

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพประกอบ	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและปัญหาที่นำไปสู่การค้นคว้าวิจัย	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎีและเชิงประยุกต์	6
1.5 ขอบเขตการวิจัย	7
บทที่ 2 หลักการ เหตุผล และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 คุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของภาคหน้าตัดปีก	9
2.1.1 อัตราส่วนสนทรรศ	9
2.1.2 สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านของภาคตัดปีก	9
2.1.3 ทฤษฎีโมเมนต์ในแนวแกน	10
2.1.4 ทฤษฎีเบลคฮิลิเมนต์	11
2.2 ทฤษฎีการหาประสิทธิภาพของอุโมงค์ลม	12
2.3 ทฤษฎีความสูญเสียภายในอุโมงค์ลม	13
2.4 สัมประสิทธิ์ไร้หน่วย	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	17
3.1 ตัวแปรสำหรับการทดสอบ	17
3.1.1 ลักษณะภาคตัดของใบพัด	17
3.1.2 มุมพิทช์	20
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด	23
3.2.1 อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบ	23
3.2.2 ชุดแทนทดสอบใบพัด	24
3.2.3 ทรานส์ดิวเซอร์สำหรับวัดแรง	25
3.2.4 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ	26
3.2.5 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลโดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์	26
3.2.6 เครื่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์	27
3.2.7 เครื่องวัดความเร็วรอบ	28
3.2.8 เครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน	28
3.2.9 น้ำหนักมาตรฐาน	29
3.2.10 เครื่องวัดความดันบรรยากาศ	30
3.2.11 ไมโครมาโนมิเตอร์	30
3.2.12 พิโดทิวป์	31
3.3 วิธีการทดสอบ	32
3.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน และความดันสูญเสีย	32
3.3.2 การสอบเทียบมาตรฐาน	34
3.4 วิธีการวิเคราะห์ผล	37
3.4.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของอุโมงค์ลม	37
3.4.2 การวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของการกระจายความเร็วในอุโมงค์ลม	38
3.4.3 การวิเคราะห์หาพื้นที่ใช้งาน	38
3.4.4 การวิเคราะห์การกระจายความเร็วอากาศ	40
3.4.5 ความดันสูญเสียภายในอุโมงค์ลม	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย	46
4.1 ผลการวิจัย	46
4.2 วิเคราะห์ผลการวิจัย	67
4.2.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของอุโมงค์ลม	67
4.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบความสม่ำเสมอของความเร็วอากาศในอุโมงค์ลม	69
4.2.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบความดันสถุณเสี่ยภายในอุโมงค์ลม	72
4.3 วิจารณ์ผลการวิจัย	74
4.3.1 วิจารณ์ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุโมงค์ลม	74
4.3.2 วิจารณ์ผลการทดสอบความสม่ำเสมอของความเร็วอากาศในอุโมงค์ลม	77
4.3.3 วิจารณ์ผลการทดสอบความดันสถุณเสี่ยภายในอุโมงค์ลม	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	82
5.1 สรุปผล	82
5.1.1 ผลของสมรรถนะการทำงานของอุโมงค์ลม	82
5.1.2 ผลของการกระจายความเร็ว และพื้นที่ใช้งานของอุโมงค์ลม	83
5.1.3 ผลของความดันสถุณเสี่ย และความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน	83
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม	85
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก โปรแกรมประเมินสมรรถนะปีกหมุน	88
ภาคผนวก ข รายละเอียดอุปกรณ์วัดแรง	93
ภาคผนวก ค ตารางแสดงข้อมูลประสิทธิภาพกับความเร็วช่วงทำงานของอุโมงค์ลม	106
ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดสอบความเร็วในช่วงทำงานของอุโมงค์ลม	110
ภาคผนวก จ ข้อมูลการทดสอบความดันรวมของอุโมงค์ลม	119
ประวัติผู้เขียน	123

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียแต่ละส่วนภายในอุโมงค์	4
3.1 แสดงสมการแนวโน้มแบบ โพลีโนเมียล ดีกรี 3	22
3.2 แสดงสมการแนวโน้มแบบ โพลีโนเมียล ดีกรี 4	23
3.3 แสดงข้อมูลการสอบเทียบความเร็วลมของอากาศ	37
4.1 สัมประสิทธิ์ไร้หน่วย และสมรรถนะของอุโมงค์ลมที่ใบพัดหน้าตัดแบบแผ่น มุมพิทช์ 23 องศา	47
4.2 สัมประสิทธิ์ไร้หน่วยและสมรรถนะของอุโมงค์ลมใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ มุมพิทช์ 12 องศา	47
4.3 สัมประสิทธิ์ไร้หน่วยและสมรรถนะของอุโมงค์ลมใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ มุมพิทช์ 18 องศา	48
4.4 สัมประสิทธิ์ไร้หน่วยและสมรรถนะของอุโมงค์ลมใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ มุมพิทช์ 23 องศา	48
4.5(ก) แสดงค่าความไม่สม่ำเสมอที่ความเร็วอากาศต่างๆของใบพัดหน้าตัดแบบแผ่น มุมพิทช์ 23 องศา	70
4.5(ข) แสดงค่าความไม่สม่ำเสมอที่ความเร็วอากาศต่างๆของใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ มุมพิทช์ 12 องศา	70
4.5(ค) แสดงค่าความไม่สม่ำเสมอที่ความเร็วอากาศต่างๆของใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ มุมพิทช์ 18 องศา	71
4.5(ง) แสดงค่าความไม่สม่ำเสมอที่ความเร็วอากาศต่างๆของใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ มุมพิทช์ 18 องศา	71
4.6(ก) แสดงค่าสมการแนวโน้มความดันสูญเสียของอุโมงค์ลมกับความเร็วน้ำที่หน้าตัด ช่วงทำงาน และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในช่วงปรับสภาพการไหล	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.6(ข) แสดงค่าสมการแนวโน้มความดันสูญเสียของอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัด ช่วงทำงาน และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในช่วงทำงาน	72
4.6(ค) แสดงค่าสมการแนวโน้มความดันสูญเสียของอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัด ช่วงทำงาน และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในช่วงเปลี่ยนทิศทางการไหล	72
4.7 แสดงค่าสมการแนวโน้มความดันสูญเสียเกี่ยวกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจและค่าสัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียในแต่ละช่วง ของอุโมงค์ลม	73
4.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียในแต่ละส่วนอุโมงค์ลมตั้งแต่ช่วงปรับสภาพ การไหลถึงช่วงเปลี่ยนรูปแบบการไหล	78
4.9 แสดงค่าสมการแนวโน้มความดันสูญเสียกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจและค่าสัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียในแต่ละช่วงของ อุโมงค์ลมทางทฤษฎี	79
ข.1 การปรับสวิตช์ Span coarse	93
ข.2 การปรับสวิตช์ Tare coarse	94
ค.1 แสดงข้อมูลประสิทธิภาพกับความเร็วช่วงทำงานของอุโมงค์ลม ใบพัดหน้าตัด แบบแผ่น มุมพิทช์ 23 องศา	106
ค.2 แสดงข้อมูลประสิทธิภาพกับความเร็วช่วงทำงานของอุโมงค์ลม ใบพัดหน้าตัด รูปแพนอากาศ มุมพิทช์ 12 องศา	107
ค.3 แสดงข้อมูลประสิทธิภาพกับความเร็วช่วงทำงานของอุโมงค์ลม ใบพัดหน้าตัด รูปแพนอากาศ มุมพิทช์ 18 องศา	108
ค.4 แสดงข้อมูลประสิทธิภาพกับความเร็วช่วงทำงานของอุโมงค์ลม ใบพัดหน้าตัด รูปแพนอากาศ มุมพิทช์ 23 องศา	109
จ.1 แสดงข้อมูลการทดสอบความดันรวมของอุโมงค์ลม ใบพัดหน้าตัดแบบแผ่น มุมพิทช์ 23 องศา	119
จ.2 แสดงข้อมูลการทดสอบความดันรวมของอุโมงค์ลม ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ มุมพิทช์ 12 องศา	120

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
จ.3	แสดงข้อมูลการทดสอบความดันรวมของอุโมงค์ลม ใบพัดหน้าตัดรูปแบนอากาศ มุมพิทช์ 18 องศา	121
จ.4	แสดงข้อมูลการทดสอบความดันรวมของอุโมงค์ลม ใบพัดหน้าตัดรูปแบนอากาศ มุมพิทช์ 23 องศา	122

สารบัญภาพประกอบ

รูป	หน้า
1.1 กราฟแสดงสมรรถนะการออกแบบโรเตอร์แบบ HELICE	3
1.2 แสดงส่วนประกอบต่างๆภายในอุโมงค์ลม	7
2.1 แสดงความเร็วลมและแรงที่กระทำบนเบลคดอิลิเมนต์	9
2.2 งานถ่ายแรงและการไหลของอากาศ	10
3.1 แสดงใบพัดหน้าตัดแบบแผ่นเรียบที่ใช้อยู่เดิม	17
3.2 แสดงลักษณะของใบพัดหน้าตัดแบบแพนอากาศ	18
3.3 แสดงข้อมูลคุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ภาคตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A.0012-B	19
3.4 อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบเปิดที่ใช้ในการทดสอบ	24
3.5 ชุดแท่นทดสอบใบพัด	25
3.6 แสดงทรานส์ดิวเซอร์สำหรับวัดแรงที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้	25
3.7 แสดงชุดอุปกรณ์ WT95 และ OD95	26
3.8 แสดงชุดเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์	27
3.9 แสดงเครื่องวัดความเร็วรอบแบบใช้แสงสะท้อน	28
3.10 แสดงชุดเครื่องมือวัดความเร็วแบบลวดร้อน	29
3.11 แสดงน้ำหนักมาตรฐานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้	29
3.12 แสดงชุดเครื่องวัดความดันบรรยากาศ	30
3.13 แสดงชุดไมโครมาโนมิเตอร์	31
3.14 แสดงชุดพีโดทิวป์	31
3.15 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วและความดันรวมทั้งตำแหน่งต่างๆในอุโมงค์ลม	33
3.16 แสดงตำแหน่งการวัดการแจกแจงความเร็วและความดันรวม	33
3.17 แสดงการวัดความเร็วรอบการหมุนของพัดลมและการวัดแรงบิด	34
3.18 แสดงการสอบเทียบมาตรฐานอุปกรณ์วัดแรงก่อนทำการวัดแรงบิด	35
3.19 แสดงกราฟแนวโน้มของแรงมาตรฐานกับแรงที่อ่านได้จากอุปกรณ์	36
3.20 แสดงแกนอ้างอิง XYZ บนอุโมงค์ลม	39

## สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า	
3.21	แสดงลักษณะการกระจายความเร็วอากาศบนระนาบ XY	39
3.22	แสดงขอบเขตพื้นที่ใช้งานบนหน้าตัดทำงานของอุโมงค์ลม	40
3.23	แสดงส่วนต่างๆของอุโมงค์ลมในการวิเคราะห์ค่าความดันสูญเสีย	41
4.1(ก)	แสดงผลการทดสอบระหว่างกำลังที่ใช้ในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัด ช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดแบบแผ่น มุมพิทช์ 23 องศา	49
4.1(ข)	แสดงผลการทดสอบระหว่างประสิทธิภาพการทำงานในอุโมงค์ลมกับความเร็ว ที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดแบบแผ่น มุมพิทช์ 23 องศา	49
4.1(ค)	แสดงผลการทดสอบระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์กับสัมประสิทธิ์กำลัง ใบพัดหน้าตัดแบบแผ่น มุมพิทช์ 23 องศา	50
4.2(ก)	แสดงผลการทดสอบระหว่างกำลังที่ใช้ในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัด ช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A. 0012-B มุมพิทช์ 12 องศา	50
4.2(ข)	แสดงผลการทดสอบระหว่างประสิทธิภาพการทำงานในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่ หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A 0012-B มุมพิทช์ 12 องศา	51
4.2(ค)	แสดงผลการทดสอบระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์กับสัมประสิทธิ์กำลัง ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A. 0012-B มุมพิทช์ 12 องศา	51
4.3(ก)	แสดงผลการทดสอบระหว่างกำลังที่ใช้ในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัด ช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A. 0012-B มุมพิทช์ 18 องศา	52
4.3(ข)	แสดงผลการทดสอบระหว่างประสิทธิภาพการทำงานในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่ หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A. 0012-B มุมพิทช์ 18 องศา	52
4.3(ค)	แสดงผลการทดสอบระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์กับสัมประสิทธิ์กำลัง ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A. 0012-B มุมพิทช์ 18 องศา	53
4.4(ก)	แสดงผลการทดสอบระหว่างกำลังที่ใช้ในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัด ช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A. 0012-B มุมพิทช์ 23 องศา	52
4.4(ข)	แสดงผลการทดสอบระหว่างประสิทธิภาพการทำงานในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่ หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A. 0012-B มุมพิทช์ 23 องศา	52



### สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.4(ค) แสดงผลการทดสอบระหว่างค่าเรโนลด์นัมเบอร์กับสัมประสิทธิ์เชิงกำลัง ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A. 0012-B มุมพิทช์ 23 องศา	53
4.5(ก) ลักษณะของการกระจายความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงานของอุโมงค์ลมบนระนาบ X-Y ใบพัดหน้าตัดแบบแผ่น มุมพิทช์ 23 องศา	55
4.5(ข) ลักษณะของการกระจายความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงานของอุโมงค์ลมตาม แนวแกน X ใบพัดหน้าตัดแบบแผ่น มุมพิทช์ 23 องศา	56
4.6(ก) ลักษณะของการกระจายความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงานของอุโมงค์ลม บนระนาบ X-Y ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 12 องศา	57
4.6(ข) ลักษณะของการกระจายความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงานของอุโมงค์ลมตาม แนวแกน X ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ มุมพิทช์ 12 องศา	58
4.7(ก) ลักษณะของการกระจายความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงานของอุโมงค์ลม บนระนาบ X-Y ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 18 องศา	59
4.7(ข) ลักษณะของการกระจายความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงานของอุโมงค์ลมตาม แนวแกน X ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 18 องศา	60
4.8(ก) ลักษณะของการกระจายความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงานของอุโมงค์ลม บนระนาบ X-Y ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ NACA0012-B มุมพิทช์ 23 องศา	61
4.8(ข) ลักษณะของการกระจายความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงานของอุโมงค์ลมตาม แนวแกน X ใบพัดหน้าตัดรูปแพนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 23 องศา	62
4.9(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียที่หน้าตัดช่วงปรับสภาพการไหลใน อุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดแบบแผ่น มุมพิทช์ 23 องศา	63
4.9(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียที่หน้าตัดช่วงทำงานในอุโมงค์ลม กับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดแบบแผ่น มุมพิทช์ 23 องศา	63
4.9(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียที่หน้าตัดช่วงเปลี่ยนรูปแบบการไหล ในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดแบบแผ่น มุมพิทช์ 23 องศา	63

### สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.10(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียที่หน้าตัดช่วงปรับสภาพการไหล ในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแบนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 12 องศา	64
4.10(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียที่หน้าตัดช่วงทำงานในอุโมงค์ลม กับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแบนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 12 องศา	64
4.10(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียที่หน้าตัดช่วงเปลี่ยนรูปแบบการไหล ในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแบนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 12 องศา	64
4.11(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียที่หน้าตัดช่วงปรับสภาพการไหล ในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแบนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 18 องศา	65
4.11(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียที่หน้าตัดช่วงทำงานในอุโมงค์ลม กับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแบนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 18 องศา	65
4.11(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียที่หน้าตัดช่วงเปลี่ยนรูปแบบการไหล ในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแบนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 18 องศา	65
4.12(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียที่หน้าตัดช่วงปรับสภาพการไหล ในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแบนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 23 องศา	66
4.12(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียที่หน้าตัดช่วงทำงานในอุโมงค์ลม กับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแบนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 23 องศา	66

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.12(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียที่หน้าตัดช่วงเปลี่ยนรูปแบบการไหล ในอุโมงค์ลมกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ใบพัดหน้าตัดรูปแบนอากาศ N.A.C.A.0012-B มุมพิทช์ 23 องศา	66
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียเฉลี่ยกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน ในแต่ละช่วงของอุโมงค์ลม	73
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงานกับกำลังงานและประสิทธิภาพของอุโมงค์ลม	76
4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความไม่สม่ำเสมอกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงาน	77
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับความเร็วที่หน้าตัดช่วงทำงานทาง ทฤษฎี	79
4.17 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันสูญเสียจากการทดลองกับทฤษฎี	80
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์กำลังสูญเสียในส่วนต่างๆของอุโมงค์ลม	81
ก.1 แสดงหน้าตาหลักของโปรแกรมประเมินสมรรถนะปีกหมุน	88
ก.2 แสดงหน้าตาสร้างฐานข้อมูลของโปรแกรมประเมินสมรรถนะปีกหมุน	89
ก.3 แสดงหน้าตาสำหรับกำหนดค่าตัวแปรของโปรแกรมประเมินสมรรถนะปีกหมุน	90
ก.4 แสดงหน้าตาแสดงผลการประเมินของ โปรแกรมประเมินสมรรถนะปีกหมุน	91
ก.5 แสดงหน้าตาแสดงรายละเอียดผลการประเมินของ โปรแกรมประเมินสมรรถนะปีกหมุน	92
ข.1 หน้าตาของโปรแกรม Online Excel Datalogger	95
ข.2 หน้าตา Setup AI	96
ข.3 หน้าตา Digital Input Setup	97
ข.4 หน้าตา Digital Output Setup	97
ข.5 หน้าตา Analog Input Setup	98
ข.6 หน้าตากราฟข้อมูล	100
ข.7 หน้าตาการ Set Scale	101
ข.8 หน้าตา History	102

## สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
ข.9	หน้าต่าง Open File	103
ข.10	หน้าต่าง View Data	103
ข.11	หน้าต่าง View Maximum and Minimum	104
ข.12	หน้าต่าง View Graph	105

## อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$AR$	อัตราส่วนสนทรรศ (Aspect Ratio)	-
$A_a$	พื้นที่หน้าตัดของจานถ่ายแรง	$m^2$
$A_i$	พื้นที่หน้าตัดในแต่ละช่วงของอุโมงค์ลม	$m^2$
$A_T$	พื้นที่หน้าตัดช่วงทำงานของอุโมงค์ลม	$m^2$
$b$	ปัจจัยการไหลในแนวรัศมีของใบพัด	-
$b'$	ระยะทางที่วัดจากปลายปีกจากปลายข้างหนึ่งถึงปลายอีกข้างหนึ่ง	m
$C_D$	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	-
$C_L$	สัมประสิทธิ์แรงยก	-
$c$	ความยาวคอร์ด	m
$D$	แรงต้าน	N
$D_H$	เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของอุโมงค์ลม	m
$D_h$	เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของรังผึ้ง	m
$dD$	แรงต้านในส่วนเล็กๆของปีก	N
$dF$	แรงในระนาบการหมุนของใบพัดที่กระทำในส่วนเล็กๆ	N
$dL$	แรงยกในส่วนเล็กๆของใบพัด	N
$dQ$	แรงบิดที่เกิดขึ้นกับส่วนเล็กๆของใบพัด	N.m
$dr$	ความหนาของส่วนเล็กๆของปีกที่พิจารณา	m
$dT$	แรงขับในส่วนเล็กๆของปีก	N
$d_w$	เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด	mm
$K_b$	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียปากทางเข้าแบบระฆัง	-
$K_h$	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียในรังผึ้ง	-
$K_i$	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียแต่ละส่วนของอุโมงค์ลม	-
$K_i'$	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียเทียบเท่าแต่ละส่วนของอุโมงค์ลม	-
$K_f$	สัมประสิทธิ์ความสูญเสียช่วงเปลี่ยนรูปแบบการไหล	-

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$K_w$	สัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียของตะแกรงลวด	-
$L$	แรงยก	N
$L_h$	ความยาวของตัวรังผึ้งในแต่ละเซลล์	m
$l$	ความยาวของอุโมงค์ลม	m
$l_w$	ความยาวของตะแกรงลวด	m
$M$	มัคนัมเบอร์	-
$\dot{m}$	อัตราการไหลของอากาศ	kg/s
$N$	จำนวนใบพัด	-
$n$	จำนวนข้อมูล	-
$P_a$	พลังงานจลน์ของมวลอากาศ	kW
$P_s$	กำลังที่ต้องป้อนให้แก่พัดลมที่เพลลา	kW
$Q$	แรงบิด	N.m
$Re$	เรโนลด์นัมเบอร์	-
$Re_h$	เรโนลด์นัมเบอร์ของตัวรังผึ้ง	-
$r$	ระยะรัศมีจากจุดศูนย์กลางปีกหมุนของส่วนเล็กๆของปีกที่พิจารณา	m
$T$	แรงขับ	N
$V_i$	ความเร็วเฉลี่ยที่ผ่านแต่ละส่วนของอุโมงค์ลม	m/s
$V_{ia}$	ความเร็วเหนี่ยวนำในแนวแกน	m/s
$V_R$	ความเร็วลัมพ์ของลมที่กระทำกับปีก	m/s
$V_s$	ความเร็วเสียง	m/s
$V_T$	ความเร็วอากาศที่หน้าตัดทำงานของอุโมงค์ลม	m/s
$V_0$	ความเร็วของใบพัดที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้าในทิศตามแนวแกนเพลลา	m/s
$V_1$	ความเร็วกระแสลมขณะที่ไหลผ่านจานถ่ายแรง	m/s
$V_3$	ความเร็วกระแสลมหลังจากที่ไหลผ่านพื้นที่จานถ่ายแรง	m/s
$W$	ความเร็วสัมพัทธ์	m/s
$\mu$	ความหนืดสัมบูรณ์	N.s/m <sup>2</sup>

## อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$\alpha$	มุมปะทะ	degree
$\beta$	มุมที่วัดจากระนาบการหมุนจนถึงเส้นแรงยกเป็นศูนย์	degree
$\beta_h$	ความพรุนของตัวรังผึ้ง	in/m <sup>2</sup>
$\beta_w$	อัตราส่วนพื้นที่ใช้งานที่ตะแกรงลวด (Open-area ratio)	in/m <sup>2</sup>
$\rho$	ความหนาแน่นของอากาศ	kg/m <sup>3</sup>
$\phi$	มุมที่ความเร็วลัพธ์กระทำกับระนาบการหมุน	degree
$\Omega$	ความเร็วเชิงมุมของ ใบพัด	rad/s
$\lambda$	สัมประสิทธิ์กำลัง	-
$\lambda_f$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	-
$\lambda_h$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของรังผึ้งในแต่ละเซลล์	-
$\eta_f$	ประสิทธิภาพของอุโมงค์ลม	%
$\Delta h_{1f}$	ความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน	m
$\Delta h_{1i}$	ความสูญเสียในแต่ละส่วนของอุโมงค์ลม	m
$\Delta h_{1b}$	ความสูญเสียเนื่องจากปากทางเข้าแบบระฆัง	m
$\Delta h_{1r}$	ความสูญเสียเนื่องจากชุดเปลี่ยนรูปแบบการไหล	m
$\Delta h_{1w}$	ความสูญเสียเนื่องจากตะแกรงลวด	m
$\Delta p_b$	ความดันสูญเสียที่ปากทางเข้าแบบระฆัง	Pa
$\Delta p_f$	ความดันสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน	Pa
$\Delta p_h$	ความดันสูญเสียในรังผึ้ง	Pa
$\Delta p_{h1}$	ความดันสูญเสียในรังผึ้งในช่วงปรับสภาพการไหล	Pa
$\Delta p_{h2}$	ความดันสูญเสียในรังผึ้งที่ช่วงเปลี่ยนรูปแบบการไหล	Pa
$\Delta p_r$	ความดันสูญเสียที่ชุดเปลี่ยนรูปแบบการไหล	Pa
$\Delta p_w$	ความดันสูญเสียเนื่องจากตะแกรงลวด	Pa
$\Delta p_1$	ความดันสูญเสียในช่วงปรับสภาพการไหล	Pa
$\Delta p_2$	ความดันสูญเสียในช่วงทำงาน	Pa
$\Delta p_3$	ความดันสูญเสียในช่วงเปลี่ยนรูปแบบการไหล	Pa