) = \rho A \nabla_2 (\nabla_4 - \nabla_1)$$

จะได้ $p_3 - p_2 = \rho \nabla_2 (\nabla_4 - \nabla_1)$ (2-15)

ใช้สมการพลังงานเปรียบเทียบจุด 1 กับจุด 2

$$p_1 + \frac{\rho \nabla_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho \nabla_2^2}{2} + h_{L(1-2)} \quad (2-16)$$

จุด 2 กับจุด 3 มีการไหลไม่ราบเรียบ จึงใช้สมการพลังงานเปรียบเทียบไม่ได้
ใช้สมการพลังงานเปรียบเทียบจุด 3 กับจุด 4

$$p_3 + \frac{\rho \nabla_3^2}{2} = p_4 + \frac{\rho \nabla_4^2}{2} + h_{L(3-4)} \quad (2-17)$$

ความเร็วลมจุด 2 เท่ากับความเร็วลมจุด 3 และความดันจุด 1 เท่ากับความดันจุด 4
จากสมการ (2-16) และ (2-17)

$$p_3 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (\nabla_4^2 - \nabla_1^2) + h_L \quad (2-18)$$

จากสมการ (2-15) และ (2-18)

$$\begin{aligned} \rho \nabla_2 (\nabla_4 - \nabla_1) &= \frac{1}{2} \rho (\nabla_4^2 - \nabla_1^2) + h_L \\ &= \frac{1}{2} \rho (\nabla_4 - \nabla_1)(\nabla_4 + \nabla_1) + h_L \end{aligned}$$

$$V_2 = \frac{1}{2}(V_4 + V_1) + c h_L \quad (2-19)$$

จากสมการ (2-19) ความเร็วลมหน้าใบพัดมีค่าเท่ากับความเร็วลมเฉลี่ยทางเข้ากับความเร็วมทางออก รวมกับค่าสัมประสิทธิ์ (c) คูณกับค่าความสูญเสีย ตามทฤษฎีของฟรูด (Froude's theorem) เมื่อพิจารณาให้ลมจุด 1 และจุด 4 หยุดนิ่ง ดังนั้นใบพัดจึงมีความเร็ว V_1 กำลังงานลมที่ได้รับจากใบพัดคือ กำลังงานที่ใบพัดส่งกำลังขับเคลื่อนให้ มีโมเมนตัมเพิ่มขึ้น

กำลังงานลมที่ได้รับจากใบพัด

$$P_o = F_m V_1$$

$$P_o = \rho Q (V_4 - V_1) V_1 \quad (2-20)$$

กำลังงานขับใบพัด

$$P_i = F_m V_2 \quad \text{ไม่คิดการสูญเสีย (} c h_L = 0 \text{)}$$

$$P_i = \rho Q (V_4 - V_1) \left(\frac{V_4 + V_1}{2} \right)$$

$$P_i = \frac{1}{2} \rho Q (V_4^2 - V_1^2) \quad (2-21)$$

ประสิทธิภาพของใบพัด (Froude efficiency)

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{F_m V_1}{F_m V_2}$$

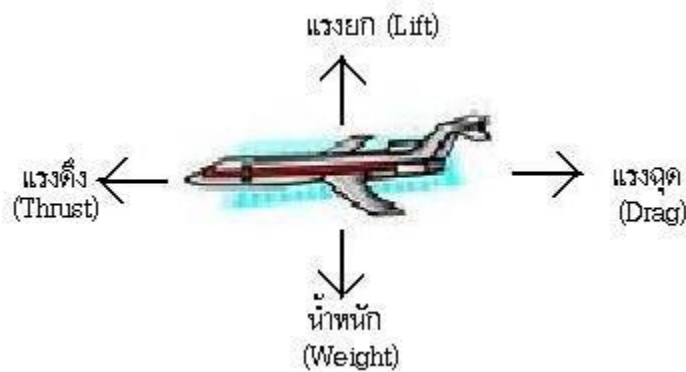
$$\eta = \frac{V_1}{V_2}$$

$$\eta = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_1}{\left(\frac{V_1 + V_4}{2} \right)} \quad (2-22)$$

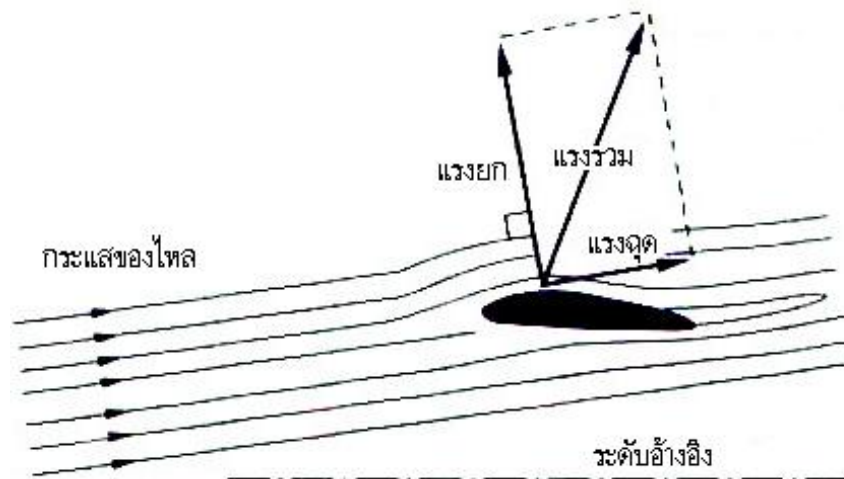
โดยทั่วไปใบพัดจะมีประสิทธิภาพ 75 - 85 เปอร์เซ็นต์

2.1.8 สมการแรงจุด (Drag Force Equation)

แรงที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่อยู่กับที่จมอยู่ในของไหลที่เคลื่อนที่ หรือวัตถุที่เคลื่อนที่ในของไหลที่อยู่กับที่ จะมีแรงที่เกิดขึ้นเหมือนกัน แรงที่เกิดขึ้นจะมี 4 อย่าง ได้แก่ แรงยก แรงดึง แรงจุด และน้ำหนักวัตถุ พิจารณาจาก ภาพประกอบ 4 และภาพประกอบ 5 ลมคือของไหล วัตถุคือเครื่องบินหรือปีกเครื่องบิน



ภาพประกอบ 4 แสดงแรงที่เกิดขึ้นกับเครื่องบินที่เคลื่อนที่และอากาศอยู่กับที่



ภาพประกอบ 5 แสดงแรงกระทำต่อวัตถุที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่

2.1.8.1 แรงยก (F_L) เป็นแรงกระทำในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ เป็นแรงที่พยายามจะยกวัตถุให้ลอยสูงขึ้นหาค่าได้จาก สัมประสิทธิ์การยก (C_L) ความหนาแน่นของไหล (ρ) พื้นที่หน้าตัดแนวตั้งฉาก (A) ความเร็วสัมพัทธ์ (V) และหารด้วย 2 พิจารณาจากภาพประกอบ 4 และภาพประกอบ 5

$$\text{จะได้} \quad F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2 \quad (2-23)$$

2.1.8.2 แรงจุด (F_D) เป็นแรงกระทำในแนวขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ ทิศทางสวนทางกับการเคลื่อนที่เป็นแรงที่พยายามจะทำให้วัตถุเคลื่อนที่ช้าลงหรือต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุ เกิดจากความดันแตกต่างด้านหน้ากับด้านหลังวัตถุและเกิดจากแรงเฉือน ซึ่งก็มาจากการหนืดของไหล หาค่าได้จากผลคูณของสัมประสิทธิ์การจุด (C_d) ความหนาแน่นของไหล (ρ) พื้นที่หน้าตัดแนวตั้งฉาก (A) ความเร็วสัมพัทธ์ (V) และหารด้วย 2 ขนาดแรงจุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับรูปร่างวัตถุ พื้นที่ผาฉายวัตถุ และความเร็วสัมพัทธ์ พิจารณาจากภาพประกอบ 5 และภาพประกอบ 6

$$\text{จะได้} \quad F_D = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2 \quad (2-24)$$

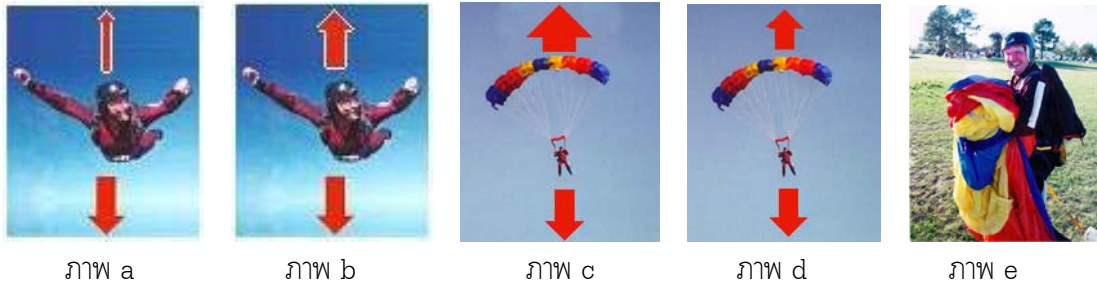
2.1.8.3 น้ำหนัก (W) เป็นแรงกระทำในแนวตั้งที่เกิดจากแรงดึงดูด ระหว่างมวลสารวัตถุกับมวลสารโลก น้ำหนักจะมีค่ามากหรือน้อยก็จะขึ้นกับมวลสารวัตถุ หาค่าได้จากผลคูณของมวลสารวัตถุ (m) กับแรงโน้มถ่วงของโลก (g) และแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าคงที่ สำหรับเครื่องบินน้ำหนักจะเท่ากับแรงยก พิจารณาจากภาพประกอบ 4 และภาพประกอบ 6

$$\text{จะได้} \quad W = mg \quad (2-25)$$

2.1.8.4 แรงดึง (F_T) เป็นแรงกระทำในแนวขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ เป็นแรงที่เกิดจากใบพัดดึงให้เครื่องบินเคลื่อนที่ไปข้างหน้า หรือแรงผลักดันของแก๊สไอเสียเครื่องยนต์เจ็ทที่พุ่งออกไปผลักดัน ให้เครื่องบินเคลื่อนที่ไปข้างหน้า แรงดึงจะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับกำลังเครื่องยนต์ที่ขับใบพัดหรือกำลังของเจ็ท พิจารณาจากภาพประกอบ 4 และภาพประกอบ 5

2.1.8.5 แรงโมเมนต์ลมหางดึง เมื่อพิจารณาแรงกระทำที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ลมทางดึง จะเห็นว่า มีแรง 2 แรงที่กระทำกับนักโดดร่มขณะลอยตัวอิสระได้แก่ น้ำหนัก แรงยกหรือแรงจุด ส่วนแรงดึงไม่มี พิจารณาจาก

ภาพประกอบ 6 ในภาพ a และภาพ b แรงยกหรือแรงจุดมีค่าเท่ากับ ในกรณีนี้โมเมนต์ลมทางตั้ง ลมเป็นของไหลที่เคลื่อนที่ นักโดดร่มลอยตัวอยู่กับที่ลักษณะสมดุล ดังนั้นสรุปได้ว่า น้ำหนักมีค่าเท่ากับแรงยกหรือแรงจุด



ภาพประกอบ 6 แสดงแรงที่กระทำกับนักโดดร่ม

ภาพ a เมื่อนักโดดร่มโดดออกจากเครื่องบินช่วงแรกน้ำหนักจะมากกว่าแรงจุด นักโดดร่มจะตกลงมาด้วยอัตราเร่ง
ภาพ b เวลาผ่านไปช่วงหนึ่งอัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลกจะทำให้นักโดดร่มมีความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น ประมาณ 200 กิโลเมตร/ชั่วโมง ดังนั้นแรงจุดจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับน้ำหนัก นักโดดร่มก็จะตกลงมาด้วยความเร็วคงที่ ภาพ c เมื่อถึงระยะที่ปลอดภัยนักโดดร่มจะเปิดร่มให้กางออก ดังนั้นแรงจุดก็จะมีค่ามากกว่าน้ำหนัก ความเร็วตกลงมาของนักโดดร่มจะลดลง ภาพ d เวลาผ่านไปอีกช่วงหนึ่ง แรงจุดจะมีค่าเท่ากับน้ำหนัก ดังนั้นความเร็วตกลงมาของนักโดดร่มจะคงที่ ประมาณ 22 กิโลเมตร/ชั่วโมง ภาพ e จนระยะสุดท้ายนักโดดร่มจะลงถึงพื้นอย่างปลอดภัย

แรงจุด
$$F_D = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2$$

น้ำหนัก
$$W = m g$$

สภาพสมดุลของนักโดดร่มในอุโมงค์ลมทางตั้ง

$$F_D = W$$

$$m g = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2$$

$$v^2 = \frac{2 m g}{C_d \rho A}$$

$$\text{ความเร็วลม} \quad v = \sqrt{\frac{2mg}{C_d \rho A}} \quad (2-26)$$

สมการ 2-26 จะใช้คำนวณหาความเร็วลม ที่สามารถยกนักโดดร่มให้ลอยได้ แนวลมตั้งฉากกับพื้นที่ด้านหน้าลำตัว

2.2 บทปริทัศน์วรรณกรรม (Literature Review)

โรงเรียนสงครามพิเศษ ศูนย์สงครามพิเศษ⁽¹⁾ จัดหาเครื่องช่วยฝึกเทคโนโลยีสูงอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบเปิดนอกอาคาร (Open outdoor) ใช้เครื่องยนต์ดีเซล 12 สูบ 783.30 กิโลวัตต์ (1,050 แรงม้า) ทำงานสูงสุดที่ 1,800 รอบ/นาที สำหรับใช้งานกับอุโมงค์ลมทางดิ่ง เส้นผ่านศูนย์กลางลำลม 3.50 เมตร ความเร็วลม 35-53 เมตร/วินาที (80-120 ไมล์/ชั่วโมง) ใช้ชุดคลัสต์ซ์ตัดต่อกำลังงาน ส่งกำลังงานผ่านเพลลา ข้อต่อ และชุดเฟืองทดเปลี่ยนทิศทางจากแนวราบเป็นแนวดิ่ง อัตราส่วน รอบเพลลาทางเข้า : รอบเพลลาทางออก เป็น 1 : 2 ส่งกำลังขับใบพัดลม 1 ชุด 4 ใบ ใบพัดทำจาก GRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) หรือ อลูมิเนียม ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้งานจริงคือ เมื่อใช้งานใบพัดลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.50 เมตร ตามที่ออกแบบไว้แต่ต้น ใบพัดจะแตก ชำรุด ผู้รับเหมาแก้ปัญหาโดยตัดใบพัดลมให้สั้นเหลือเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.00-2.50 เมตร และทำคอคอดที่บริเวณผนังรอบๆ ใบพัด จึงสามารถใช้งานได้ แต่ลำลมแคบใช้ฝึกได้ครั้งละ 1 คน จำนวนเชื้อเพลิงดีเซลที่ใช้เดินเครื่องยนต์ 200-250 ลิตร/ชั่วโมง ปัญหาแนวเพลลาขับและความสมดุลเพลลาทางพลศาสตร์ไม่ถูกต้อง ทำให้เพลลาส่งกำลังสั้นขณะหมุนด้วยความเร็วใช้งาน มีผลทำให้แรงรับเพลลาเมื่ออายุใช้งานสั้น จุดรองรับเพลลาชำรุดเสียหาย ดังภาพประกอบ 7 ภาพประกอบ 8 และภาพประกอบ 9 ปัจจุบันเครื่องช่วยฝึกเทคโนโลยีสูงอุโมงค์ลมทางดิ่งถูกระงับการใช้งาน



ภาพประกอบ 7 แสดงชุดใบพัดลมเครื่องช่วยฝึกเทคโนโลยีสูงอุโมงค์ลมทางดิ่ง¹



ภาพประกอบ 8 แสดงชุดเครื่องยนต์ดีเซล 12 สูบ ต้นกำลังของเครื่องช่วยฝึกเทคโนโลยีสูงอุโมงค์ลมทางดิ่ง¹



ภาพประกอบ 9 แสดงเพลาชับและเบร็กรองรับเพลาคือเครื่องช่วยฝึกเทคโนโลยีสูงอุโมงค์ลมทางดิ่ง¹

SkyVenture⁽²³⁾ ออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่ง ขนาดเส้นผ่านอุโมงค์ลม 3.04, 3.65, 4.26 เมตร (10, 12, 14 ฟุต) ความเร็วลม 57-71 เมตร/วินาที (130-160 ไมล์/ชั่วโมง) สร้างอุโมงค์ลมทางดิ่งแบบเปิด อากาศถ่ายเทได้ (Open-flow tunnels) สำหรับประเทศที่อากาศอบอุ่น และสร้างอุโมงค์ลมทางดิ่งแบบลมหมุนวน (Re-circulating tunnels) สำหรับประเทศที่อากาศหนาว ดังที่ได้แสดงในตาราง 2

ตาราง 2 แสดงข้อมูล เส้นผ่านศูนย์กลางลำลมและกำลังงานที่ใช้ขับใบพัดของอุโมงค์ลมทางดิ่ง

แบบ อุโมงค์ลม	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	กำลังงาน (HP)	กำลังงานรวม (HP)	กำลังงานสูงสุด (HP)	ความเร็วลมสูงสุด (m/s)
1	3.04	3 x 200	600	672	57
2	3.65	3 x 250	750	840	59
3	3.65	3 x 350	1,050	1,064	63
4	3.65	3 x 400	1,200	1,344	68
5	3.65	4 x 200	800	896	60
6	3.65	4 x 250	1,000	1,120	65
7	4.26	4 x 300	1,200	1,344	60
8	4.26	4 x 400	1,600	1,792	65
9	4.26	4 x 300	1,200	1,344	63
10	4.26	4 x 350	1,400	1,568	67
11	4.26	4 x 400	1,600	1,792	71

SkyVenture Abu Dhabi.⁽²⁴⁾ สร้างอุโมงค์ลมทางดิ่งที่กรุงอาบูดาบี (Abu Dhabi) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำลม 3.60 เมตร (12 ฟุต) เป็นอุโมงค์ลมทางดิ่งในอาคารแบบเปิด (Indoor open flow) ใช้กำลังงานขับ 875 แรงม้า ผู้ที่ดำเนินงานคือกองทัพสหพันธรัฐอาหรับเอมิเรตส์ (The Armed Forces of the United Arab Emirates) สกายเวนเจอร์เป็นผู้ส่งมอบให้ผู้ที่ จะดำเนินงานในฤดูใบไม้ผลิ (Spring) ปี 2006

SkyVenture Arizona⁽²⁵⁾ เป็นผู้ออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมทางดิ่งขึ้นที่ ระยะทาง 40 ไมล์ ทางใต้ของเมืองฟีนิกซ์ มลรัฐแอริโซนา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำลม 4.20 เมตร (14 ฟุต) เป็นอุโมงค์ลมทางดิ่งแบบเปิดในอาคาร (Indoor open flow) ใช้กำลังงานขับ 1,600 แรงม้า ความเร็วลม 71 เมตร/วินาที (160 ไมล์/ชั่วโมง)

SkyVenture Colorado⁽²⁶⁾ เป็นผู้ออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมทางดิ่งแบบในอาคาร ใช้ลมหมุนวน เส้นผ่านศูนย์กลางลำลม 3.60 เมตร (12 ฟุต) ใช้กำลังงานขับจากมอเตอร์ไฟฟ้า 300 แรงม้า จำนวน 4 ตัว (1,200 แรงม้า) ขับใบพัดลม ตั้งอยู่ในทางใต้เมืองเดนเวอร์ มลรัฐโคโลราโด ให้บริการเพื่อการกีฬา ความบันเทิงและการฝึกทางทหาร

SkyVenture Genting⁽²⁷⁾ เป็นผู้ออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมทางดิ่งแบบในอาคาร ในศูนย์การค้า โดยมีการบันเทิงรูปแบบต่างๆ ที่กรุงกัวลาลัมเปอร์ ประเทศมาเลเซีย เส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ลม 3.60 เมตร (12 ฟุต) ใช้กำลังงานขับ 875 แรงม้า กำหนดขนาดผู้เข้าใช้บริการ คือความสูงไม่น้อยกว่า 120 เซนติเมตร น้ำหนักไม่ต่ำกว่า 36 กิโลกรัม และไม่เกิน 113.60 กิโลกรัม

SkyVenture Hollywood⁽²⁸⁾ เป็นผู้ออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมทางดิ่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร (10 ฟุต) ใช้กำลังงานขับใบพัดลม 800 แรงม้า แบบในอาคาร ใช้ลมหมุนวน ลำลมสูง 9.10 เมตร (30 ฟุต)

SkyVenture Orlando⁽³⁰⁾ เป็นผู้ออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมทางดิ่ง เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับความบันเทิง การกีฬาและการฝึกทางทหาร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.60 เมตร (12 ฟุต) แบบในอาคาร ใช้กำลังงานขับใบพัดลม 1,000 แรงม้า ในปี พ.ศ. 2546 อุโมงค์ลมทางดิ่งเปิดบริการมากกว่า 5,000 ชั่วโมง ต้องการการบำรุงรักษา น้อยกว่า 75 ชั่วโมง

SkyVenture U.K. Milton Keynes⁽²⁹⁾ สร้างอุโมงค์ลมทางดิ่งแบบในอาคาร ใช้อากาศหมุนวน ชื่อ เอ็กซ์เคป (XSCAPE) ติดตั้งอยู่ที่ระยะ 30 ไมล์ ทางเหนือกรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ เส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ลม 3.60 เมตร (12 ฟุต) กำหนดความเร็วลมสูงสุด 71 เมตร/วินาที (160 ไมล์/ชั่วโมง) ความสูงลำลม 10 เมตร (33 ฟุต) ให้กำลังลมเรียบ เสียงเงียบ กำลังงานขับใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 250 แรงม้า 4 ตัว (1,000 แรงม้า) อนุญาตให้กลุ่มผู้ให้บริการเข้าฝึกलयตัวได้ครั้งละ 4 คน โดยแบ่งตามขนาด อายุและความชำนาญ

Bodyflightconcepts⁽⁷⁾ ในอดีตที่ผ่านมา อุโมงค์ลมทางดิ่งมีปัญหาเสียงดังรบกวนมาก จึงได้มีกฎควบคุมระดับเสียงดังรบกวนในอุโมงค์ลมทางดิ่งให้ไม่เกิน 90 เดซิเบล (Decibel) จากการออกแบบสร้างของ บอดี้ฟลายท์ (Bodyflight) ทำให้มีระดับเสียงต่ำกว่า 74 เดซิเบล โครงสร้างขนาด 24 ฟุต แบบในอาคาร สามารถติดตั้งอุโมงค์ลมทางดิ่ง ภายในสวนสนุก สวนสาธารณะ ที่โรงภาพยนตร์ ภัตตาคาร ห้างสรรพสินค้าได้ อุโมงค์ลมทางดิ่งต้องใช้เงินลงทุนหลายล้านดอลลาร์สหรัฐ วิศวกรใช้เวลามากกว่า 10 ปี ในการทดสอบอุโมงค์ลมทางดิ่ง แอล วัน

(L1) ใยพดลทำจากไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) เส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางตั้ง ตั้งแต่ 0.30 - 4.87 เมตร (1-16 ฟุต) ความเร็วลมมากกว่า 60 เมตร/วินาที (135 ไมล์/ชั่วโมง) กำลังงานที่ใช้ขับใยพดลคือ มอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งไม่ต้องการการบำรุงรักษาใดๆ อุโมงค์ลมทางตั้งออกแบบให้เดินเครื่อง 24 ชั่วโมง/วัน 365 วัน/ปี

George Bergeles ⁽¹⁶⁾ ได้สร้างห้องทดลองอากาศพลศาสตร์ของไหล ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัย The National Technical University Of Athens (N.T.U.A.) ซึ่งเป็นมหาวิทยาลัยเก่าแก่ของประเทศกรีซ ห้องทดลองมีพื้นที่ 8,800 ตารางเมตร เพื่อการฝึกอบรม การวิจัยแก่นิสิตจนถึงระดับปริญญาเอก เป็นห้องทดลองขนาดใหญ่แบบวงจรปิด อุโมงค์ลมความเร็วลมต่ำกว่าความเร็วเสียง (Subsonic) มีความสะดวกในการใช้งาน เครื่องมือวัดมีความแม่นยำสูง กำลังงานใช้พดลไฟฟ้า 7 ใย แบบไหลตามแนวแกน ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด 350 แรงม้า ใช้อุปกรณ์ไทรสเตอร์ (Thyristor) ควบคุมความเร็วลมได้อย่างต่อเนื่อง ความยาวอุโมงค์ลม 32 เมตร มีพื้นที่การทดสอบแบบเปิดแบ่งเป็น 3 แห่ง พื้นที่ทดสอบแรก มีความเร็วลมสูงสุด 70 เมตร/วินาที มีความถูกต้องสูง มีจุดสมดุลการวัดแรงปะทะลม 1,000 - 5,000 นิวตัน ใช้สำหรับวิจัยแผ่นควบคุมแรงยกเครื่องบิน ปีกเครื่องบิน พื้นที่ทดสอบสอง มีความเร็วลมสูงสุด 18 เมตร/วินาที ติดตั้งเครื่องมือควบคุมระยะไกล (Remotely controlled) ของการเคลื่อนที่ชิ้นส่วนกล พื้นที่ส่วนนี้สำหรับการทดลองเกี่ยวกับอุตสาหกรรมด้านพลศาสตร์การไหล เช่น แรงลมกระทำกับอาคาร อาคารเรือน กระจก สะพาน หอระบายความร้อน การศึกษากระแสลมในทางตั้ง การศึกษาสภาวะแวดล้อมของการแพร่กระจายของแก๊ส ปล่องควันจากอาคาร พลังงานไฟฟ้าจากความร้อน พื้นที่ทดสอบสาม เป็นพื้นที่ที่ใหญ่ที่สุด ความเร็วลมสูงสุด 12 เมตร/วินาที ใช้สำหรับการศึกษาพลศาสตร์ใบพัด กังหันลม พดล

BEVI Ltd. ⁽⁶⁾ ศึกษาประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ซึ่งจะสูญเสียพลังงานประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ และได้กำลังงานกลมาใช้งาน 95 เปอร์เซ็นต์ ต้นแบบของมอเตอร์มาตรฐาน 3 เฟส ไฟฟ้ากระแสสลับ มอเตอร์ไฟฟ้าแบบกึ่งกรอกจะมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 75 เปอร์เซ็นต์ สำหรับมอเตอร์ขนาด 0.75 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพ 95 เปอร์เซ็นต์ สำหรับมอเตอร์ขนาด 110 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพ 98 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป สำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่มากๆ ความน่าจะเป็นของกำลังงานไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์เปลี่ยนเป็นพลังงานกล ได้ประมาณ 85 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น กำลังงานสูญเสียจากการเปลี่ยนรูปพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ กำลังงานที่จะได้ใช้งานจริง 85 เปอร์เซ็นต์ สำหรับใช้ขับเคลื่อนเครื่องจักร เครื่องมือต่างๆ การส่งถ่ายกำลังงานก็มีการสูญเสียกำลังงาน ระหว่าง 0 - 20 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับแนวการส่งถ่ายกำลังงาน ประสิทธิภาพเฉลี่ยของเครื่องมือ เช่น ปัด พดล คอมเพรสเซอร์ ปั๊มจันยกของ สายพานลำเลียง เครื่องปั้น เครื่องบด เป็นต้น มอเตอร์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ถูกนำไปใช้ ควรจะมีประสิทธิภาพมากกว่า 55 เปอร์เซ็นต์ และได้กำลังงานกลออกมา 45 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเพิ่มภาระให้กับมอเตอร์ 4 เปอร์เซ็นต์ ผลที่เกิดขึ้นคือ อุณหภูมิมอเตอร์จะเพิ่ม 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นควรเลือกใช้มอเตอร์ให้ถูกต้องกับงาน

Fan Systems Group Ltd. ⁽¹³⁾ ตั้งอยู่ที่ประเทศอังกฤษเป็นบริษัทในกลุ่มของ WITT&SOHN AG ซึ่งตั้งอยู่ที่ประเทศเยอรมนี เป็นบริษัทผู้ผลิตชุดมอเตอร์พร้อมพดลชนิดต่าง ๆ ขนาดต่าง ๆ สำหรับงานระบายลม

ดูดควัน สำหรับอุโมงค์ลมทั้งแนวราบและแนวตั้ง อุโมงค์รถยนต์ อุโมงค์รถไฟ แสดงในตาราง 3 ชุดมอเตอร์พัดลมแบบไหลตามแนวแกนเพลลา (Axial flows)

ตาราง 3 ชุดมอเตอร์พัดลมแบบไหลตามแนวแกนเพลลา

ปริมาณการไหล (m ³ /s)	ความดันรวม (Pa)	ขนาดพัดลม (mm)	รอบทำงาน (rpm)	กำลังมอเตอร์ (kW)	มวลรวม (kg)	ประสิทธิภาพรวม (%)
27.77	1000	1,250	1,470	37	~900	75.07
27.77	1500	1,250	1,480	55	~1,200	75.75
55.55	1000	1,800	980	75	~2,100	74.07
55.55	1500	1,800	990	110	~2,400	75.75
111.11	1000	2,240	990	160	~3,700	69.44
111.11	1500	2,240	995	250	~4,100	66.66
222.22	1000	2,800	740	355	~6,200	62.59
222.22	1500	2,800	745	500	~7,100	66.66

Flakt Woods ⁽¹⁴⁾ เป็นผู้นำในด้านเทคโนโลยีการเคลื่อนย้ายอากาศ ทั้งในด้านการออกแบบและการพัฒนาการใช้งานมากกว่า 90 ปี มีประสบการณ์ในโลกอุตสาหกรรมระบบพัดลมขนาดใหญ่ เป็นผู้นำในตลาดพัฒนาด้านอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) เสียง (Acoustics) การสั่นสะเทือน (Vibration) การควบคุมระบบและคุณสมบัติของมอเตอร์ผ่านการรับรอง ISO 9001:1994 และ AQAP-1 มาตรฐานกระทรวงกลาโหมของสหรัฐฯ (The standard for the Ministry Defense) ผลิตภัณฑ์ใช้เคลื่อนย้ายอากาศของบริษัทออกสู่ประเทศต่างๆ ทั่วโลกมากกว่า 100 ประเทศ ชุดมอเตอร์พัดลมชื่อลาร์จ เจเอ็ม แอร์โรพอยล์ แฟน (Large JM Aerofoil fan) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 เมตร ถึง 3.15 เมตร มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของลม 300 ลูกบาศก์เมตร/วินาที ผ่านการรับรองจาก ISO 5801 มีทั้งแบบติดตั้งแนวราบและแนวตั้ง ประสิทธิภาพชุดมอเตอร์พัดลม 65 - 70 เปอร์เซ็นต์ สำหรับชุดมอเตอร์

พัดลมที่ไม่มีลิ้นบังคับทิศทาง (Non guide vane fan) และ 75 เปอร์เซ็นต์ สำหรับชุดมอเตอร์พัดลมที่มีลิ้นบังคับทิศทาง (Guide vane fan) ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ชุดมอเตอร์พัดลมของบริษัทแฟลคท์ วูดส์ กรุ๊ป จำกัด (Flakt Woods group Ltd)

ขนาดพัดลม (m)	รอบทำงาน (rpm)	กำลังมอเตอร์สูงสุด (kW)	อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m ³ /s)	ความดันรวม (kPa)	ระดับความดังเสียง dB
1.60	1500	250	45	1.80	124
1.80	1000	125	50	1.10	115
1.80	1500	500	70	2.50	126
2.00	1000	125	70	1.40	122
2.00	1500	700	100	3.00	129
2.24	1000	450	100	1.60	123
2.50	750	250	110	1.00	118
2.50	1000	700	150	2.20	127
2.80	750	550	150	1.70	124
3.15	750	800	225	1.80	128

สรุป จากการศึกษาเอกสาร โครงการและเดินทางไปศึกษาอุโมงค์ลมทางดิ่ง ของโรงเรียนสงครามพิเศษ ศูนย์สงครามพิเศษ ทำให้ทราบว่า อุโมงค์ลมทางดิ่งในประเทศไทย มีเฉพาะหน่วยงานทางทหารเพียงแห่งเดียวคือ ที่โรงเรียนสงครามพิเศษ ศูนย์สงครามพิเศษ จังหวัดลพบุรี ซึ่งเป็นอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบเปิดนอกอาคาร ใช้สำหรับฝึกทหารพลร่มเท่านั้น ปัจจุบันถูกระงับการใช้งาน ในต่างประเทศมีหลายแห่ง เช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ สภาพการติดตั้งมีทั้งแบบประจำอยู่กับที่และแบบเคลื่อนที่ สำหรับเครื่องต้นกำลังงาน มีทั้งแบบใช้เครื่องยนต์ดีเซล และใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับใบพัดลม ชนิดการขับ มีทั้งแบบขับโดยตรงจากเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ไฟฟ้า และแบบใช้เฟืองทดรอบความเร็วลมที่เข้าอยู่ระหว่าง 35 -71 เมตร/วินาที เส้นผ่านศูนย์กลางลำลม 3 - 4.80 เมตร กำลังงานที่ใช้ขับใบพัดลมอยู่ระหว่าง 600 -1,600 แรงม้า ความสูงลำลม 6 -10 เมตร วัตถุประสงค์การใช้งานโดยทั่วไปคือ เพื่อการกีฬาและการฝึกทางทหาร ไม่พบการวิเคราะห์อุโมงค์ลมทางดิ่งที่ออกแบบเหมือนกับงานวิจัยนี้ ด้วยระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข ด้วยโปรแกรม Fluent 6.2 เพื่อหาความเร็วและสภาพของกระแสลม นำมาเปรียบเทียบกับวิเคราะห์หาตัวแปรที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่สุด

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอน ประกอบด้วย

- 3.1 ออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่งหาความเร็วลม อัตราการไหลเชิงปริมาตรของลมที่ไหลผ่านอุโมงค์ลม กำลังงานชุดมอเตอร์พัดลม ชื่อและความหมาย ลักษณะและขนาด จำนวนชุดมอเตอร์พัดลม
- 3.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบหาขนาดกริดที่เหมาะสม
- 3.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาขนาดกริดที่เหมาะสม

3.1 ออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่ง

3.1.1 กำหนดหาความเร็วลมที่สามารถยกทหารพลร่มให้ลอยทางดิ่งได้

การคำนวณหาค่าต่างๆ ของอุโมงค์ลมทางดิ่ง โดยกำหนดคุณสมบัติที่ต้องการคือ รูปแบบอุโมงค์ลมทางดิ่งเป็นแบบในอาคาร ความสามารถในการใช้งานฝึกการลอยตัวได้ครั้งละไม่เกิน 4 คน พร้อมๆ กัน ความสูงลำลม 8 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.6 เมตร ใช้กำลังงานมอเตอร์ไฟฟ้าขับใบพัดลมแบบขับตรง ผนังอุโมงค์ลมทางดิ่งเป็นคอนกรีตเรียบ มวลนักโดดร่ม 100 กิโลกรัม/คน ความเร็วลมในอุโมงค์ลมทางดิ่งได้ตามตาราง 5 ตาราง 6 และภาพประกอบ 10

โดยที่

$$C_d = \text{สัมประสิทธิ์การรูด}$$

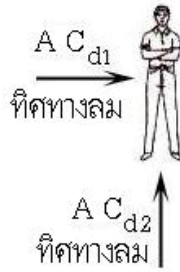
$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดการรูด}$$

ความถ่วงจำเพาะลม

$$S = 0.00122$$

ความหนาแน่นลม

$$\rho = 1.22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



ภาพประกอบ 10 แสดงทิศทางการไหลของกระแสลม¹⁵

ลมพัดตั้งฉากกับตัวคน $AC_{d1} = 0.8365 \text{ m}^2$ หรือ $(9 \text{ ft}^2)^{15}$

ลมพัดขนานกับตัวคน $AC_{d2} = 0.111 \text{ m}^2$ หรือ $(1.2 \text{ ft}^2)^{15}$

สภาวะสมดุล แรงปะทะ = แรงจุด (Drag force)

แรงปะทะ = น้ำหนัก

มวลนักโตดรัม 1 คน $m = 100 \text{ kg}$

$W = mg$

โดยที่ $\text{แรงจุด} = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2$

$mg = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2$

ความเร็วลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง $v = \sqrt{\frac{2 mg}{C_d A \rho}}$ จากสมการ (2-26)

ตาราง 5 แสดงมวลนักโตดรัมกับความเร็วม ลมพัดตั้งฉากกับด้านหน้าตัวคน

มวลนักโตดรัม (kg)	80	90	100	110	120	130
ความเร็วม (m/s)	39.54	41.94	44.20	46.36	48.42	50.40

และจะใช้ความเร็วม 45 เมตร/วินาที สำหรับการวิเคราะห์ในอุโมงค์ลมทางดิ่งในงานวิจัยนี้

ตาราง 6 แสดงมวลนักโตดรัมกับความเร็วม ลมพัดขนานกับตัวคน

มวลนักโตดรัม (kg)	80	90	100	110	120	130
ความเร็วม (m/s)	107.65	114.19	120.36	126.24	131.85	137.23

3.1.2 คำนวณหาปริมาณลมที่ไหลผ่านอุโมงค์ลมทางดิ่ง

กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางดิ่ง 3.6 เมตร²⁹ หาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง กำหนดความเร็วม 45 เมตร/วินาที เส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ลม 3.6 เมตร จากตาราง 5 เมื่อความหนาแน่นลมคงที่ หาอัตราการไหลเชิงปริมาตรและอัตราการไหลเชิงมวลของลม ได้ดังนี้

โดยที่ อัตราการไหลเชิงปริมาตร $Q = A V$

$$Q = \frac{\pi}{4} \times 3.6^2 \text{ m}^2 \times 45 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

อัตราการไหลเชิงปริมาตร $Q = 458 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

อัตราการไหลเชิงมวลของลม $\dot{m} = \rho Q$

$$\dot{m} = 1.22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 458 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{อัตราการไหลเชิงมวลของลม} \quad \dot{m} = 558.76 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

3.1.3 คำนวณหาค่าพลังงานชุดมอเตอร์พัดลม

คำนวณหาค่าพลังงานชุดมอเตอร์พัดลม เพื่อผลักดันลมให้มีความเร็ว 45 เมตร/วินาที และมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของลม 458 ลูกบาศก์เมตร/วินาที พลังงานสูญเสีย พิจารณาจากภาพประกอบ 11 จากสมการ (2-9)

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad R_e &= \frac{\rho D \forall}{\mu} \\ &= \frac{1.22 (\text{kg} / \text{m}^3) \times 3.6 \text{ m} \times 45 (\text{m} / \text{s})}{1.8 \times 10^{-5} (\text{Ns} / \text{m}^2)} \\ &= 10,800,000 \end{aligned}$$

$$\text{ตัวเลขเรย์โนลด์} \quad R_e = 1.08 \times 10^7 \text{ เป็นการไหลแบบปั่นป่วน}$$

กำหนดให้ ผนังอุโมงค์ลมทางดิ่งเป็นคอนกรีตผนังเรียบ ค่าความขรุขระ (ε) 0.04 มิลลิเมตร^{5, 19} ตามภาพประกอบ 2

$$\text{ความขรุขระสัมพัทธ์} \quad \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.04 \text{ mm}}{3,600 \text{ mm}}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = 1 \times 10^{-5}$$

จากภาพประกอบ 1 หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f)

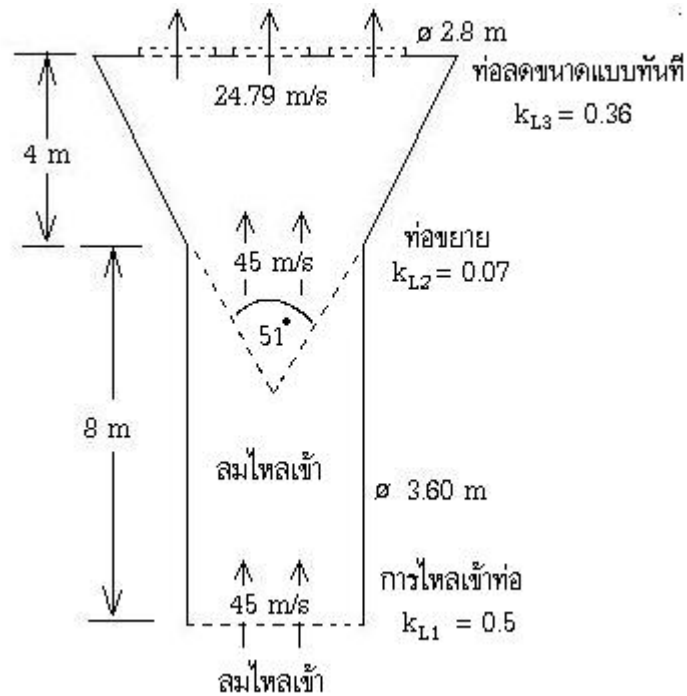
$$f = 0.009$$

$$\text{จากสมการ (2-11)} \quad h_f = f \frac{L}{D} \frac{\forall^2}{2g}$$

$$h_f = 0.009 \times \frac{8 \text{ m}}{3.6 \text{ m}} \times \frac{45^2 (\text{m} / \text{s})^2}{2 \times 9.81 (\text{m} / \text{s}^2)}$$

พลังงานสูญเสียหลัก

$$h_f = 2.06 \text{ m}$$



ภาพประกอบ 11 แสดงสัมประสิทธิ์ความสูญเสียรอง

การสูญเสียพลังงานรอง (รูปกรวยปิดและท่อออกลดขนาด 3 ท่อ แบบทันทึ) หาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยท่อทางออก 3 ท่อ โดยแต่ท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เมตร ดังนี้

$$\text{พื้นที่ทางออก 1 ท่อทาง} \quad A_{2.8} = \frac{\pi}{4} \times 2.8^2 \text{ m}^2$$

$$A_{2.8} = 6.15 \text{ m}^2$$

$$\text{พื้นที่ทางออก 3 ท่อทาง} \quad A_{2.8 \times 3} = 18.472 \text{ m}^2$$

$$\text{สมการการไหลต่อเนื่อง} \quad A_{3.6} V_{45} = A_{2.8 \times 3} V_{2.8 \times 3}$$

$$\frac{\pi}{4} \times 3.6^2 \text{ m}^2 \times 45 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 18.472 \text{ m}^2 V_{2.8 \times 3}$$

ความเร็วเฉลี่ย 1 ท่อทางออกรวม $V_{2.8 \times 3}^- = 24.8 \frac{m}{s}$

พิจารณาขนาดท่อทางเข้าเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.6 เมตร ทางเข้าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย $k_{L1} = 0.5$ ¹⁵ ท่อขยาย
มุมยอดกรวย 51 องศา สัมประสิทธิ์การสูญเสีย $k_{L2} = 0.07$ ¹⁵ ท่อลดขนาดทางออกแบบทันทีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8
เมตร 3 ท่อ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย $k_{L3} = 0.36$ ¹⁵

จากสมการ (2-12) การสูญเสียรอง $h_m = k_L \frac{V^2}{2g}$

$$h_m = (k_{L1} + k_{L2}) \frac{V_1^2}{2g} + k_{L3} \frac{V_3^2}{2g}$$

$$h_m = (0.5 + 0.07) \times \frac{45^2 (m/s)^2}{2 \times 9.81 (m/s^2)} + 0.36 \times \frac{24.8^2 (m/s)^2}{2 \times 9.81 (m/s^2)}$$

$$h_m = 58.83 \text{ m} + 11.27 \text{ m}$$

$$h_m = 70.1 \text{ m}$$

พลังงานสูญเสียเป็นพลังงานรวมของ พลังงานสูญเสียหลัก กับ พลังงานสูญเสียรอง

พลังงานสูญเสีย $h_L = \text{พลังงานสูญเสียหลัก} + \text{พลังงานสูญเสียรอง}$

$$h_L = h_f + h_m$$

$$h_L = 2.06 \text{ m} + 70.1 \text{ m}$$

$$h_L = 72.16 \text{ m}$$

หาพลังงานลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง โดยที่ความดันลมทางเข้าและความดันลมทางออกเป็นความดันบรรยากาศ ความเร็วลมภายในอุโมงค์ลมทางดิ่ง 45 เมตร/วินาที ทางเข้าให้ระดับอ้างอิงผ่าน ความสูงระยะปีก 8 เมตร และมีพลังงานสูญเสีย 2.06 เมตร จากสมการ (2-8)

$$\text{โดยที่} \quad \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + E_p = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

$$0 + 0 + 0 + E_p = 0 + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

$$\text{พลังงานลม} \quad E_p = \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

$$E_p = \frac{45^2 \text{ (m/s)}^2}{2 \times 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}} + 8 \text{ m} + 72.16 \text{ m}$$

$$\text{พลังงานลม} \quad E_p = 103.21 \text{ m} + 8 \text{ m} + 72.16 \text{ m}$$

$$\text{พลังงานลม} \quad E_p = 183.37 \text{ m}$$

หากำลังงานลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง โดยที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของลม 458 ลูกบาศก์เมตร/วินาที พลังงานลม 183.37 เมตร หากำลังงานลมได้ดังนี้

$$\text{โดยที่} \quad \text{กำลังงานลม} = \gamma Q E_p \quad (3-1)$$

$$\text{กำลังงานลม} = 0.00122 \times 9.81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times 458 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 183.37 \text{ m}$$

$$\text{กำลังงานลม} = 1005.13 \text{ kW.}$$

$$\text{กำลังงานลม} = 1,347.35 \text{ HP.}$$

หากำลังงานชุดมอเตอร์พัดลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง โดยที่ประสิทธิภาพชุดมอเตอร์พัดลม 98 เปอร์เซ็นต์⁶

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad \text{กำลังงานชุดมอเตอร์พัดลม} &= \text{กำลังงานลม} \times \frac{1}{\eta} \\ &= 1005.13 \text{ kW} \times \frac{100}{98} \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$\text{กำลังงานชุดมอเตอร์พัดลม} = 1,025.64 \text{ kW.}$$

$$= 1,374.85 \text{ HP.}$$

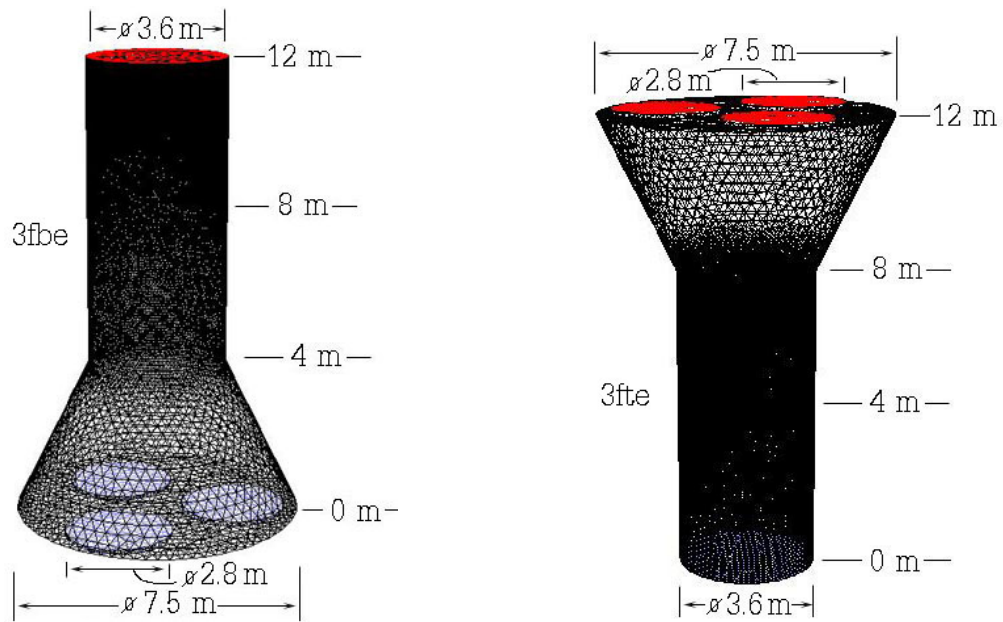
ใช้กำลังงานชุดมอเตอร์พัดลมในการออกแบบ = 1,500 HP.

3.1.4 ชื่อและความหมายอุโมงค์ลมทางดิ่ง

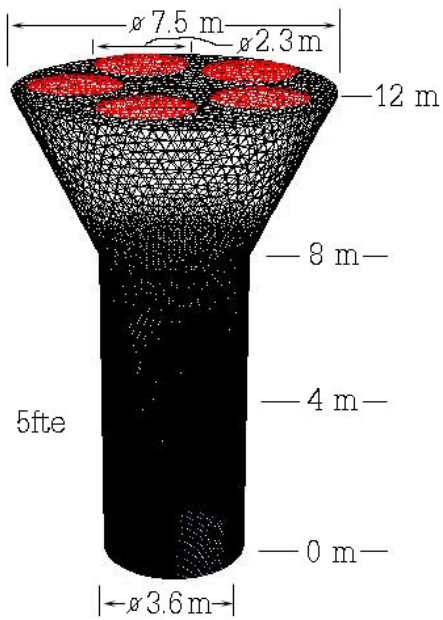
ข้อมูลที่กำหนดขึ้นและข้อมูลที่ได้จากการค้นคว้า ผู้วิจัยได้กำหนดชื่ออุโมงค์ลมทางดิ่ง เพื่อความสะดวกในการเรียกชื่อไฟล์งาน ที่ได้ออกแบบ เขียนแบบ และวิเคราะห์อุโมงค์ลมทางดิ่ง 3 มิติ ตามตาราง 7 ภาพประกอบ 12 ภาพประกอบ 13 และภาพประกอบ 14

ตาราง 7 ชื่อและความหมายอุโมงค์ลมทางดิ่งที่ออกแบบ

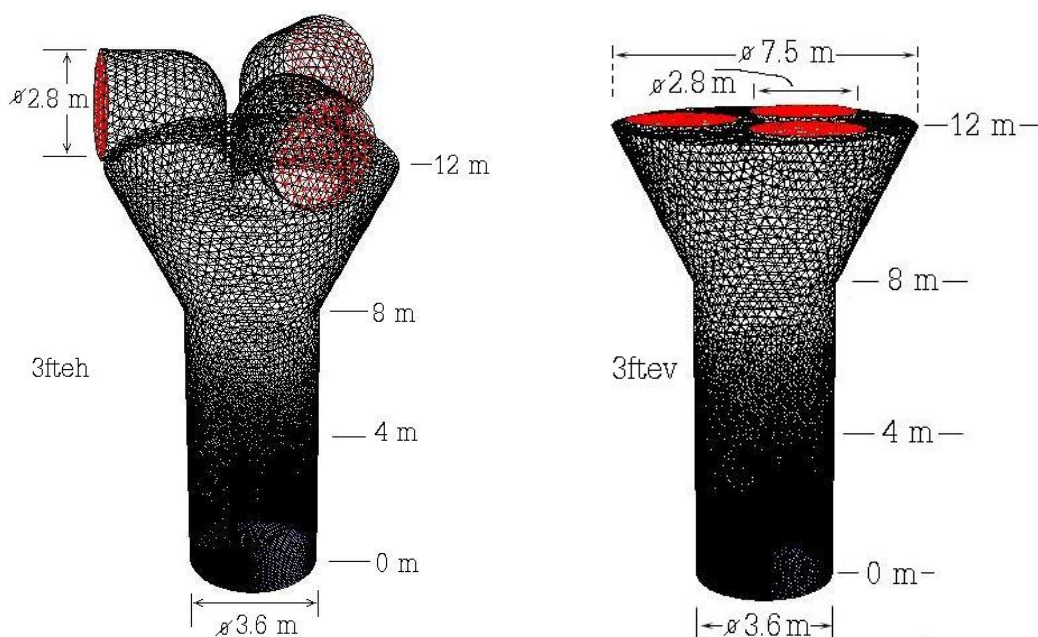
ชื่อ	ความหมายอุโมงค์ลมทางดิ่ง ว่างเปล่า
3fbe	ชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านล่าง
3fte	ชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบน
5fte	ชุดมอเตอร์พัดลม 5 ชุด ที่ด้านบน
3fteh	ชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบน ท่อลมออกแนวราบ
3ftev	ชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบน ท่อลมออกแนวดิ่ง



ภาพประกอบ 12 อุโมงค์ลมทางดิ่งแบบ 3fbe และ 3fte



ภาพประกอบ 13 อุโมงค์ลมทางดิ่งแบบ 5fte



ภาพประกอบ 14 อุโมงค์ลมทางดิ่งแบบ 3fteh และ 3ftev

3.1.5 ลักษณะและขนาดอุโมงค์ลมทางดิ่ง

ช่วงระยะการลอยตัว (Test section) ของนักโคตรัม 0-8 เมตร ส่วนกรวย สูง 4 เมตร สำหรับติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมแบ่งเป็น 2 กรณี ประกอบด้วย

กรณีที่ 1 ติดชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด เส้นผ่านศูนย์กลางพัดลม 2.8 เมตร

กรณีที่ 2 ติดชุดมอเตอร์พัดลม 5 ชุด เส้นผ่านศูนย์กลางพัดลม 2.3 เมตร

ซึ่งทั้ง 2 กรณี เส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางดิ่ง มีความโตไม่เพียงพอที่จะติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมทั้งหมดได้โดยตรง จึงออกแบบส่วนที่เป็นรูปกรวย ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านโต 7.5 เมตร ด้านเล็กเท่ากับอุโมงค์ลม 3.6 เมตร สูง 4 เมตร ใช้เป็นที่ติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมจำนวน 3 ชุด และแบบชุดมอเตอร์พัดลมจำนวน 5 ชุด

3.1.6 จำนวนชุดมอเตอร์พัดลม

การที่จะกำหนดจำนวนชุดมอเตอร์พัดลม จะต้องกำหนดจากข้อมูลที่ค้นคว้าจากสื่อต่างๆ ข้อมูลดังกล่าวประกอบด้วย ขนาดชุดมอเตอร์พัดลม จำนวนชุดมอเตอร์พัดลม อัตราการไหลเชิงปริมาตรของลมที่ไหลผ่าน ความเร็วรอบ กำลังงานมอเตอร์ ประสิทธิภาพรวม การเลือกใช้ชุดมอเตอร์พัดลมขนาดใดๆ จะต้องมีอุปกรณ์ขนาดดังกล่าวจริงที่โรงงานอุตสาหกรรมผลิตออกจำหน่าย ค่าที่ใช้งานจะต้องเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่คำนวณได้ ประกอบด้วย

กรณีที่ 1 ชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เมตร เป็นข้อมูลชุดมอเตอร์พัดลมของบริษัท Fan Systems Group Ltd. ประเทศอังกฤษ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของลม 222.22 ลูกบาศก์เมตร/วินาที กำลัง

มอเตอร์ แต่ละชุด 355 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพรวม 62.59 เปอร์เซนต์ จากตาราง 3

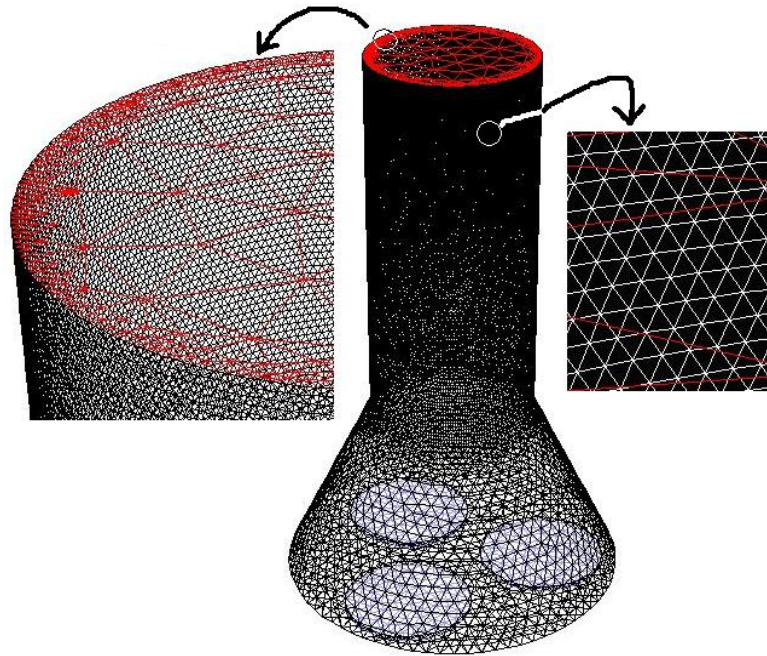
กรณีนี้ 2 ชุดมอเตอร์พัดลม 5 ชุด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.24 เมตร เป็นข้อมูลชุดมอเตอร์พัดลมของบริษัท Fan Systems Group Ltd. ประเทศอังกฤษ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของลม 111 ลูกบาศก์เมตร/วินาที กำลังมอเตอร์ แต่ละชุด 160 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพรวม 69.44 เปอร์เซนต์ จากตาราง 3

3.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบขนาดกริดที่เหมาะสม (Grid Size Independent)

การเปรียบเทียบขนาดของกริด (Grid) ที่เหมาะสม กำหนดใช้กริดปิรามิดสามเหลี่ยม (tetrahedral) โดยเลือกใช้ขนาดด้านของกริด เป็น 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 และ 0.3 เมตร ใช้อุโมงค์ลมแบบ 3fbc ทำการวิเคราะห์หาความเร็วและสภาพกระแสลมที่ตำแหน่งต่างๆ แล้วดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 นำค่าความเร็วและสภาพกระแสลมของอุโมงค์ลมทางดิ่งที่กำหนดขนาดกริด 0.05 เมตร เป็นตัวหลัก นำความเร็วและสภาพกระแสลมของอุโมงค์ลมทางดิ่งที่กำหนดขนาดกริดอื่นๆ มาเปรียบเทียบหาความเร็วแตกต่าง เลือกอุโมงค์ลมทางดิ่งที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดตามที่ต้องการ ขั้นตอนที่ 2 นำความเร็วของอุโมงค์ลมทางดิ่งที่เลือกจากขั้นตอนที่ 1 มาเป็นตัวมาตรฐาน นำค่าความเร็วของอุโมงค์ลมทางดิ่งที่มีขนาดของกริดที่ใช้ต่างกัน ที่ยังไม่ได้เปรียบเทียบ มาเปรียบเทียบหาความเร็วแตกต่าง แล้วเลือกอุโมงค์ลมทางดิ่งที่เหมาะสมที่สุดตามที่ได้ออกแบบ ทำแบบเดียวกับขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 จนครบทุกแบบของอุโมงค์ลมทางดิ่ง ขั้นตอนสุดท้าย เลือกค่าความเร็วแตกต่างที่น้อยและยอมรับได้ ตามตาราง 8 และภาพประกอบ 15

ตาราง 8 ขนาดและจำนวนของกริด

ลำดับที่	ขนาดของกริดที่ใช้	จำนวนกริดทั้งหมด
1	0.05 m	190,941
2	0.06 m	173,201
3	0.07 m	150,348
4	0.08 m	129,862
5	0.09 m	113,720
6	0.1 m	105,017
7	0.3 m	100,016
8	0.5 m	858,02



ภาพประกอบ 15 การตีกริดตำแหน่งที่แตกต่างกันแบบ 3fbe

3.2.1 วิธีการตีกริด

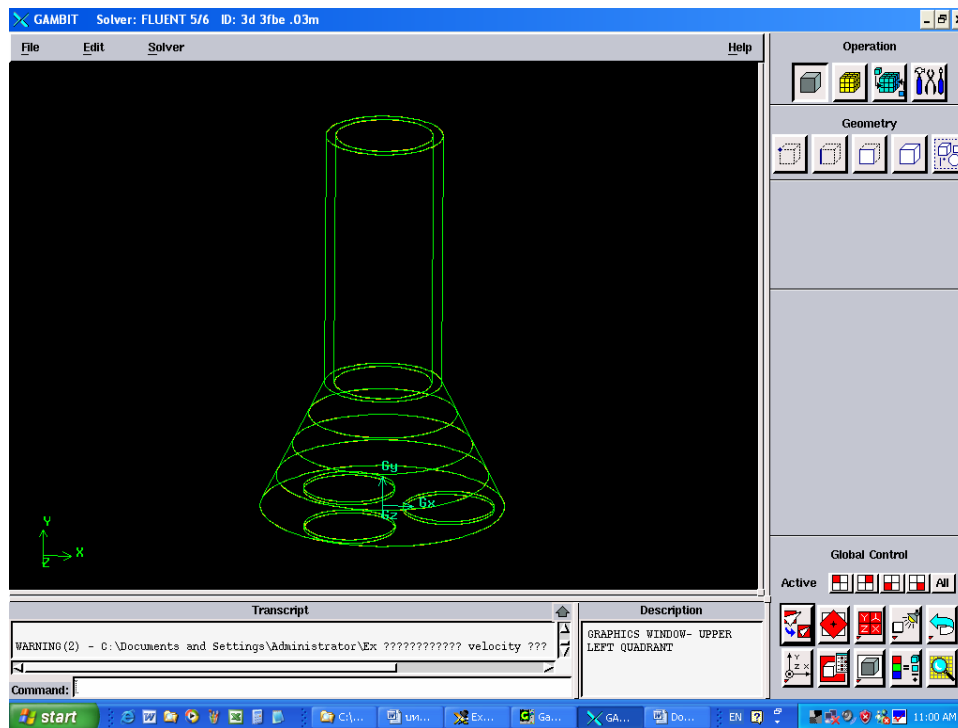
ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะใช้อุโมงค์ลมทางดิ่งเป็น 3 มิติ ทั้งหมด หลังจากการเขียนแบบ และกำหนดเงื่อนไขต่างๆ เสร็จแล้ว จะนำแบบอุโมงค์ลมทางดิ่งมาแบ่งเป็นส่วนๆ กำหนดปริมาตรการตีกริด ให้มีความละเอียดของกริดแตกต่างกัน เพื่อความถูกต้อง ประหยัดทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ และเวลาที่ใช้วิเคราะห์ ประกอบด้วย

1. ปริมาตรระยะการลอยตัวความสูง 8 เมตร จากจุดศูนย์กลาง รัศมี 1.5 เมตร ใช้ขนาดของกริด 0.6 เมตร กรณีอุโมงค์ลมแบบ 3fte และใช้ขนาดของกริด 0.2 เมตร กรณีอุโมงค์ลมแบบ 3fbe ปริมาตรส่วนนี้อยู่ตอนกลาง ได้รับผลกระทบจากความหนืดลมต่อผนังน้อย จึงไม่จำเป็นต้องใช้กริดที่ละเอียดมาก ตามภาพประกอบ 15-22

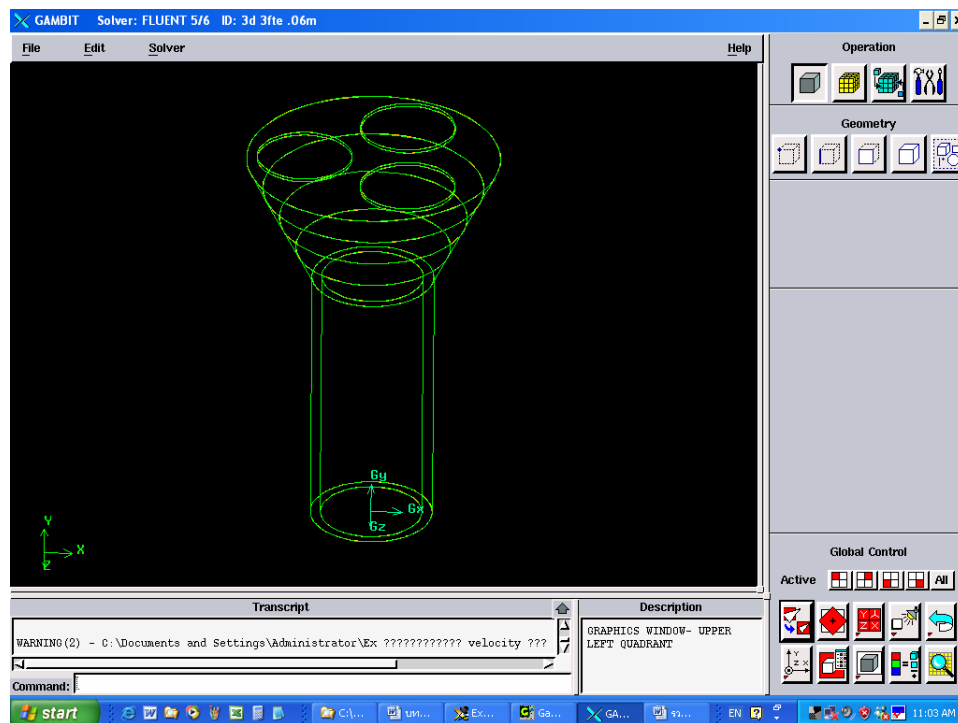
2. ที่ระยะ 0.3 เมตร จากผนัง (รัศมี 1.5-1.8 เมตร) ซึ่งได้รับผลกระทบจากความหนืดลมต่อผนังมากกว่า มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของกริด 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1 และ 0.3 เมตร ตามตาราง 8

3. ส่วนกรวยสำหรับติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม ขนาดของกริด 0.3 เมตร โดยติดตั้งอยู่ด้านล่างของอุโมงค์ลม และติดตั้งอยู่ด้านบนของอุโมงค์ลม

4. ลักษณะของกริดที่ใช้ จะเป็นกริดปริมาตรสามเหลี่ยม ซึ่งจะเข้าบริเวณที่เป็นส่วนโค้งได้ดี และจะมีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณผลลัพธ์

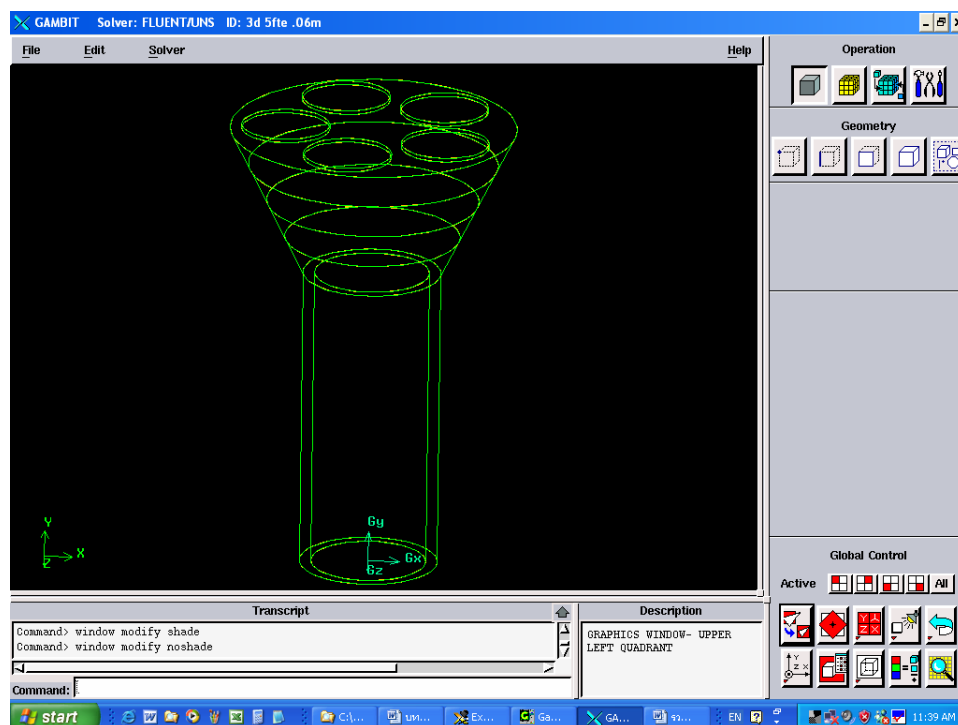


ภาพประกอบ 16 แสดงการแบ่งส่วนเพื่อตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 3fbe

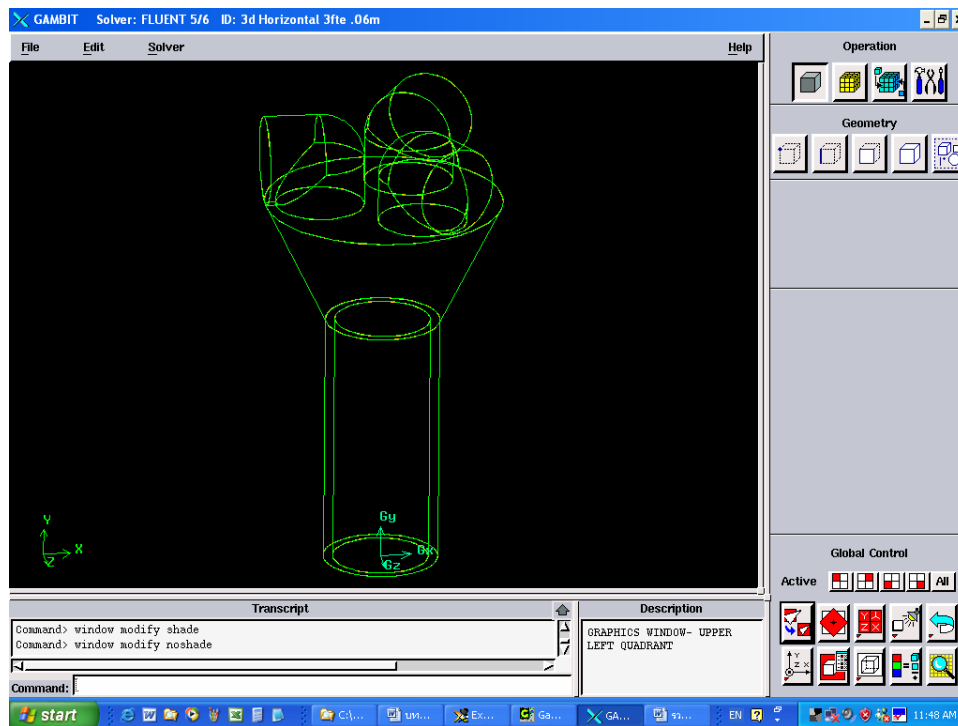


ภาพประกอบ 17 แสดงการแบ่งส่วนเพื่อตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 3fte

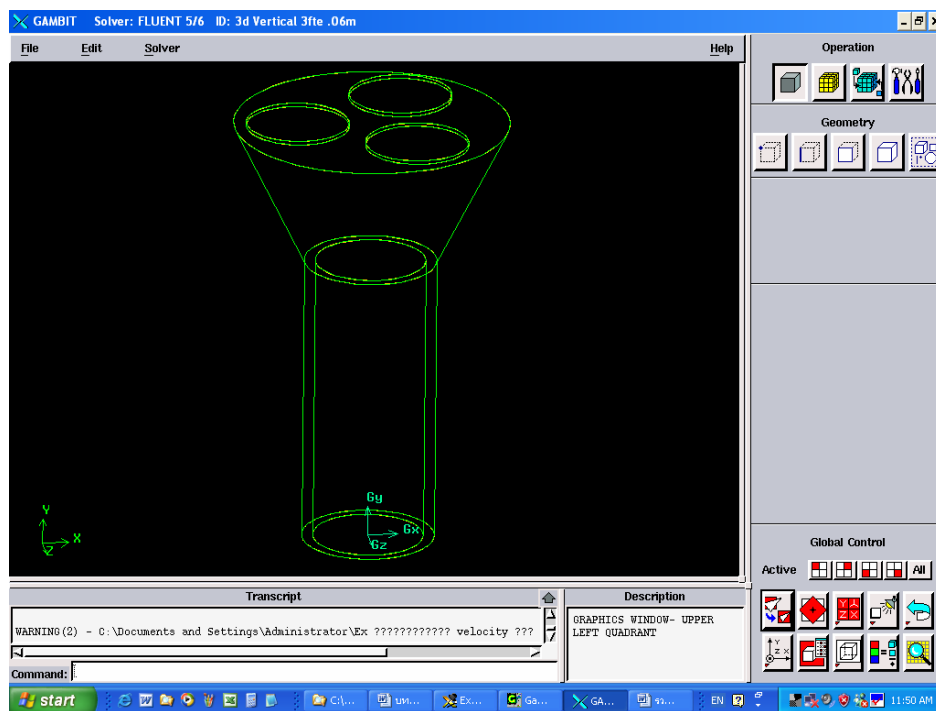
การแบ่งปริมาตรส่วนที่ได้รับผลของแรงเฉือนและปริมาตรส่วนที่ไม่ได้รับผลของแรงเฉือน ของความหนืดลม กับผนังอุโมงค์ลมทางดิ่งออกจากกัน เพื่อกำหนดขนาดกริดที่ต่างกัน โดยปริมาตรส่วนที่ได้รับผลของแรงเฉือนจากความหนืดลมกับผนังอุโมงค์ลม จะกำหนดให้มีขนาดกริดเปลี่ยนแปลงหลายๆ ขนาด ได้แก่ 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1 และ 0.3 เมตร ปริมาตรส่วนที่ไม่ได้รับผลของแรงเฉือนจากความหนืดลมกับผนังอุโมงค์ลม จะมีขนาด กริดคงที่ คือ 0.6 เมตร ทั้งนี้จะมีผลทำให้ประหยัดทรัพยากรต่างๆ เช่น ความสามารถของคอมพิวเตอร์ ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ เป็นต้น



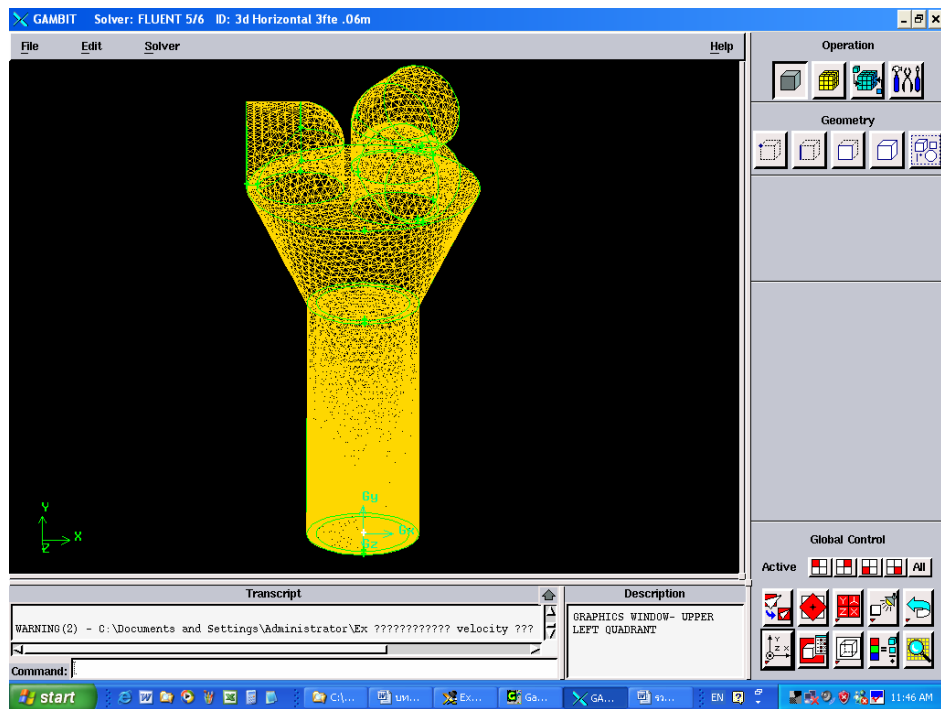
ภาพประกอบ 18 แสดงการแบ่งส่วนเพื่อติกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 5fte



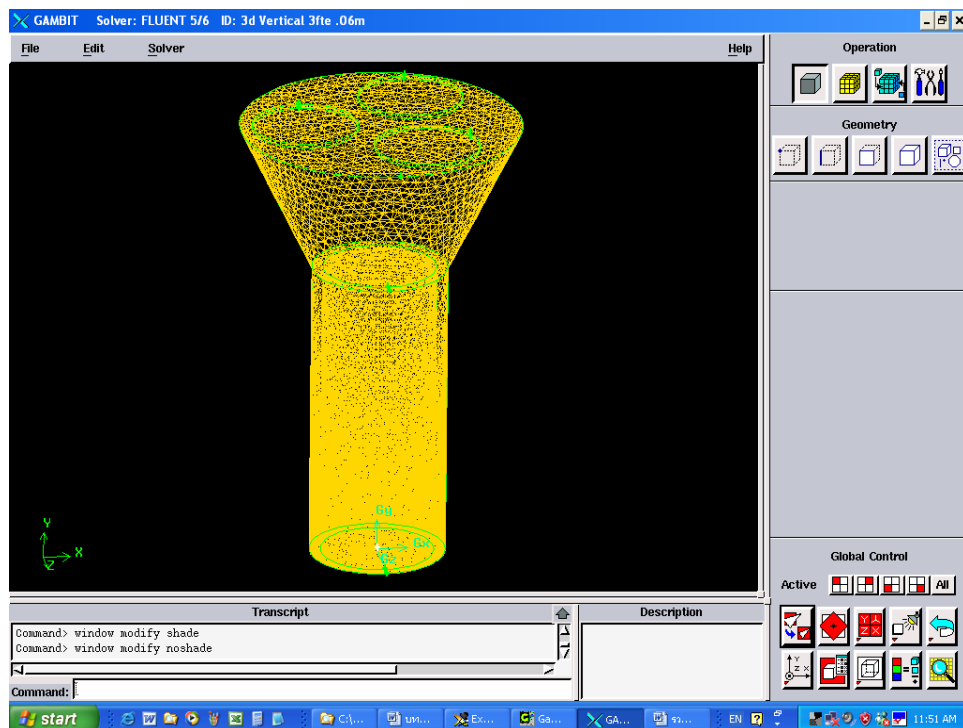
ภาพประกอบ 19 แสดงการแบ่งส่วนเพื่อตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 3fteh



ภาพประกอบ 20 แสดงการแบ่งส่วนเพื่อตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 3ftev



ภาพประกอบ 21 แสดงการตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 5fteh



ภาพประกอบ 22 แสดงการตีกริดขนาดที่แตกต่างกัน แบบ 3ftev

3.2.2 การเปรียบเทียบขนาดของกริด

การเปรียบเทียบตัวแปร จะเปรียบเทียบครั้งละ 2 ตัวแปร โดยกำหนดเงื่อนไขมาใช้เปรียบเทียบ เลือกตัวแปรที่เข้าเงื่อนไขมากที่สุด มาเป็นตัวแปรมาตรฐาน นำตัวแปรอื่นมาเปรียบเทียบ ตัวแปรที่ต่ำกว่าทิ้งไป เลือกตัวแปรที่ดีกว่า นำตัวแปรที่ดีกว่ามาเป็นตัวมาตรฐาน แล้วนำตัวแปรต่อไปมาเปรียบเทียบทำแบบนี้เรื่อยๆ ไปจนกว่าจะไม่มี ความแตกต่างหรือมีความแตกต่างน้อยๆ เป็นที่ยอมรับได้ การเปรียบเทียบความเร็วที่ตำแหน่งรัศมี 1.5-1.8 เมตร ซึ่งเป็นส่วนที่เปลี่ยนแปลงขนาดกริด ตำแหน่งรัศมี 0-1.5 เมตร เป็นส่วนที่อยู่ตอนกลางใช้ขนาดกริดคงที่ จึงเปรียบเทียบไม่ได้ ผู้วิจัยจะใช้ความเร็วลมในอุโมงค์ลมทางดิ่งที่มีขนาดกริด 0.05 เมตร เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบ นำความเร็วลมในอุโมงค์ลมทางดิ่งที่มีขนาดกริด 0.3 เมตร มาเปรียบเทียบ ได้ความเร็วแตกต่างต่อจากนั้นเปรียบเทียบลำดับที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามตาราง 9

ตาราง 9 เปรียบเทียบความเร็วลมแตกต่างที่ขนาดกริดต่างกัน

ลำดับที่	ขนาดกริดคู่เปรียบเทียบ	
1	0.05 เมตร	0.3 เมตร
2	0.05 เมตร	0.1 เมตร
3	0.05 เมตร	0.09 เมตร
4	0.05 เมตร	0.08 เมตร
5	0.05 เมตร	0.07 เมตร
6	0.05 เมตร	0.06 เมตร

3.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาขนาดกริดที่เหมาะสม

ใช้กริดปริมาตรสามเหลี่ยม โดยเลือกใช้ขนาดกริด 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 และ 0.3 เมตร ตามลำดับ เลือกใช้อุโมงค์ลมแบบ 3fbc ทำการวิเคราะห์หาความเร็วลม ใช้ขนาดกริด 0.05 เมตร เป็นตัวหลัก นำความเร็วของอุโมงค์ลมที่ตกริดขนาดอื่นๆ มาเปรียบเทียบ ลักษณะตามภาพประกอบ 22 ได้ดังนี้

ภาพประกอบ 23 ผลการเปรียบเทียบความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีขนาดกริด 0.05 เมตร กับความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีขนาดกริด 0.3 เมตร ได้สภาพลมไม่เรียบเหมือนกันทั้ง 2 แบบ ความเร็วที่ตำแหน่งรัศมี -1.62 เมตร (จากจุดศูนย์กลางไปทางซ้ายมือ) มีค่าความเร็วแตกต่าง 16.05 เมตร/วินาที

ภาพประกอบ 24 ผลการเปรียบเทียบความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีขนาดกริด 0.05 เมตร กับความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีขนาดกริด 0.1 เมตร ได้สภาพลมไม่เรียบเหมือนกันทั้ง 2 แบบ ความเร็วที่ตำแหน่งรัศมี-1.62 เมตร (จุดศูนย์กลางไปทางซ้ายมือ) ค่าความเร็วแตกต่างกัน 17.55 เมตร/วินาที

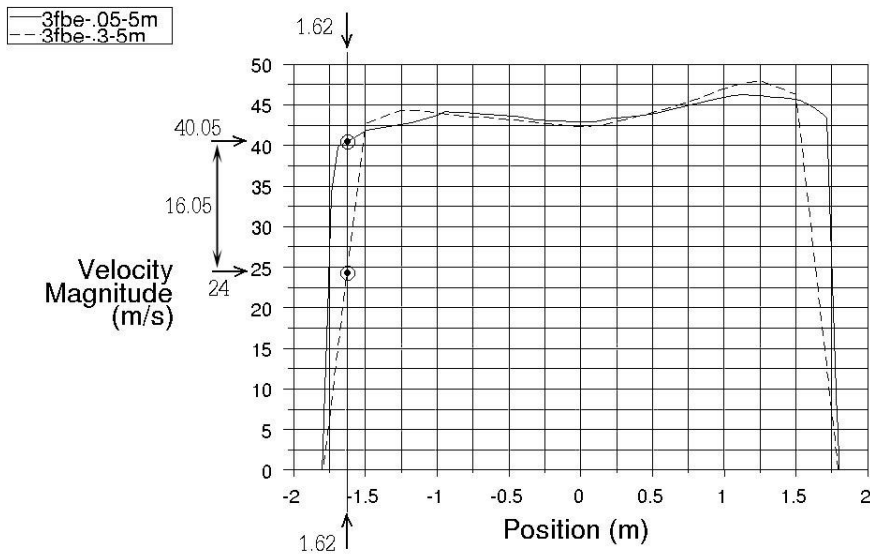
ภาพประกอบ 25 ผลการเปรียบเทียบความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีขนาดกริด 0.05 เมตร กับความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีขนาดกริด 0.09 เมตร ได้สภาพลมไม่เรียบเหมือนกันทั้ง 2 แบบ ความเร็วที่ตำแหน่งรัศมี-1.62 เมตร (จุดศูนย์กลางไปทางซ้ายมือ) ค่าความเร็วแตกต่างกัน 1.05 เมตร/วินาที

ภาพประกอบ 26 ผลการเปรียบเทียบความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีขนาดกริด 0.05 เมตร กับความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีขนาดกริด 0.08 เมตร ได้สภาพลมไม่เรียบเหมือนกันทั้ง 2 แบบ ความเร็วที่ตำแหน่งรัศมี-1.62 เมตร (จุดศูนย์กลางไปทางซ้ายมือ) ค่าความเร็วแตกต่างกัน 1.05 เมตร/วินาที

ภาพประกอบ 27 ผลการเปรียบเทียบความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีขนาดกริด 0.05 เมตร กับความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีขนาดกริด 0.07 เมตร ได้สภาพลมไม่เรียบเหมือนกันทั้ง 2 แบบ ความเร็วที่ตำแหน่งรัศมี-1.62 เมตร (จุดศูนย์กลางไปทางซ้ายมือ) ค่าความเร็วแตกต่างกัน 1.05 เมตร/วินาที

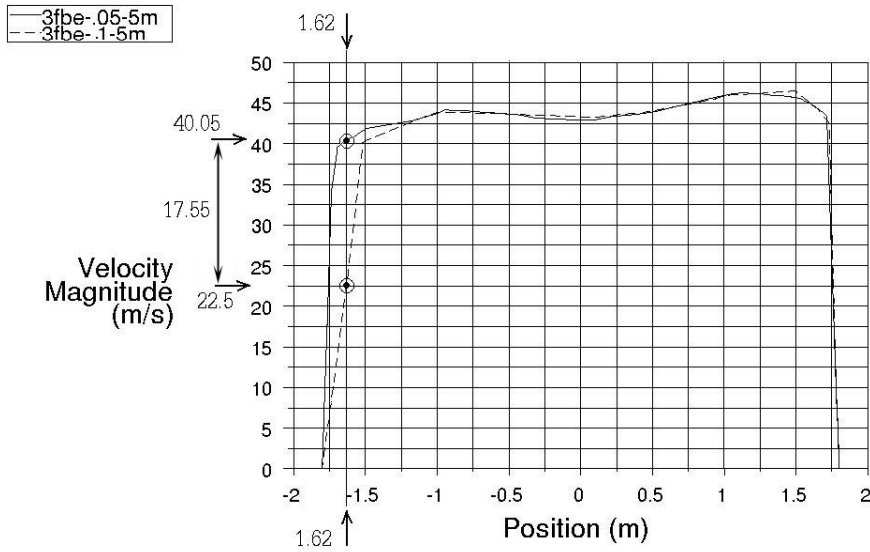
ภาพประกอบ 28 ผลการเปรียบเทียบความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีขนาดกริด 0.05 เมตร กับความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่มีขนาดกริด 0.06 เมตร ได้สภาพลมไม่เรียบเหมือนกันทั้ง 2 แบบ ความเร็วที่ตำแหน่งรัศมี-1.62 เมตร (จุดศูนย์กลางไปทางซ้ายมือ) ค่าความเร็วแตกต่างกัน 0.02 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบหาขนาดกริดที่เหมาะสมได้ตามตาราง 10 เลือกใช้ขนาดกริด 0.09 เมตร มีความเร็วแตกต่างกัน 1.05 เมตร/วินาที คงที่ คิดเป็นความเร็วแตกต่างกัน 2.62 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะใช้สำหรับตีกริดเพื่อการวิเคราะห์หาความเร็วลมและสภาพกระแสลมในอุโมงค์ลมทางดิ่งในงานวิจัยนี้ทั้งหมด



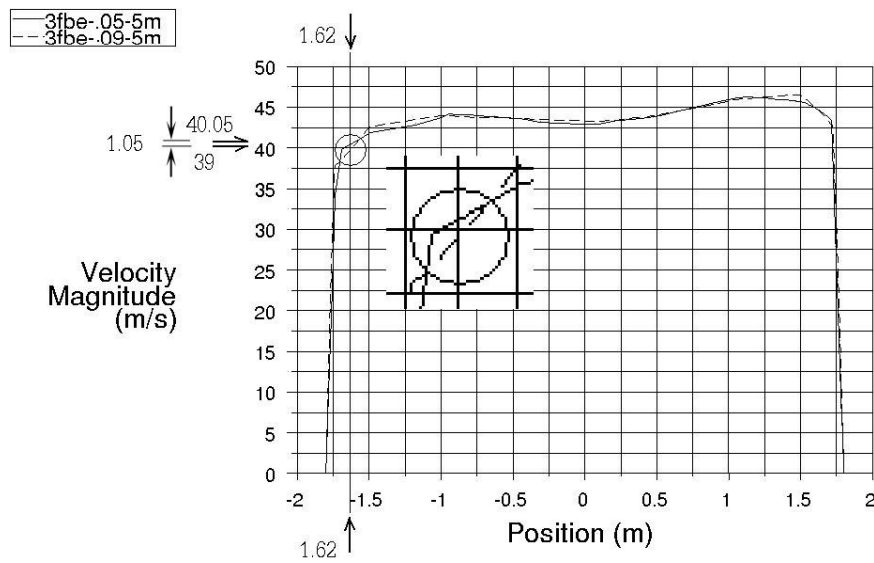
Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01) Dec 01, 2006
 FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 23 เปรียบเทียบความเร็วขนาดกริด 0.05 เมตร กับ 0.3 เมตร



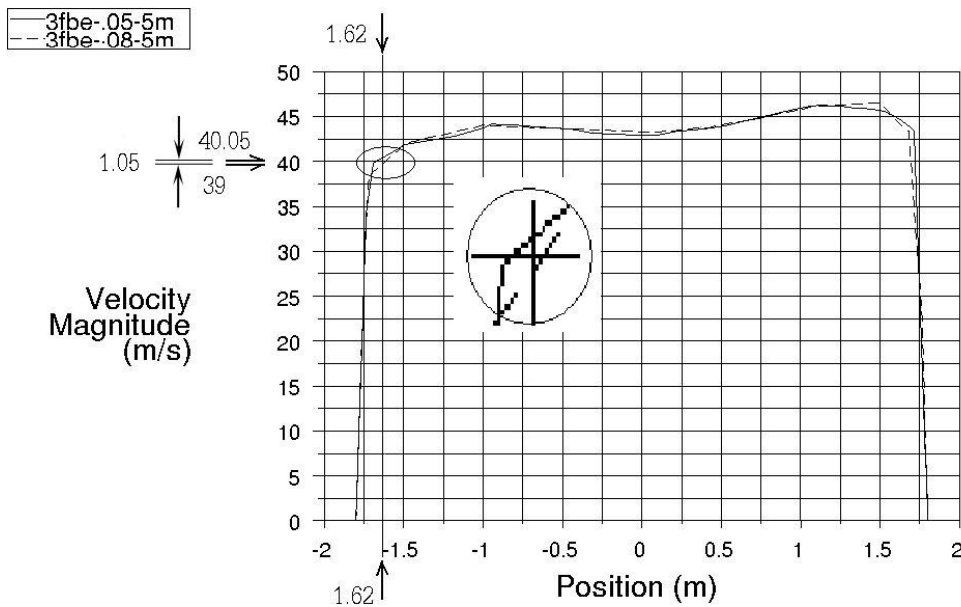
Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01) Dec 01, 2006
 FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 24 เปรียบเทียบความเร็วขนาดกริด 0.05 เมตร กับ 0.1 เมตร



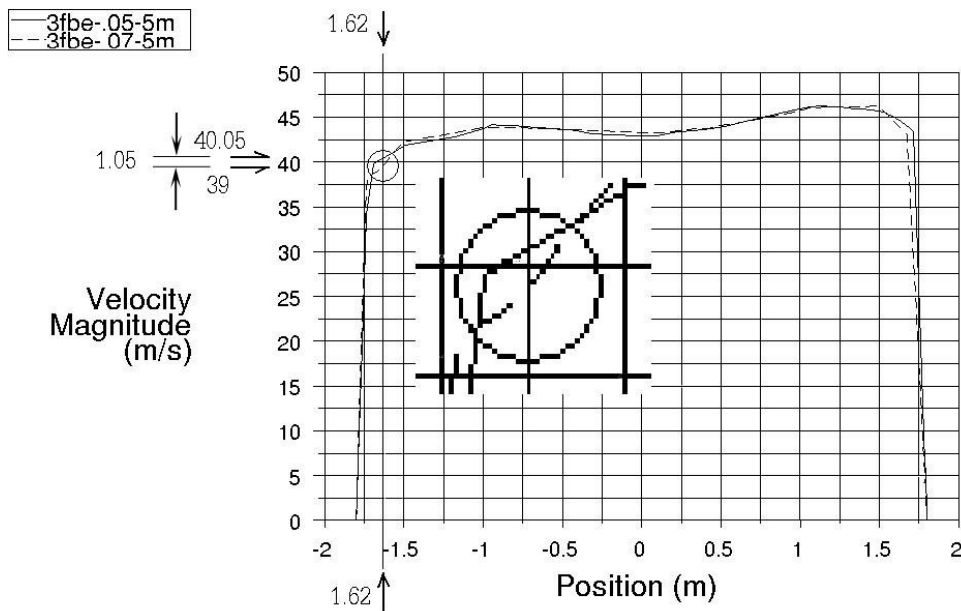
Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01) Dec 01, 2006
 FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 25 เปรียบเทียบความเร็วลมขนาดกริด 0.05 เมตร กับ 0.09 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01) Dec 01, 2006
 FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

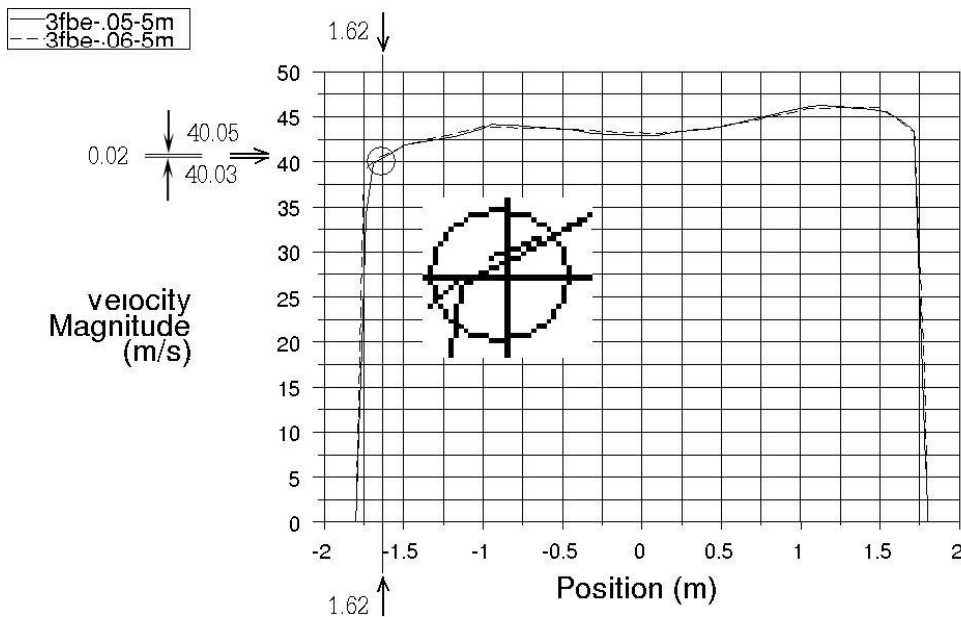
ภาพประกอบ 26 เปรียบเทียบความเร็วลมขนาดกริด 0.05 เมตร กับ 0.08 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 01, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 27 เปรียบเทียบความเร็วลมขนาดกริด 0.05 เมตร กับ 0.07 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 01, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 28 เปรียบเทียบความเร็วลมขนาดกริด 0.05 เมตร กับ 0.06 เมตร

ตาราง 10 ตารางเปรียบเทียบความเร็วลมและค่าร้อยละความเร็วลมแตกต่างที่ขนาดกริดต่างกัน

คู่เปรียบเทียบขนาดกริด		ความเร็วแตกต่าง	
0.05 เมตร	0.3 เมตร	16.05 เมตร/วินาที	40.07 %
0.05 เมตร	0.1 เมตร	17.55 เมตร/วินาที	43.82 %
0.05 เมตร	0.09 เมตร	1.05 เมตร/วินาที	2.62 %
0.05 เมตร	0.08 เมตร	1.05 เมตร/วินาที	2.62 %
0.05 เมตร	0.07 เมตร	1.05 เมตร/วินาที	2.62 %
0.05 เมตร	0.06 เมตร	0.02 เมตร/วินาที	0.05 %

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ความเร็วลมและสภาพกระแสลมของอุโมงค์ลมทางตั้ง

ผู้วิจัยใช้โปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขทางกลศาสตร์ของไหล Fluent 6.2 ทำการวิเคราะห์ ความเร็วลมและสภาพกระแสลมของอุโมงค์ลมทางตั้ง ได้ผลการวิเคราะห์ประกอบด้วย

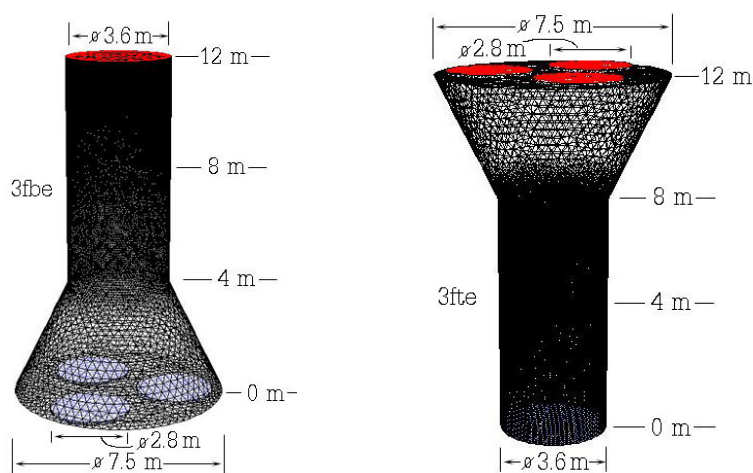
4.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาตำแหน่งติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม ระหว่างด้านบนกับด้านล่างของอุโมงค์ลมทางตั้ง

4.2 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาจำนวนชุดมอเตอร์พัดลม ระหว่าง 3 ชุด กับ 5 ชุด อุโมงค์ลมทางตั้ง

4.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาทิศทางท่อลมออก ระหว่างแนวตั้งกับแนวราบอุโมงค์ลมทางตั้ง

4.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาตำแหน่งติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม ระหว่างด้านบนกับด้านล่าง ของอุโมงค์ลมทางตั้ง

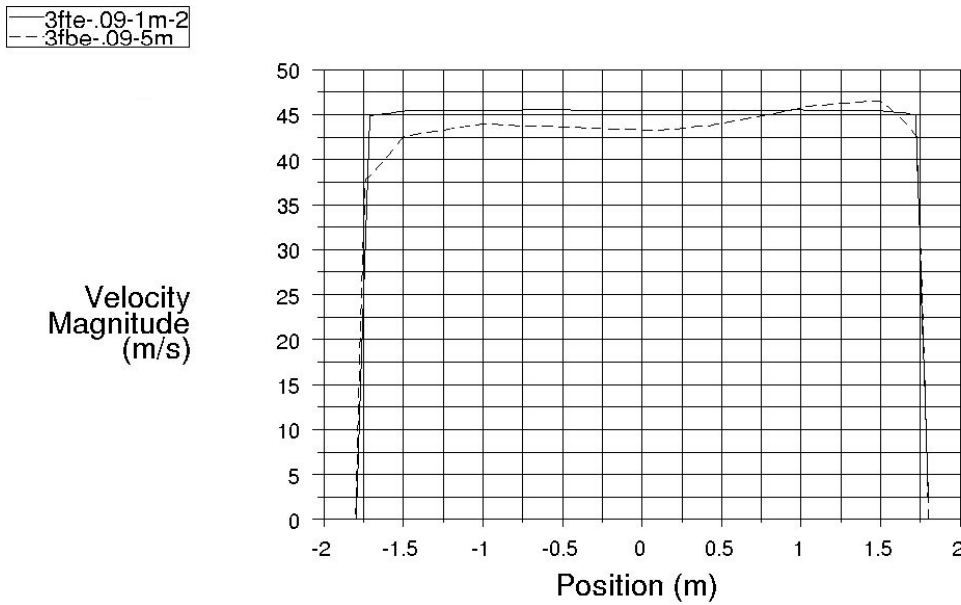
ผลการวิเคราะห์ความเร็วลมและสภาพกระแสลมของอุโมงค์ลมทางตั้ง ที่ติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบน กับอุโมงค์ลมทางตั้งที่ติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านล่าง ตามภาพประกอบ 29 - 38 วิเคราะห์เปรียบเทียบตำแหน่งการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมด้านบนกับด้านล่าง โดยพิจารณาความเร็วลม ความเรียบของกระแสมที่ระดับต่างๆ ของอุโมงค์ลมทางตั้ง ติดชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ลักษณะการไหลไม่สม่ำเสมอ (Unsteady flow) เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence flow) วิเคราะห์การไหลโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน เค-เอฟซีลอน ($k-\epsilon$)



ภาพประกอบ 29 แสดงภาพลักษณะอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบ 3fbe กับ แบบ 3fte

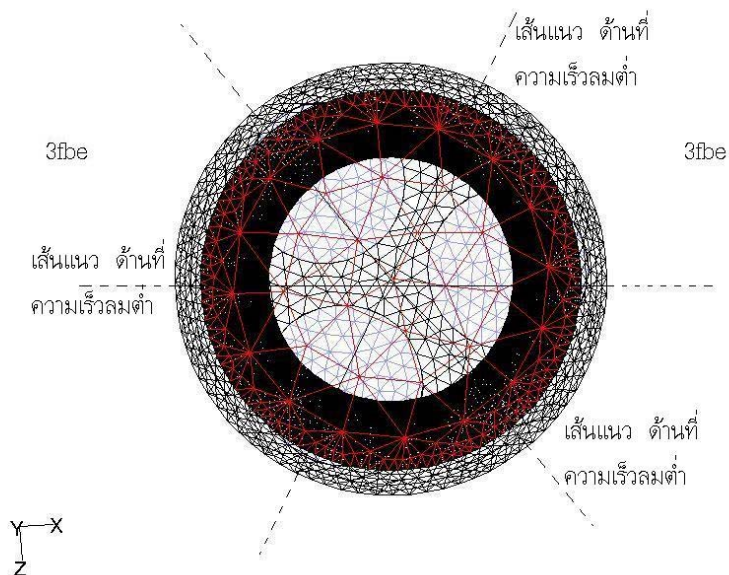
ภาพประกอบ 37 เปรียบเทียบความเร็วลมและสภาพกระแสลมของอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbc กับ แบบ 3fte ที่ความสูง 11 เมตร สำหรับอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbc เส้นประ (---) จะพบว่าความเร็วลมต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที บริเวณรัศมี 1.2 เมตร ถึง 1.8 เมตร จากจุดศูนย์กลางไปทางซ้ายมือ กระแสลมส่วนกลางอุโมงค์ความเร็วลดลงเล็กน้อย แต่ไม่ต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที และสำหรับอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte เส้นทึบ (—) ที่ความสูง 7 เมตร พบว่ากระแสลมส่วนกลางอุโมงค์ความเร็วลดลงเล็กน้อย แต่ไม่ต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที กระแสลมเรียบ ภาพประกอบ 38 เปรียบเทียบความเร็วลมและสภาพกระแสลมของอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbc กับ แบบ 3fte ที่ความสูง 12 เมตร สำหรับอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbc เส้นประ (---) จะพบว่าความเร็วลมต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที บริเวณรัศมี 1.3 เมตร ถึง 1.8 เมตร จากจุดศูนย์กลางไปทางซ้ายมือ กระแสลมส่วนกลางอุโมงค์ความเร็วไม่ต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที และสำหรับอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte เส้นทึบ (—) ที่ความสูง 8 เมตร พบว่ากระแสลมส่วนกลางลดต่ำลงเป็น 41 เมตร/วินาที บริเวณขอบรอบความเร็วเพิ่มเป็น 56 เมตร/วินาที ซึ่งเป็นบริเวณระดับสูงสุดของอุโมงค์ลมทางดิ่ง ไม่สามารถฝีกปล่อยตัวที่ความสูง 8 เมตร ได้ จะอันตราย โดยทั่วไปแล้วจะมีตาข่ายคลุมไว้ เพื่อความปลอดภัยของนักโดดร่มที่เข้าฝีกปล่อยตัวในอุโมงค์ลมทางดิ่ง

ผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาตำแหน่งการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม ระหว่างด้านบนกับด้านล่างของอุโมงค์ลมทางดิ่ง คืออุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte ให้กระแสลมที่เรียบและสม่ำเสมอ มากกว่าอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbc ความเร็วลมแตกต่างกันอย่างชัดเจนที่ตำแหน่งด้านล่างของอุโมงค์ลมทางดิ่ง และเป็นตำแหน่งที่ใช้งานมากที่สุด เช่น การเข้าฝีกปล่อยตัว การสอนการฝีกภาคปฏิบัติของครูผู้สอนกับผู้เข้ารับการฝีกปล่อยตัว ที่ความเร็วลมไม่ต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที ซึ่งปกติชุดมอเตอร์พัดลมสามารถปรับความเร็วรอบได้ ความเรียบและความสม่ำเสมอของกระแสลม มีผลทำให้นักโดดร่มที่เข้าฝีกการปล่อยตัวสามารถปฏิบัติและควบคุมตัวเองได้ง่าย ที่ความสูง 8 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งขอบบนสุดของอุโมงค์ลมทางดิ่งแบบ 3fte ไม่ควรที่จะเข้าไปฝีก เพราะความเร็วลมไม่สม่ำเสมอ บริเวณตรงจุดศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางดิ่งแบบ 3fte ความเร็วลมลดต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที ซึ่งจะไม่สามารถปล่อยตัวได้ และบริเวณใกล้ขอบความเร็วลมจะสูงทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่าย จึงเป็นบริเวณที่อันตรายจุดหนึ่ง



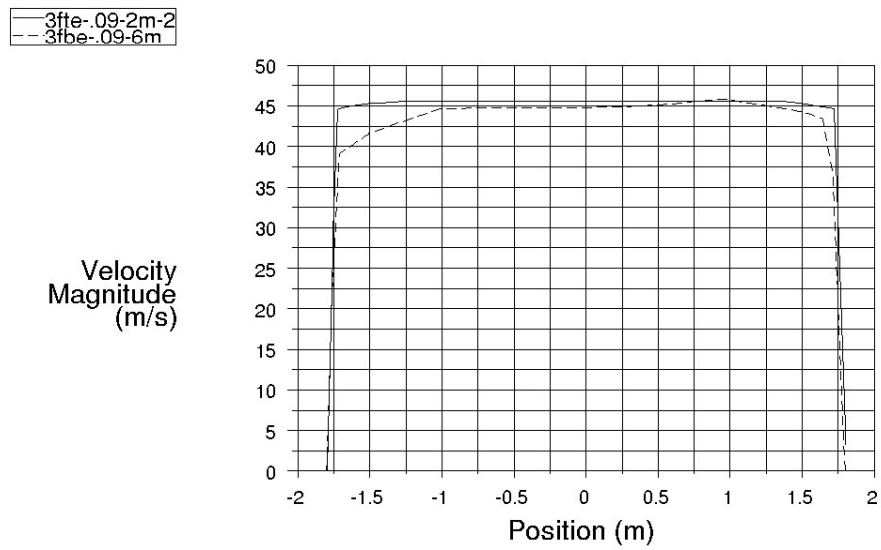
Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01) Dec 20, 2006
 FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 30 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 1 เมตร กับ 5 เมตร



Grid Jan 23, 2007
 FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, lam)

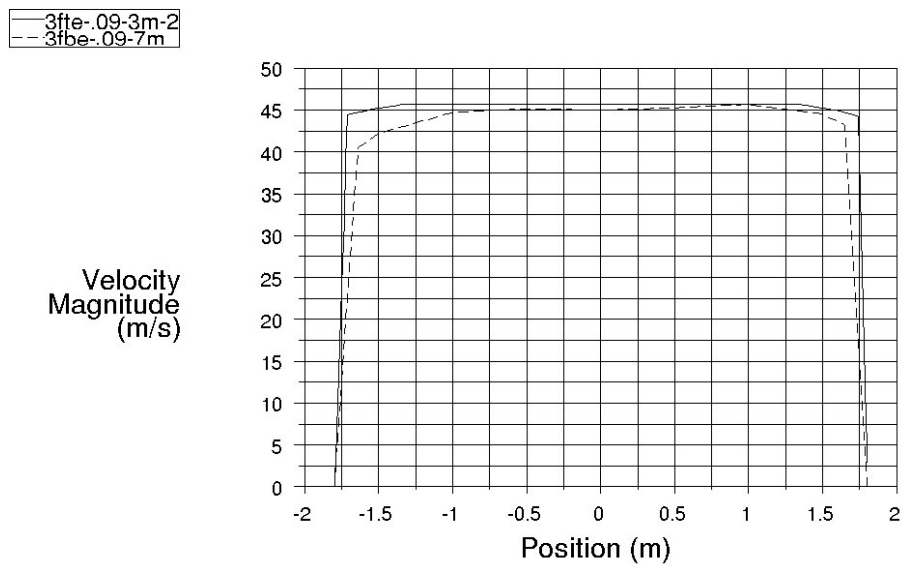
ภาพประกอบ 31 แสดงตำแหน่งที่ความเร็วลมต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที ของอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 20, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

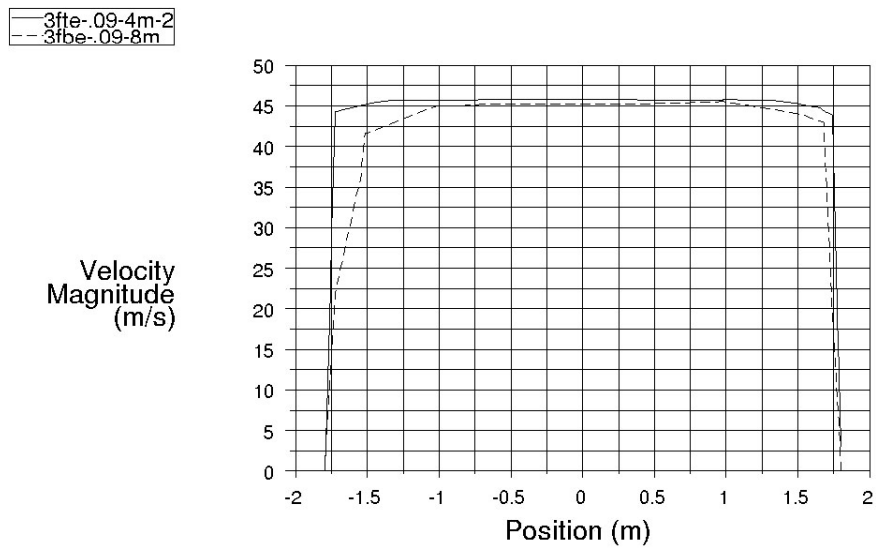
ภาพประกอบ 32 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 2 เมตร กว้าง 6 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 20, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

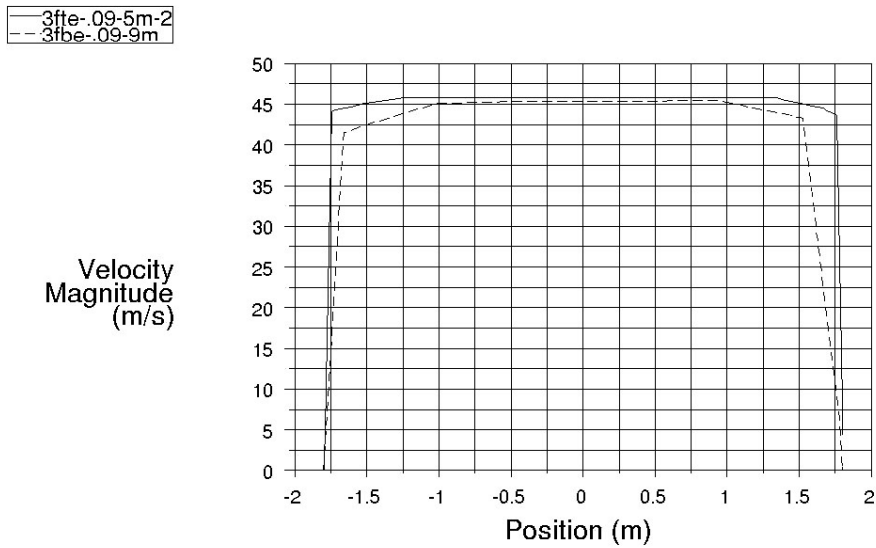
ภาพประกอบ 33 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 3 เมตร กว้าง 7 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 20, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

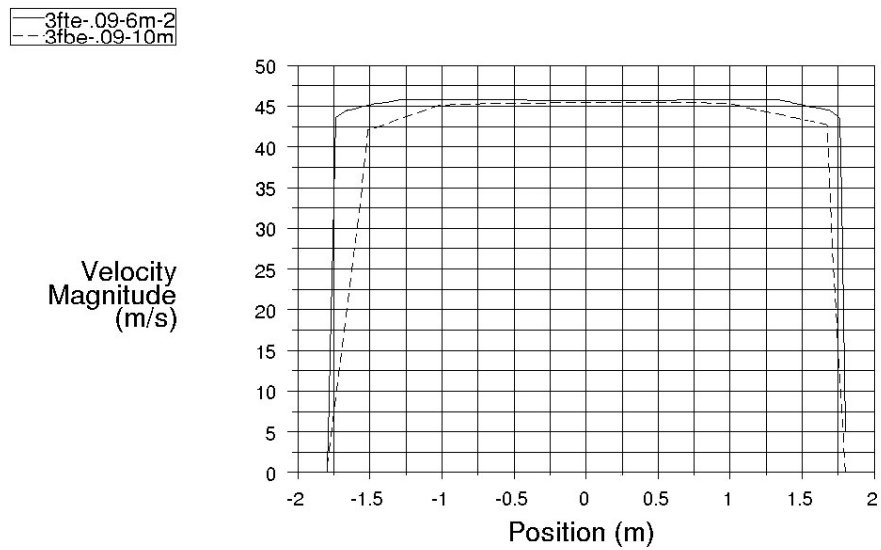
ภาพประกอบ 34 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 4 เมตร กว้าง 8 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 20, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

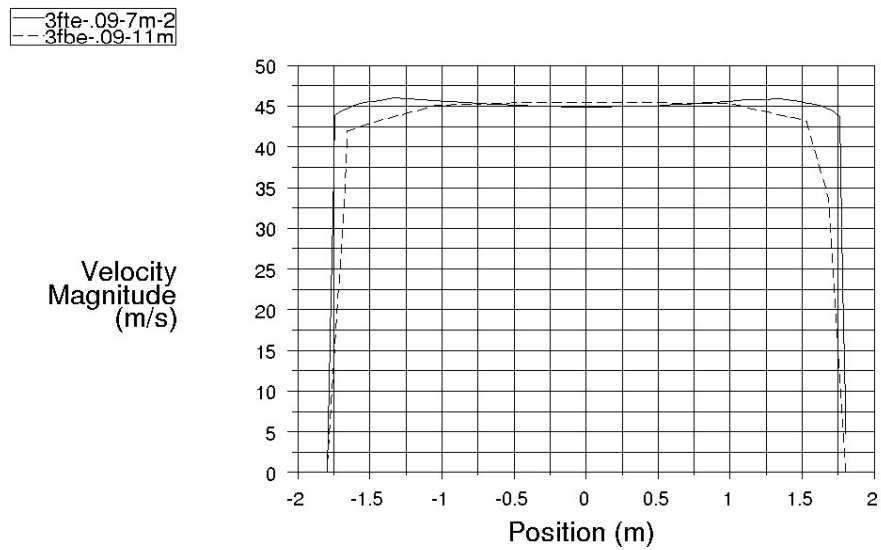
ภาพประกอบ 35 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 5 เมตร กว้าง 9 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 20, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

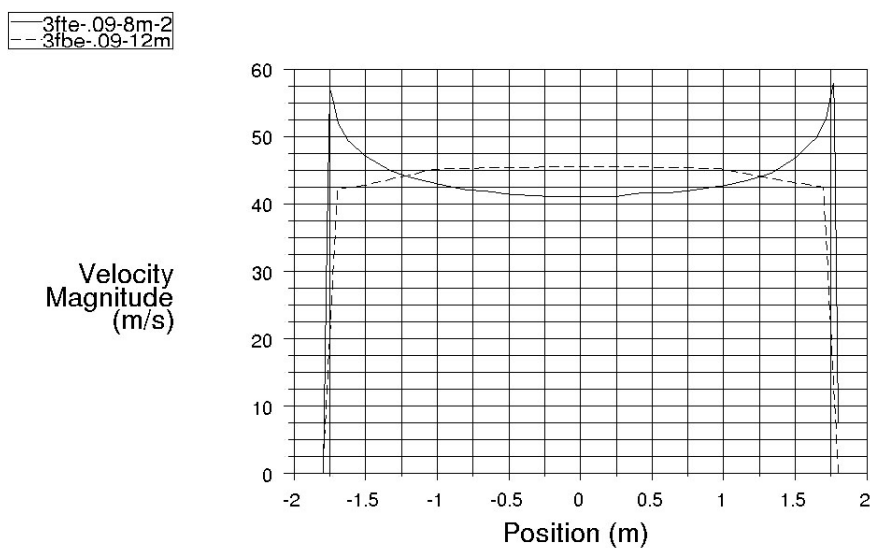
ภาพประกอบ 36 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 6 เมตร กว้าง 10 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 20, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 37 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 7 เมตร กว้าง 11 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 20, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 38 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fbe และ 3fte ความสูง 8 เมตร กับ 12 เมตร

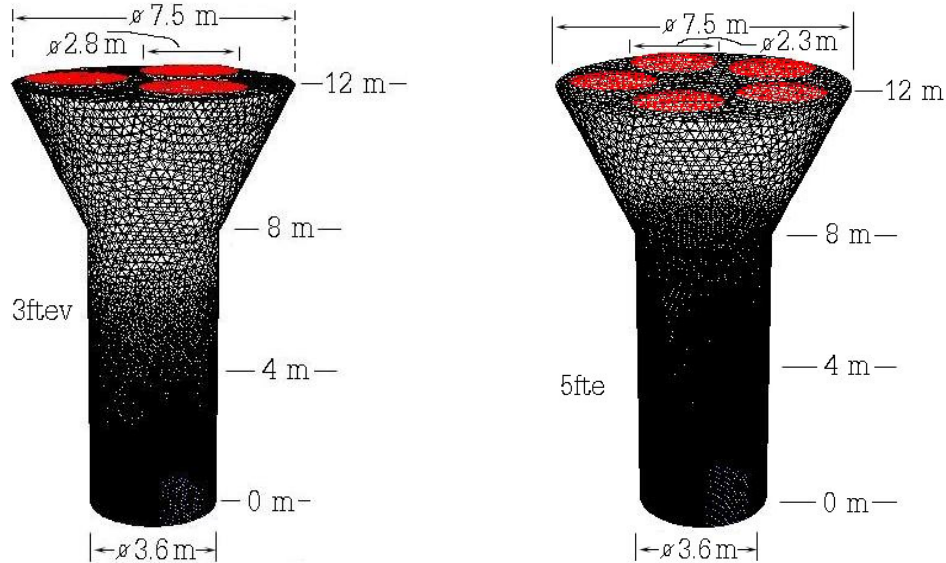
4.2 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาจำนวนชุดมอเตอร์พัดลม ระหว่าง 3 ชุด กับ 5 ชุด อุโมงค์ลมทางดิ่ง

ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาจำนวนติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม ระหว่าง 3 ชุด กับ 5 ชุด ด้านบนของอุโมงค์ลมทางดิ่ง จะนำผลการวิเคราะห์ตำแหน่งการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมมาใช้ด้วย คือการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมด้านบนของอุโมงค์ลมทางดิ่งจะให้กระแสลมเรียบและสม่ำเสมอมากกว่า ดังภาพประกอบ 39 - 47

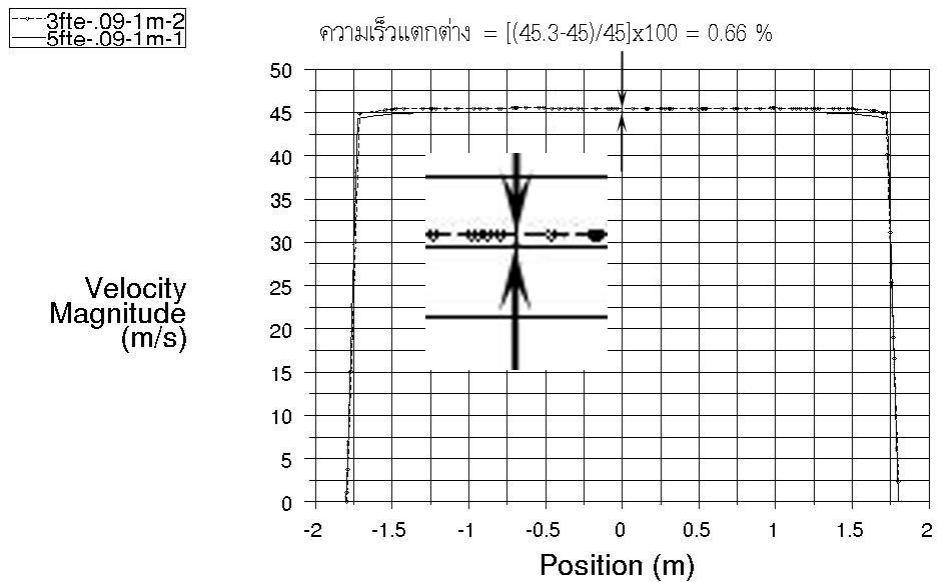
ภาพประกอบ 40-45 ชุดมอเตอร์พัดลม แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 1-6 เมตร ที่จุดศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte เส้นประ (----) อุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 5fte เส้นทึบ (—) จากการวิเคราะห์อุโมงค์ลมทางดิ่งทั้ง 2 แบบ กระแสลมเรียบ สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของอุโมงค์ลม และมีความเร็วลมแตกต่างกัน 0.66 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างกันน้อยมาก

ภาพประกอบ 46 แสดงความเร็วลมและสภาพกระแสลมของอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 7 เมตร ที่จุดศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte เส้นประ (----) อุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 5fte เส้นทึบ (—) จากการวิเคราะห์อุโมงค์ลมทางดิ่งทั้ง 2 แบบ กระแสลมเรียบ ที่จุดศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางดิ่งความเร็วลมต่ำลงเล็กน้อย และมีความเร็วลมแตกต่างกัน 0.89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างกันน้อยมาก

ภาพประกอบ 47 แสดงความเร็วลมและสภาพกระแสของอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 8 เมตร ที่จุดศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte เส้นประ (---) อุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 5fte เส้นทึบ (—) จากการวิเคราะห์อุโมงค์ลมทางดิ่งทั้ง 2 แบบ กระแสลมที่จุดศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางดิ่งความเร็วต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที ที่ไม่สามารถฝีกปล่อยตัวได้ และเป็นตำแหน่งที่ขอบบนสุดของอุโมงค์ลมทางดิ่ง ซึ่งจะต้องมีตาข่ายกันเพื่อความปลอดภัยที่ขอบด้านข้างจะมีความเร็วลมเพิ่มขึ้นและมีความเร็วลมแตกต่างกัน 0.74 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างกันน้อยมาก ผลการวิเคราะห์อุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ระดับความสูง 1-8 เมตร ที่จุดศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางดิ่งได้ว่า กระแสลมเรียบ สม่ำเสมอ ทั้ง 2 แบบ ความเร็วลมและความเรียบของกระแสลมไม่แตกต่างกัน



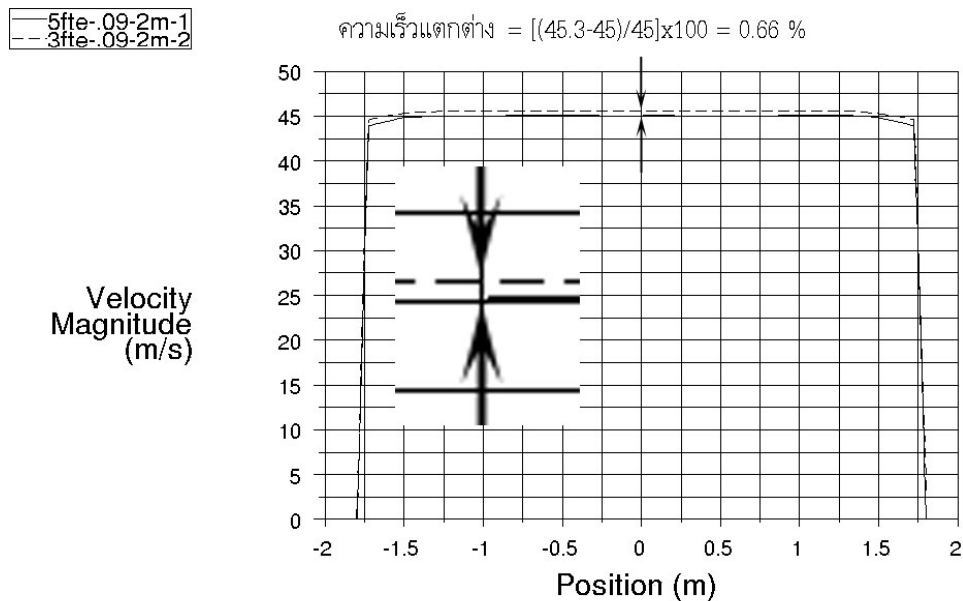
ภาพประกอบ 39 แสดงตำแหน่งความสูงของอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 20, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

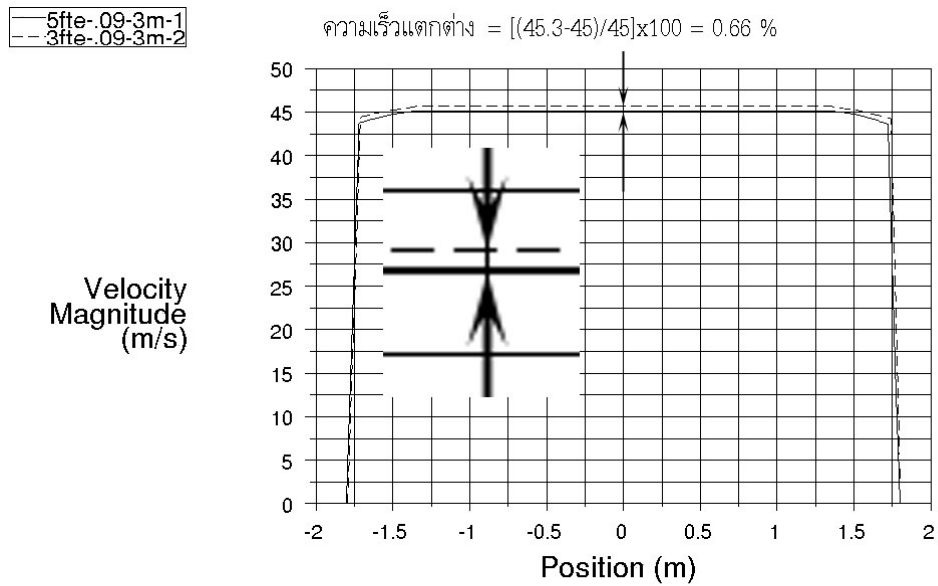
ภาพประกอบ 40 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 1 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

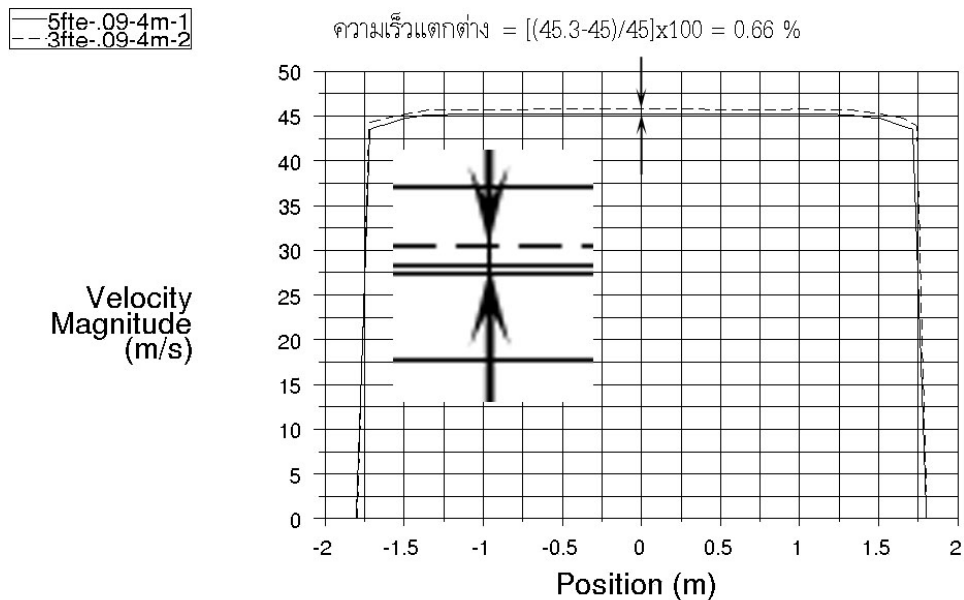
Jan 07, 2007
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 41 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 2 เมตร



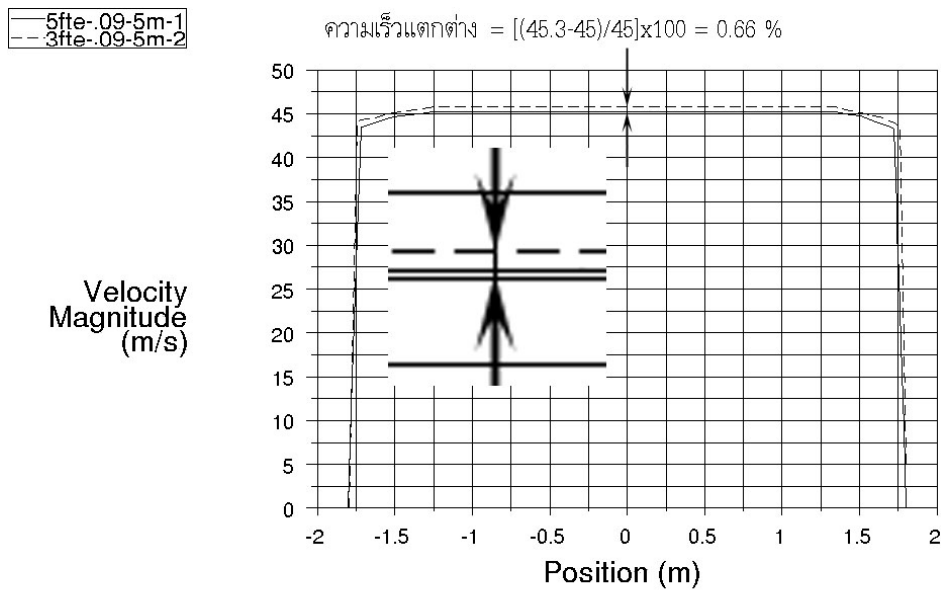
Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01) Jan 07, 2007
 FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 42 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 3 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01) Jan 07, 2007
 FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

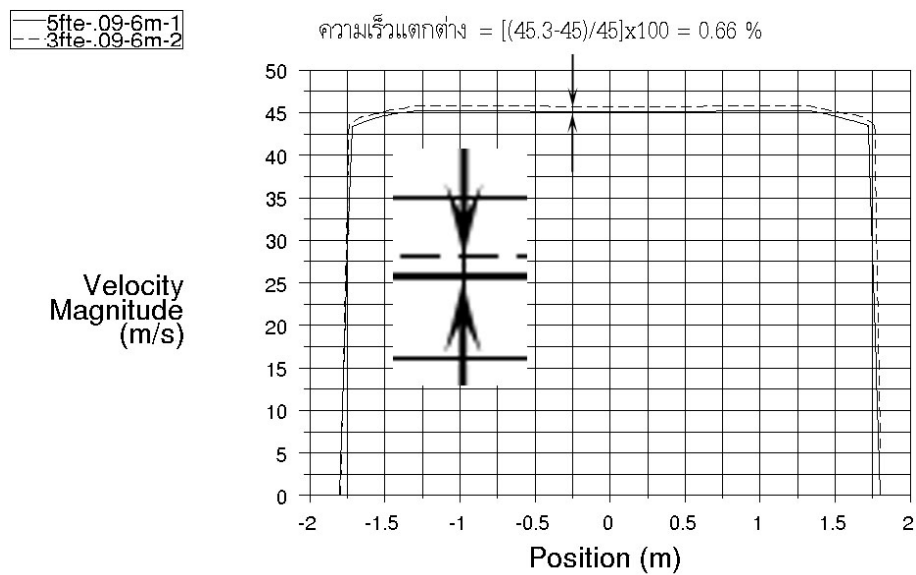
ภาพประกอบ 43 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 4 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Jan 07, 2007
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

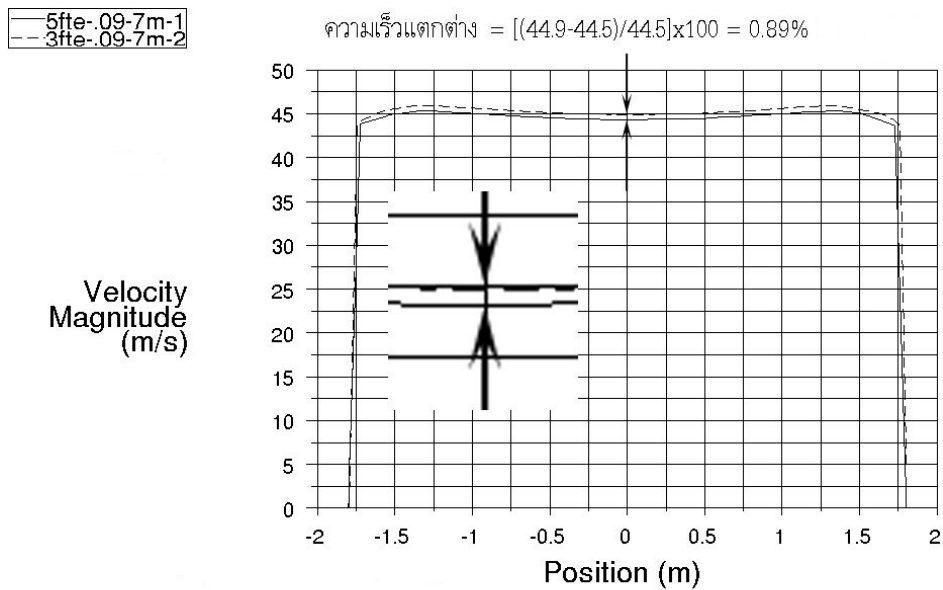
ภาพประกอบ 44 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 5 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

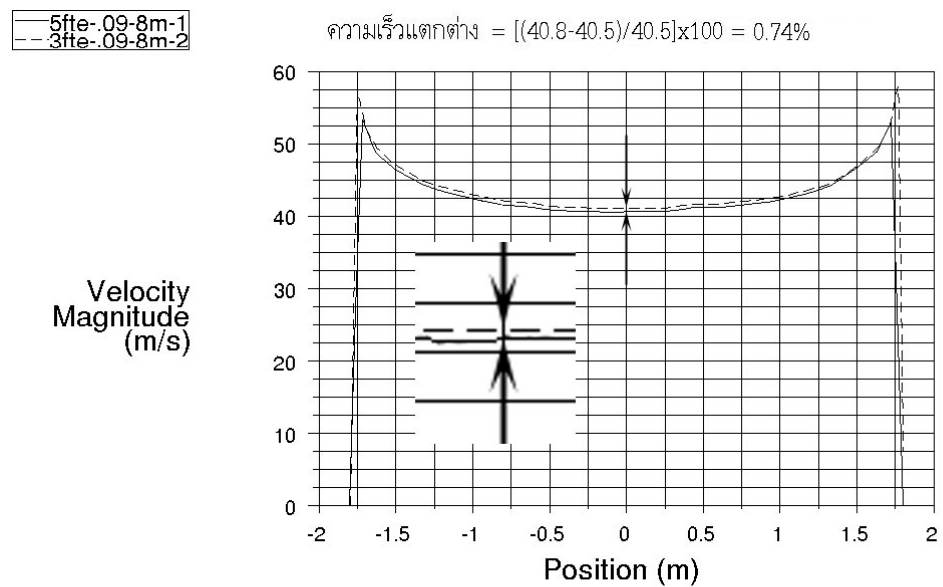
Jan 07, 2007
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 45 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 6 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01) Jan 07, 2007
 FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 46 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 7 เมตร

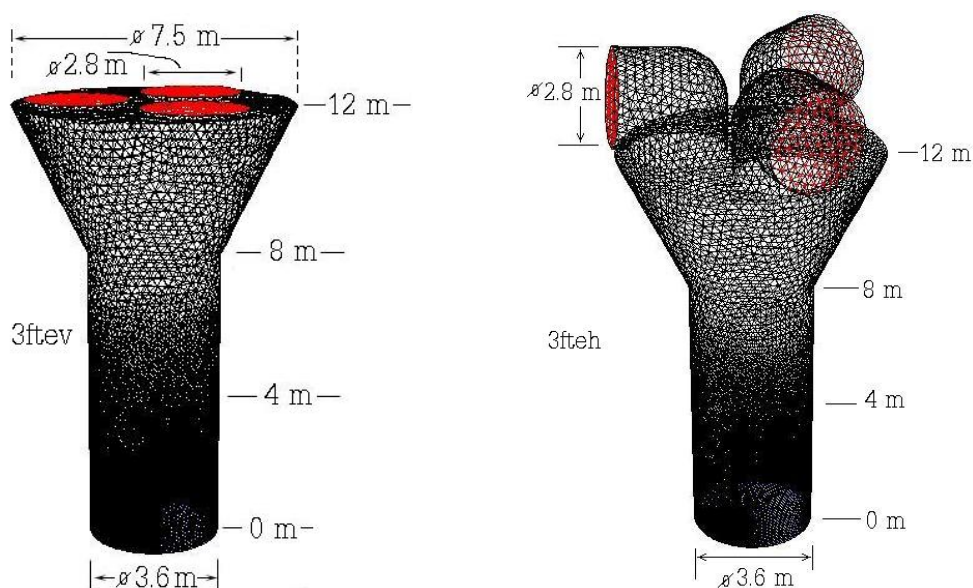


Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01) Jan 07, 2007
 FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 47 ความเร็วลมและสภาพกระแสลมอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fte และ 5fte ความสูง 8 เมตร

4.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาทิศทางท่อลมออก ระหว่างแนวตั้งกับแนวราบอุโมงค์ลมทางตั้ง

การวิเคราะห์ในส่วนนี้ จะนำผลการวิเคราะห์ที่ได้คือติดชุดมอเตอร์พัดลมด้านบนจะให้กระแสลมที่เรียบกว่า สม่ำเสมอกว่า และจำนวนการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมด้านบน 3 ชุด กับ 5 ชุด ความเร็วลมและสภาพกระแสลมไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้น จึงเลือกใช้อุโมงค์ลมทางตั้งที่ติดชุดมอเตอร์พัดลมด้านบน จำนวน 3 ชุด มาออกแบบเพิ่มเติมท่อลมออก 2 แบบ แบบที่ 1 อุโมงค์ลมทางตั้งที่ติดชุดมอเตอร์พัดลมด้านบน จำนวน 3 ชุด ท่อลมออกแนวราบ แบบที่ 2 อุโมงค์ลมทางตั้งที่ติดชุดมอเตอร์พัดลมด้านบน จำนวน 3 ชุด ท่อลมออกแนวตั้ง นำความเร็วลมและสภาพกระแสลมทั้ง 2 แบบ มาเปรียบเทียบ เพื่อการหาแนวท่อลมออก ที่มีความเหมาะสมที่สุด โดยกำหนดขนาดและเงื่อนไขต่างๆ ให้ใกล้เคียงกันที่สุด ซึ่งความเร็วลมและสภาพกระแสลมจะมีผลต่อการฝีกलयตัวอย่างมาก ผลการวิเคราะห์ความเร็วลมได้ดังภาพประกอบ 48-56

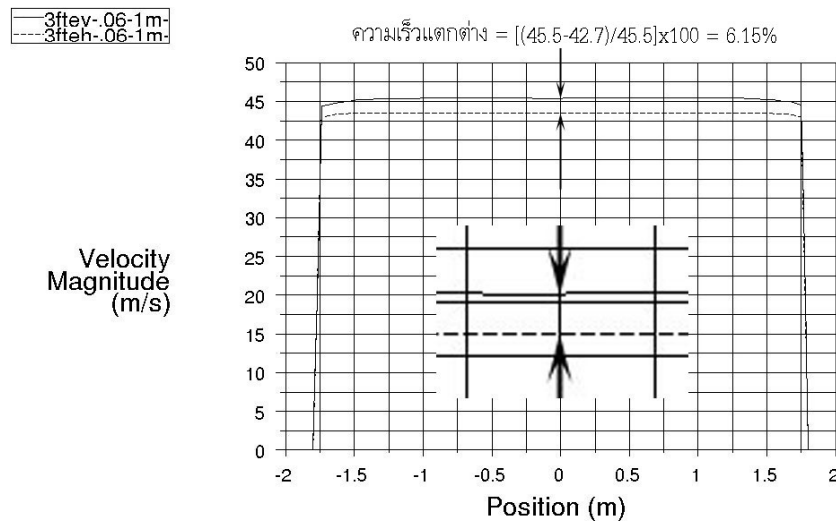


ภาพประกอบ 48 ตำแหน่งระดับต่างๆ ของอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบ 3ftev และ 3fteh

จากภาพประกอบ 49 - 54 แสดงความเร็วและสภาพกระแสลมของอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 1 - 6 เมตร ที่จุดศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบ 3fteh เส้นประ (---) มีความเร็วลม 42.7 เมตร/วินาที ขณะที่อุโมงค์ลมทางตั้ง แบบ 3ftev เส้นทึบ (—) มีความเร็วลม 45.5 เมตร/วินาที มีความเร็วลมแตกต่างกัน 6.15 เปอร์เซ็นต์ โดยภาพรวมอุโมงค์ลมทางตั้งแบบ 3fteh จะมีกระแสลมที่เรียบตลอดพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลมมากกว่า โดยเฉพาะที่ระยะ 0.4 เมตร จากผนังอุโมงค์ลมโดยรอบ แต่ความเร็วลมต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที อุโมงค์ลมทางตั้งแบบ 3ftev จะมีความเร็วลมสูงกว่า 45 เมตร/วินาที ภาพประกอบ 55 แสดงความเร็วลมและสภาพกระแสลมของ

อุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 7 เมตร ที่จุดศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fteh เส้นประ (---) มีความเร็วลม 42.5 เมตร/วินาที ขณะที่อุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev เส้นทึบ (—) มีความเร็วลม 45 เมตร/วินาที ตอนกลางอุโมงค์ลมทางดิ่งทั้ง 2 แบบ ความเร็วลมลดต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที เนื่องจากผลกระทบอยู่ใกล้ปลายท่อ ความเร็วลมแตกต่างกัน 5.55 เปอร์เซ็นต์ ภาพประกอบ 55 แสดงความเร็วลมและสภาพกระแสลมของอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 8 เมตร ที่จุดศูนย์กลางอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3fteh เส้นประ (---) มีความเร็วลม 42.5 เมตร/วินาที ขณะที่อุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev เส้นทึบ (—) มีความเร็วลม 45 เมตร/วินาที ตอนกลางอุโมงค์ลมทางดิ่งทั้ง 2 แบบ ความเร็วลมลดต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที เนื่องจากผลกระทบอยู่ใกล้ปลายท่อ ความเร็วลมแตกต่างกัน 6.02 เปอร์เซ็นต์

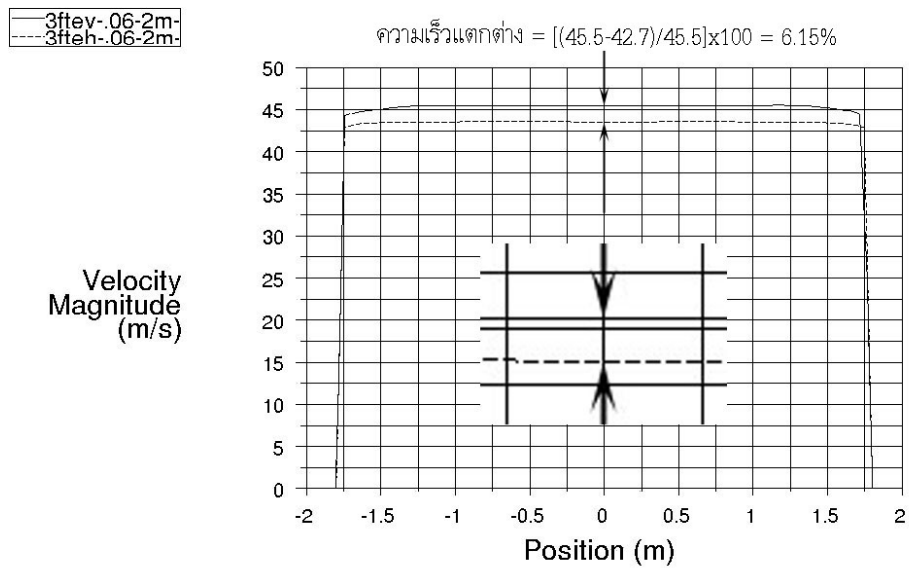
จากการวิเคราะห์อุโมงค์ลมที่จัดทิศทางท่อลมออกในแนวตั้งและแนวราบ นำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกัน โดยพิจารณาจากความเร็วลมและสภาพกระแสลม ที่ตำแหน่งความสูงเท่ากัน ท่อลมออกแนวตั้งมีความเร็วลมภายในอุโมงค์ลมสูงกว่า 45 เมตร/วินาที ความเรียบของกระแสลมที่ ระยะ 0.4 เมตร จากผนังอุโมงค์ลมโดยรอบต่ำกว่า ท่อลมออกแนวราบกระแสลมต้องเปลี่ยนทิศทางการไหล ทำให้ความเร็วลมภายในอุโมงค์ลมต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที ความเรียบของกระแสลมตลอดพื้นที่หน้าตัดอุโมงค์ลมมากกว่าที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางอุโมงค์ลม ความเร็วลมแตกต่าง 6.15 เปอร์เซ็นต์



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 21, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

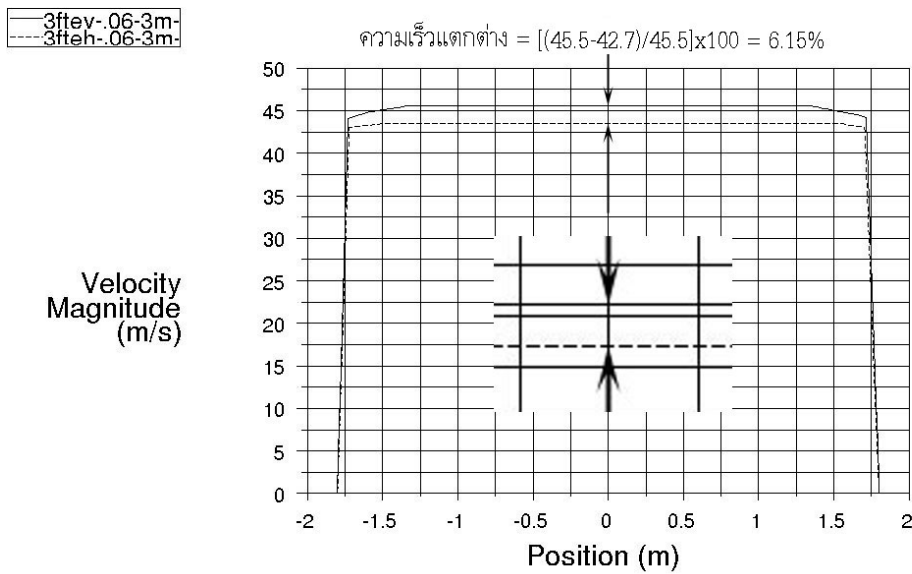
ภาพประกอบ 49 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 1 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 21, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

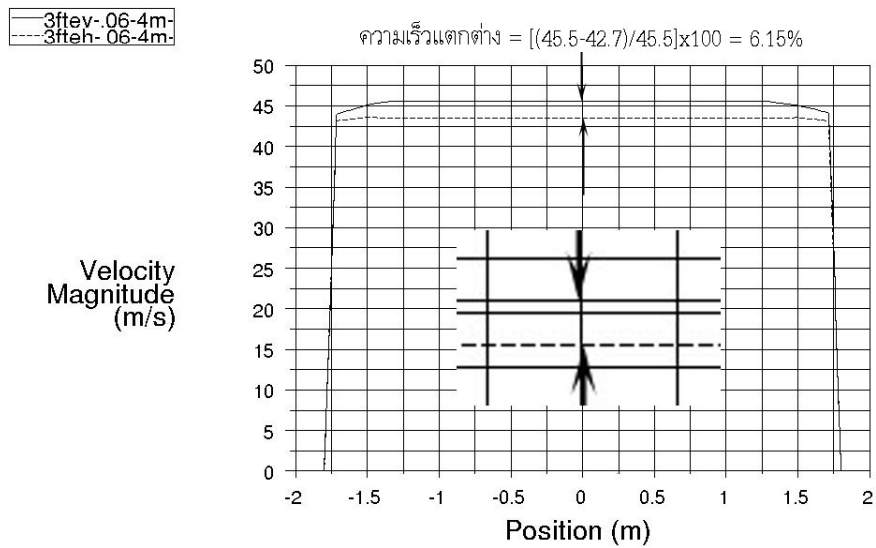
ภาพประกอบ 50 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 2 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 21, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

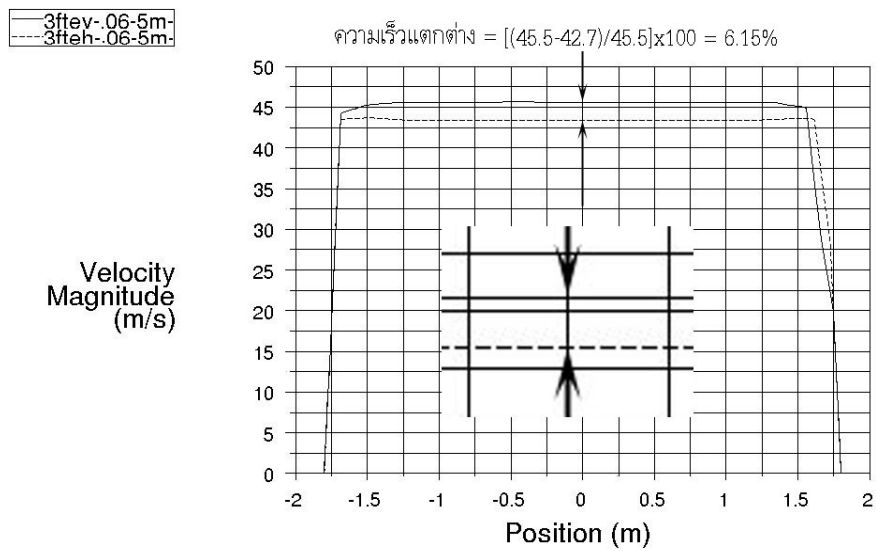
ภาพประกอบ 51 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 3 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 21, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

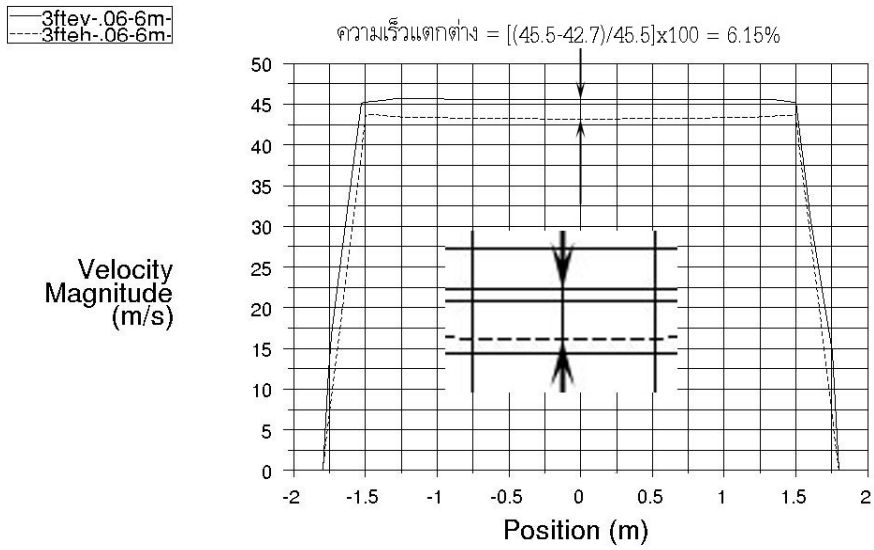
ภาพประกอบ 52 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 4 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 21, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

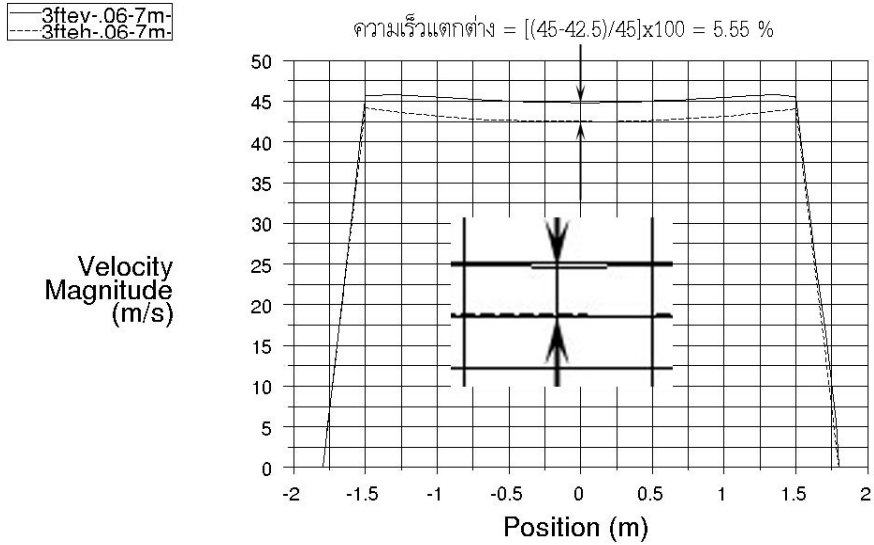
ภาพประกอบ 53 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 5 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 21, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

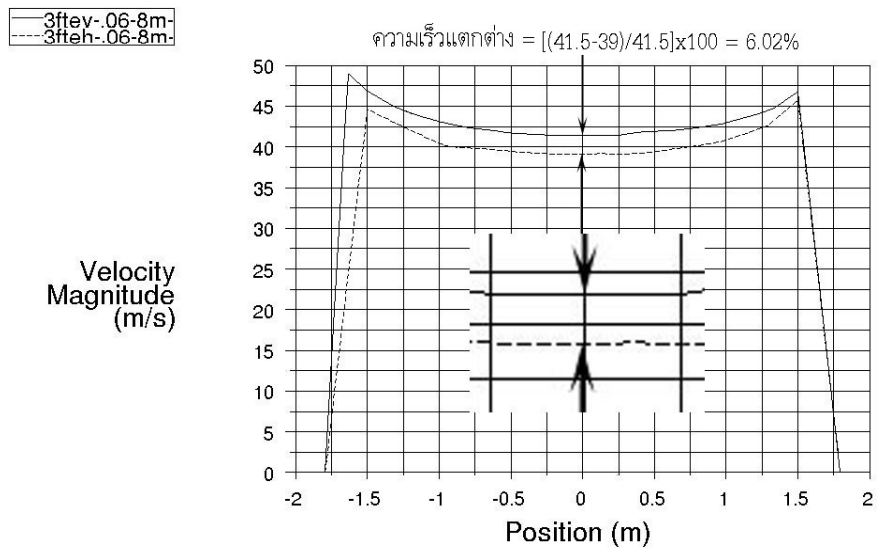
ภาพประกอบ 54 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 6 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 21, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 55 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 7 เมตร



Velocity Magnitude (Time=5.0000e-01)

Dec 21, 2006
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, ske, unsteady)

ภาพประกอบ 56 แสดงลักษณะอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบ 3ftev และ 3fteh ความสูง 8 เมตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Fluent 6.2 ทำการวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ออกมาจะนำมาเปรียบเทียบ เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมและดีที่สุดตามจุดประสงค์ โดยทั่วไปผลการวิเคราะห์จะเป็นที่ยอมรับและเชื่อถือในทางวิศวกรรม แต่จะต้องกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ให้ถูกต้อง ซึ่งสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.2 อภิปรายผล

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบหาการออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่งที่ดีและเหมาะสม โดยมีเงื่อนไขต่างๆ ใน 3 กรณี ดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 การติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมของอุโมงค์ลมทางดิ่งจะติดตั้งที่ด้านล่างหรือด้านบนจึงจะให้ผลดีที่สุด

กรณีที่ 2 การติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมของอุโมงค์ลมทางดิ่งจะติดตั้ง 3 ชุด หรือ 5 ชุด จึงจะให้ผลดีที่สุด

ทั้งนี้ได้ศึกษาข้อมูลจากเอกสารวิชาการ กลุ่มบริษัทผู้ผลิตชุดมอเตอร์พัดลม กลุ่มธุรกิจให้บริการด้านอุโมงค์ลมทั้งทางราบและทางดิ่ง มารวบรวมออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่ง ตามเงื่อนไขประกอบด้วย นักโคตรมสามารถถอดยตัวได้พร้อมๆ กัน 4 คน ต้นกำเนิดพลังงานใช้ชุดมอเตอร์พัดลมไม่ใช้เครื่องยนต์ ระยะการลอยตัวความสูงประมาณ 8 เมตร

กรณีที่ 3 การติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมของอุโมงค์ลมทางดิ่ง จะติดตั้งท่อลมออกแนวดิ่งหรือแนวราบจึงจะให้ผลดีที่สุด

ทั้งนี้ในกรณีที่ 2 ต้องนำผลการวิเคราะห์จากกรณีที่ 1 มาใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบ และในกรณีที่ 3 ต้องนำผลการวิเคราะห์จากกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 มาใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบ

การออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่ง 5 แบบ ประกอบด้วย

แบบที่ 1 อุโมงค์ลมทางดิ่ง ติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านล่าง

แบบที่ 2 อุโมงค์ลมทางดิ่ง ติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบน

แบบที่ 3 อุโมงค์ลมทางดิ่ง ติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 5 ชุด ที่ด้านบน

แบบที่ 4 อุโมงค์ลมทางดิ่ง ติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบน มีท่อลมออกแนวตั้ง

แบบที่ 5 อุโมงค์ลมทางดิ่ง ติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบน มีท่อลมออกแนวราบ

ผลการวิเคราะห์จะได้ออกมาเป็นค่าความเร็วของลม ที่ตำแหน่งรัศมีต่างๆ และที่ตำแหน่งความสูงระดับต่างๆ ของอุโมงค์ลมทางดิ่ง ตามที่ผู้วิจัยกำหนดค่าระดับความสูง นอกจากนี้ยังสามารถบอกสภาพความราบเรียบสม่ำเสมอของกระแสลมได้อีกด้วย ซึ่งจะมีผลต่อความยากง่ายในการฝึกการลอยตัวของนักโดดร่มอีกด้วย โปรแกรม Fluent 6.2 เป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมรับในทางวิศวกรรมโดยทั่วไป ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลที่จะได้รับของอุโมงค์ลมทางดิ่ง เพื่อเลือกหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เป็นสิ่งที่คุ้มค่าเนื่องจากต้นทุนดำเนินการต่ำกว่า ใช้เวลาน้อยกว่า สามารถทดสอบเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้ตามต้องการ จนเป็นที่พอใจและดีที่สุดตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น และมีความปลอดภัยมากกว่า การสร้างแบบจำลอง

5.1.1 สรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมด้านบนหรือด้านล่าง

จากการวิเคราะห์ความเร็วลมและสภาพกระแสลมภายในอุโมงค์ลมทางดิ่ง ทั้ง 2 แบบ คือ แบบติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านล่าง และแบบติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบนของอุโมงค์ลมทางดิ่ง เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกัน ที่ตำแหน่งความสูงระดับเดียวกัน จะเห็นได้ชัดเจนว่า อุโมงค์ลมทางดิ่งที่ติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมด้านบนให้ความเร็วลมที่สูงกว่า ที่ระดับความสูง 1-2 เมตร ความราบเรียบและความสม่ำเสมอของกระแสลมดีกว่าตลอดหน้าตัดของอุโมงค์ลมทางดิ่ง สำหรับการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมไว้ด้านล่าง ความเร็วลมจะต่ำกว่า 45 เมตร/วินาที ตรงส่วนที่อยู่ระหว่างชุดมอเตอร์พัดลม ส่วนที่อยู่ตรงชุดมอเตอร์พัดลมความเร็วลมจะสูงกว่า 45 เมตร/วินาที มาก โดยทั่วไปแล้วสามารถลดหรือเพิ่มความเร็วรอบของชุดมอเตอร์พัดลมได้อีกจำนวนหนึ่ง ด้วยชุดควบคุมความเร็วรอบ มีผลทำให้ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมกับการใช้งานจริง ซึ่งอาจจะมี การสูญเสียพลังงานไปบางส่วนจากการไหลผ่านอุโมงค์ลมทางดิ่ง ที่ระดับความสูงมากกว่า 2 เมตร จะมีความเร็วลมแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบจำนวนการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม ด้านบนระหว่าง 3 ชุด กับ 5 ชุด

ผลการวิเคราะห์ความเร็วลมและสภาพกระแสลมภายในอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบน และแบบติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 5 ชุด ที่ด้านบน เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกัน ที่ตำแหน่งความสูงระดับเดียวกันจะเห็นได้ชัดเจนว่า ความเร็วลม ความราบเรียบสม่ำเสมอของกระแสลมดีมาก มีความแตกต่างกันน้อยมาก ตลอดหน้าตัดของอุโมงค์ลมทางดิ่ง

5.1.3 สรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาทิศทางต่อลมออกระหว่างแนวราบ กับ แนวตั้ง

ผลการวิเคราะห์ความเร็วลมและสภาพกระแสลมภายในอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบน ท่อลมออกแนวราบ กับ แนวตั้ง แบบใดจะให้ผลดีและเหมาะสมที่สุด ในการวิเคราะห์นี้จะต้องนำผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.1.1 และหัวข้อ 5.1.2 มาใช้ด้วย เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกัน ที่ตำแหน่งความสูงระดับเดียวกัน จะเห็นได้ชัดเจนว่า ความเร็วลมของอุโมงค์ลมแนวตั้งที่มีท่อลมออกแนวตั้งให้ความเร็วลมที่สูงกว่า 6.15 เมตร/วินาที ความราบเรียบและสม่ำเสมอของกระแสลมดีมาก มีความแตกต่างกันน้อยมาก ตลอดหน้าตัดของอุโมงค์ลมทางดิ่ง

5.2 อภิปรายผล

การวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ มีความคล่องตัวที่จะเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ อีกทั้งยังใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำกว่า จึงเป็นที่นิยมในการวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ในงานวิศวกรรม และต่อไปในอนาคตคุณภาพของความถูกต้องของโปรแกรมจะมีค่ามากยิ่งขึ้น และก็ยังมีการโปรแกรมอื่นๆ ที่ใช้งานในลักษณะเดียวกันนี้ ซึ่งจะต้องศึกษาต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

5.3.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

ในการวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบหาการออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่งสำหรับฝึคนักโดดร่มที่ดีและมีความเหมาะสม โดยมีเงื่อนไขต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยยังเห็นว่าถ้ามีการออกแบบอุโมงค์ลมทางดิ่งโดยติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมทั้งด้านล่างและด้านบน น่าจะมีข้อดีบางประการปรากฏให้เห็น และในกรณีดังกล่าวถ้าเป็นการออกแบบอุโมงค์ลมแบบปิด จะมีข้อดีเป็นที่น่าสนใจ นอกจากนี้การติดตั้งระบบลิ้นปรับทิศทางก็เป็นเรื่องที่น่าสนใจอย่างยิ่งอีกเช่นกัน หวังว่าข้อเสนอแนะดังกล่าวอาจเป็นแนวทางในการศึกษาทำวิจัยในครั้งต่อไป

5.3.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

ในการวิจัยครั้งต่อไปแนะนำว่า การเพิ่มความละเอียดของกริดให้มากกว่านี้ ก็จะลดค่าผิดพลาดลงจนถึงระดับต่ำสุดเป็นที่ยอมรับได้ ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์มากขึ้นด้วย และการใส่ท่อปรับกระแสลมที่ด้านล่างของอุโมงค์ลมทางดิ่ง เพื่อให้ลมมีความเร็วสม่ำเสมอมากที่สุดตลอดหน้าตัด จะเป็นนการง่ายต่อการฝึกการลอยตัวของนักโดดร่ม

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

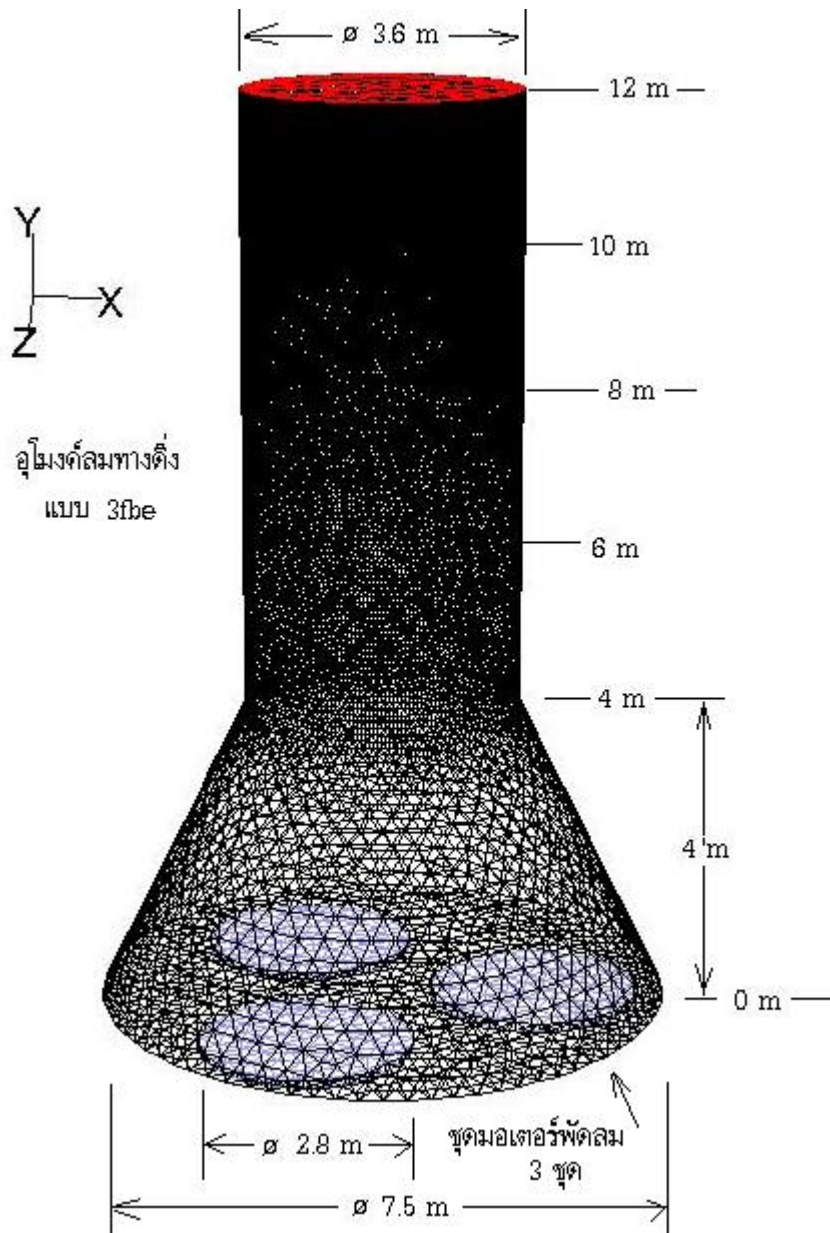
1. โรงเรียนสงครามพิเศษ ศูนย์สงครามพิเศษ. (2545). เครื่องช่วยฝึกเทคโนโลยีสูงอุโมงค์ลมทางดิ่ง. (Online). Available : <http://www.sws.in.th/swsairspeed.htm>. Retrieved October 9, 2005.
2. รวบรวมจากฝ่ายสุขภาพทั่วไป กองอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร. (2549). (Online). Available : <http://www.yupparaj.ac.th/DigitalLibrary/snet6/envi3/soundpol/soundpol.htm>.
3. สุพันธ์ ศรีณนิตย. (2542). กลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพฯ : ประชาชน จำกัด.
4. อติศักดิ์ พลิตผลการพิมพ์. (2549). หูหนู่จะฟังหรือเปล่า (Online). Available : http://www.elib-online.com/doctors48/ent_ear003.html. Retrieved December 2, 2005.
5. Aero-Astro. (2006). Fluid Dynamics Research Laboratory's Low Turbulence Wind Tunnel (Online). Available : <http://web.mit.edu/aeroastro/www/labs/FDRL/ltwt.html>. Retrieved June 27, 2006.
6. BEVI. (2005). Typical motor efficiencies for standard 3 phase AC squirrel cage induction motors. (Online). Available : http://www.bevi.dk/t_topics/e_effcy.htm. Retrieved December 3, 2005.
7. Bodyflightconcepts. (2005). Vertical Wind Tunnel (Online). Available : http://www.bodyflightconcepts.com/vertical_wind_tunnel_sales.html. Retrieved December 2, 2005.
8. BRUCE R. MUNSON, DONALD F. YOUNG and THEODORE H. OKIISHI. (1998). *Fundamentals of Fluid Mechanicals*. 3rd ed. Canada : John Wiley & Song.
9. Calorex Ltd. (2006). PORTA-AIR fans (Online). Available : <http://www.calorex.com/company/porta04.htm>. Retrieved June 23, 2006.
10. Elta Fans Ltd 2000. (2006). Axial Flow Fans (Online). Available : http://www.eltafans.com/nomal_axial.html#. Retrieved June 23, 2006.
11. ENGIN SOFTT. (2006). FLUIDODINAMICA (Online). Available : <http://www.cfd.enginsoft.it/applicazioni/fan.html>. Retrieved June 24, 2006.
12. Exa Corporation. (2006). Swirling Flows. Assembly (Online). Available : http://www.exa.com/newsite/PowerFLOW/pfvald_fanmodels.html. Retrieved June 24, 2006.
13. Fan Systems Group Ltd.(2006). Axial Flows (Online). Available : <http://www.fansystems.co.uk>. Retrieved May 11, 2006.

14. Flakt Woods Group Ltd.(2006). Axial Flows (Online). Available : <http://www.fansystems.co.uk>. Retrieved May 11, 2006.
15. FRANK M. WHITE. (1999). *Fluid Mechanicals*. 4th ed. Singapore : McGraw-Hill.
16. George Bergeles (Professor) Director of the Lab. The National Technical University of Athens (N.T.U.A.) (2005). Wind Tunnel (Online). Available : <http://www.aerolab.ntua.gr/experim.html>. Retrieved December 3, 2005.
17. Institute for Coean Technology. (2006). Hydrodynamic Characteristics of a Screw-Nozzle-Rudder (Online). Available : http://www.engr.mun.ca/~pliu/NRC_CFD/propeller05.html. Retrieved June 24, 2006.
18. IRVING H. SHAMES. (1992). *Mechanics of Fluids*. 3rd ed. The United States : McGraw-Hill.
19. J.F. Douglas, J.M.Gasiorek and J.A.Swaffield. (1995). *FLUID MECHANICES*. 3rd ed. Singapore : Longman Singapore.
20. Mechanical and Aeronautical Engineering University of California. (2006). The Adverse Pressure Gradient Wind Tunnel(Online). Available : <http://mae.engr.ucdavis.edu/~wind/facilities/apg.html>. Retrieved June 27, 2006.
21. Robert A. Granger. (1995). *FLUID MECHANICES*. New York : DOVER PUBLICATIONS.
22. SEED. (2006). Adventures In Skydiving (Online). Available : http://www.seed.slb.com/en/scictr/watch/skydiving/gravity_drag.htm. Retrieved June 24, 2006.
23. SkyVenture. (2005). Vertical Wind Tunnel (Online). Available : <http://www.skyventure.com/Tunnellocations/default.aspx>. Retrieved November 9, 2005.
24. SkyVenture Abu Dhabi. (2004). Vertical Wind Tunnel (Online). Available : <http://www.skyventure.com/tunnellocations/TBA>. Retrieved November 23, 2005.
25. SkyVenture Arizona. (2005). Vertical Wind Tunnel (Online). Available : <http://www.skyventureaz.com/>. Retrieved October 12, 2005.
26. SkyVenture Colorado. (2005). Vertical Wind Tunnel (Online). Available : <http://www.skyventurecolorado.com/>. Retrieved November 23, 2005.
27. SkyVenture Genting. (2005). Vertical Wind Tunnel (Online). Available : <http://www.genting.com/my/themepark/indoor/skyventure.htm>. Retrieved November 11, 2005.
28. SkyVenture Hollywood. (2005). Vertical Wind Tunnel (Online). Available : <http://www.skyventure.com/tunnellocations/TBA>. Retrieved October 15, 2005.

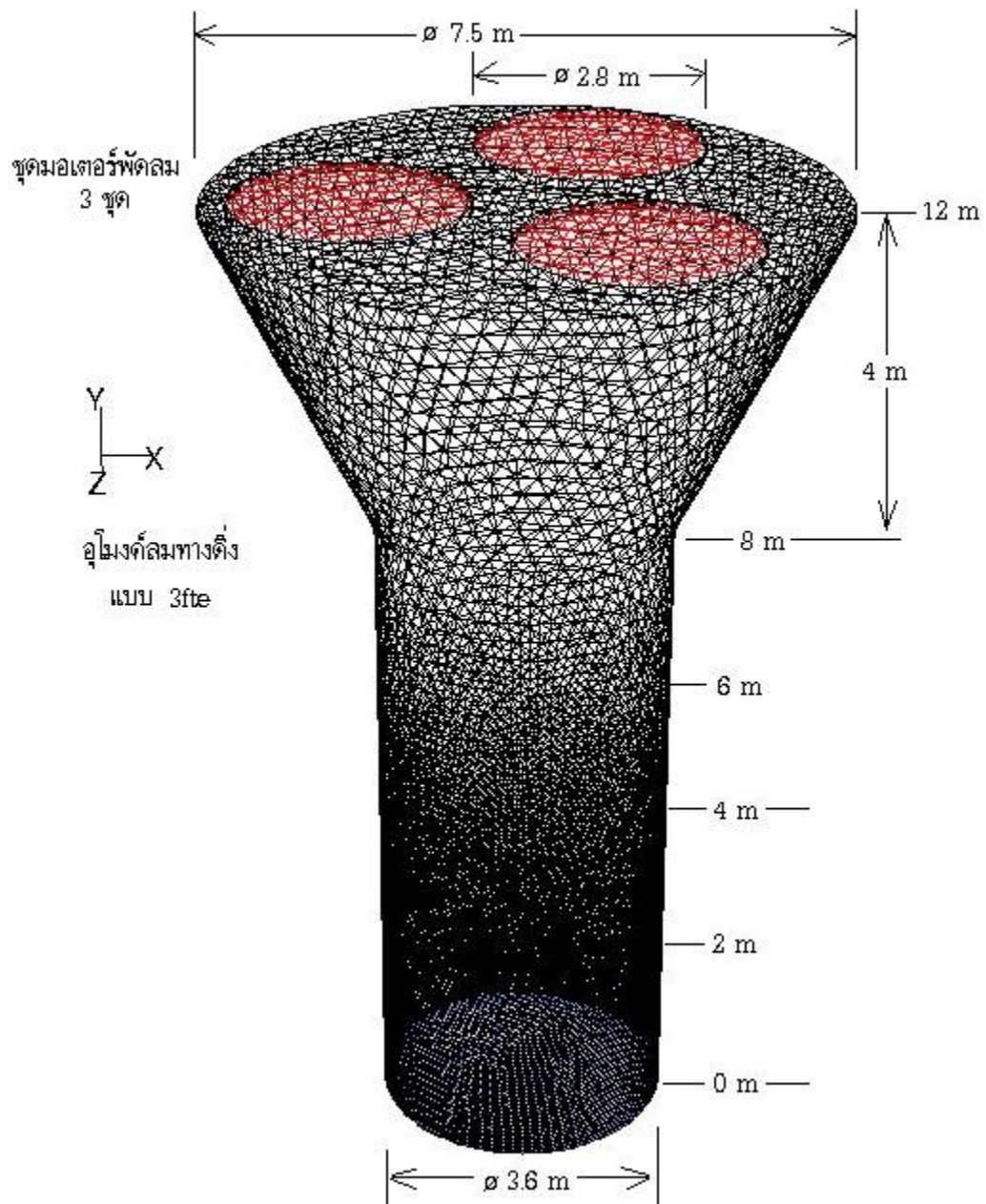
29. SkyVenture U.K. Milton Keynes. (2005). Vertical Wind Tunnel (Online). Available : <http://www.airkix.com/>. Retrieved December 9, 2005.
30. SkyVenture Orlando. (2005). Vertical Wind Tunnel (Online). Available : <http://www.skyventureorlando.com>. Retrieved October 12, 2005.
31. TEKNOLOGISK INSTITUT. (2006). CFD analyser (Online). Available : <http://www.teknologisk.dk/energi/10829,2>. Retrieved June 24, 2006.
32. The Wind Tunnel. (2006). Low-Speed Wind Tunnels (Online). Available : <http://aerodyn.org/WindTunnel/ttunnels.html#lowspeed>. Retrieved June 27, 2006.
33. U.C.M. Resita. (2006). Image gallery - products (Online). Available : <http://www.ucmr.com/galerii/imagepages/image-cap09.html>. Retrieved June 24, 2006.
34. UIUC Low Speed Airfoil Test Program Bulletin #2. (2006). Airfoil Testing for Model Aircraft (Online). Available : http://www.ae.uiuc.edu/m-selig/uiuc_lsats/tunnel.gif. Retrieved June 27, 2006.

ภาคผนวก

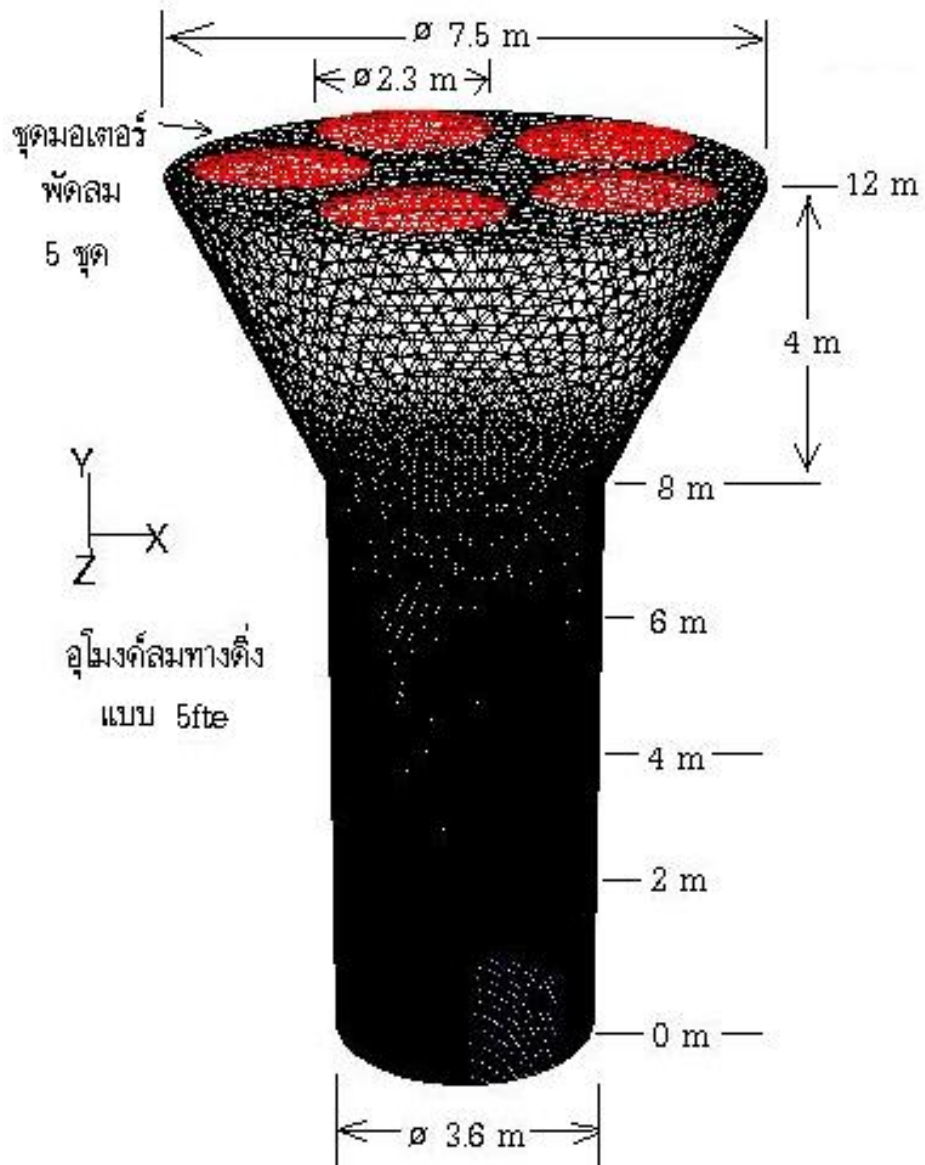
แสดงขนาดของอุโมงค์ลมทางดิ่ง



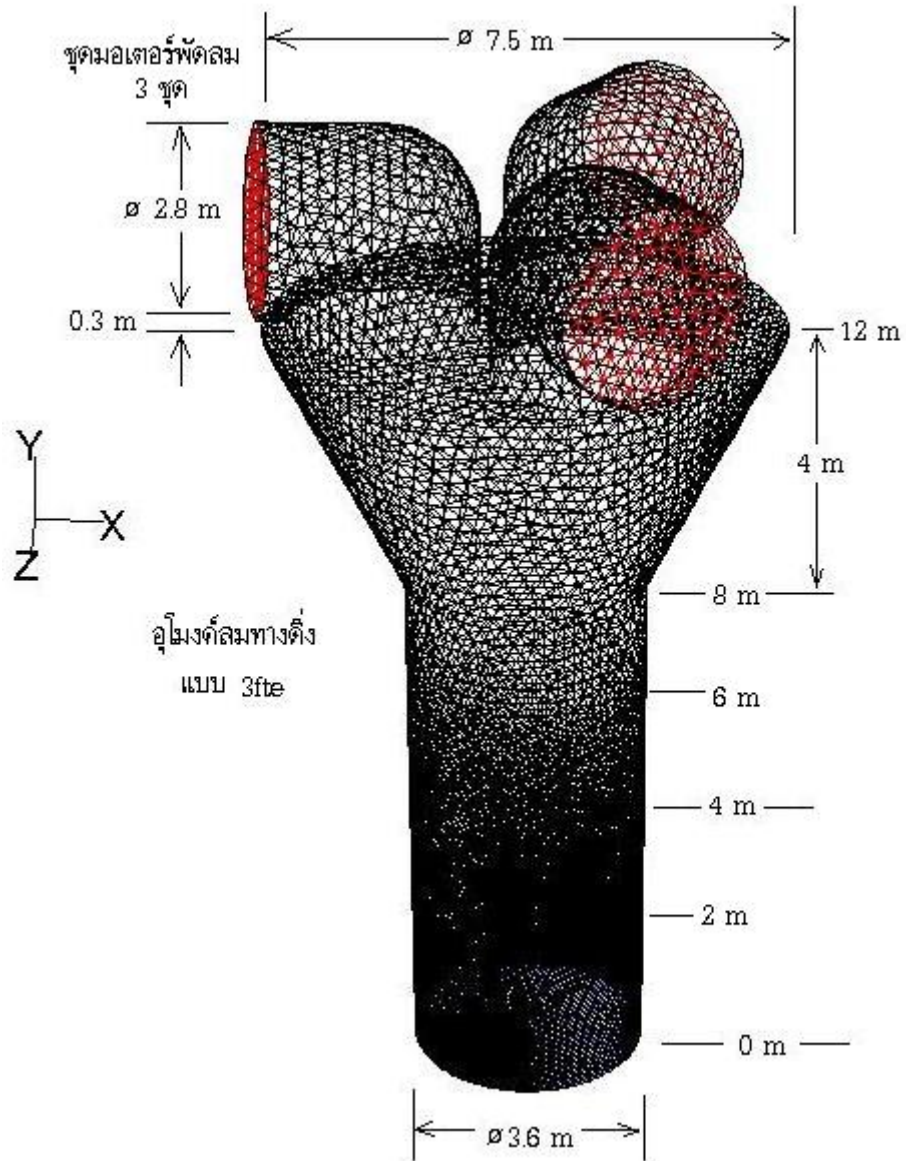
ภาพประกอบ 57 อุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านล่าง



ภาพประกอบ 58 อุโมงค์ลมทางตั้ง แบบติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบน

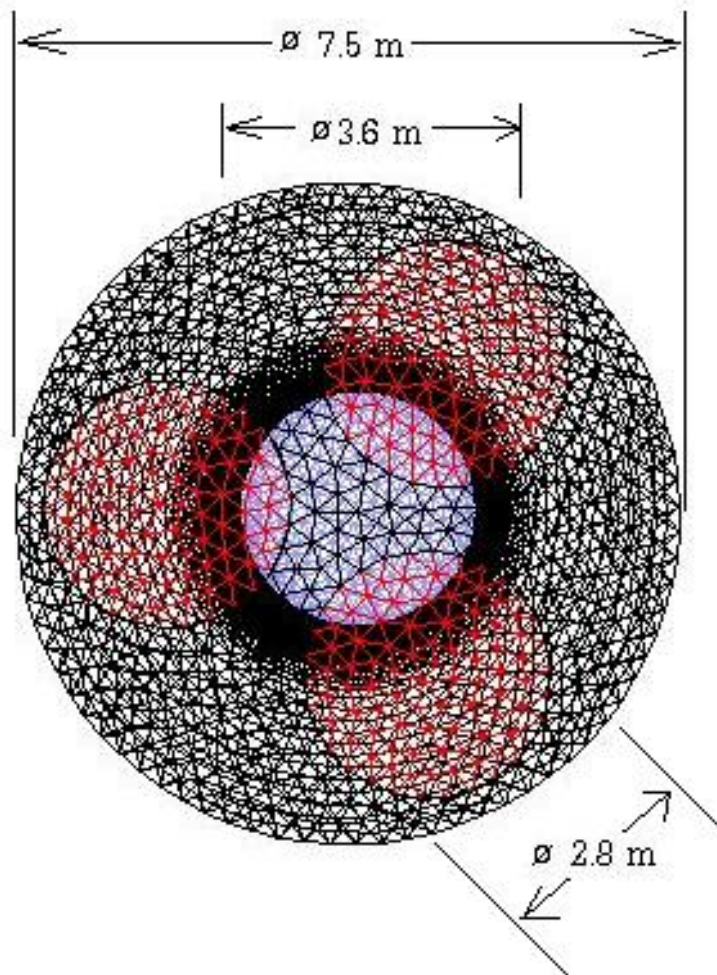


ภาพประกอบ 59 อุโมงค์ลมทางตั้ง แบบติดตั้งชูดมอเตอรืพัดลม 5 ชุด ที่ด้านบน

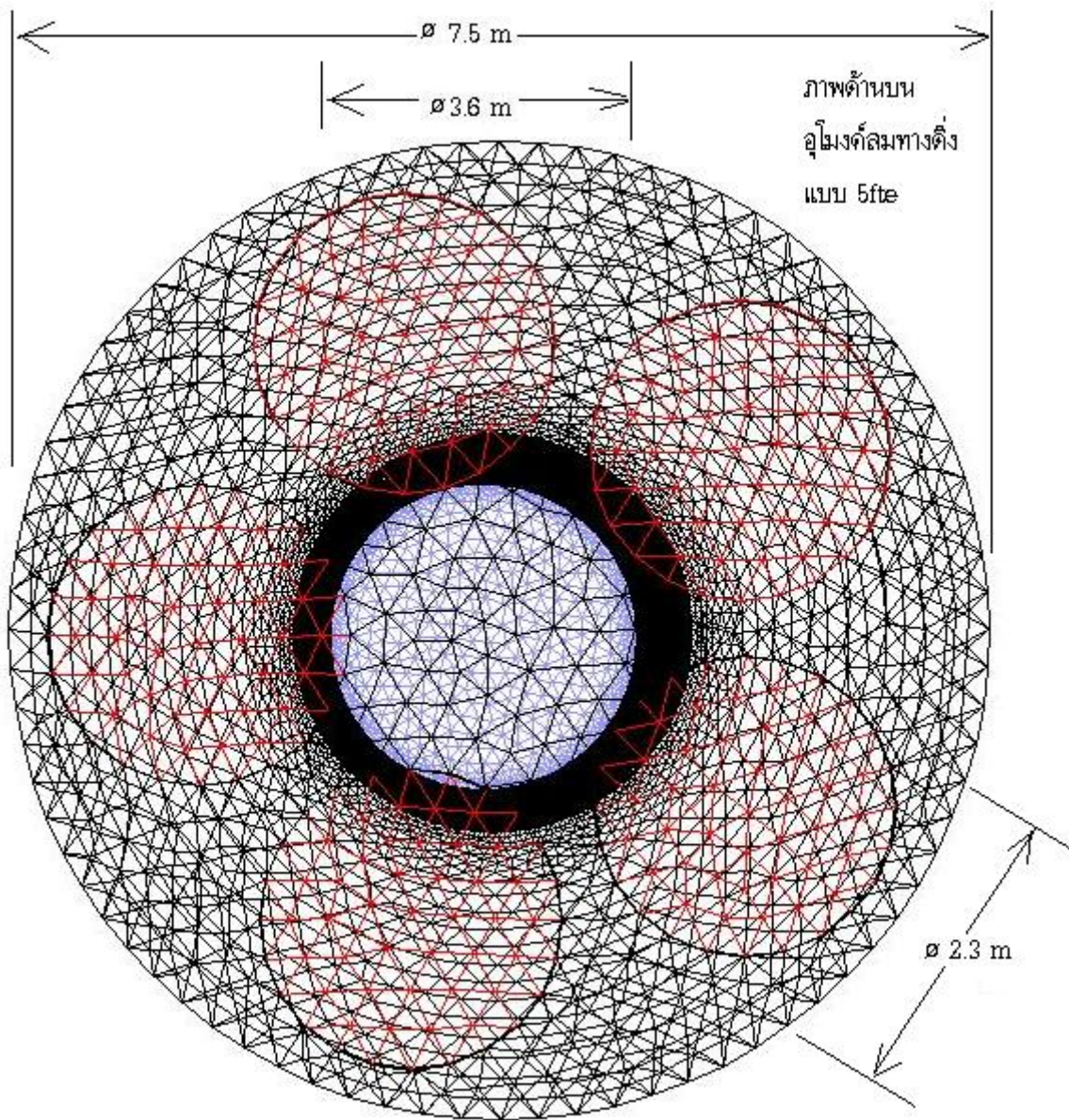


ภาพประกอบ 60 อุโมงค์ลมทางตั้ง แบบติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบน มีท่อลมออกแนวราบ

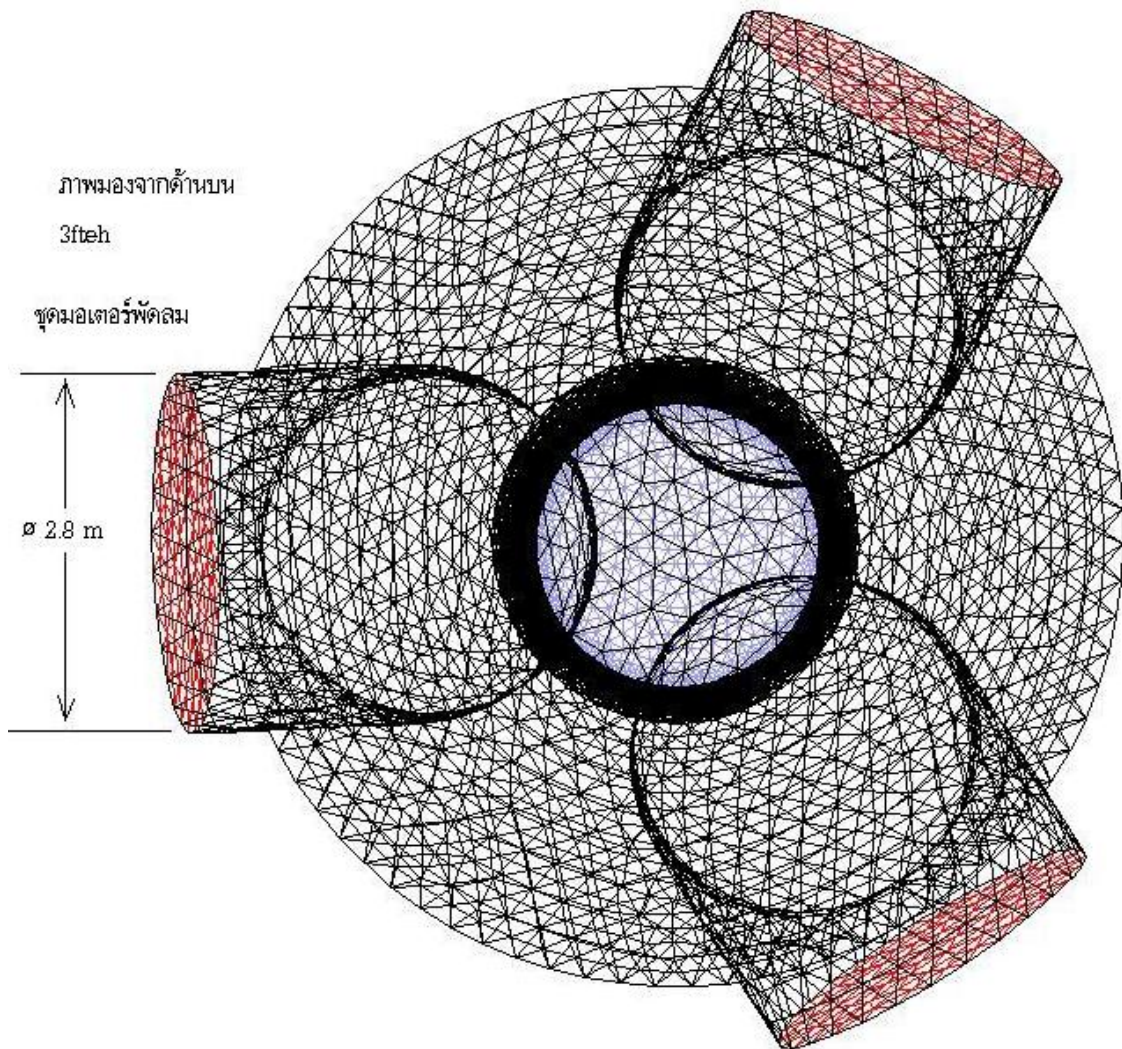
ภาพด้านบน
อุโมงค์ลมทางตั้ง
แบบ 3fte หรือ 3fbe



ภาพประกอบ 61 ด้านบนของอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 3 ชุด ที่ด้านบน หรือด้านล่าง



ภาพประกอบ 62 ด้านบนของอุโมงค์ลมทางตั้ง แบบติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลม 5 ชุด ที่ด้านบน หรือด้านล่าง



ภาพประกอบ 63 ด้านบนของอุโมงค์ลมทางดิ่ง แบบติดตั้งชูดมเตอร์พัดลม 3 ชุด
ที่ด้านบน หรือด้านล่าง มีท่อลมออกแนวราบ

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ - สกุล	ชัยณรงค์ อินประสิทธิ์
วัน-เดือน-ปี เกิด	31 มกราคม 2502
สถานที่เกิด	อำเภอโมโนรมย์ จังหวัดชัยนาท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตตาก อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2518	มัธยมศึกษาตอนต้น รร.อุทิศไพบูลย์ชนูปถัมภ์ จังหวัดชัยนาท
พ.ศ.2521	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์
พ.ศ.2523	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษาคณะตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา
พ.ศ.2526	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ
พ.ศ.2545	การศึกษามหาบัณฑิต สาขาจิตวิทยาการแนะแนว มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก
พ.ศ.2550	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ โครงการร่วม รร.นายร้อยพระจุลจอมเกล้า จังหวัดนครนายก
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ.2528	อาจารย์ 1 วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา วิทยาเขตตาก
พ.ศ.2536	อาจารย์ 2 วิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตตาก
พ.ศ.2542	อาจารย์ 3 วิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตตาก
พ.ศ.2548	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตตาก