สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบาญตาราง	ฎ
สารบาญภาพประกอบ	ฐ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ต
บทที่ I บทนำ	1
1.1 ที่มาและปัญหาที่นำไปสู่การค้นคว้าและวิจัย	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา เชิงทฤษฎีและประยุกต์	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย	4
บทที่ 2 หลักการ เหตุผล และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 คุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ของภาคหน้าตัดปีก	5
2.2 ทฤษฎีเบลดอิลิเมนท์ (Blade Element Theory)	7
2.3 การวิเคราะห์ความเร็วอากาศไหลวนหลังใบพัด	9
2.4 ทฤษฎีวอร์เทค (Vortex Theory)	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	13
3.1 การวิเคราะห์หาแรงขับและแรงบิด	13
3.1.1 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆด้วย วิธีการทำซ้ำที่วิเคราะห์ด้วยทฤษฎีใบพัด	14
3.1.2 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆด้วย วิธีการทำซ้ำที่วิเคราะห์ด้วยทฤษฎีวอร์เทค	14
3.1.3 การหาค่าแรงขับและแรงบิดของปีกหมุน	15

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 โปรแกรมประเมินสมรรถนะปีกหมุน	15
3.2.1 การลู่เข้าของคำตอบและจำนวนคำตอบของโปรแกรมประเมินสมรรถนะปีกหมุน	19
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ	19
3.4 ชุดทดสอบสมรรถนะของปีกหมุนและปีกที่ใช้ทดสอบ	26
3.4.1 ชุดทดสอบสมรรถนะของปีกหมุน	26
3.4.2 ปีกที่ใช้ในการทดสอบ	28
3.4.3 การปรับมุมพิทช์	29
3.5 การสอบเทียบมาตรฐาน	29
3.5.1 การสอบเทียบมาตรฐานการปรับมุมพิทช์	29
3.5.2 การสอบเทียบมาตรฐานการวัดแรงขับ	31
3.5.3 การสอบเทียบมาตรฐานของการวัดแรงบิด	34
3.6 การหาสมรรถนะของปีกหมุน	36
3.6.1 การประเมินสมรรถนะปีกหมุนทางทฤษฎี	36
3.6.2 การทดสอบหาแรงขับ	36
3.6.3 การทดสอบหาแรงบิด	37
3.7 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	39
3.7.1 วิธีการวิเคราะห์แรงขับและแรงบิด	39
3.7.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของปีกหมุนที่ประเมินจากทฤษฎีกับที่ได้จากการทดสอบ	40
3.7.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของปีกหมุนที่มีอัตราส่วนสนทรรศต่างๆ	40
บทที่ 4 ผลและการวิจารณ์ผลจากการดำเนินการวิจัย	42
4.1 ผลการทดสอบแรงขับและแรงบิดของปีกหมุน	42

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการประเมินสมรรถนะด้วยการคำนวณทางทฤษฎี โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	48
4.3 การเปรียบเทียบผลการประเมินสมรรถนะตามทฤษฎีกับผลจากการทดสอบสมรรถนะของปีกหมุน	59
4.4 อิทธิพลของอัตราส่วนสนทรรศที่มีผลต่อสมรรถนะของปีกหมุน	90
4.5 วิจารณ์ผลการวิจัย	109
4.5.1 วิจารณ์ผลการทดสอบแรงขับและแรงบิดของปีกหมุน	109
4.5.2 วิจารณ์ผลการประเมินสมรรถนะด้วยการคำนวณทางทฤษฎี โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	109
4.5.3 การวิจารณ์ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของปีกประเมินโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์กับที่ได้จากการทดสอบ	112
4.54 วิจารณ์ผลของอัตราส่วนสนทรรศต่อค่าสมรรถนะของปีกหมุน	119
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	120
5.1 สรุปผลการวิจัย	120
5.2 ข้อเสนอแนะ	121
บรรณานุกรม	122
ภาคผนวก	124
ภาคผนวก ก. โปรแกรมประเมินสมรรถนะปีกหมุน	125
ภาคผนวก ข. การสร้างปีกสำหรับทำการทดสอบ	156
ภาคผนวก ค. ผลแรงบิดของชุดทดสอบที่ไม่ได้ติดตั้งปีก	170
ภาคผนวก ง. รายละเอียดอุปกรณ์วัดแรง	175
ประวัติผู้เขียน	188

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงปัจจัยที่นำมาคิดในการวิเคราะห์เพื่อประเมินแรงขับและแรงบิดของปีกหมุน	12
3.1 แสดงผลการทดลองการปรับมุมพิทช์ของปีกหมุน	31
3.2 แสดงฟังก์ชันของแรงมาตรฐานกับค่าแรงที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดแรง	33
4.1 แสดงค่าผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยที่มุมพิทช์ต่างๆในการเปรียบเทียบสมรรถนะปีกหมุน ที่ประเมินจากการคำนวณทางทฤษฎีกับที่ได้จากการทดสอบ	113

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
2.1	กราฟแสดงข้อมูลทางอากาศพลศาสตร์ของแอร์ฟอยล์แบบ NACA 0012-B	6
2.2	แสดงส่วนเล็กๆของปีกที่ถูกแบ่งตามแนวเส้นคอร์ด มีความหนา dr คอร์ดยาว c	8
2.3	แสดงส่วนประกอบความเร็วอากาศที่เข้าสู่ปีกและแรงกระทำบนแพนอากาศเล็กๆ ของปีกในการพิจารณาโดยทฤษฎีเบลดอิลิเมนท์	8
2.4	ลักษณะการหมุนวนของอากาศเมื่อผ่านปีกหมุน	9
2.5	พื้นที่กวาดของใบพัดและแถบวงแหวนกว้าง dr	10
2.6	ส่วนประกอบของความเร็วอากาศที่เข้าสู่ปีกและแรงกระทำบนแพนอากาศเล็กๆ ของปีกในการวิเคราะห์ด้วยทฤฎีวอร์เทค	11
3.1	ขั้นตอนการประเมินสมรรถนะ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	16
3.2	แสดงแผนผังของโปรแกรมในส่วนของการคำนวณที่วิเคราะห์ด้วยทฤษฎีใบพัด	17
3.3	แสดงแผนผังของโปรแกรมในส่วนของการคำนวณที่วิเคราะห์ด้วยทฤษฎีวอร์เทค	18
3.4	แสดงทรานส์ดิวเซอร์สำหรับวัดแรงที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้	20
3.5	แสดงชุดอุปกรณ์ WT95 และ OD95	21
3.6	แสดงชุดเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์	22
3.7	แสดงเครื่องวัดความเร็วรอบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้	23
3.8	แสดงมวลมาตรฐานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้	24
3.9	แสดงเครื่องชั่งดิจิตอลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้	24
3.10	แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้	25
3.11	แสดงเครื่องวัดความดันบรรยากาศ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้	25
3.12	ชุดทดสอบขณะทำงาน	26
3.13	ชุดทดสอบสมรรถนะปีกหมุน	27
3.14	แสดงการวัดความยาวปีก	28
3.15	แสดงปีกหมุนทั้งหมด 5 ชุด ชุดละ 2 ใบ ความยาว 0.4 0.5 0.6 0.7 และ 0.8 เมตร คอร์ดขนาด 0.1 เมตร	28

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.16 แสดงชุดปรับมุมพิทช์ของชุดทดสอบสมรรถนะปีกหมุน	29
3.17 แสดงการทดสอบการปรับมุมพิทช์ของชุดทดสอบ	30
3.18 แสดงแผนผังการสอบเทียบมาตรฐานชุดอุปกรณ์วัดแรง	32
3.19 แสดงเส้นกราฟแนวโน้มของค่าแรงที่ได้จากการวัดเทียบกับแรงมาตรฐาน ในการสอบเทียบมาตรฐานของชุดอุปกรณ์วัดแรงขับ	33
3.20 การสอบเทียบมาตรฐานอุปกรณ์วัดแรงก่อนทำการวัดแรงบิด	35
3.21 แสดงเส้นกราฟแนวโน้มของแรงที่วัดได้เทียบกับแรงมาตรฐาน ในการสอบเทียบมาตรฐานการวัดแรงบิด	35
3.22 แสดงการทำงานของชุดทดสอบ	39
3.23 แสดงตัวอย่างการสร้างแนวโน้มของแรงขับของปีกหมุนเทียบกับความเร็วรอบ โดยมีมุมพิทช์ 25 องศา อัตราส่วนสนทรรศเท่ากับ 8 ที่ได้จากการทดสอบ	41
4.1 (ก)-4.1 (จ) แสดงผลการทดสอบแรงขับของปีกหมุนที่มีมุมพิทช์ 5 ถึง 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศเท่ากับ 4 5 6 7 และ 8	42
4.2 (ก)-4.2 (จ) แสดงผลการทดสอบแรงบิดของปีกหมุนที่มีมุมพิทช์ 5 ถึง 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศเท่ากับ 4 5 6 7 และ 8	45
4.3 (ก)-4.3 (จ) แสดงผลการประเมินแรงขับด้วยทฤษฎีใบพัดของปีกหมุน ที่มีมุมพิทช์ 5 ถึง 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศเท่ากับ 4 5 6 7 และ 8	48
4.4 (ก)-4.4 (จ) แสดงผลการประเมินแรงบิดด้วยทฤษฎีใบพัดของปีกหมุน ที่มีมุมพิทช์ 5 ถึง 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศเท่ากับ 4 5 6 7 และ 8	51
4.5 (ก)-4.5 (จ) แสดงผลการประเมินแรงขับด้วยทฤษฎีวอร์เทคของปีกหมุน ที่มีมุมพิทช์ 5 ถึง 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศเท่ากับ 4 5 6 7 และ 8	54
4.6 (ก)-4.6 (จ) แสดงผลการประเมินแรงบิดด้วยทฤษฎีวอร์เทคของปีกหมุน ที่มีมุมพิทช์ 5 ถึง 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศเท่ากับ 4 5 6 7 และ 8	57

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.7 (ก)-4.7 (ฉ) แสดงการเปรียบเทียบผลการประเมินแรงขับของปีกหมุนที่มีมุมพิทช์ 5 10 15 20 25 และ 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศ 4 ด้วยทฤษฎีใบพัด ทฤษฎีวอร์เทค กับผลการทดสอบ	60
4.8 (ก)-4.8 (ฉ) แสดงการเปรียบเทียบผลการประเมินแรงขับของปีกหมุนที่มีมุมพิทช์ 5 10 15 20 25 และ 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศ 5 ด้วยทฤษฎีใบพัด ทฤษฎีวอร์เทค กับผลการทดสอบ	63
4.9 (ก)-4.9 (ฉ) แสดงการเปรียบเทียบผลการประเมินแรงขับของปีกหมุนที่มีมุมพิทช์ 5 10 15 20 25 และ 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศ 6 ด้วยทฤษฎีใบพัด ทฤษฎีวอร์เทค กับผลการทดสอบ	66
4.10 (ก)-4.10 (ฉ) แสดงการเปรียบเทียบผลการประเมินแรงขับของปีกหมุนที่มีมุมพิทช์ 5 10 15 20 25 และ 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศ 7 ด้วยทฤษฎีใบพัด ทฤษฎีวอร์เทค กับผลการทดสอบ	69
4.11 (ก)-4.11 (ฉ) แสดงการเปรียบเทียบผลการประเมินแรงขับของปีกหมุนที่มีมุมพิทช์ 5 10 15 20 25 และ 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศ 8 ด้วยทฤษฎีใบพัด ทฤษฎีวอร์เทค กับผลการทดสอบ	72
4.12 (ก)-4.12 (ฉ) แสดงการเปรียบเทียบผลการประเมินแรงบิดของปีกหมุนที่มีมุมพิทช์ 5 10 15 20 25 และ 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศ 4 ด้วยทฤษฎีใบพัด ทฤษฎีวอร์เทค กับผลการทดสอบ	75
4.13 (ก)-4.13 (ฉ) แสดงการเปรียบเทียบผลการประเมินแรงบิดของปีกหมุนที่มีมุมพิทช์ 5 10 15 20 25 และ 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศ 5 ด้วยทฤษฎีใบพัด ทฤษฎีวอร์เทค กับผลการทดสอบ	78
4.14 (ก)-4.14 (ฉ) แสดงการเปรียบเทียบผลการประเมินแรงบิดของปีกหมุนที่มีมุมพิทช์ 5 10 15 20 25 และ 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศ 6 ด้วยทฤษฎีใบพัด ทฤษฎีวอร์เทค กับผลการทดสอบ	81

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.15 (ก)-4.15 (ฉ) แสดงการเปรียบเทียบผลการประเมินแรงบิดของปีกหมุนที่มีมุมพิทช์ 5 10 15 20 25 และ 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศ 7 ด้วยทฤษฎีใบพัด ทฤษฎีวอร์เทค กับผลการทดสอบ	84
4.16 (ก)-4.16 (ฉ) แสดงการเปรียบเทียบผลการประเมินแรงบิดของปีกหมุนที่มีมุมพิทช์ 5 10 15 20 25 และ 30 องศา อัตราส่วนสนทรรศ 8 ด้วยทฤษฎีใบพัด ทฤษฎีวอร์เทค กับผลการทดสอบ	87
4.17 (ก)-4.17 (ฉ) แสดงแนวโน้มของแรงขับของปีกหมุนที่ได้จากการทดสอบเทียบกับค่าอัตราส่วนสนทรรศ โดยมีมุมพิทช์ 5 องศา รัศมีดุมของปีกหมุน 0.1285 เมตร	90
4.18 (ก)-4.18 (ฉ) แสดงแนวโน้มของแรงบิดของปีกหมุนที่ได้จากการทดสอบเทียบกับค่าอัตราส่วนสนทรรศ โดยมีมุมพิทช์ 5 และ 10 องศา รัศมีดุมของปีกหมุน 0.1285 เมตร	94
4.19 (ก)-4.19 (ฉ) แสดงแนวโน้มของแรงขับของปีกหมุนที่ประเมินจากทฤษฎีใบพัดเทียบกับค่าอัตราส่วนสนทรรศ โดยมีมุมพิทช์ 5 และ 10 องศา รัศมีดุมของปีกหมุน 0.1285 เมตร	97
4.20 (ก)-4.20 (ฉ) แสดงแนวโน้มของแรงบิดของปีกหมุนที่ประเมินจากทฤษฎีใบพัดเทียบกับค่าอัตราส่วนสนทรรศ โดยมีมุมพิทช์ 5 และ 10 องศา รัศมีดุมของปีกหมุน 0.1285 เมตร	100
4.21 (ก)-4.21 (ฉ) แสดงแนวโน้มของแรงขับของปีกหมุนที่ประเมินจากทฤษฎีวอร์เทคเทียบกับค่าอัตราส่วนสนทรรศ โดยมีมุมพิทช์ 5 และ 10 องศา รัศมีดุมของปีกหมุน 0.1285 เมตร	103
4.22 (ก)-4.22 (ฉ) แสดงแนวโน้มของแรงบิดของปีกหมุนที่ประเมินจากทฤษฎีวอร์เทคเทียบกับค่าอัตราส่วนสนทรรศ โดยมีมุมพิทช์ 5 และ 10 องศา รัศมีดุมของปีกหมุน 0.1285 เมตร	106

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป หน้า

4.23 แสดงลักษณะการกระจายแรงขับและแรงบิดตามระยะรัศมีที่ได้จาก
การคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ 110
4.24 แสดงลักษณะการกระจายมุมปะทะตามระยะรัศมีของปีกหมุน 111
4.25 แสดงลักษณะการกระจายของค่ามัคนัมเบอร์ตามระยะรัศมีของปีกหมุน 112
4.26 กราฟแนวโน้มค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ของแรงขับที่ประเมินด้วยทฤษฎีวอร์เทค
เทียบกับที่ได้จากการทดสอบของปีกหมุนที่มีอัตราส่วนสนทรรศเท่ากับ 8 114
4.27 แสดงแนวโน้มของค่าผิดพลาดเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมพิทช์ของแรงขับ
ที่ได้จากการทดสอบเทียบกับที่ได้จากการประเมินด้วย
(ก) ทฤษฎีใบพัด (ข) ทฤษฎีวอร์เทค 115
4.28 กราฟแนวโน้มค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ของแรงบิดที่ประเมินด้วยทฤษฎีใบพัด
เทียบกับที่ได้จากการทดสอบของปีกหมุนที่มีอัตราส่วนสนทรรศเท่ากับ 7 116
4.29 แสดงแนวโน้มของค่าผิดพลาดเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมพิทช์ของแรงบิด
ที่ได้จากการทดสอบเทียบกับที่ได้จากการประเมินด้วย
(ก) ทฤษฎีใบพัด (ข) ทฤษฎีวอร์เทค 116

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
AR	อัตราส่วนสนทรรศ (Aspect Ratio)	-
A	พื้นที่หน้าตัดของจานถ่ายแรง	m^2
a	พื้นที่ของปีก c × s	m^2
a_b	ความเร็วอากาศหมุนวนรอบแพนอากาศ	-
b	ค่าปัจจัยการไหลเข้าในแนวรัศมีของปีกหมุน หรือ ความเร็วอากาศหมุนวนเกิดจากผลกระทบการหมุนวนที่ปลายปีก	-
C_D	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	-
C_L	สัมประสิทธิ์แรงยก	-
C_{Li}	สัมประสิทธิ์แรงยกที่ไม่คิดผลกระทบการยุบตัวของอากาศ	-
C_{Lc}	สัมประสิทธิ์แรงยกที่คิดผลกระทบการยุบตัวของอากาศ	-
c	ความยาวคอร์ด	m
D	แรงต้าน	N
dD	แรงต้านในส่วนเล็กๆของปีก	m
dF	แรงในระนาบการหมุนของใบพัดที่กระทำในส่วนเล็กๆของกลีบใบ	m
dL	แรงยกในส่วนเล็กๆของกลีบใบ	m
dQ	แรงบิดที่เกิดขึ้นกับส่วนเล็กๆของกลีบใบ	N.m
dr	ความหนาของส่วนเล็กๆของปีกที่พิจารณา	m
dT	แรงขับในส่วนเล็กๆของปีก	m
F	ปัจจัยการสูญเสียที่ปลายปีก	-
L	แรงยก	N
M	มัคนัมเบอร์	-
N	จำนวนกลีบใบของปีกหมุน	-
Q	แรงบิด	N
r	ระยะรัศมีจากจุดศูนย์กลางปีกหมุนของส่วนเล็กๆของปีกที่พิจารณา	m

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

สัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
r_{tip}	รัศมีที่ปลายปีก	m
r_{root}	รัศมีที่โคนปีก	m
S	พื้นที่หน้าตัดของปริมาตรควบคุม	m^2
s	กางปีก หรือความยาวปีก	m
T	แรงขับ	N
V_R	ความเร็วลัพธ์ของลมที่กระทำกับปีก	m/s
V_i	ความเร็วเหนี่ยวนำ	m/s
V_{ia}	ความเร็วเหนี่ยวนำในแนวแกน	m/s
V_{it}	ความเร็วเหนี่ยวนำในแนวรัศมี	m/s
V_0	ความเร็วของใบพัดที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้าในทิศตามแนวแกนเพลา	m/s
x	อัตราส่วนระหว่างระยะรัศมีที่พิจารณาต่อรัศมีที่ปลายใบพัด	-
y	ระยะขจัดในแนวแกน y	mm
α	มุมปะทะ	degree
α_i	มุมเหนี่ยวนำ	degree
β	มุมที่วัดจากระนาบการหมุนจนถึงเส้นแรงยกเป็นศูนย์	degree
ε_T	ค่าผิดพลาดรวม	%
ε_F	ค่าผิดพลาดของอุปกรณ์วัดแรง	%
ε_T	ค่าผิดพลาดของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ	%
Γ	การหมุนวน (Circulation)	m^2/s
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ	kg/m^3
ϕ	มุมที่ความเร็วลัพธ์กระทำกับระนาบการหมุน	degree
Ω	ความเร็วเชิงมุมของใบพัด	rad/s