สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบาญตาราง	ญ
สารบาญภาพประกอบ	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฑ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและความเป็นมาของการวิจัย	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	7
2.1 ภาคตัดปีก	7
2.1.1 อัตราส่วนสนทรรศ	7
2.1.2 สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านของภาคตัดปีก	8
2.1.3 สัมประสิทธิ์แรงยกเทียบกับมุมปะทะ	8
2.1.4 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงต้านเนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงยก	10
2.2 การไหลภายในโรเตอร์	11
2.3 ทฤษฎีเบลดอิลิเมนท์	12
2.4 การสูญเสียที่ปลายปีก	14
2.5 การวิเคราะห์แรงยกบนโรเตอร์ในสภาวะออโต้ไจโร	16
บทที่ 3 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดสำหรับงานวิจัย	18
บทที่ 4 วิธีดำเนินการทดสอบ	30
4.1 การทดสอบแรงยกในแนวแกนเพลาโรเตอร์ของชุดแท่นทดสอบโรเตอร์ออโต้ไจโร	30

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 วิธีคำนวณทางโปรแกรม	38
4.2.1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้าน	38
4.2.2 การคำนวณหาค่าแรงยกออโต้ไจโรบนภาคตัดย่อยๆของปีก	43
4.2.3 การคำนวณหาค่าแรงยกที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ออโต้ไจโร	47
4.2.4 การทำงานของโปรแกรม	51
บทที่ 5 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย	52
5.1 ผลการวิเคราะห์แรงเนื่องจากเพลาและดุมโรเตอร์จากการทดสอบชุดแท่นทดสอบ	52
5.2 ผลการวิเคราะห์สมรรถนะแรงยกที่ได้จากการทดสอบ (Experimental Results, ER) เทียบกับแรงยกที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีเบลดอิลิเมนท์ (BE) และการสูญเสียที่ปลายปีก (TL)	54
5.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงยก (C_T) อัตราส่วนความเร็วที่ปลายปีก (λ) มุมเอียง และมุมพิทช์ (β) จากผลการทดสอบของชุดแท่นทดสอบโรเตอร์ออโต้ไจโร	68
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	74
6.1 สรุปผล	74
6.2 ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	78
ภาคผนวก ก การทดสอบความเร็วลมที่พัดเข้าหาชุดแท่นทดสอบในอุโมงค์ลมแบบเปิดความเร็วต่ำ	78
ภาคผนวก ข ปีกและการตรวจสอบคุณภาพของโรเตอร์	85
ภาคผนวก ค การทดสอบสัญญาณของชุดวัดแรง	91
ภาคผนวก ง คานทดแรงและการทดสอบการทดแรงของคาน	95
ภาคผนวก จ ตารางข้อมูล	104
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลของโปรแกรมและการใช้งาน	109
ประวัติผู้เขียน	141

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แสดงการแปรค่าของความเร็วลม มุมพิทช์ และมุมเอียง สำหรับใช้เก็บข้อมูลในการวิจัย	6
4.1 แสดงสมการการทดแรงของคานในแต่ละมุมเอียง	37
4.2 ตัวอย่างของ α C_l และ C_d ของภาคตัดปีก NACA 0015	41
4.3 ผลลัพธ์ของตัวอย่างการคำนวณทางโปรแกรมด้วยวิธีการประยุกต์การถดถอยแบบเชิงเส้นกับข้อมูลไม่เชิงเส้น (ความสมบูรณ์ใช้ได้ที่ $-8^\circ \leq \alpha \leq +16^\circ$)	41
4.4 ผลลัพธ์ของตัวอย่างการลู่เข้าสู่คำตอบด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน สำหรับ 2 สมการ 2 ตัวแปร	47
4.5 การอินทิกรัลด้วยวิธีซิมป์สัน 1/3 แบบหลายช่วงของตัวอย่างสมการ 2 สมการ	50

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สารบาญภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงแรงที่เกิดขึ้นบนภาคตัดปีกของโรเตอร์	1
1.2	ชุดทดสอบกังหันลมแกนตั้งที่โรเตอร์เป็นแบบหัวลูกศร	3
1.3	แสดงชุดโรเตอร์ออโต้ไจโรของ Wallace	4
1.4	แสดงองค์ประกอบของชุดออโต้ไจโรของ Watts	4
2.1	องค์ประกอบของภาคตัดปีก	7
2.2	แสดงเส้นแนวโน้มสัมประสิทธิ์แรงยกเทียบกับมุมปะทะของ NACA 0015	9
2.3	แสดงตัวแปรของการไหลภายในโรเตอร์ที่ปีกหมุนรับกำลังออกมาจากกระแสลม	11
2.4	แสดงแรงที่กระทำบนเบลดอิลิเมนท์	12
2.5	แสดงลักษณะการทำงานของโรเตอร์ในสภาวะออโต้ไจโร	16
3.1	อุโมงค์ลมความเร็วต่ำที่ใช้ในการทดสอบ	18
3.2	ส่วนประกอบที่สำคัญของชุดแท่นทดสอบโรเตอร์ออโต้ไจโร	19
3.3	แสดงรูปแบบการทำงานร่วมกันของชุดโรเตอร์ออโต้ไจโรและชุดคานทดแรง	20
3.4	แสดงวงจรการทำงานของชุดวัดแรงในชุดคานทดแรง	20
3.5	แสดงองค์ประกอบของชุดโรเตอร์ออโต้ไจโร	21
3.6	แสดงการวัดมุมพิทช์ของปีกโดยใช้ตัวช่วยปรับมุมพิทช์	22
3.7	แสดงหน้าตัดของท่อสำหรับเพลาโรเตอร์	23
3.8	แสดงแผ่นระนาบปรับมุมเอียง	23
3.9	แสดงหน้าตัดไอของคานและลักษณะของคาน	24
3.10	แสดงลักษณะของโหลดเซลล์แบบคาน	25
3.11	เครื่องขยายและรับสัญญาณ WT 95 และ OD 95	25
3.12	น้ำหนักมาตรฐาน	26
3.13	เครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน	27
3.14	เครื่องวัดความเร็วรอบสามารถวัดรอบ (RPM) ได้ตั้งแต่ 5 ถึง 500,000 รอบต่อนาที	27

สารบาญภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.15 เครื่องมือวัดอุณหภูมิใช้ร่วมกับสายเทอร์โมคับเปิลชนิด K 28
3.16 เครื่องวัดความหนามีช่วงการวัด 0 ถึง 0.0254 เมตร และความละเอียด 25.4 ไมครอน 29
3.17 เครื่องวัดความดันบรรยากาศ ซึ่งสามารถแสดงผลได้ถึง 1/1,000 มิลลิเมตรปรอท 29
4.1 แสดงการติดตั้งชุดแท่นทดสอบโรเตอร์ออโต้ไจโรในอุโมงค์ลม 31
4.2 แสดงตัวอย่างการปรับมุมพิทช์ของปีกที่มุมพิทช์ 15 องศา 33
4.3 แสดงสัญญาณของแรงยกขณะทำการทดสอบจากชุดวัดแรงเทียบกับเวลา 34
4.4 แสดงลักษณะของการปรับมุมเอียงของเพลาโรเตอร์ 35
4.5 ตัวอย่างแสดงข้อมูลของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบและการเลือกช่วงข้อมูลเพื่อใช้คำนวณหาค่าแรงยกของโรเตอร์ ความเร็วลม และความเร็วรอบของแต่ละการทดสอบ 36
4.6 แสดงแผนผังการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงด้าน 42
4.7 แสดงแผนผังการคำนวณหาค่าแรงยกบนภาคตัดย่อยๆของปีก 45
4.8 แสดงแผนผังการคำนวณหาค่าแรงยกบนโรเตอร์ออโต้ไจโร 48
4.9 แสดงแผนผังลำดับขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมที่เขียนขึ้น 50
4.10 แสดงแผนผังสรุปขั้นตอนการวิจัย 51
5.1 แสดงเส้นแนวโน้มแรงเนื่องจากเพลาและดุมโรเตอร์ที่ตำแหน่งมุมเอียง 0^0 15^0 30^0 และ 45^0 53
5.2 กราฟเปรียบเทียบแรงจากโรเตอร์และแรงของเพลาและดุมโรเตอร์ จากการทดสอบโดยตั้งมุมพิทช์และมุมเอียงที่ 0 องศา 54
5.3 ภาพประกอบการทดสอบของภาคตัดปีกสมมาตร NACA 0015 ที่มุมเอียงและมุมพิทช์ 0^0 55
5.4 กราฟเปรียบเทียบแรงยกโรเตอร์จากการทดสอบ (ER) กับทฤษฎี BE ที่มุมเอียง 15^0 56
5.5 กราฟเปรียบเทียบแรงยกโรเตอร์จากการทดสอบ (ER) กับทฤษฎี TL ที่มุมเอียง 15^0 57
5.6 แสดงความเร็วสัมพัทธ์ มุมการไหล (ϕ) และมุมปะทะ (α) ที่เกิดขึ้นบนภาคตัดปีก 58
5.7 ผลตัวอย่างของมุมปะทะที่เกิดขึ้นที่มุมพิทช์ 0 2 6 10 และ 15 องศา เมื่อโรเตอร์เอียงทำมุม 15 องศากับแนวแกนตั้งและมีความเร็วลม 7.27 เมตรต่อวินาที พัดเข้าหาโรเตอร์โดยใช้ทฤษฎี BE 59

สารบาญภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.8	กราฟเปรียบเทียบแรงยกโรเตอร์จากการทดสอบ (ER) กับทฤษฎี BE ที่มุมเอียง 30^0	60
5.9	กราฟเปรียบเทียบแรงยกโรเตอร์จากการทดสอบ (ER) กับทฤษฎี TL ที่มุมเอียง 30^0	61
5.10	กราฟเปรียบเทียบแรงยกโรเตอร์จากการทดสอบ (ER) กับทฤษฎี BE ที่มุมเอียง 45^0	62
5.11	กราฟเปรียบเทียบแรงยกโรเตอร์จากการทดสอบ (ER) กับทฤษฎี TL ที่มุมเอียง 45^0	63
5.12	แรงยกตัวในแนวแกนตั้งและแรงต้านในแนวระดับที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์	66
5.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกและมุมพิทช์เทียบกับอัตราส่วนความเร็วที่ปลายปีก ที่มุมเอียง 15^0	69
5.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกและมุมพิทช์เทียบกับอัตราส่วนความเร็วที่ปลายปีก ที่มุมเอียง 30^0	70
5.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกและมุมพิทช์เทียบกับอัตราส่วนความเร็วที่ปลายปีก ที่มุมเอียง 45^0	71
5.16	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกเทียบกับอัตราส่วนความเร็วที่ปลายปีก ของมุมเอียง 15^0 30^0 และ 45^0	73

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่จานถ่ายแรง	m^2
AR	อัตราส่วนสนทรรศ	
a	แฟคเตอร์ของการไหลภายในแนวแกน	
a_0, a_1	ค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าของสมการเส้นตรงที่สร้างด้วยวิธีการประยุกต์การถดถอยแบบเชิงเส้นกับข้อมูลไม่เชิงเส้น	
a'	ค่าแฟคเตอร์ของการไหลภายในแนวแกนที่ลู่เข้าสู่คำตอบของกระบวนการวนซ้ำ	
B	จำนวนใบพัดหรือปีกหมุน	ใบ
b	แฟคเตอร์ของการไหลภายในระนาบการหมุนของโรเตอร์	
b'	ค่าแฟคเตอร์ของการไหลภายในระนาบการหมุนที่ลู่เข้าสู่คำตอบของกระบวนการวนซ้ำ	
C_D, C_d	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	
C_{D_V}	สัมประสิทธิ์แรงต้านเหนี่ยวนำ	
C_{D0}, C_{d0}	สัมประสิทธิ์แรงต้านเมื่อแรงยกเป็นศูนย์หรือไม่เกิดแรงยก	
C_d'	สัมประสิทธิ์แรงต้านจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้านกับสัมประสิทธิ์แรงยก	
$\overline{C_d}$	ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากข้อมูลทั้งหมด	
C_L, C_l	สัมประสิทธิ์แรงยก	
C_l'	สัมประสิทธิ์แรงยกจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะ	
$\overline{C_l}$	ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงยกจากข้อมูลทั้งหมด	
C_T	สัมประสิทธิ์แรงยก	

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$\overline{C_T}$, C_{TRotor}	ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ออโต้ไจโรตลอดระนาบการหมุนของปีกหมุนจากการคำนวณ	
c	ความยาวคอร์ดของปีก	m
$c.dr$	พื้นที่ระนาบการหมุนที่ความหนาวงแหวน dr	m^2
dD	แรงต้านที่กระทำบนภาคตัดย่อยๆของปีก	N
dL	แรงยกที่กระทำบนภาคตัดย่อยๆของปีก	N
dQ	แรงบิดที่กระทำบนภาคตัดย่อยๆของปีก	N.m
dr	ภาคตัดย่อยๆของปีก	m
dT	แรงขับที่กระทำบนภาคตัดย่อยๆของปีกหรือแรงยกของโรเตอร์ในสภาวะออโต้ไจโร	N
E	ค่าความผิดพลาด	
$E_{a/a}$	ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์โดยประมาณของแฟคเตอร์ a	
$E_{a/b}$	ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์โดยประมาณของแฟคเตอร์ b	
F	ค่าคงที่ที่แทนผลกระทบที่เกิดจากปีกที่มีความยาวจำกัด	
F_1	แรงยกที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์	N
F_2	แรงที่กระทำบนโหลดเซลล์หรือแรงจากการทดแรงในหน่วยนิวตัน	N
$F_2^{/}$	แรงที่กระทำบนโหลดเซลล์หรือแรงจากการทดแรงในหน่วยกิโลกรัม	kg
f_a, f_b	ฟังก์ชันสมการสองตัวแปรที่ขึ้นกับแฟคเตอร์การไหลภายใน a และ b	
h_a, h_b	ค่าเปลี่ยนแปลงของตัวแปรแฟคเตอร์การไหลภายใน a และ b ซึ่งลู่เข้าสู่ศูนย์	
I	สมการอินทิกรัลของฟังก์ชัน $f(x)$ ด้วยวิธีซิมป์สัน 1/3 แบบหลายช่วง	
i	ดรรชนีล่างที่แสดงจำนวนข้อมูลใดๆ	
$iter$	ดรรชนีล่างที่แทนการทำซ้ำ	
J	ค่ายาโคเบียน	

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
j	ดรรชนีล่างที่แสดงจำนวนข้อมูลใดๆ	
k	ค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์แรงต้านเนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงยก	
k_1	ค่าความชันระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะของภาคตัดปีกที่เลือกใช้	
k_2	ค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากข้อมูลของสัมประสิทธิ์แรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงยก	
L'	ความยาวปีก	m
n	จำนวนข้อมูล	
$n2$	จำนวนมุมการหมุน	
P	ความดันบรรยากาศเฉลี่ยตลอดการทดสอบ	mm.Hg
$Q_{1,2,3}$	ควอไตล์ที่ 1 2 และ 3	
IRQ	ค่าพิสัยระหว่างควอไตล์	
R	รัศมีปีกหรือความยาวปีกตามแนวรัศมีการกวาดหมุน	m
$R^2_{C_l}$	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะ	
$R^2_{C_d}$	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้านกับสัมประสิทธิ์แรงยก	
r	รัศมีย่อยๆของปีก	m
r_1, r_2	รัศมีดุมโรเตอร์และรัศมีนอกสุดของโรเตอร์	m
T	อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการทดสอบ	$^{\circ}C$
T_x, T_y	แรงที่มีทิศทางในแนวแกนเพลาและขนานกับแนวระดับ	N
$T'_{0,15,30,45}$	แรงเนื่องจากเพลาและดุมโรเตอร์ที่มุมเอียง 0 15 30 และ 45 องศา	N
$\overline{T}$, T_{Rotor}	แรงยกเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ตลอดระนาบการหมุน	N

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$T_{0/15,30,45}$	แรงยกในแนวแกนเพลาที่เกิดขึ้นเมื่อเพลาโรเตอร์ทำมุมเอียง 15 30 และ 45 องศา	N
$T_{0/15x,30x,45x}$	แรงขับเคลื่อนที่ต้องการเมื่อเพลาโรเตอร์ทำมุมเอียง 15 30 และ 45 องศา	N
$T_{0/15y,30y,45y}$	แรงยกตัวที่ต้องการเมื่อเพลาโรเตอร์ทำมุมเอียง 15 30 และ 45 องศา	N
t	ความหนาของภาคตัดปีก	m
v	ความเร็วลมที่พัดเข้าหาชุดแท่นทดสอบโรเตอร์	m/s
v_C	ความเร็วลมที่พัดเข้าหาจานโรเตอร์โดยมีทิศทางขนานกับระนาบการหมุน	m/s
v_S	ความเร็วลมที่พัดเข้าหาจานโรเตอร์ในทิศตั้งฉากกับระนาบการหมุน	m/s
v_{ax}	ความเร็วลมที่เกิดขึ้นในแนวแกนจานโรเตอร์	m/s
v_{rp}	ความเร็วลมที่เกิดขึ้นในระนาบการหมุนของจานโรเตอร์	m/s
$v_{0/15,30,45}$	ความเร็วลมที่ไหลเข้าหาจานโรเตอร์เมื่อเพลาโรเตอร์ทำมุมเอียง 15 30 และ 45 องศา	m/s
W	ความเร็วสัมพัทธ์หรือความเร็วลัพธ์	m/s
X	อัตราส่วนความเร็วในระนาบการหมุนต่อความเร็วที่เข้าระนาบการหมุน	
∂	สัญลักษณ์ที่แทนการหาอนุพันธ์	
α	มุมปะทะของปีก	degree
α_0	ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่มุมปะทะเป็นศูนย์	
β	มุมพิทช์ของปีก	degree
δ	มุมเอียงของเพลาโรเตอร์	degree
ϕ	มุมการไหล	degree
λ	อัตราส่วนความเร็วที่ปลายปีก	
π	ค่าคงที่ 3.1416	
θ	ตำแหน่งเชิงมุมของปีกในระนาบการหมุน	degree
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ	kg/m^3

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
σ	อัตราส่วนของพื้นที่ที่เป็นส่วนของปีกทั้งหมดในวงแหวน *dr* นั้นกับพื้นที่วงแหวนหนา *dr* นั้น	
ω	ความเร็วรอบของโรเตอร์	rpm
ξ	ค่าดงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของปีก	

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University