

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะนำผลการทดสอบทั้งหมดมาแสดงในรูปแบบกราฟ ซึ่งแสดงผลตอบสนองของมุมเอียงตัวที่ศึกษาคือมุมโรลและมุมพิทช์เทียบกับเวลา แล้วใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวซึ่งแสดงในสมการที่ (4.1) และ (4.2) เป็นตัวประเมินความสามารถในการควบคุมที่นำเสนอเพื่อลดผลกระทบของลมปะทะที่มีต่อการใช้การควบคุมมุมเอียงตัวแบบ PD ของเฮลิคอปเตอร์ขนาดเล็กในการวิจัยนี้

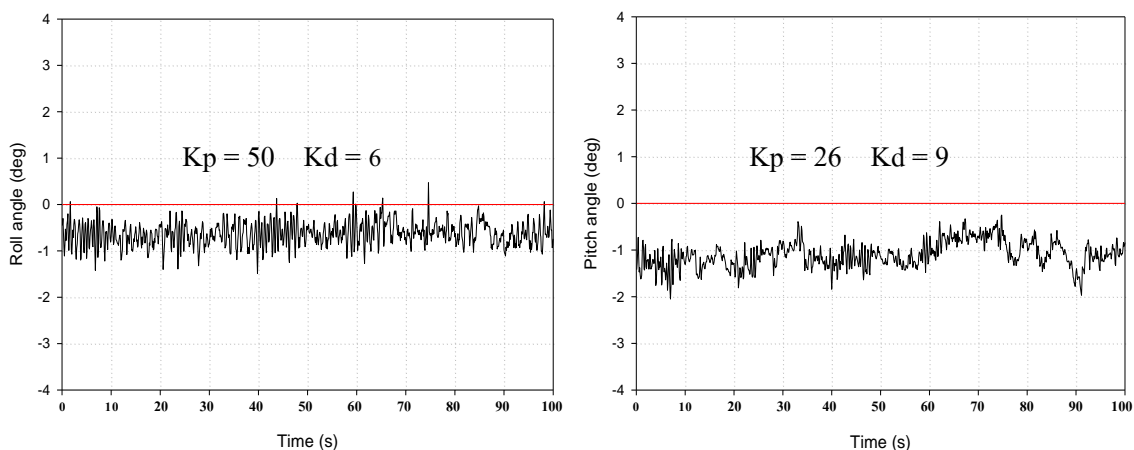
$$\text{ค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว} = \text{มุมโรลที่กำหนด} - \text{มุมโรลในสภาวะอยู่ตัว} \quad (4.1)$$

$$\text{ค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว} = \text{มุมพิทช์ที่กำหนด} - \text{มุมพิทช์ในสภาวะอยู่ตัว} \quad (4.2)$$

4.1 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 1 : การปรับแต่งตัวควบคุมในสภาวะที่ไม่มีลมปะทะ

การทดสอบขั้นตอนแรกนี้เพื่อปรับแต่งค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ของมุมโรลและมุมพิทช์ในสภาวะที่ไม่มีลมปะทะ โดยติดตั้งเฮลิคอปเตอร์บนแท่นทดสอบ แล้วปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายจนผลตอบสนองมีลักษณะที่ยอมรับได้ตามที่กำหนดไว้ คือ ไม่มีการพุ่งเกิน (overshoot) เกิดขึ้น และค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวอยู่ในช่วง ± 2 deg

ผลการปรับแต่งตัวควบคุมแบบ PD ในสภาวะที่ไม่มีลมปะทะ ได้ผลตอบสนองของมุมโรลและมุมพิทช์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 การควบคุมแบบ PD ที่ปรับแต่งในสภาวะไม่มีลมในขั้นตอนนี้ สามารถรักษามุมเอียงตัวของเฮลิคอปเตอร์ในสภาวะไม่มีลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งค่าอัตราขยายการควบคุมที่ได้จากการทดสอบในขั้นตอนนี้จะต่างจากค่าที่ได้จากการทดสอบในส่วนของงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ ซึ่งเกิดจากการยึดแกนใดแกนหนึ่งในระหว่างการทดสอบทำให้ผลตอบสนองที่ได้นั้นเกิดความคลาดเคลื่อน โดยมีค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน (K_p) ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (K_d) และค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ย (avg. error) ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 1 การควบคุมมุมเอียงตัวในสภาวะที่ไม่มีลมปะทะ

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าอัตราขยายการควบคุมและค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเฉลี่ยในสถานะที่ไม่มีลมปะทะ

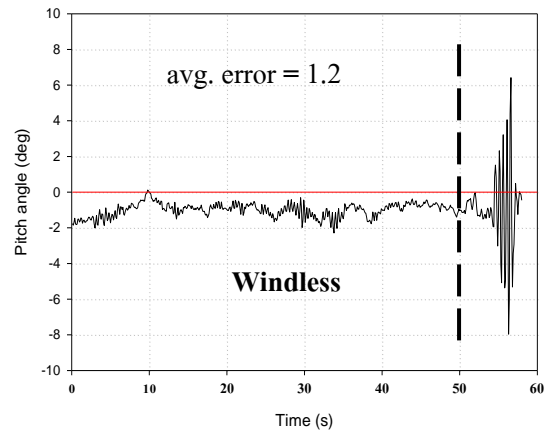
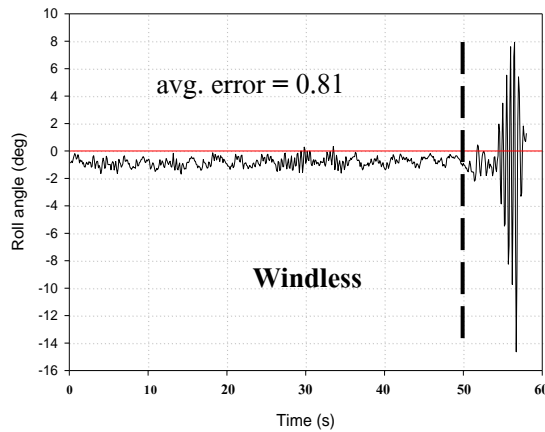
สถานะไม่มีลมปะทะ (ความเร็วลม 0 m/s)	K_p	K_d	avg. error (deg)
การควบคุมมุมโรล	50	6	0.76
การควบคุมมุมพิทช์	26	9	1.23

4.2 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 2 : การทดสอบนำตัวควบคุมที่ปรับแต่งในสถานะที่ไม่มีลมปะทะมาใช้ในสถานะที่มีลมปะทะ

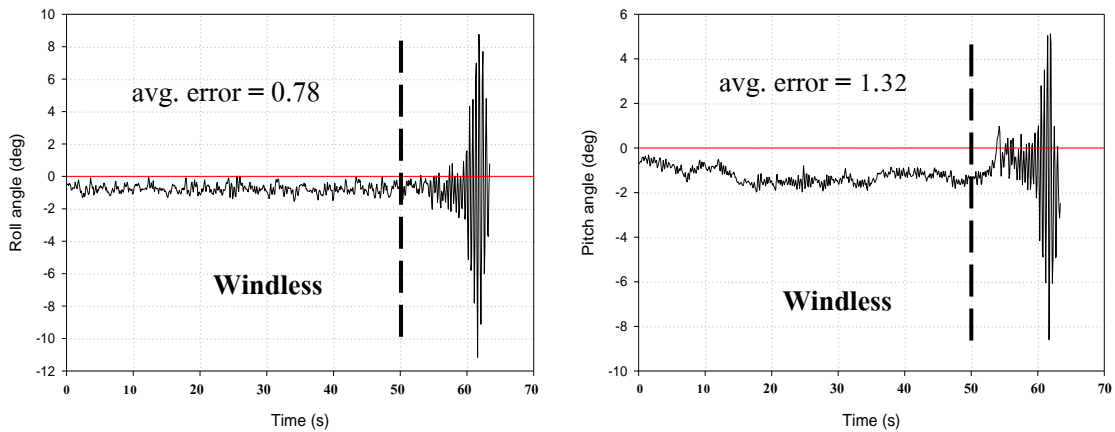
การทดสอบขั้นตอนนี้เริ่มจากช่วงแรกเป็นสถานะที่ไม่มีลมปะทะ จากนั้นเมื่อเวลา 50 วินาทีจะเปิดให้ลมเข้าปะทะเฮลิคอปเตอร์ โดยกรณีการทดสอบทำ 2 กรณี คือ

- ลมปะทะมีความเร็ว 2 m/s ทิศทางจากทางด้านหน้า ที่มุมขอว์ 0 deg ของเฮลิคอปเตอร์ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.2

- ลมปะทะมีความเร็ว 2 m/s ทิศทางจากทางด้านซ้าย ที่มุมขอว์ -90 deg ของเฮลิคอปเตอร์ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 2 กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านหน้า



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 2 กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านซ้าย

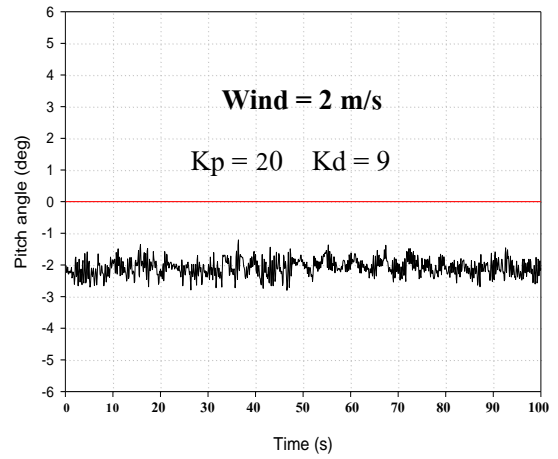
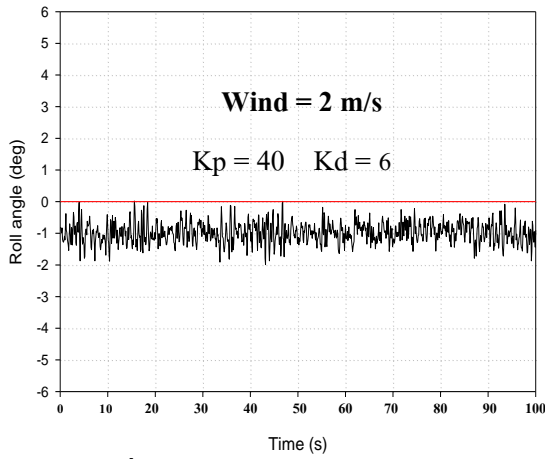
จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นผลการควบคุมเมื่อนำตัวควบคุมแบบ PD ที่ปรับแต่งในสภาวะที่ไม่มีลมมาใช้ในสภาวะที่มีลม ในช่วงแรกที่ยังไม่มีลมปะทะจะสามารถควบคุมมุมเอียงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่ปรับแต่งไว้ แต่เมื่อมีลมปะทะทั้งกรณีที่มีลมเข้าปะทะทางด้านหน้าและกรณีที่มีลมเข้าปะทะทางด้านซ้ายของเฮลิคอปเตอร์ เฮลิคอปเตอร์จะเกิดการแกว่งอย่างรุนแรงจนเสียการทรงตัวสาเหตุที่เป็นไปได้คือการใช้ค่า K_p ที่สูงซึ่งมีผลดีในการทำให้ค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวต่ำในสภาวะที่ไม่มีลม แต่เมื่อมีลมปะทะแล้วการควบคุมด้วย K_p ที่มีค่าสูงจะพยายามปรับแก้การเอียงตัวที่เกิดจากลมปะทะอย่างรวดเร็วด้วยการสั่งงานให้เอียง swash-plate เป็นมุมมากๆ และเปลี่ยนค่าไปมา จนเป็นผลทำให้เฮลิคอปเตอร์เกิดการสั่นไปมาอย่างรุนแรงจนเสียการทรงตัวในที่สุด โดยมีแอมพลิจูดของการสั่นของมุมโรลอยู่ที่ประมาณ $\pm 8 \text{ deg}$ และแอมพลิจูดของการสั่นของมุมพิทช์อยู่ที่ประมาณ $\pm 6 \text{ deg}$

4.3 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 3 : การปรับแต่งตัวควบคุมในสภาวะที่มีลมปะทะ

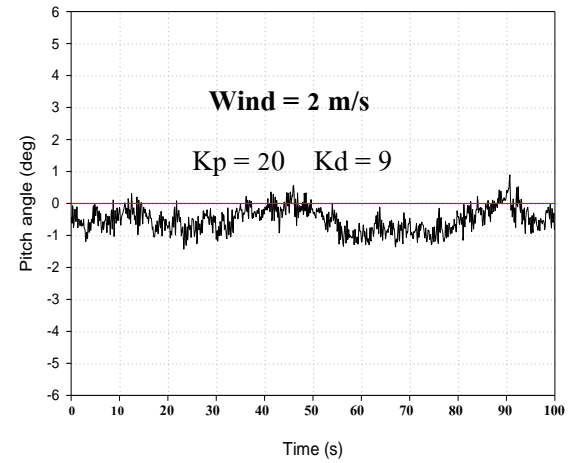
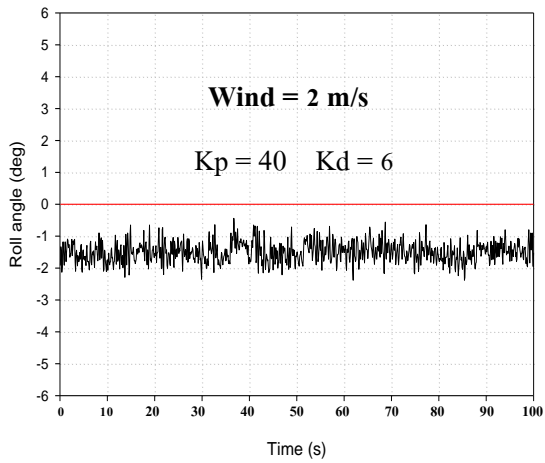
เนื่องจากตัวควบคุมแบบ PD ที่ปรับค่าอัตราขยายให้สามารถควบคุมการเอียงตัวได้อย่างเหมาะสมแล้วในสภาวะที่ไม่มีลมปะทะนั้น ไม่สามารถควบคุมการเอียงตัวได้เมื่อมีลมเข้ามาปะทะ ดังนั้นการทดสอบต่อมาจึงได้ทำการปรับแต่งค่าอัตราขยายในสภาวะที่มีลมปะทะตลอดเวลา เพื่อศึกษาความแตกต่างของค่าอัตราขยายที่สามารถควบคุมการเอียงตัวของเฮลิคอปเตอร์ได้อย่างเหมาะสมในสภาวะที่มีลมเข้ามาปะทะตลอดเวลา เปรียบเทียบกับค่าอัตราขยายที่เหมาะสมในสภาวะที่ไม่มีลมปะทะ โดยในขั้นตอนนี้ได้ทำการปรับแต่งค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ใหม่ในกรณีการทดสอบดังนี้

- ความเร็วลมปะทะ 2, 3 และ 4 m/s
- ทิศทางลมปะทะจากทางด้านหน้า ที่มุมยอร์ 0 deg ของเฮลิคอปเตอร์ และลมปะทะจากทางด้านซ้าย ที่มุมยอร์ -90 deg ของเฮลิคอปเตอร์

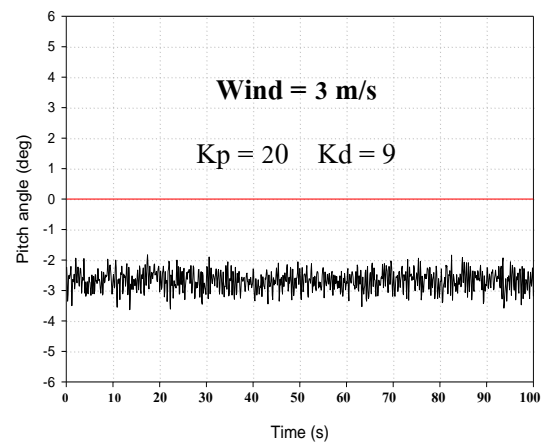
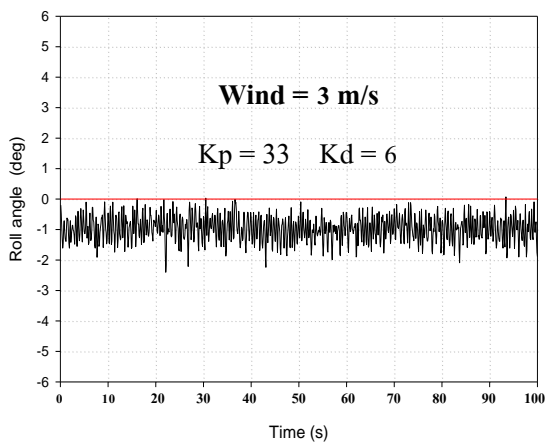
ผลการปรับแต่งได้ผลตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 4.4 – 4.9 และค่าอัตราขยายของตัวควบคุมและค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 4.2



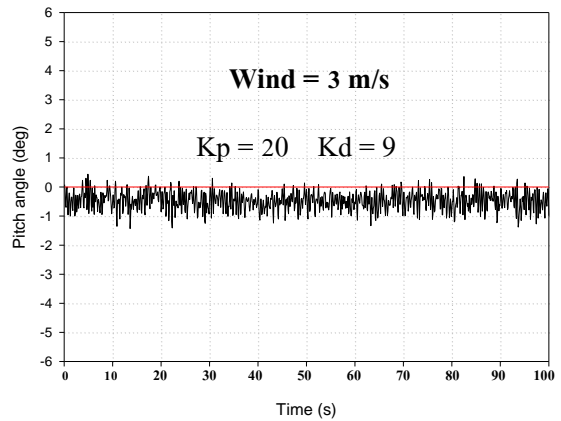
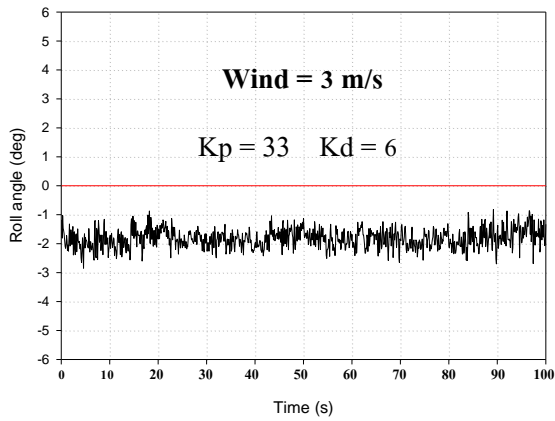
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านหน้าด้วยความเร็วลม 2 m/s



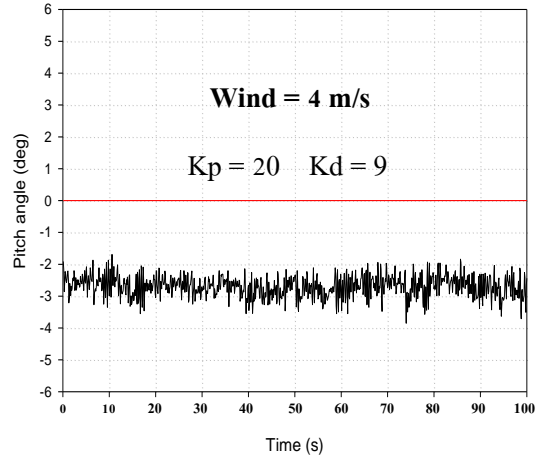
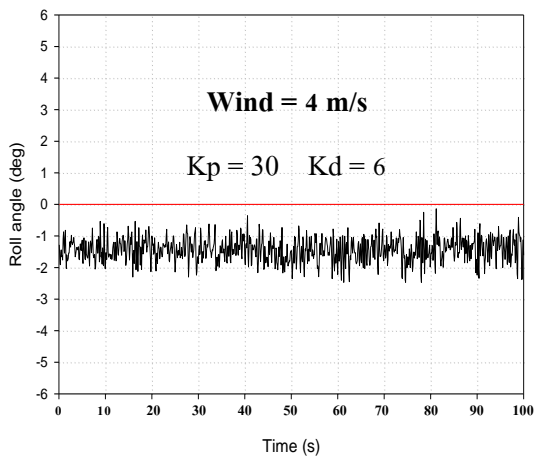
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายด้วยความเร็วลม 2 m/s



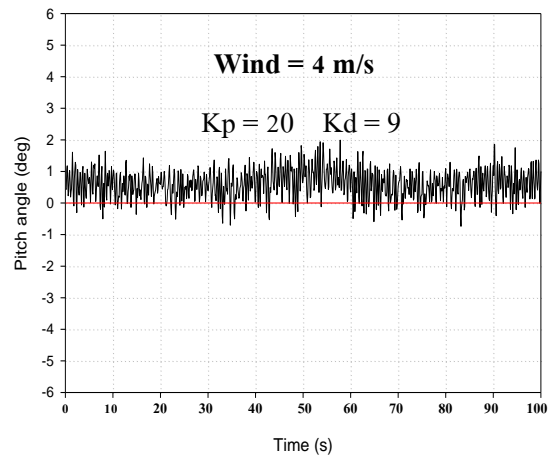
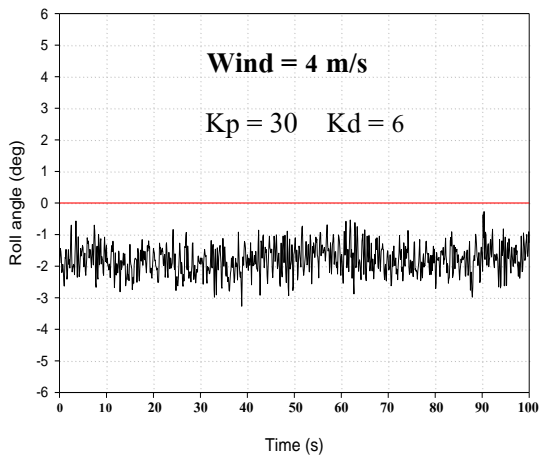
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านหน้าด้วยความเร็วลม 3 m/s



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายด้วยความเร็วลม 3 m/s



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านหน้าด้วยความเร็วลม 4 m/s



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบกรณีที่มีลมปะทะต่อเนื่องจากทางด้านซ้ายด้วยความเร็วลม 4 m/s

ตารางที่ 4.2 สรุปค่าอัตราขยายการควบคุมและค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยในสภาวะที่มีลมปะทะต่อเนื่อง

ลมปะทะ		การควบคุมมุมโรล			การควบคุมมุมพิทช์		
ความเร็ว (m/s)	ทิศทาง (deg)	K_p	K_d	avg. error (deg)	K_p	K_d	avg. error (deg)
2	0	40	6	1.10	20	9	2.28
3		33	6	0.97	20	9	2.7
4		30	6	1.44	20	9	2.69
2	-90	40	6	1.5	20	9	0.51
3		33	6	1.82	20	9	0.47
4		30	6	1.79	20	9	-0.59

4.4 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 4 : การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD กับความเร็วและทิศทางลมปะทะ

จากผลการทดสอบปรับแต่งค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ของมุมโรลและมุมพิทช์ในสภาวะที่มีลมปะทะในขั้นตอนที่แล้วดังสรุปในตารางที่ 4.2 พบว่า

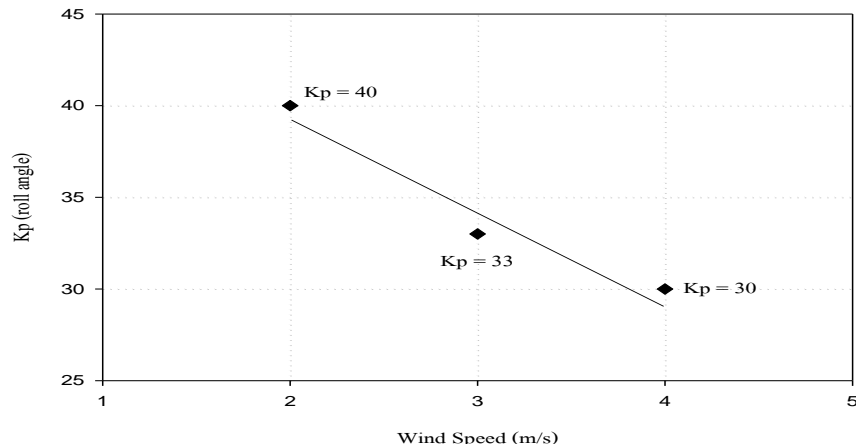
- การควบคุมมุมโรล ค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบสัดส่วน (K_p) ของมุมโรลที่เหมาะสมมีการเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของความเร็วลมปะทะ โดยไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางของลมปะทะ ส่วนค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (K_d) ของมุมโรลที่เหมาะสม ไม่ขึ้นกับทั้งความเร็วและทิศทางของลมปะทะ
- การควบคุมมุมพิทช์ ทั้งค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบสัดส่วน (K_p) และค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (K_d) ของมุมพิทช์ที่เหมาะสม ไม่ขึ้นกับทั้งความเร็วและทิศทางของลมปะทะ

การทดสอบในขั้นตอนนี้จึงนำค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบสัดส่วน (K_p) ของมุมโรลที่เหมาะสมมาหาความสัมพันธ์กับค่าความเร็วของลมปะทะ ได้ผลเป็นดังสมการที่ (4.3) และแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.10

$$K_{p_{roll}} = -5V_{wind} + 49.333 \quad (4.3)$$

โดยที่ V_{wind} คือ ขนาดของความเร็วลม, m/s

$K_{p_{roll}}$ คือ ค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบสัดส่วน (K_p) ของมุมโรล



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_p ของมุมโรลกับความเร็วลมในการทดสอบ

4.5 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5 : การทดสอบปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสถานะลมปะทะ

การทดสอบขั้นตอนนี้เพื่อตรวจสอบผลการแก้ไขการควบคุมการเอียงตัวของเฮลิคอปเตอร์ด้วยการควบคุมแบบ PD ในสถานะที่มีลมปะทะ โดยการใช้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ PD ของมุมโรล และมุมพิทช์จากสมการที่ 4.3 ซึ่งปรับเปลี่ยนค่าไปตามความเร็วและทิศทางของลมปะทะ โดยที่

การควบคุมมุมโรล

- ค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบสัดส่วน (K_p) เปลี่ยนไปตามค่าความเร็วของลมปะทะ ในขณะนั้น ดังสมการที่ 4.3
- ค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (K_d) เปลี่ยนระหว่าง 2 ค่า คือ ค่าในสถานะที่ไม่มีลมปะทะ กับค่าในสถานะที่มีลมปะทะ

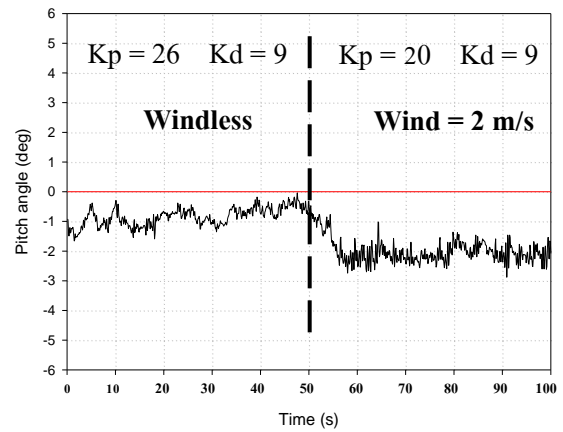
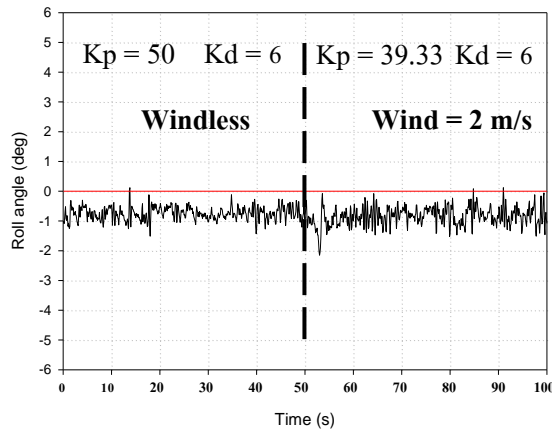
การควบคุมมุมพิทช์

- ทั้งค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบสัดส่วน (K_p) และค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (K_d) เปลี่ยนระหว่าง 2 ค่า คือ ค่าในสถานะที่ไม่มีลมปะทะ กับค่าในสถานะที่มีลมปะทะ

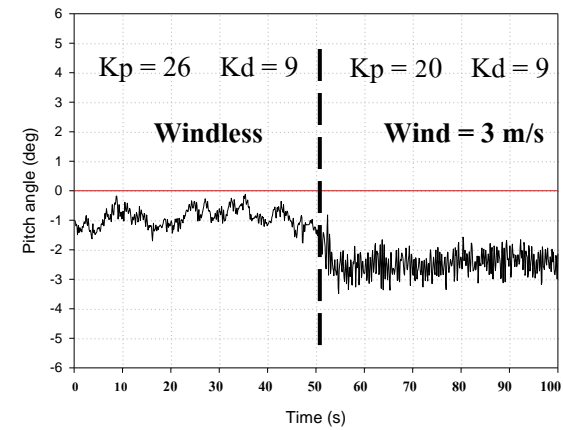
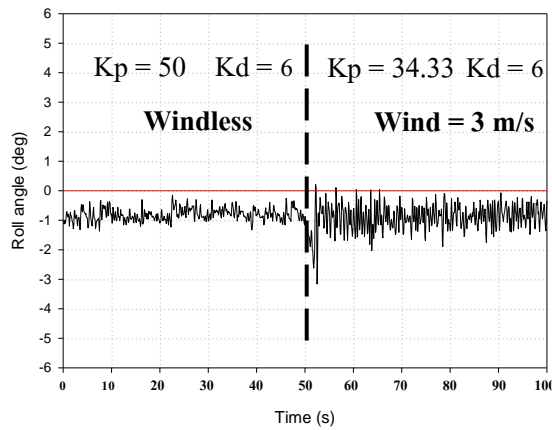
4.5.1 ผลการทดสอบย่อย 5.1 : การทดสอบด้วยความเร็วและทิศทางของลมปะทะเหมือนกับที่ทำการปรับแต่งการควบคุม

ผลการทดสอบเมื่อมีลมเข้าปะทะด้วยความเร็ว 2, 3 และ 4 m/s ในทิศทาง 4 ทิศทางหลัก การปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามความเร็วและทิศทางของลมปะทะที่นำเสนอสามารถควบคุมมุมเอียงตัวของเฮลิคอปเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่สูญเสียการทรงตัวเมื่อมีลมเข้ามาปะทะ

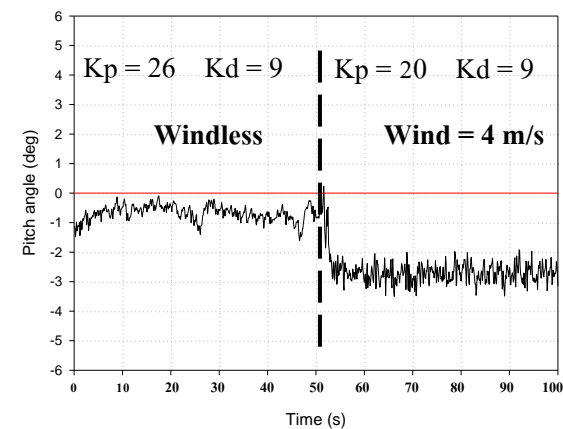
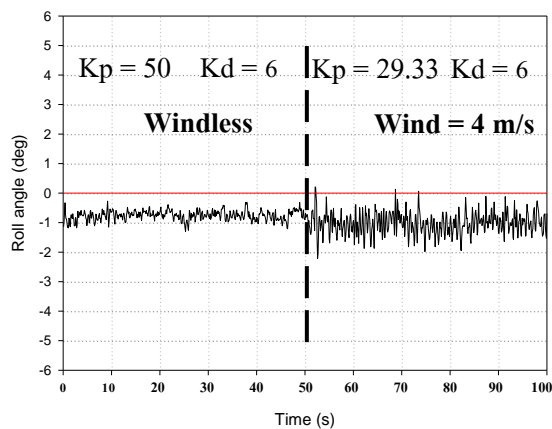
ผลตอบสนองของมุมโรลและมุมพิทช์แต่ละกรณีการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.11 – 4.14 และค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเฉลี่ยแสดงสรุปในตารางที่ 4.3



(4.11-ก) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2 m/s

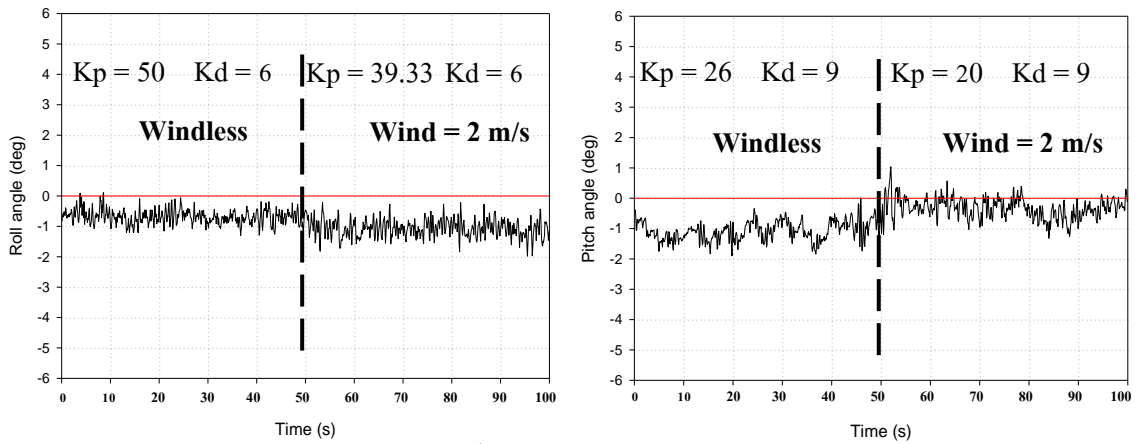


(4.11-ข) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3 m/s

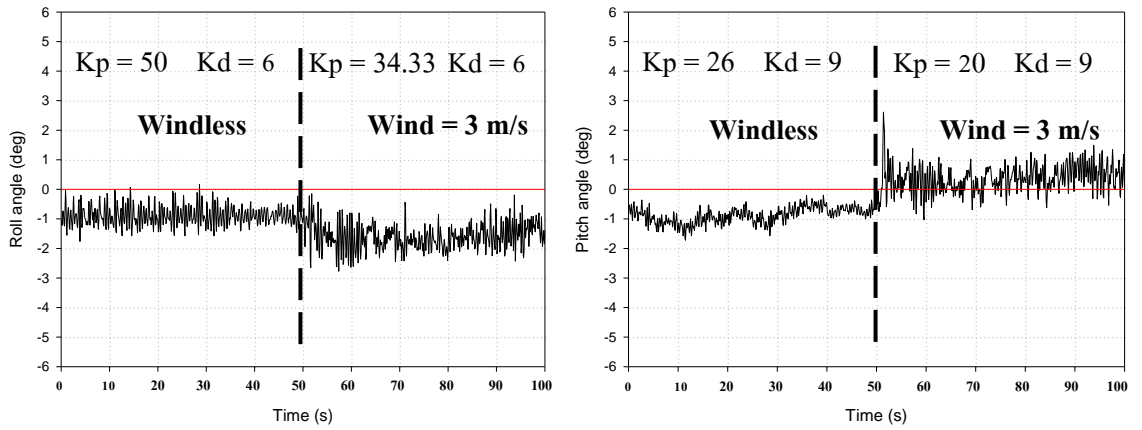


(4.11-ค) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 4 m/s

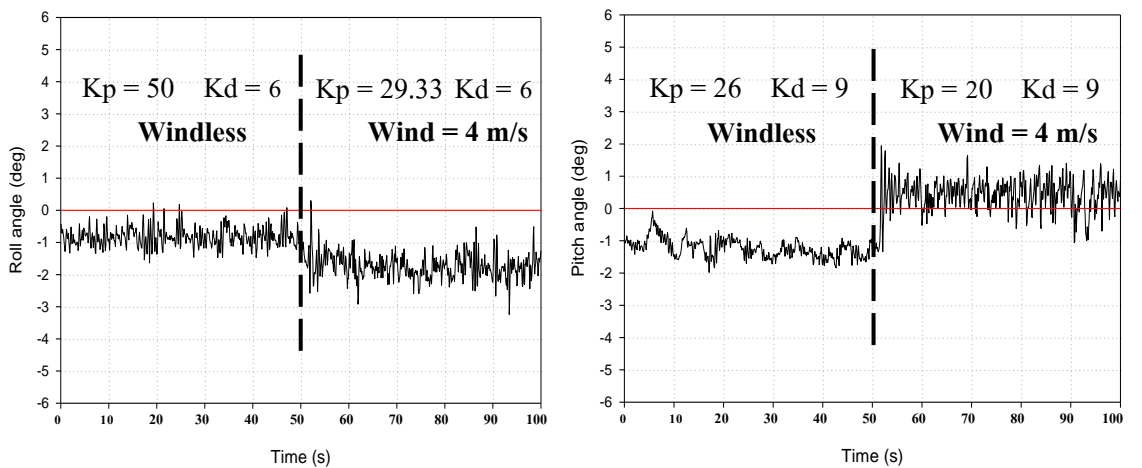
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 เปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านหน้า



(4.12-ก) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2 m/s

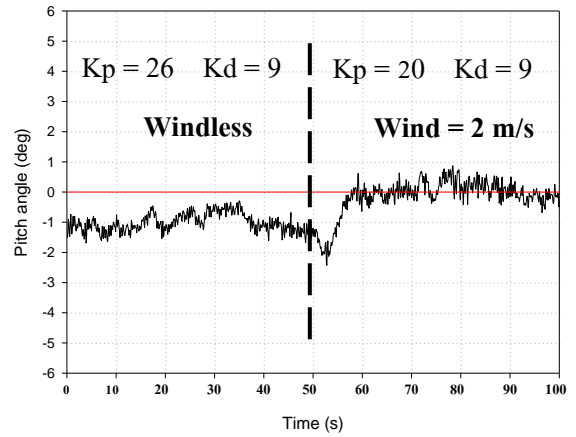
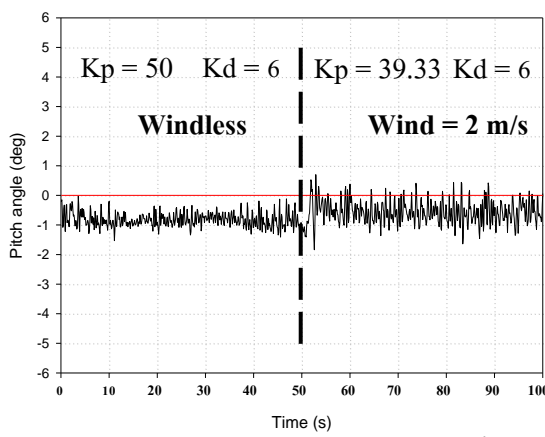


(4.12-ข) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3 m/s

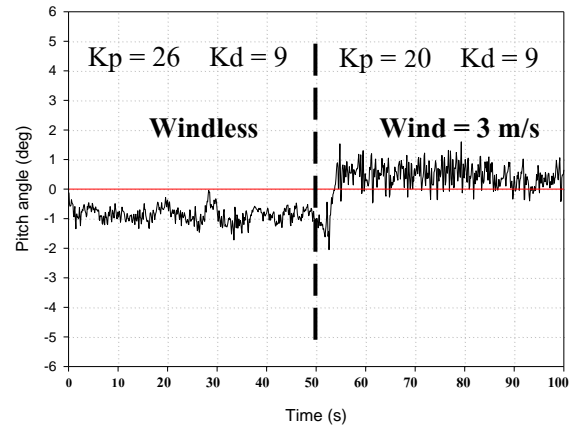
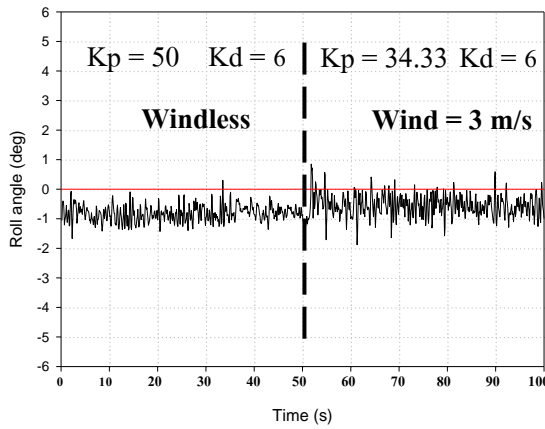


(4.12-ค) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 4 m/s

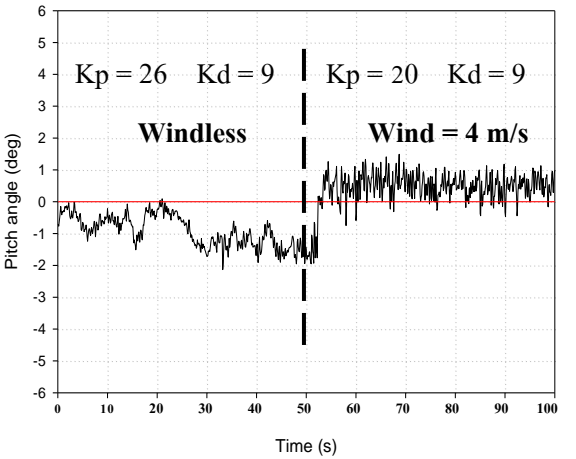
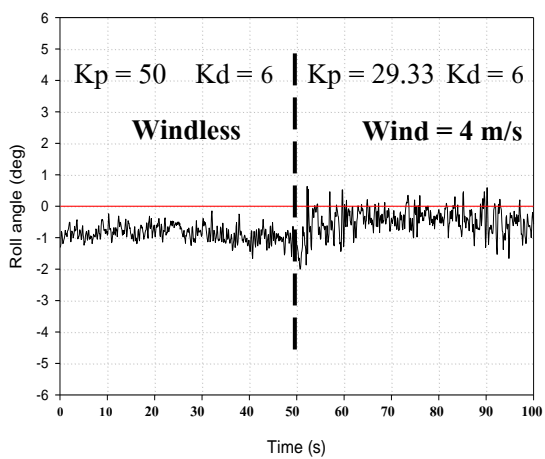
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 เปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านซ้าย



(4.13-ก) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2 m/s

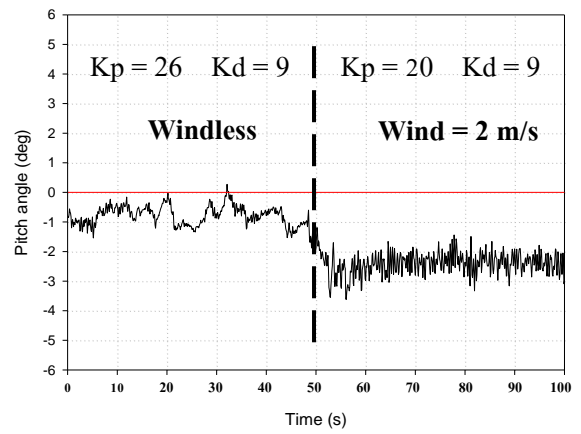
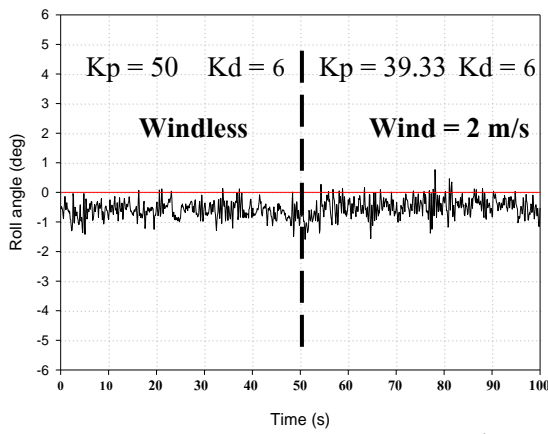


(4.13-ข) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3 m/s

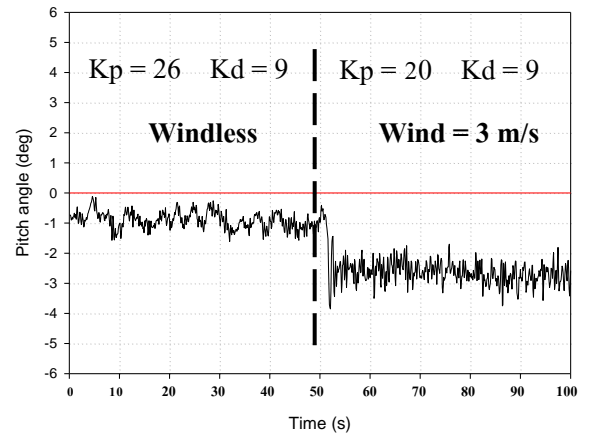
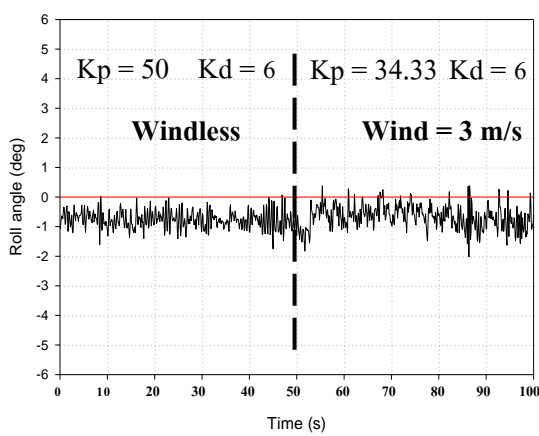


(4.13-ค) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 4 m/s

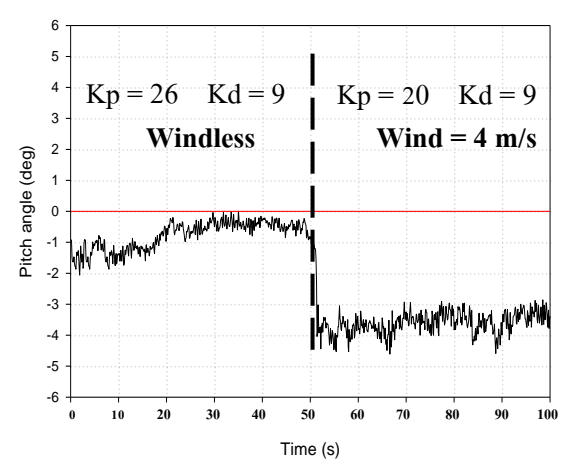
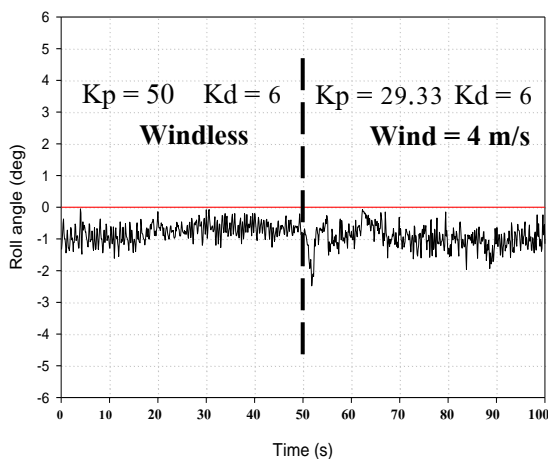
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านหลัง



(4.14-ก) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2 m/s



(4.14-ข) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3 m/s



(4.14-ค) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 4 m/s

รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.1 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านขวา

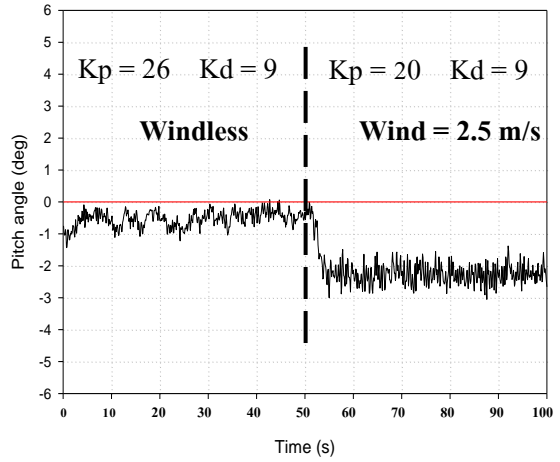
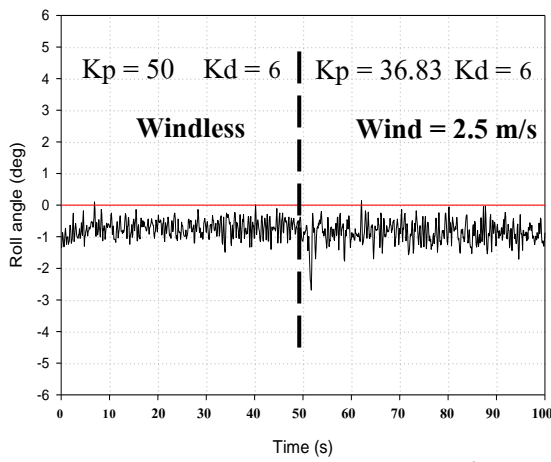
ตารางที่ 4.3 สรุปค่าอัตราขยายการควบคุมและค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยกรณีสภาวะที่มีลมปะทะ 2, 3 และ 4 m/s ใน 4 ทิศทางหลัก

ลมปะทะ		avg. error ของการควบคุมมุมโรล (deg)		avg. error ของการควบคุมมุมพิทช์ (deg)	
ความเร็ว (m/s)	ทิศทาง (deg)	ไม่มีลมปะทะ	มีลมปะทะ	ไม่มีลมปะทะ	มีลมปะทะ
2	0	0.75	0.85	0.84	1.99
3		0.81	0.91	0.92	2.44
4		0.68	1.05	0.8	2.6
2	-90	0.7	1.07	0.93	0.49
3		0.9	1.59	0.87	-0.38
4		0.56	1.46	1.39	-0.29
2	180	0.82	0.58	1.02	0.05
3		0.82	0.57	0.86	-0.44
4		0.87	0.41	0.92	-0.52
2	90	0.61	0.46	0.81	2.36
3		0.76	0.59	0.85	2.8
4		0.67	0.97	0.38	3.75

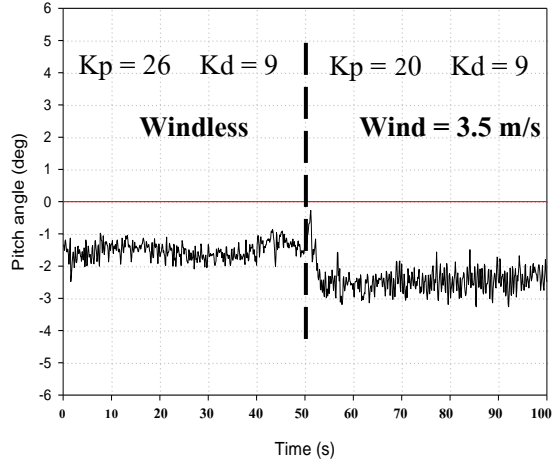
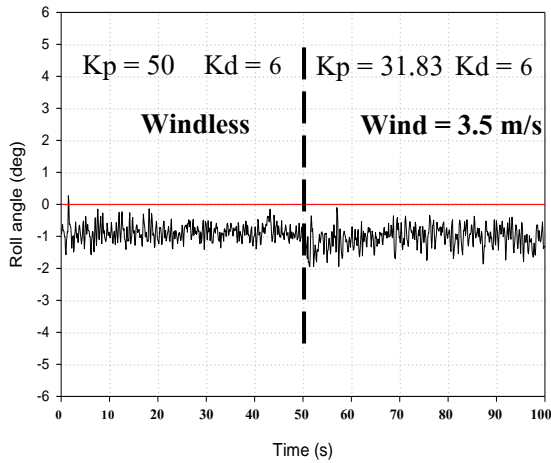
4.5.2 การทดสอบย่อย 5.2 : การทดสอบด้วยความเร็วของลมปะทะต่างจากที่ทำการปรับแต่งการควบคุม แต่ทิศทางลมปะทะเหมือนกับที่ทำการปรับแต่งการควบคุม

ผลการทดสอบในขั้นตอนที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ของมุมโรลและมุมพิทช์ตามความเร็วและทิศทางของลมปะทะดังที่นำเสนอ นั้น สามารถควบคุมมุมเอียงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อมีลมเข้าปะทะด้วยความเร็วและทิศทางที่ทำการปรับแต่งค่าอัตราขยาย ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงทำการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบความสามารถของวิธีการที่นำเสนอในการควบคุมมุมเอียงตัวเมื่อความเร็วของลมปะทะเป็นค่าอื่นนอกเหนือจากที่ทำการปรับแต่งค่าอัตราขยาย

ผลตอบสนองของมุมโรลและมุมพิทช์ในกรณีทดสอบด้วยลมปะทะที่มีความเร็ว 2.5 และ 3.5 m/s ในทิศทาง 4 ทิศทางหลักแสดงในรูปที่ 4.15 – 4.18 และค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยแสดงสรุปในตารางที่ 4.4

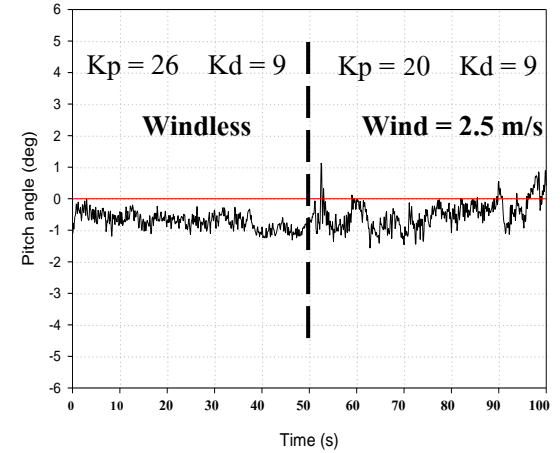
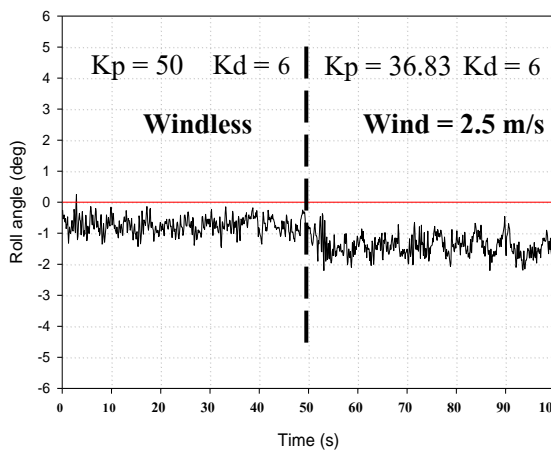


(4.15-ก) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2.5 m/s

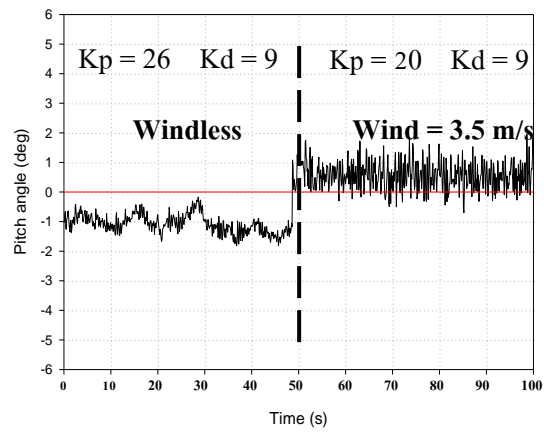
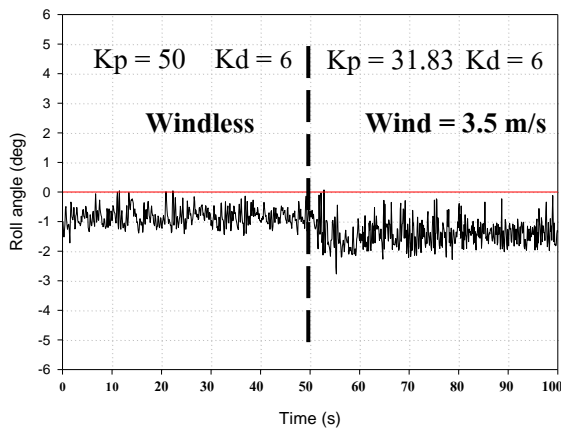


(4.15-ข) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3.5 m/s

รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านหน้า

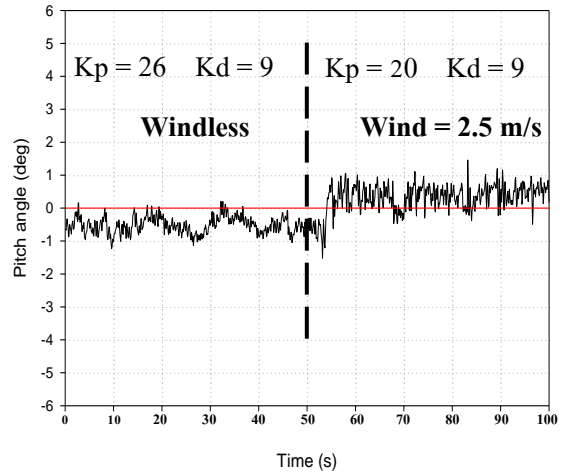
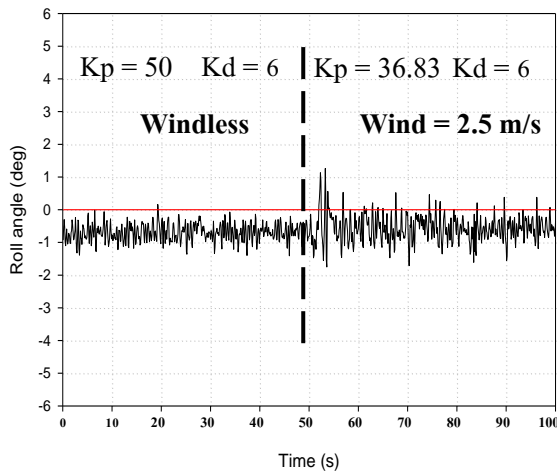


(4.16-ก) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2.5 m/s

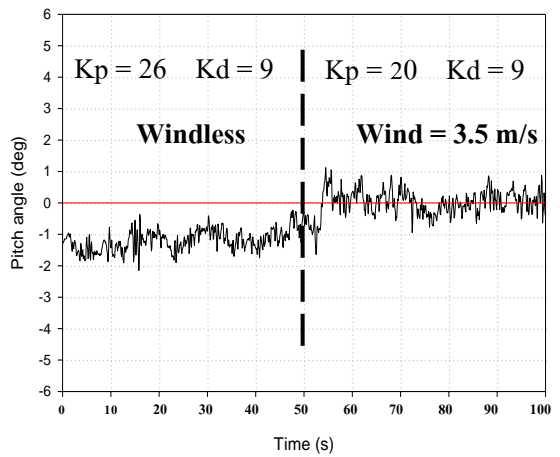
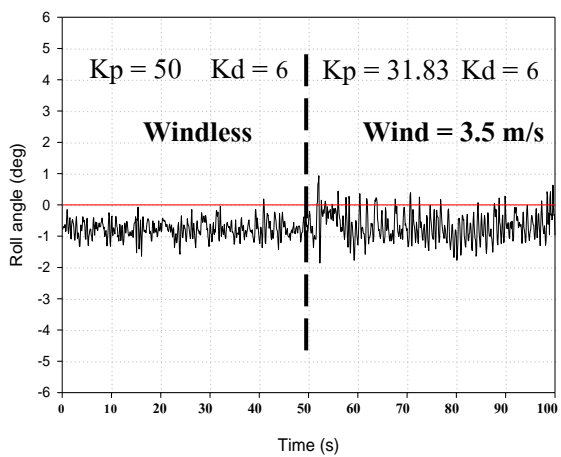


(4.16-ข) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3.5 m/s

รูปที่ 4.16 ขั้นตอนที่ 5.2 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านซ้าย

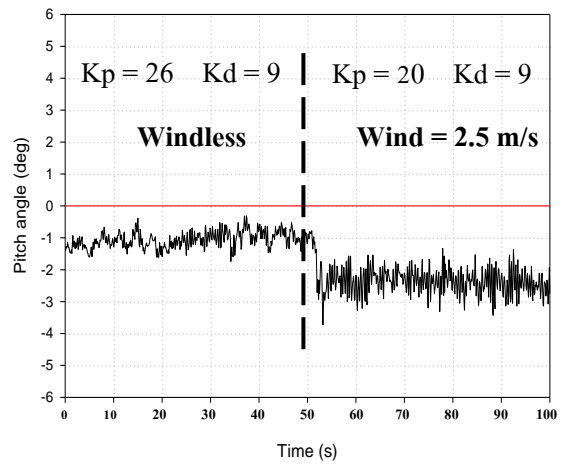
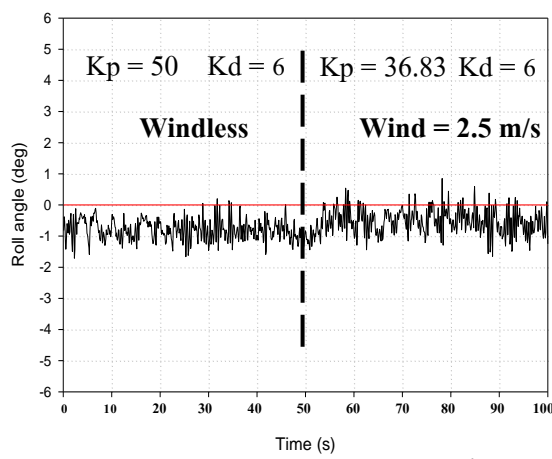


(4.17-ก) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2.5 m/s

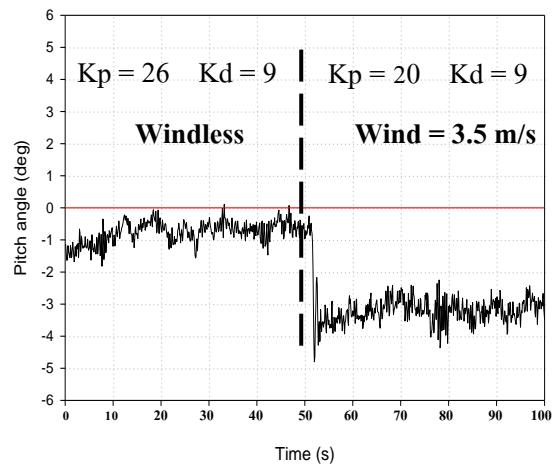
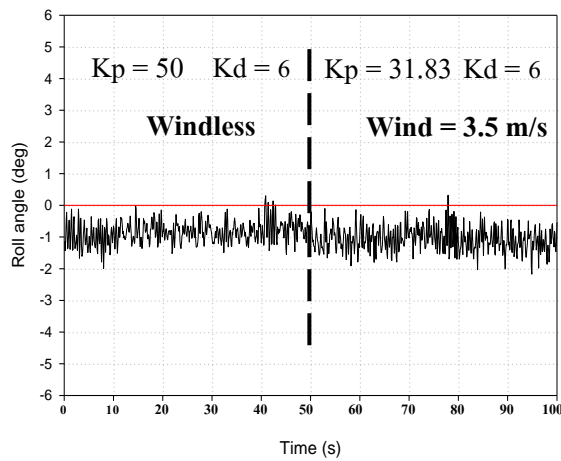


(4.17-ข) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3.5 m/s

รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านหลัง



(4.18-ก) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2.5 m/s



(4.18-ข) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3.5 m/s

รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.2 เปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านขวา

ตารางที่ 4.4 สรุปค่าอัตราขยายการควบคุมและค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยกรณีสภาวะที่มีลมปะทะ 2.5 และ 3.5 m/s ใน 4 ทิศทางหลัก

ลมปะทะ		avg. error ของการควบคุมมุมโรล (deg)		avg. error ของการควบคุมมุมพิทช์ (deg)	
ความเร็ว (m/s)	ทิศทาง (deg)	ไม่มีลมปะทะ	มีลมปะทะ	ไม่มีลมปะทะ	มีลมปะทะ
2.5	0	0.73	0.88	0.53	2.12
3.5		0.81	1	1.5	2.5
2.5	-90	0.75	1.41	0.72	0.45
3.5		0.84	1.66	1.1	-0.46
2.5	180	0.79	0.72	1.04	-0.7
3.5		0.77	0.73	1.1	-0.03
2.5	90	0.8	0.53	1	2.3
3.5		0.7	0.77	0.5	3.21

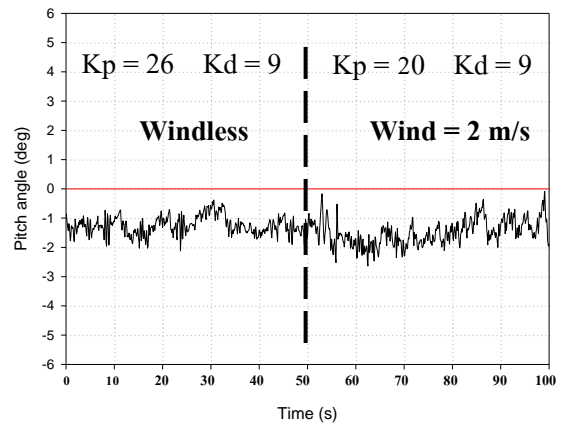
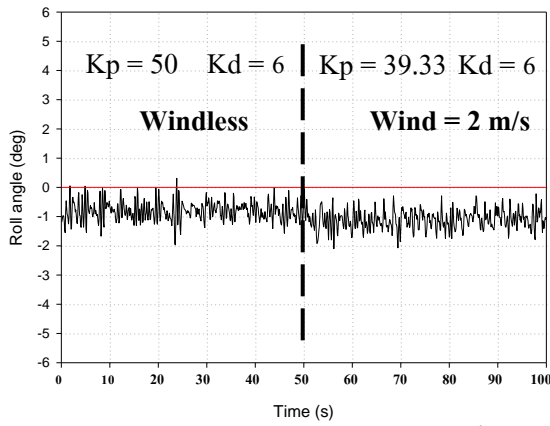
4.5.3 การทดสอบย่อย 5.3 : การทดสอบด้วยความเร็วและทิศทางของลมปะทะต่างจากที่ทำการปรับแต่งการควบคุม

การทดสอบขั้นตอนนี้เพื่อตรวจสอบความสามารถในการควบคุมด้วยวิธีการที่นำเสนอ เมื่อทั้งความเร็วและทิศทางของลมปะทะแตกต่างจากสภาวะที่ทำการปรับแต่งการควบคุม

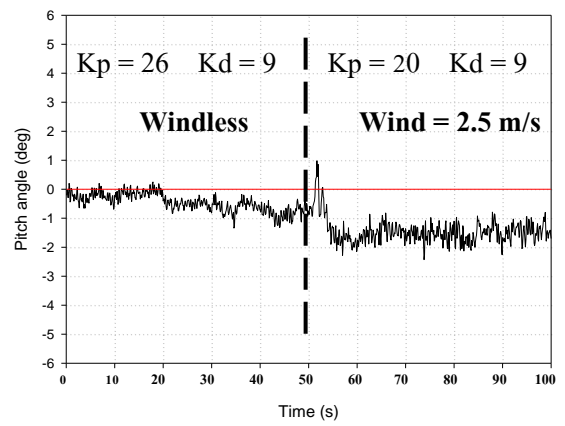
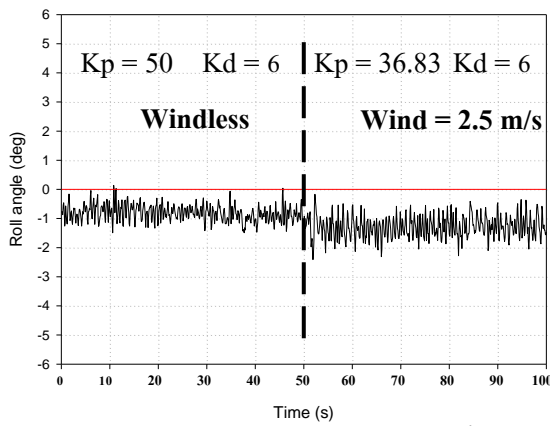
โดยมีกรณีการทดสอบดังนี้

- ความเร็วลมปะทะ 2, 2.5, 3, 3.5 และ 4 m/s

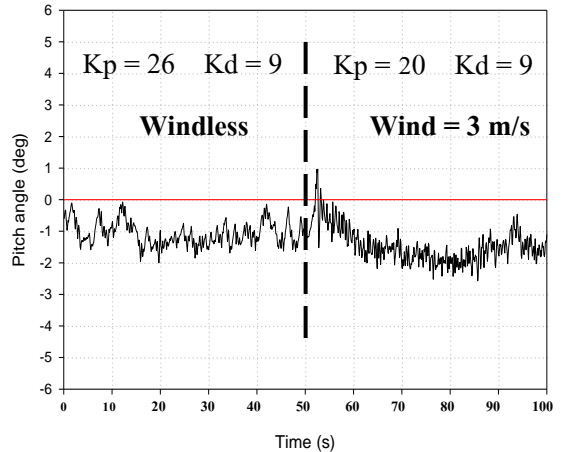
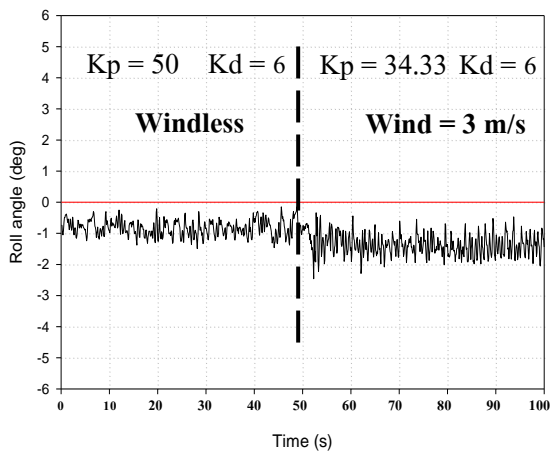
- ทิศทางลมปะทะจากทางมุมยอว์ -45 deg ของเฮลิคอปเตอร์ ลมปะทะจากทางมุมยอว์ -135 deg ของเฮลิคอปเตอร์ ลมปะทะจากทางมุมยอว์ 135 deg ของเฮลิคอปเตอร์ และลมปะทะจากทางมุมยอว์ 45 deg ของเฮลิคอปเตอร์ ผลตอบสนองของมุมโรลและมุมพิทช์แต่ละกรณีการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.19



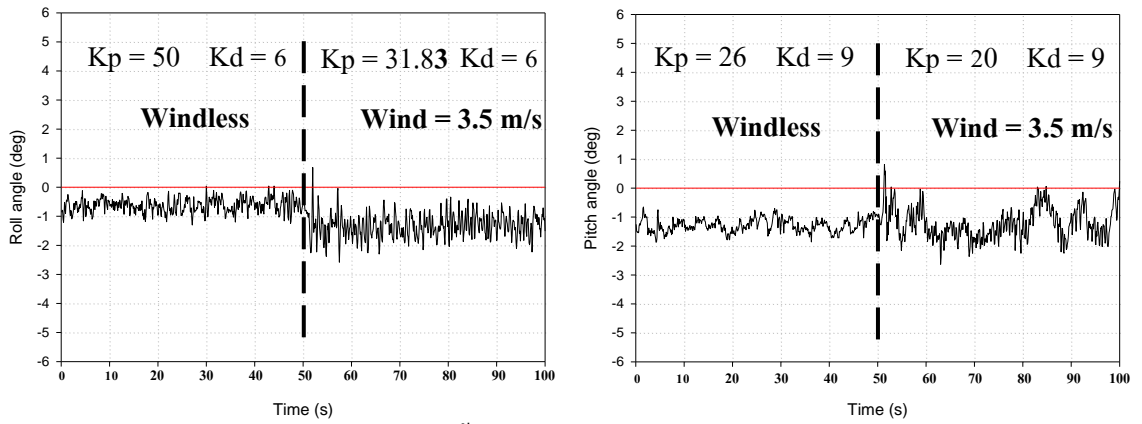
(4.19-ก) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2 m/s



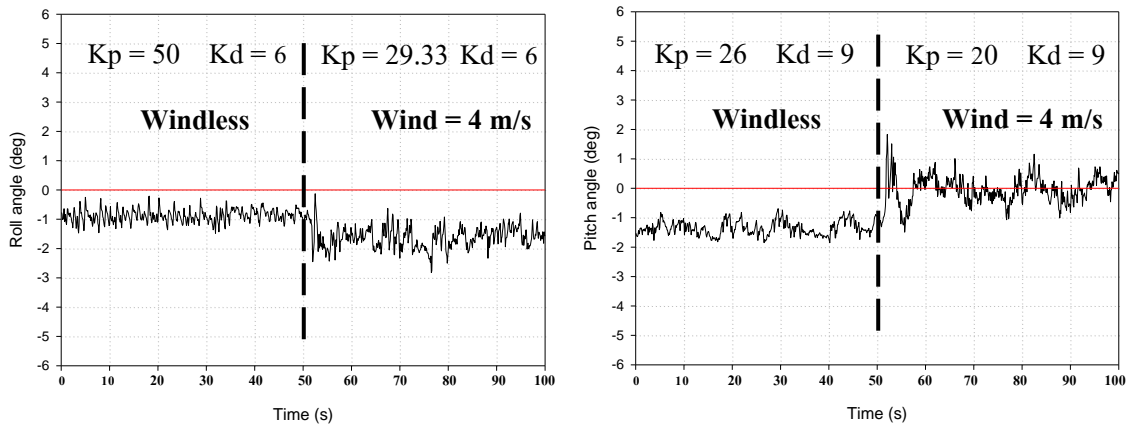
(4.19-ข) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2.5 m/s



(4.19-ค) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3 m/s

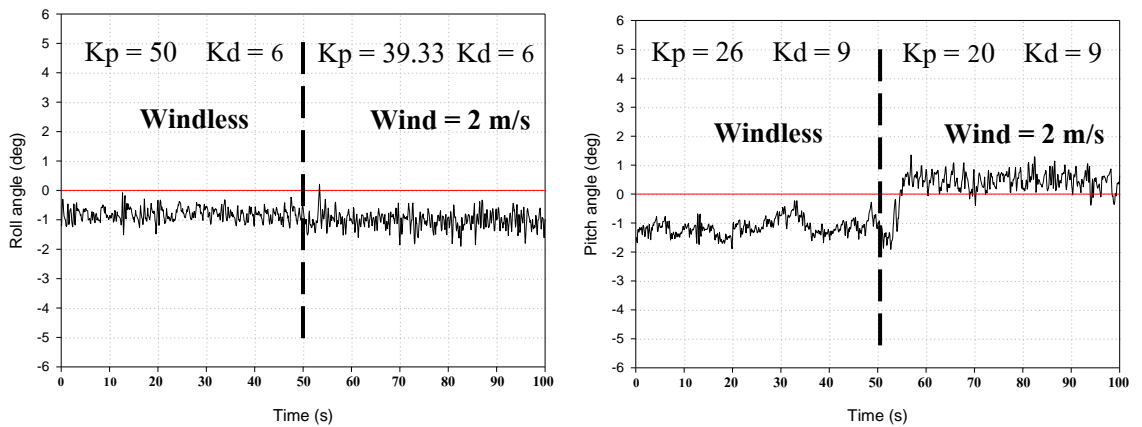


(4.19-ง) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3.5 m/s

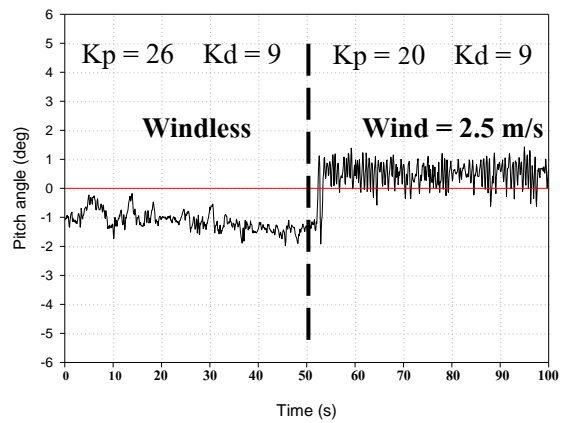
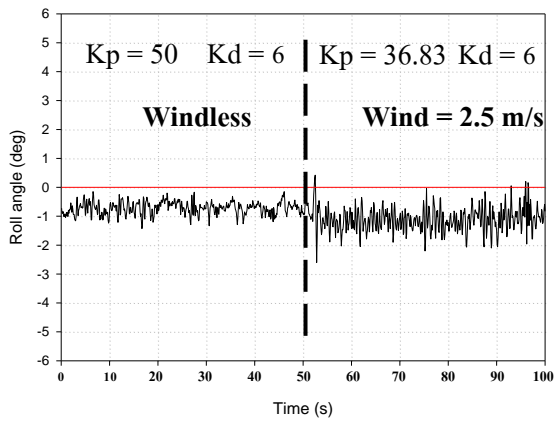


(4.19-จ) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 4 m/s

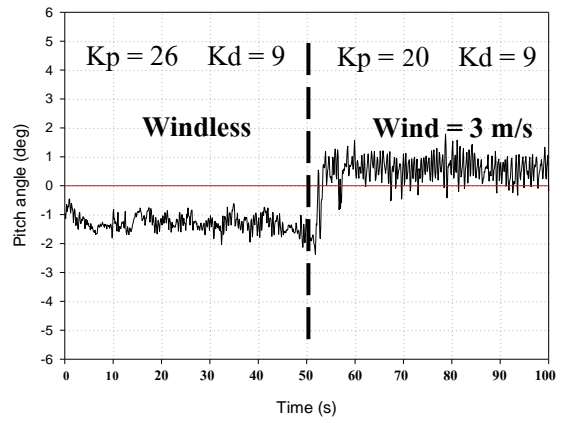
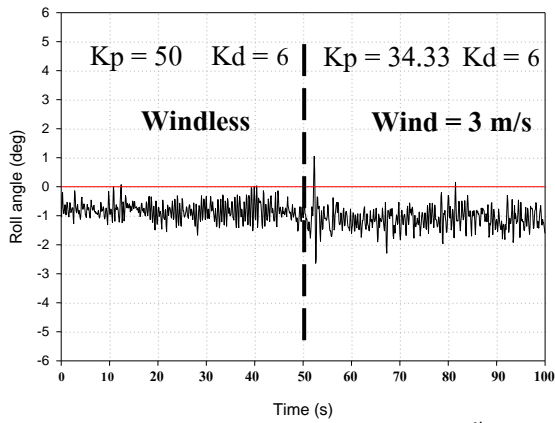
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านซ้ายที่มุมยอร์ -45 deg



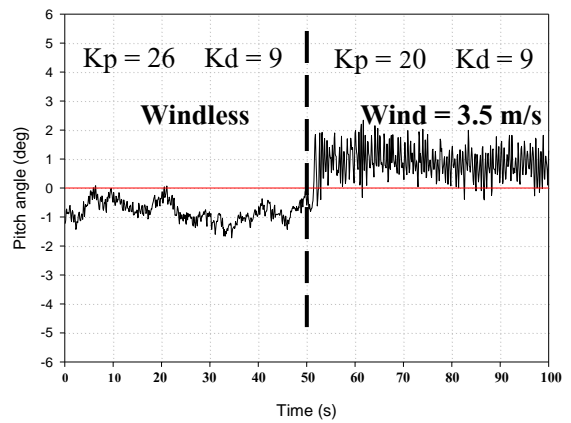
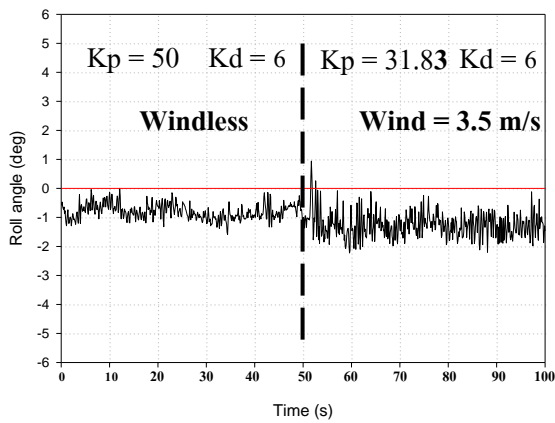
(4.20-ก) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2 m/s



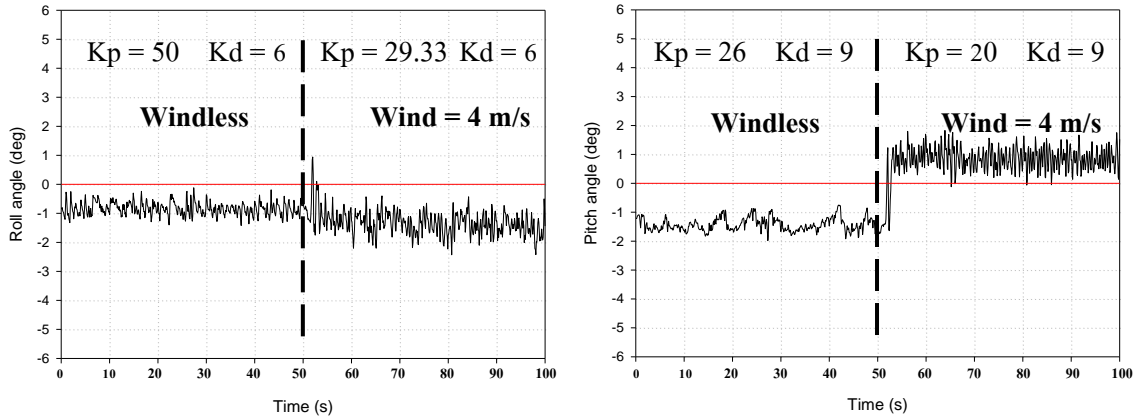
(4.20-ข) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2.5 m/s



(4.20-ค) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3 m/s

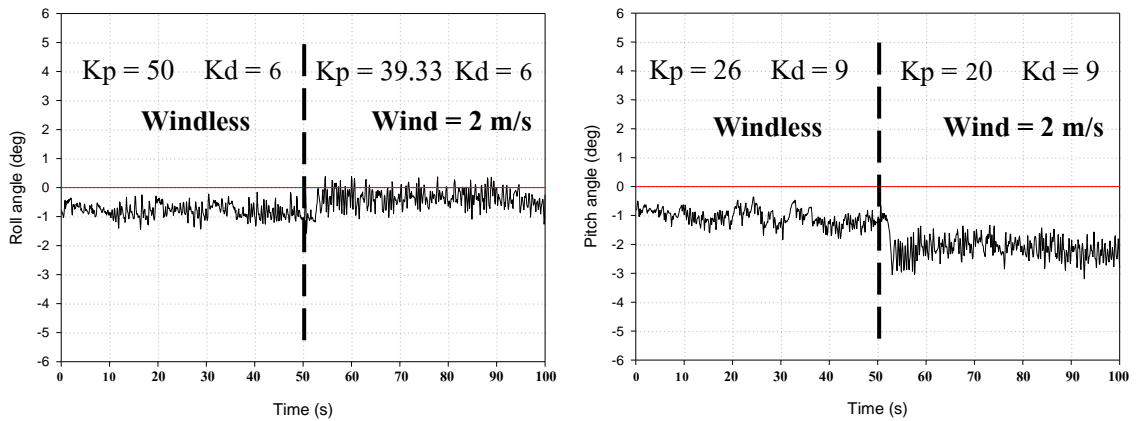


(4.20-ง) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3.5 m/s

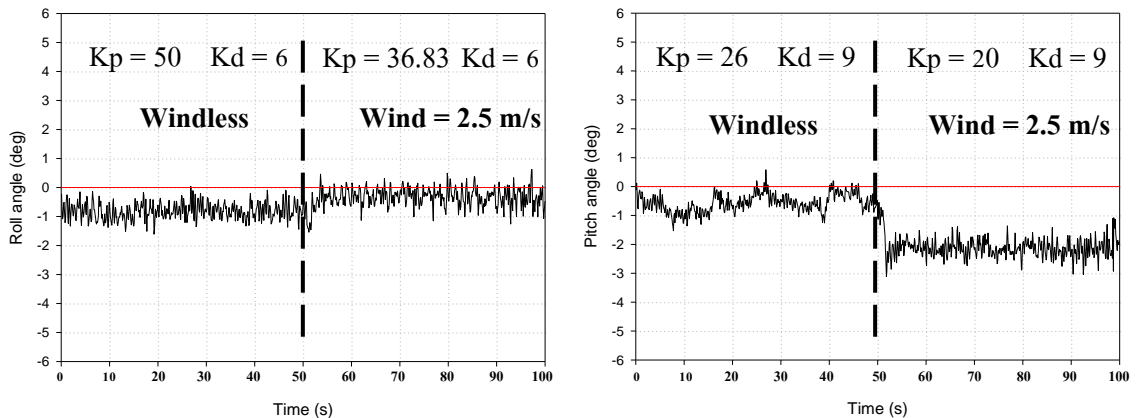


(4.20-จ) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 4 m/s

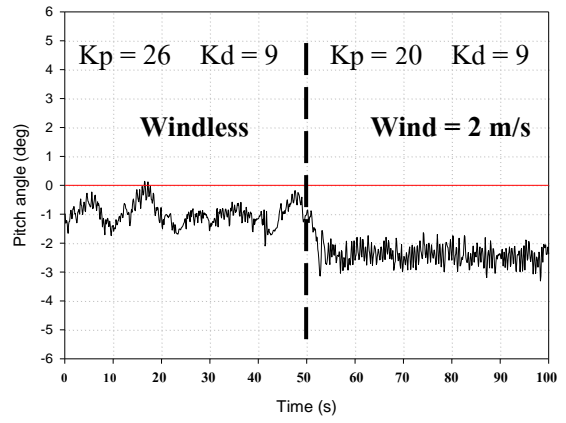
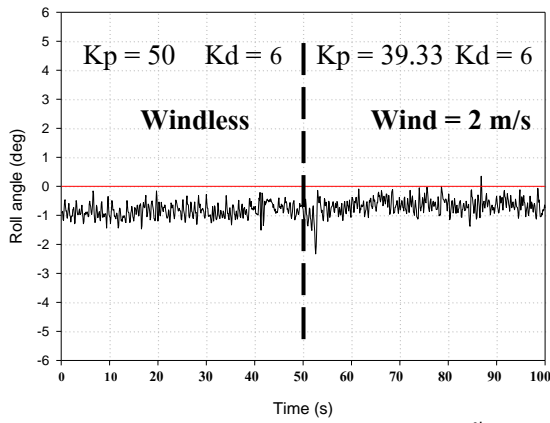
รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านซ้ายที่มุมยอร์ -135 deg



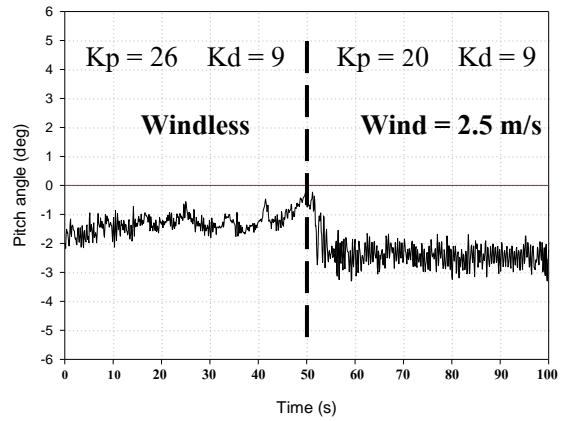
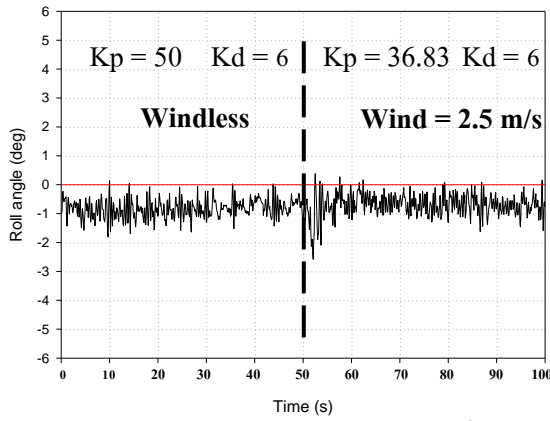
(4.21-ก) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2 m/s



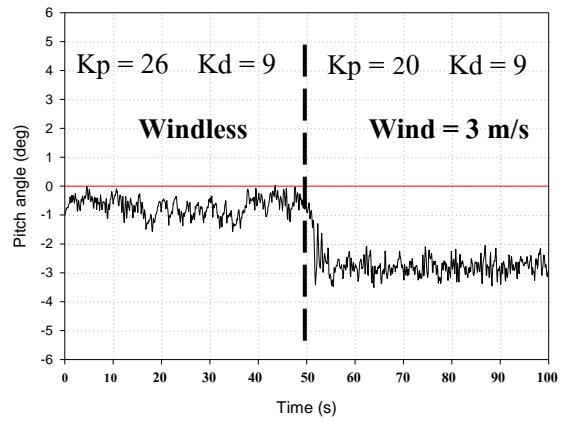
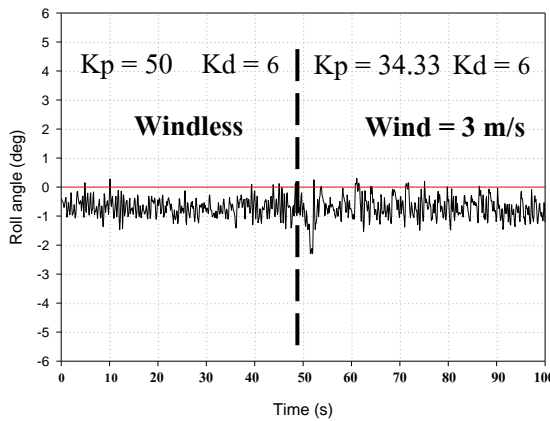
(4.21-ข) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2.5 m/s



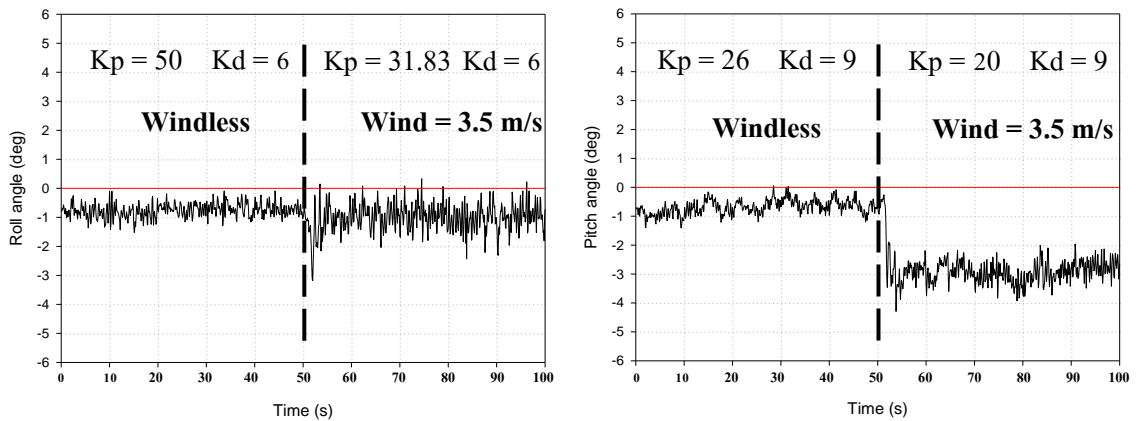
(4.22-ก) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2 m/s



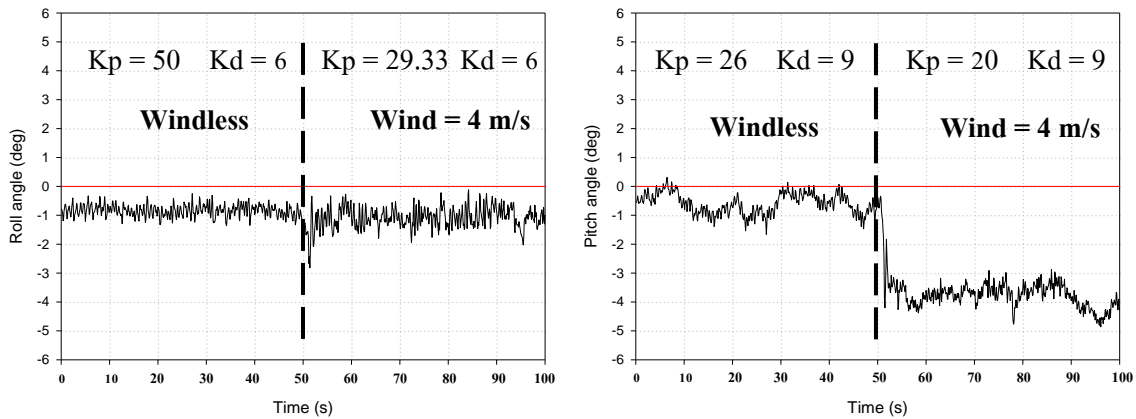
(4.22-ข) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 2.5 m/s



(4.22-ค) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3 m/s



(4.22-ง) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 3.5 m/s



(4.22-จ) ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 กรณีความเร็วลมปะทะที่ 4 m/s

รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 5.3 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ตามสภาวะลมปะทะ กรณีที่มีลมปะทะจากทางด้านขวาที่มุมขอร์ 45 deg

ผลการทดสอบในขั้นตอนที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของการควบคุมแบบ PD ของมุม โรลและมุมพิทช์ด้วยสมการความสัมพันธ์ที่ได้มานั้น ความเร็วและทิศทางของลมปะทะดังที่นำเสนอ นั้น สามารถควบคุมมุมเอียงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อมีลมเข้าปะทะ โดยที่ค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีความเร็วลมที่เข้ามาปะทะสูงขึ้น และมีค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวที่เกิดขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ย ได้แสดงดังในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สรุปค่าอัตราขยายการควบคุมและค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเฉลี่ยกรณีสภาวะที่มีลมปะทะ 2, 2.5, 3, 3.5 และ 4 m/s ใน 4 ทิศทางย่อย

ลมปะทะ		avg. error ของการควบคุมมุมโรล (deg)		avg. error ของการควบคุมมุมพิทช์ (deg)	
ความเร็ว (m/s)	ทิศทาง (deg)	ไม่มีลมปะทะ	มีลมปะทะ	ไม่มีลมปะทะ	มีลมปะทะ
2	-45	0.72	1.16	0.68	1.45
2.5		0.81	1.18	0.46	1.51
3		0.83	1.4	1.08	1.65
3.5		0.6	1.31	0.87	0.82
4		0.88	1.61	1.36	0.06
2	-135	0.81	1.02	1.14	-0.45
2.5		0.65	1.07	1.09	-0.23
3		0.72	1.13	1.13	-0.49
3.5		0.8	1.32	0.8	-0.89
4		0.84	1.37	1.42	-0.85
2	135	0.8	0.36	1.05	2.1
2.5		0.81	0.31	0.57	2.15
3		0.91	0.27	0.85	2.16
3.5		1.41	0.68	1.09	2.81
4		0.96	0.08	0.6	2.62
2	45	0.76	0.75	0.57	2.3
2.5		0.82	0.68	1.3	2.43
3		0.7	0.77	0.51	2.72
3.5		0.62	0.75	0.79	2.91
4		0.77	0.87	0.86	3.53