สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค

กิตติกรรมประกาศ ง

สารบัญ จ

รายการตาราง ช

รายการรูปประกอบ ซ

รายการสัญลักษณ์ ฎ

ประมวลศัพท์และคำย่อ ฐ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ที่มาของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 2

1.3 ขอบเขต 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเฮลิคอปเตอร์ 3

2.2 หลักการบินเคลื่อนที่ของเฮลิคอปเตอร์ 7

2.3 สมการจลศาสตร์ของเฮลิคอปเตอร์ 9

2.4 หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ 12

2.5 ผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง 19

3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและวิธีการทดลอง 22

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 22

3.2 การทดลองการควบคุมการเอียงตัวของเฮลิคอปเตอร์ขณะมีลมปะทะ 25

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล 34

4.1 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 1: การปรับแต่งตัวควบคุมในสภาวะที่ไม่มีลมปะทะ 34

4.2 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 2: การทดสอบนำตัวควบคุมที่ปรับแต่งในสภาวะที่ไม่มีลมปะทะมาใช้ในสภาวะที่มีลมมาปะทะ 35
4.3 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 3: การปรับแต่งตัวควบคุมในสภาวะที่มีลมปะทะ 36
4.4 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 4: การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD กับความเร็วและทิศทางลมปะทะ 39
4.5 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5: การทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ 40

5. **บทสรุปและข้อเสนอแนะ** **58**
5.1 บทสรุป 58
5.2 การทดสอบเพิ่มเติม 61
5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อ 65

เอกสารอ้างอิง **66**

ภาคผนวก **68**
ก คู่มือการใช้งานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 68
ข รายละเอียดคุณสมบัติการใช้งานต่างๆของเซ็นเซอร์ 72
ค แท่นทดสอบการเอียงตัว 75
ง ผลการทดสอบเทียบกับสัญญาณพัลส์ 93

ประวัติผู้วิจัย **103**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	ข้อมูลพื้นฐานของเฮลิคอปเตอร์	22
4.1	สรุปค่าอัตราขยายการควบคุมและค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยในสภาวะที่ไม่มีลมปะทะ	35
4.2	สรุปค่าอัตราขยายการควบคุมและค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยในสภาวะที่มีลมปะทะต่อเนื่อง	39
4.3	สรุปค่าอัตราขยายการควบคุมและค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยกรณีสภาวะที่มีลมปะทะ 2, 3 และ 4 m/s ใน 4 ทิศทางหลัก	45
4.4	สรุปค่าอัตราขยายการควบคุมและค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยกรณีสภาวะที่มีลมปะทะ 2.5 และ 3.5 m/s ใน 4 ทิศทางหลัก	49
4.5	สรุปค่าอัตราขยายการควบคุมและค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยกรณีสภาวะที่มีลมปะทะ 2.5 และ 3.5 m/s ใน 4 ทิศทางย่อย	57
5.1	สรุปค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยของมุมโรล	59
5.2	สรุปค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยของมุมพิทช์	60
5.3	สรุปค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยในสภาวะมีลมปะทะเทียบกับค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยในสภาวะไม่มีลมปะทะ	60
5.4	สรุปค่าอัตราขยายการควบคุมและค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยในสภาวะที่ไม่มีลมปะทะและสภาวะที่มีลมปะทะต่อเนื่อง	61

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	แสดงระบบการบังคับพื้นฐานของใบพัดหลัก	3
2.2	แสดง Swash-Plate of Collective pitch and Cyclic stick control ของใบพัดหลัก	4
2.3	แสดงการใช้ใบพัดหางสร้างแรงบิดต้านโมเมนต์ ที่เกิดจากการหมุนของใบพัดหลัก	5
2.4	แสดงการพิจารณาแรงยกของใบพัดแต่ละใบ	6
2.5	แสดงความเร็วสัมพัทธ์ของอากาศที่ปะทะกับใบพัด	6
2.6	แสดงความเร็วสัมพัทธ์ของอากาศที่ปะทะกับใบพัดเมื่อมีลมจากภายนอก	7
2.7	การเอียงของใบพัดหลัก ทำให้เฮลิคอปเตอร์เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ	8
2.8	แรงที่ใบพัดหลักสร้างแรงยก เท่ากับน้ำหนักของตัวเฮลิคอปเตอร์	8
2.9	แกนและตัวแปรต่างๆ ของเฮลิคอปเตอร์	9
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและมุมเอียงในแกนลำตัวของเฮลิคอปเตอร์	10
2.11	ระนาบ a - Frame และการหมุนมุมยอว์ (Yaw ψ) โดยแกน z_0 พุ่งออกจากกระดาษ	11
2.12	ระนาบ b - Frame และการหมุนมุมพิทช์ (Pitch θ) โดยแกน y_1 พุ่งออกจากกระดาษ	11
2.13	ระนาบ c - Frame และการหมุนมุมโรล (Roll ϕ) โดยแกน x_b พุ่งออกจากกระดาษ	11
2.14	สัญญาณอินพุต-เอาต์พุตของการควบคุมเชิงสัดส่วน	12
2.15	บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ P-Control	13
2.16	สัญญาณอินพุต-เอาต์พุตของการควบคุมแบบอินทิกรัล	13
2.17	บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ I-Control	14
2.18	สัญญาณอินพุต-เอาต์พุตของการควบคุมแบบอนุพันธ์	14
2.19	บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ D-Control	14
2.20	บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ PD-Control	15
2.21	บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ PI-Control	16
2.22	บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ PID-Control	17
2.23	การตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบควบคุม	18
3.1	เฮลิคอปเตอร์ที่ใช้ในการทสอบ	22
3.2	เฮลิคอปเตอร์ที่ติดตั้งบนแท่นทดสอบ	23
3.3	เซ็นเซอร์ รุ่น 3DM-GX1	23
3.4	ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC รุ่น 18F4431	24
3.5	Pin diagram ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC รุ่น 18F4431	24

3.6	อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบ	25
3.7	การทดสอบภายในอุโมงค์ลม	26
3.8	แผนผังการควบคุมการเอียงตัวของเฮลิคอปเตอร์ด้วยการควบคุมแบบ PD	26
3.9	ทิศทางลมปะทะในการทดสอบนำตัวควบคุมที่ปรับแต่งในสภาวะที่ไม่มีลมปะทะมาใช้ในสภาวะที่มีลมปะทะ	27
3.10	แผนผังการทำงานการควบคุมการเอียงตัวอัตโนมัติด้วยการควบคุมแบบ PD	28
3.11	ทิศทางลมปะทะในการทดสอบในสภาวะที่มีลมปะทะอย่างต่อเนื่อง	29
3.12	แผนผังการทำงานการควบคุมการเอียงตัวอัตโนมัติด้วยการควบคุมแบบ PD ในกรณีที่ใช้การคำนวณหาค่าอัตราขยายของการควบคุม	30
3.13	ทิศทางลมปะทะในการทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ(ขั้นตอนที่5.1)	31
3.14	ทิศทางลมปะทะในการทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ(ขั้นตอนที่5.2)	32
3.15	ทิศทางลมปะทะในการทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ(ขั้นตอนที่5.3)	33
4.1	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 1 การควบคุมมุมเอียงตัวในสภาวะไม่มีลมปะทะ	34
4.2	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 2 กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านหน้า	35
4.3	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 2 กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านซ้าย	36
4.4	ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านหน้าด้วยความเร็วลม 2 m/s	37
4.5	ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายด้วยความเร็วลม 2 m/s	37
4.6	ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านหน้าด้วยความเร็วลม 3 m/s	37
4.7	ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายด้วยความเร็วลม 3 m/s	38
4.8	ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านหน้าด้วยความเร็วลม 4 m/s	38
4.9	ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายด้วยความเร็วลม 4 m/s	38
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_p ของมุมโรลกับความเร็วลมในการทดสอบ	40
4.11	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านหน้า	41
4.12	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านซ้าย	42
4.13	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านหลัง	43

4.14	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านขวา	44
4.15	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านหน้า	46
4.16	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านซ้าย	47
4.17	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านหลัง	47
4.18	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านขวา	48
4.19	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านซ้ายที่มุมยอร์ -45 deg	51
4.20	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านซ้ายที่มุมยอร์ -135 deg	53
4.21	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านขวาที่มุมยอร์ 135 deg	54
4.22	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านขวาที่มุมยอร์ 45 deg	56
5.1	ทิศทางลมปะทะในการทดสอบในสภาวะที่มีลมปะทะอย่างต่อเนื่อง	62
5.2	ผลการทดสอบเพิ่มเติมกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านหน้าด้วยความเร็วลม 2 m/s	63
5.3	ผลการทดสอบเพิ่มเติมกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านหน้าด้วยความเร็วลม 3 m/s	63
5.4	ผลการทดสอบเพิ่มเติมกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านหน้าด้วยความเร็วลม 4 m/s	63
5.5	ผลการทดสอบเพิ่มเติมกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายด้วยความเร็วลม 2 m/s	64
5.6	ผลการทดสอบเพิ่มเติมกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายด้วยความเร็วลม 3 m/s	64
5.7	ผลการทดสอบเพิ่มเติมกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายด้วยความเร็วลม 4 m/s	65
ง.1	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 1 การควบคุมมุมเอียงตัวในสภาวะไม่มีลมปะทะ	94
ง.2	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 2 กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านหน้า	95
ง.3	ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 2 กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านซ้าย	96
ง.4	ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านหน้าด้วยความเร็วลม 2 m/s	97
ง.5	ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายด้วยความเร็วลม 2 m/s	98
ง.6	ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านหน้าด้วยความเร็วลม 3 m/s	99
ง.7	ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายด้วยความเร็วลม 3 m/s	100

ง.8 ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านหน้าด้วยความเร็วลม 4 m/s 101
ง.9 ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายด้วยความเร็วลม 4 m/s 102

รายการสัญลักษณ์

$C(s)$	=	ค่าเอาต์พุตที่วัดได้จากเซ็นเซอร์
$E(s)$	=	ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น $= R(s) - C(s)$
e_{ss}	=	ค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว
$e(t)$	=	ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น
K_p	=	ค่าอัตราขยายที่กำหนดการทำงานของเอาต์พุตให้เป็นสัดส่วนกับค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ
K_i	=	ค่าอัตราขยายที่กำหนดการทำงานของเอาต์พุตให้อยู่ในสภาวะอยู่ตัวของระบบซึ่งมีผลทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวมีค่าเป็นศูนย์
K_d	=	ค่าอัตราขยายที่กำหนดการทำงานของเอาต์พุตของระบบที่มีการเปลี่ยนเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดเพื่อหน่วงให้ผลตอบสนองช้าลง
L, M, N	=	โมเมนต์ทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Moment) ในแกน x y และ z
m	=	มวลของอากาศยาน
p, q, r	=	ความเร็วเชิงมุมรอบแกน x y และ z ตามลำดับ (Roll Pitch And Yaw Rate)
$R(s)$	=	ค่าอินพุตที่ต้องการให้ระบบทำงาน
$U(s)$	=	อินพุตที่ป้อนให้กับระบบ
$u(t)$	=	อินพุตที่ป้อนให้กับระบบ
u, v, w	=	ความเร็วเชิงเส้นในแกน x y และ z ตามลำดับ
X, Y, Z	=	แรงทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Force) ในแกน x y และ z ตามลำดับ
x, y, z	=	แกน x y และ z ของเฮลิคอปเตอร์ ตามลำดับ
ϕ, θ, ψ	=	มุม Roll มุม Pitch และมุม Yaw

ประมวลศัพท์และคำย่อ

AHRS	=	Attitude Heading Reference System
CG	=	Center of Gravity
deg	=	degree [Unit]
DOF	=	Degree of Freedom
FGS	=	Fuzzy Gain Scheduling
LQG	=	Linear Quadratic Gaussian
MCU	=	Micro Controller Unit
MFC	=	Mamdani Fuzzy Controller
PD	=	Proportional Derivative
PWM	=	Pulse Width Modulation
RS232	=	Received Standard 232
sec	=	Second [Unit]
USART	=	Universal Asynchronous Receiver Transmitter