

การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งอัตโนมัติ
ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้

นางสาวปาริชาติ ประภาสวุฒิชัย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**DESIGN AND PROTOTYPING WIND TURBINE TESTER
WITH VARIABLE VELOCITY PATTERN**

Parichart Prakatwutthichon



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2013**

การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์
ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.ธีทัต คลวิชัย)

ประธานกรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.ชโลธร ธรรมแท้)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปาริชาติ ประภาสวุฒิชัย : การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลม
ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ (DESIGN AND PROTOTYPING WIND
TURBINE TESTER WITH VARIABLE VELOCITY PATTERN) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์, 156 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลม ที่สามารถปรับรูปแบบ
ความเร็วลมได้ เครื่องต้นแบบนี้จะสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วลมให้มีความเร็วลมได้ตั้งแต่
ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที จนกระทั่งถึงความเร็วสูงสุดเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงของ
ความเร็วลมที่พบในประเทศไทย หลังจากนั้นจะสร้างอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของพัดลมที่เป็น
แหล่งกำเนิดลม โดยจะทำให้สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วรอบเพื่อปรับความเร็วลมที่หน้ากังหันลม
ให้สามารถมีความเร็วในรูปแบบต่างๆ ตามที่ต้องการได้ โดยในที่นี้จะทำให้ลมสามารถเปลี่ยนแปลง
รูปแบบเป็นฟังก์ชันที่ซ้ำตนเองได้ 3 รูปแบบ แบบแรกเป็นฟังก์ชันแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็น
ขั้นบันได แบบที่สองเป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบอัตราเร่งคงที่ และแบบสุดท้ายจะเป็น
การเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของฮาร์มอนิก การปรับเปลี่ยนความเร็วลมที่กระทบกังหันลมนั้นจะทำ
โดยการปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ให้กับพัดลมโดยใช้ทฤษฎีระบบควบคุมแบบ PID ประโยชน์ของ
การควบคุมความเร็วลมเพื่อจำลองลักษณะลมรายปีที่เกิดขึ้นในแต่ละท้องถิ่น ที่มีรูปแบบของสถิติ
ลมแตกต่างกันออกไป ผลที่ได้จะช่วยในการออกแบบกังหันลมและวิธีการควบคุมกังหันลม
ให้เหมาะสมกับสถิติลมในรูปแบบที่หลากหลายเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ผลการทดสอบพบว่า
เครื่องต้นแบบสามารถควบคุมความเร็วลมให้เป็นไปตามต้องการได้ ลมที่สร้างขึ้นมีค่าความเร็วลม
เฉลี่ยเป็นไปตามต้องการ

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

PARICHART PRAKATWUTTHICHON: DESIGN AND PROTOTYPING OF
WIND TURBINE TESTER WITH VARIABLE VELOCITY PATTERN.

THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. FLT.LT. KONTORN
CHAMNIPRASART, Ph.D., 156 PP.

WIND TURBINE TESTER / WIND SPEED / WIND STATISTICS / PID CONTROL

The prototype of a wind turbine tester with variable velocity patterns is presented in this research. It was designed to adjust the various wind speeds ranging from 0.5 m/s. to 5 m/s. which are normally found in Thailand. Then, this research created a device to control a fan that acted as a wind source. The wind source was adjusted to a desired wind speed at the front of wind turbine. The wind speed signals used in this experiment include step, ramp, and harmonic signals. The PID control theory was used to ensure that the wind at the front of the turbine would meet the designed pattern. Test results showed that the prototype could control the desired speed and pattern. The variations of wind speed and wind pattern are expected to help engineers for designing a better wind turbine.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการและด้านอื่น ๆ จากบุคคล ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นทั้งผู้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิชาการ ให้คำปรึกษา และชี้แนะทางในการทำวิทยานิพนธ์ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งยังให้ข้อคิดและแนวทางการดำเนินชีวิต จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ ผู้วิจัยชาวซึ่งในความปรารถนาดี และจะปฏิบัติตามคำสอนของท่านตลอดไป

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์วิชัย ศรีสุรภัย ที่ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย แนะนำแนวทางการดำเนินงาน และให้ความรู้แก่ผู้ทำวิจัยด้วยความกรุณา

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ช.โลธร ธรรมแท้ ผู้ให้คำแนะนำด้านวิชาการ และเป็นแบบอย่างที่ดีแก่ผู้ทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์จิตติมา วระกุล ผู้ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ แนะนำแนวทางการดำเนินงานให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และเป็นแบบอย่างที่ดีแก่ผู้ทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณณกาจ จบนุช คุณวัลรัตน์ ทองปิ่น และคุณปัทมา ชุกกลิ่น ที่มอบกำลังใจที่ดี พร้อมทั้งให้คำปรึกษาด้านวิชาการและความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยในทุกๆเรื่องด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยจะระลึกถึงตลอดไป

ขอขอบคุณ คุณภักดี สวัสดิ์นะที นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เป็นผู้สนับสนุนด้านเครื่องมือและทุนวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุวชัย ประภาสวุฒิชัย และ คุณแม่สาตี ประภาสวุฒิชัย บิดาและมารดาผู้เป็นที่รักยิ่ง ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และสนับสนุนด้านการศึกษาเป็นอย่างดี จวบจนครูบาอาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาตั้งแต่เล็กจนเติบโต คุณงามความดีทั้งหมดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงขออุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวมา

ปาริชาติ ประภาสวุฒิชัย

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญรูป..... | ญ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... | ต |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ระเบียบวิธีวิจัย..... | 2 |
| 1.5 สถานที่ทำงานวิจัย..... | 3 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 กล่าวนำ..... | 4 |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.3 ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์..... | 8 |
| 2.3.1 อากาศพลศาสตร์..... | 8 |
| 2.3.2 อากาศพลศาสตร์ของกังหัน (Turbine Aerodynamics)..... | 11 |
| 2.3.3 อากาศพลศาสตร์ของอุโมงค์ลม (Wind Tunnel Aerodynamics)..... | 12 |
| 2.4 กังหันลม..... | 12 |
| 2.4.1 พลังงานลม..... | 13 |
| 2.4.2 ส่วนประกอบหลักของกังหันลม (Part of a wind Turbine)..... | 13 |
| 2.4.3 รูปแบบเทคโนโลยีกังหันลม..... | 15 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|--------|---|----|
| 2.4.4 | ประสิทธิภาพกัณฑ์ | 17 |
| 2.4.5 | กัณฑ์เพื่อผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย | 18 |
| 2.5 | มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ | 20 |
| 2.5.1 | ทฤษฎีการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | 22 |
| 2.5.2 | วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | 23 |
| 2.5.3 | การควบคุมแบบ Scalar ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ | 33 |
| 2.6 | อินเวอร์เตอร์ | 37 |
| 2.6.1 | หลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์ | 37 |
| 2.6.2 | โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์ | 38 |
| 2.6.3 | อินเวอร์เตอร์สำหรับการควบคุมมอเตอร์ | 40 |
| 2.6.4 | การควบคุมมอเตอร์ | 43 |
| 2.6.5 | การใช้งานอินเวอร์เตอร์ในระบบงานต่าง ๆ | 44 |
| 2.7 | อุปกรณ์วัดความเร็วลม | 44 |
| 2.7.1 | หลักการการทำงานของหัววัดความเร็วลมแบบต่าง ๆ | 45 |
| 2.8 | การควบคุมระบบ | 47 |
| 2.8.1 | ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ (Open-loop Control Systems, Nonfeedback Control Systems) | 47 |
| 2.8.2 | ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop Control Systems, feedback Control Systems) | 48 |
| 2.9 | พื้นฐานการควบคุมแบบ PID | 49 |
| 2.9.1 | เทอมสัดส่วน (Proportional Term) | 50 |
| 2.9.2 | เทอมปริพันธ์ (Integral Term) | 51 |
| 2.9.3 | เทอมอนุพันธ์ (Derivative Term) | 52 |
| 2.9.4 | ผลรวม PID Controller | 53 |
| 2.9.5 | การปรับจูน PID Controller | 54 |
| 2.10 | สัญญาณ PWM (Pulse width modulation) | 55 |
| 2.10.1 | การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวงจรถอด | 55 |
| 2.10.2 | การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวงจรถอด | 56 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.10.3 | การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยโปรแกรม LabVIEW..... | 57 |
| 3 | วิธีการดำเนินงานวิจัย | 59 |
| 3.1 | กล่าวนำ..... | 59 |
| 3.2 | การออกแบบต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่ สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้..... | 59 |
| 3.3 | การสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่ สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้..... | 60 |
| 3.3.1 | 3-phase AC motor..... | 61 |
| 3.3.2 | INVERTER..... | 63 |
| 3.3.3 | NI-USB 6008..... | 65 |
| 3.3.4 | Air Velocity Transmitter..... | 67 |
| 3.3.5 | เครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... | 68 |
| 3.3.6 | ใบพัดกังหันลม..... | 69 |
| 3.3.7 | ชุดควบคุมความเร็วลมด้วยการปรับมือ และชุดแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้า..... | 69 |
| 3.4 | การหาค่าพารามิเตอร์..... | 70 |
| 3.4.1 | คำนวณหาความเร็วเชิง โครนัสในหน่วยของรอบ/นาที..... | 71 |
| 3.4.2 | มอเตอร์อยู่นิ่ง..... | 71 |
| 3.4.3 | มอเตอร์ทำงานที่สถานะไม่มีโหลด..... | 72 |
| 3.4.4 | มอเตอร์ทำงานที่สถานะ โรเตอร์ถูกล็อกไม่ให้หมุน..... | 73 |
| 3.4.5 | การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์..... | 73 |
| 3.5 | การจำลองการควบคุมมอเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB..... | 76 |
| 3.5.1 | การตั้งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์..... | 77 |
| 3.5.2 | การออกแบบโปรแกรมควบคุม..... | 77 |
| 3.6 | การทดสอบความเร็วลม..... | 79 |
| 3.6.1 | ตำแหน่งการวัดค่าความเร็วลม..... | 79 |
| 3.6.2 | โครงสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลม ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้..... | 80 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.7 | อัลกอริทึมสำหรับการประมวลผลการควบคุมการทำงานของมอเตอร์..... | 82 |
| 3.7.1 | รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบขั้นบันได (Step Signals)..... | 84 |
| 3.7.2 | รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบความชันคงที่ (Ramp Signals)..... | 85 |
| 3.7.3 | รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Signals)..... | 85 |
| 3.7.4 | ฟังก์ชันที่สำคัญและการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ..... | 86 |
| 3.8 | แผนผังแสดงกระบวนการทำงาน..... | 92 |
| 3.9 | การรับค่าจากผู้ใช้..... | 93 |
| 4 | ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล..... | 94 |
| 4.1 | กล่าวนำ..... | 94 |
| 4.2 | ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB..... | 95 |
| 4.2.1 | ผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำใน สภาวะไม่มีภาระกรรม..... | 95 |
| 4.2.2 | ผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำใน สภาวะมีภาระกรรม..... | 96 |
| 4.3 | ผลการทดสอบความเร็วลม..... | 97 |
| 4.3.1 | Prototyping of a wind turbine tester + Honeycomb..... | 97 |
| 4.3.2 | Prototyping of a wind turbine tester + Honeycomb + Nozzle1..... | 98 |
| 4.3.3 | Prototyping of a wind turbine tester + Honeycomb + Nozzle2..... | 99 |
| 4.3.4 | Prototyping of a wind turbine tester + 2Honeycomb + Nozzle2..... | 100 |
| 4.3.5 | Prototyping of a wind turbine tester..... | 101 |
| 4.3.6 | Prototyping of a wind turbine tester + nozzle2..... | 102 |
| 4.4 | ผลการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธี PID Controller..... | 104 |
| 4.4.1 | รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบขั้นบันได (Step Signals)..... | 105 |
| 4.4.2 | รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบความชันคงที่ (Ramp Signals)..... | 106 |
| 4.4.3 | รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Signals)..... | 107 |
| 4.5 | สรุปผลการทดลอง..... | 109 |
| 5 | สรุปผลและข้อเสนอแนะ..... | 110 |
| 5.1 | กล่าวนำ..... | 110 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 5.2 สรุปผลการวิจัย..... | 11๖ |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ..... | 111 |
| 5.3.1 ปัญหาในการทดลอง..... | 111 |
| 5.3.2 งานวิจัยในอนาคต..... | 111 |
| รายการอ้างอิง..... | 112 |
| ภาคผนวก..... | 115 |
| ภาคผนวก ก. รายละเอียดการออกแบบ โครงสร้างด้วยโปรแกรม SolidWorks..... | 115 |
| ภาคผนวก ข. โปรแกรม MATLAB..... | 127 |
| ภาคผนวก ค. ข้อมูลของผลทดสอบความเร็วลม..... | 142 |
| ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... | 150 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 156 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|--|
| 2.1 | การเปลี่ยนขนาดแรงดันของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่โดยวิธีการแปรรูปคลื่นของแรงดัน 42 |
| 2.2 | รูปแบบควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ของวิธี PWM แบบ Sine Wave 43 |
| 2.3 | ค่าตัวแปรการปรับจูนแบบ Manual 54 |
| 2.4 | ค่าตัวแปรการปรับจูนแบบ Ziegler-Nichols 55 |
| 3.1 | ข้อมูลเทคนิคของพัดลมถักกลมแบบมอเตอร์ขับเคลื่อน Model: VFD-3122 63 |
| 3.2 | ค่าจากการทดสอบมอเตอร์ทำงานที่สภาวะโรเตอร์ถูกล๊อคไม่ให้หมุน 73 |
| 3.3 | ค่า θ , R_{eq} และ X_{eq} จากการทดสอบมอเตอร์ 74 |
| 3.4 | แสดงค่าความต้านทานของขดลวดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 75 |
| 3.5 | แสดงค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 76 |
| 3.6 | โครงสร้างของต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 กรณี 82 |
| ค.1 | แสดงค่าความเร็วลมที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz. สำหรับ โครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 1 143 |
| ค.2 | แสดงค่าความเร็วลมที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz. สำหรับ โครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 2 144 |
| ค.3 | แสดงค่าความเร็วลมที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz. สำหรับ โครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 3 145 |
| ค.4 | แสดงค่าความเร็วลมที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz. สำหรับ โครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 4 146 |
| ค.5 | แสดงค่าความเร็วลมที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz. สำหรับ โครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 5 147 |
| ค.6 | แสดงค่าความเร็วลมที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz. สำหรับ โครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 6 148 |
| ค.7 | แสดงค่าความเร็วลม 3 ตำแหน่ง 149 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.1 | แสดงการเกิดแรงยกและแรงต้าน | 9 |
| 2.2 | แสดงการเปิดมุมปะทะของปีก | 10 |
| 2.3 | แสดงส่วนของแพนอากาศ | 10 |
| 2.4 | แสดงแรงยกแรงต้านที่มีผลต่อการหมุนของกังหัน | 11 |
| 2.5 | อุโมงค์ลมใหญ่ที่สุดในโลกที่สถาบันวิจัยแลงเลย์ของนาซา | 12 |
| 2.6 | แสดงใบพัดของกังหันลม | 13 |
| 2.7 | แสดงส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีชุด Gear box | 15 |
| 2.8 | แสดงกังหันลมขนาดเล็กของ Sky stream | 15 |
| 2.9 | แสดงกังหันลมแนวแกนตั้ง | 16 |
| 2.10 | แสดงส่วนประกอบกังหันลมเพลาอน | 17 |
| 2.11 | ลักษณะการทำงานของปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal pump) | 21 |
| 2.12 | ลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็ก | 22 |
| 2.13 | Per phase representation | 24 |
| 2.14 | Phasor diagram ของแรงดันและกระแสของ Stator | 28 |
| 2.15 | แสดงวิธีหาทิศทางเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำโดยใช้กฎมือขวา | 29 |
| 2.16 | ลักษณะการหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ | 30 |
| 2.17 | Vector เมื่อ $\theta_r \cong 0$ | 31 |
| 2.18 | Open loop volts/hertz control | 34 |
| 2.19 | acceleration and deceleration characteristics | 35 |
| 2.20 | Closed-loop volts/hertz speed control | 36 |
| 2.21 | Constant volts/hertz speed control with slip regulation | 36 |
| 2.22 | แสดงหลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์ | 38 |
| 2.23 | แสดงโครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) | 39 |
| 2.24 | แสดงกระบวนการทำงานของอินเวอร์เตอร์ | 39 |
| 2.25 | Pitot Static Tube | 45 |
| 2.26 | ระบบควบคุมแบบวงเปิด | 47 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 2.27 | ตัวควบคุม PID ที่ต่อเข้าควบคุมแบบอนุกรม..... 48 |
| 2.28 | แผนภาพบล็อกตัวควบคุมแบบ PID..... 49 |
| 2.29 | กราฟแสดงค่า PV ที่ค่า K_p ต่าง ๆ (K_i และ K_d คงที่)..... 51 |
| 2.30 | กราฟแสดงค่า PV ที่ค่า K_i ต่าง ๆ (K_p และ K_d คงที่)..... 52 |
| 2.31 | กราฟแสดงค่า PV ที่ค่า K_d ต่าง ๆ (K_i และ K_p คงที่)..... 53 |
| 2.32 | การเปรียบเทียบสัญญาณ PWM แบบอนาล็อก..... 55 |
| 2.33 | ผลการสร้างสัญญาณ PWM..... 56 |
| 2.34 | การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยหลักการทางดิจิทัล..... 57 |
| 2.35 | แสดง block Simulate Signal..... 57 |
| 2.36 | แสดงลักษณะสัญญาณ PWM จาก block Simulate Signal..... 58 |
| 3.1 | ต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งนำสารที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้..... 60 |
| 3.2 | ต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งนำสารที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้..... 61 |
| 3.3 | พัลลวมัลติเพลกซ์แบบมอเตอร์ขับเคลื่อน Model: VFD-3122..... 62 |
| 3.4 | Inverter ยี่ห้อ POWTRAN รุ่น PI8600..... 63 |
| 3.5 | Diagram ต่อใช้งาน Inverter ยี่ห้อ POWTRAN รุ่น PI8600..... 64 |
| 3.6 | คุณสมบัติและฟังก์ชันใช้งาน Inverter ยี่ห้อ POWTRAN รุ่น PI8600..... 65 |
| 3.7 | NI -USB 6008..... 66 |
| 3.8 | Analog Terminal Assignments..... 66 |
| 3.9 | Digital Terminal Assignments..... 67 |
| 3.10 | Air Velocity Transmitter รุ่น CTV 100..... 68 |
| 3.11 | เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง..... 68 |
| 3.12 | ชุดใบพัดกึ่งนำสาร..... 69 |
| 3.13 | ลักษณะภายนอกชุดควบคุมและชุดแสดงผล..... 70 |
| 3.14 | ลักษณะภายในชุดควบคุมและชุดแสดงผล..... 70 |
| 3.15 | วงจรเสมือนมอเตอร์เหนี่ยวนำสถานะไม่มีโหลด..... 72 |
| 3.16 | วงจรเสมือนมอเตอร์เหนี่ยวนำสถานะ โรเตอร์ถูกล๊อคไม่ให้หมุน..... 73 |
| 3.17 | ขดลวดเหนี่ยวนำ 3 เฟส..... 74 |
| 3.18 | การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับค่าเงื่อนไขเริ่มต้น..... 77 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.19 การรับค่าอินพุตของ โปรแกรม..... | 77 |
| 3.20 ชุดอินเวอร์เตอร์ใน โปรแกรม MATLAB..... | 78 |
| 3.21 มอเตอร์ในโปรแกรม MATLAB..... | 78 |
| 3.22 โปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์แบบ PID Controller..... | 79 |
| 3.23 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วลม..... | 79 |
| 3.24 (ก) รังผึ้งออกแบบโดยโปรแกรม Solid Works (ข) รังผึ้งทำจากอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตรแสดงผล..... | 80 |
| 3.25 (ก) Nozzle ออกแบบโดยโปรแกรม Solid Works (ข) Nozzle ทำจากกระดาษลูกฟูก..... | 81 |
| 3.26 การต่อใช้งาน DAQ ร่วมกับ อินเวอร์เตอร์..... | 83 |
| 3.27 Block diagram of controller..... | 83 |
| 3.28 สัญญาณแบบขั้นบันได..... | 84 |
| 3.29 สัญญาณแบบความชันคงที่..... | 85 |
| 3.30 สัญญาณแบบฮาร์มอนิก..... | 86 |
| 3.31 ฟังก์ชัน Simulate Signal..... | 87 |
| 3.32 ฟังก์ชันต่างๆที่มีใช้ใน Formula Node..... | 88 |
| 3.33 ตัวอย่างการเขียน Logic ใน Formula Node..... | 88 |
| 3.34 รูปแบบการปรับปรุงข้อมูลแต่ละวิธีของ Waveform Chart..... | 89 |
| 3.35 ฟังก์ชัน Index Array..... | 90 |
| 3.36 ตัวอย่างการใช้งานฟังก์ชัน Index Array..... | 90 |
| 3.37 การตั้งค่าในส่วนของ DAQ Assistant..... | 91 |
| 3.38 แผนผังแสดงกระบวนการทำงาน..... | 92 |
| 3.39 หน้าต่างแสดงผลระหว่างการประมวลผล..... | 93 |
| 4.1 ต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้..... | 94 |
| 4.2 กราฟแสดงผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระกรรม..... | 95 |
| 4.3 กราฟแสดงผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะมีภาระกรรม..... | 96 |
| 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวัดกับความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. สำหรับ โครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 1..... | 97 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.5 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวัดกับความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. สำหรับ โครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 2 | 98 |
| 4.6 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวัดกับความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. สำหรับ โครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 3 | 99 |
| 4.7 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวัดกับความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. สำหรับ โครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 4 | 100 |
| 4.8 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวัดกับความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. สำหรับ โครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 5 | 101 |
| 4.9 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวัดกับความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. สำหรับ โครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 6 | 102 |
| 4.10 | กราฟแสดงสัญญาณแบบขั้นบันได (Step Signals) | 105 |
| 4.11 | กราฟแสดงสัญญาณแบบความชันคงที่ (Ramp Signals) | 106 |
| 4.12 | กราฟแสดงสัญญาณแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Signals) | 107 |
| 4.13 | กราฟแสดงสัญญาณแบบฮาร์มอนิกหลายลูกคลื่น | 108 |
| 4.14 | กราฟแสดงสัญญาณแบบผสม (Compound Signals) | 109 |
| ก.1 | ส่วนประกอบของรังผึ้งส่วนที่ 1 | 116 |
| ก.2 | ส่วนประกอบของรังผึ้งส่วนที่ 2 | 117 |
| ก.3 | รังผึ้ง | 118 |
| ก.4 | Aluminum angle | 119 |
| ก.5 | Aluminum for fix | 120 |
| ก.6 | Shaft 3/8" | 121 |
| ก.7 | แสดงส่วนประกอบของฐานติดตั้งรังผึ้ง | 122 |
| ก.8 | แสดงโครงสร้างของฐานติดตั้งรังผึ้ง | 123 |
| ก.9 | แสดงโครงสร้างของฐานติดตั้งรังผึ้ง | 124 |
| ก.10 | ต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ | 125 |
| ก.11 | ต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ | 126 |
| ข.1 | โปรแกรมจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะไม่มีภาระกรรม | 128 |
| ข.2 | โปรแกรมจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะมีภาระกรรม | 129 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| ข.3 | แสดงรายละเอียดการทำงานในบล็อก PIVQ..... 130 |
| ข.4 | แสดงรายละเอียดการแปลงค่าแรงดัน 3 เฟส..... 131 |
| ข.5 | แสดงรายละเอียดการทำงานในบล็อก Subsystem..... 132 |
| ข.6 | แสดงรายละเอียดการทำงานในบล็อก Subsystem1..... 133 |
| ข.7 | แสดงค่าแรงดันที่จ่ายให้ Subsystem ในสภาวะไม่มีภาระกรรม..... 134 |
| ข.8 | แสดงค่าแรงดันที่จ่ายให้ Subsystem ในสภาวะมีภาระกรรม..... 135 |
| ข.9 | แสดงค่าแรงดันที่จ่ายให้ Subsystem ในสภาวะไม่มีภาระกรรม (ขยาย)..... 136 |
| ข.10 | แสดงค่าแรงดันที่จ่ายให้ Subsystem ในสภาวะมีภาระกรรม (ขยาย)..... 137 |
| ข.11 | แสดงค่ากระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ในสภาวะไม่มีภาระกรรม..... 148 |
| ข.12 | แสดงค่ากระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ในสภาวะมีภาระกรรม..... 139 |
| ข.13 | แสดงค่าแรงบิดของมอเตอร์ในสภาวะไม่มีภาระกรรม..... 140 |
| ข.14 | แสดงค่าแรงบิดของมอเตอร์ในสภาวะมีภาระกรรม..... 141 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | | |
|-------------|---|--|
| L | = | แรงยก (N) |
| D | = | แรงต้าน (N) |
| ρ | = | ความหนาแน่น (kg/m^3) |
| C_L | = | สัมประสิทธิ์แรงยก |
| C_D | = | สัมประสิทธิ์แรงต้าน |
| V | = | ความเร็ว (m/s) |
| A | = | พื้นที่ผิวของปีก (m^2) |
| C_p | = | สัมประสิทธิ์กำลัง |
| τ | = | แรงบิด (Nm) |
| ω | = | ความเร็วเชิงมุม (rad/s) |
| ω_s | = | ความเร็วเชิงโคโรนัส (rad/s) |
| p | = | จำนวนขั้วของมอเตอร์ |
| V_s | = | เฟสโวลเตจ (V) |
| E_{ag} | = | Air gap voltage |
| R_s | = | ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (Ω) |
| L_{ls} | = | Leakage inductance ของขดลวดสเตเตอร์ (H) |
| I_m | = | Stator current (A) |
| N_s | = | จำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ |
| L_m | = | Magnetizing inductance (H) |
| R_r | = | Resistance ของโรเตอร์ (Ω) |
| L_{lr} | = | Leakage inductance ของโรเตอร์ (H) |
| T_{em} | = | Electromagnetic Torque (Nm) |
| δ | = | Torque angle (degree) |
| v/f control | = | Volts/hertz constant control |
| VSD | = | Variable Speed Drives |
| VVVF | = | Variable Voltage Variable Frequency |
| VC | = | Vector Control |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

| | | |
|-----------|---|------------------------------|
| PAM | = | Pulse Amplitude Modulation |
| PWM | = | Pulse Width Modulation |
| P_t | = | ความดันของของไหลทั้งหมด (Pa) |
| P_s | = | ความดันคงที่ (Pa) |
| P_{out} | = | สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน |
| K_p | = | อัตราขยายสัดส่วน |
| I_{out} | = | สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์ |
| K_i | = | อัตราขยายปริพันธ์ |
| D_{out} | = | สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน |
| K_d | = | อัตราขยายสัดส่วน |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความมั่นคงทางพลังงาน ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญที่ทุกประเทศทั่วโลกให้ความสนใจ ซึ่งจากการที่ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่จะคงราคาอยู่ในระดับสูง และมีแนวโน้มที่จะหายากมากขึ้นเรื่อย ๆ จึงทำให้มีการมองหาพลังงานในรูปแบบอื่น มาทดแทนพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิง ซึ่งปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการสรรหาพลังงานทางเลือกอื่น ๆ และนำมาพัฒนาเพื่อใช้ในชีวิตประจำวัน เป็นการลดการพึ่งพาการใช้พลังงานจากต่างประเทศและสร้างความมั่นคงด้านพลังงานให้กับประเทศอีกส่วนหนึ่ง

พลังงานลมถือว่าเป็นพลังงานทางเลือกอีกแบบหนึ่งซึ่งถือว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานจริงได้ และในประเทศไทยก็ได้มีการติดตั้งกังหันลม ทั้งเป็นขั้นตอนการทดลองและติดตั้งเพื่อนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อจ่ายเข้าเครือข่ายพลังงานไฟฟ้าได้จริง อย่างไรก็ตามกังหันลมที่ติดตั้งในที่ต่าง ๆ นั้นล้วนมีลักษณะพิเศษอย่างหนึ่งคือ กังหันแบบหนึ่งจะเหมาะที่จะทำงานที่สภาพภูมิอากาศแบบหนึ่งเท่านั้น ซึ่งตัวแปรที่สำคัญคือลักษณะของลมที่พัดผ่าน เช่นความเร็ว ทิศทาง เป็นต้น ดังนั้นการที่จะออกแบบกังหันลมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบความสามารถของกังหันนั้นที่ระดับความเร็วลมต่าง ๆ และประเมินว่ากังหันลมนี้ ควรจะนำไปใช้ในภูมิประเทศที่มีลักษณะของลมเป็นอย่างไร

ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวข้างต้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่เป็นการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ ในการทดสอบ จะสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วลมให้มีความเร็วลมได้ตั้งแต่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที จนกระทั่งถึงความเร็วสูงสุดเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วลมที่อยู่ในช่วงที่พบบ่อยในประเทศไทย หลังจากการสร้างเครื่องทดสอบที่สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบกังหันลม ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมจะเป็นทั้งแบบขั้นบันได แบบความชันคงที่ และแบบฮาร์โมนิก จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบความเหมาะสมของการใช้ทฤษฎีระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ ผลของการทดสอบ จะได้รับการนำเสนอที่จะสามารถเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมกับทฤษฎีการควบคุมที่ใช้ สำหรับกังหันลมแบบหนึ่งได้ ข้อมูลเหล่านี้จะสามารถนำไปใช้ในการเลือกใช้รูปแบบการควบคุมและกังหันลมที่ดีที่สุดสำหรับลักษณะท้องถิ่น ซึ่งแต่ละท้องถิ่นจะมีรูปแบบของลมและการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันออกไป ผลที่ได้จะช่วยในการสร้างกังหันลมให้เหมาะกับท้องถิ่นนั้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้นี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะช่วยพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานลมให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตมากยิ่งขึ้น และเป็นอีกหนึ่งพลังงานทางเลือกที่จะสามารถพัฒนาต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยในการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้นี้มีวัตถุประสงค์หลักๆ ในการวิจัย ดังต่อไปนี้

1.2.1 ศึกษาและสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์

1.2.2 ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ควบคุมรูปแบบความเร็วลมได้ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ และวิเคราะห์ผล

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบจริงและการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์เพื่อปรับแก้ให้ได้ต้นแบบที่ดีที่สุด

1.2.4 สามารถออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วิเคราะห์การปรับเปลี่ยนรูปแบบความเร็วลมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

1.3.2 การวิเคราะห์การปรับเปลี่ยนรูปแบบความเร็วลมจะทำการเปรียบเทียบความเหมาะสมโดยการใช้ทฤษฎีควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์

1.3.3 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมจะเป็นแบบขั้นบันได แบบความชันคงที่ และแบบฮาร์โมนิก

1.3.4 เปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมกับทฤษฎีการควบคุมที่ใช้สำหรับกึ่งหุ่นยนต์แบบหนึ่ง เพื่อสามารถนำไปเลือกใช้รูปแบบการควบคุม และกึ่งหุ่นยนต์ที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละท้องถิ่น

1.3.5 ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SolidWorks 2011, LabVIEW 2013 และ MATLAB 2009a ในการช่วยวิเคราะห์ผล

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบเครื่องต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์

1.4.3 สร้างเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้

- 1.4.4 ออกแบบอุปกรณ์ควบคุมที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนรูปแบบความเร็วลม
- 1.4.5 เปรียบเทียบรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมกับทฤษฎีการควบคุมที่ใช้
- 1.4.6 ปรับแก้ต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้
- 1.4.7 สรุปผลและจัดทำเอกสารรายงานการวิจัย

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

อาคารเครื่องมือ 4 และ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้เครื่องต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้
- 1.6.2 ได้รูปแบบการปรับเปลี่ยนความเร็วลม ทั้งแบบขั้นบันได แบบความชันคงที่ และแบบฮาร์โมนิก พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับทฤษฎีการควบคุมที่ใช้สำหรับกังหันลมแบบหนึ่ง



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยฉบับนี้ และยังคงกล่าวถึงความจำเป็นของการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานลมในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งมีการค้นคว้าและวิจัยในด้านนี้มาเป็นระยะเวลานาน แต่ในปัจจุบันกังหันลมที่นำมาใช้ในประเทศไทย พบว่ายังมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากกังหันลมแบบหนึ่งจะเหมาะสมกับความเร็วลมหนึ่ง ๆ เท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ นั่นคือเพื่อทำการทดสอบกังหันลมในรูปแบบความเร็วลมที่แตกต่างกันออกไป เพื่อการออกแบบใบพัดกังหันลมให้มีความเหมาะสมกับสถิติลมเฉพาะในพื้นที่ที่ติดตั้ง และพัฒนาประสิทธิภาพของกังหันลมต่อไป

ในส่วนแรกนี้เป็นส่วนที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าเอกสาร รายงานการวิจัย วิทยานิพนธ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ได้ดำเนินการอยู่ และตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่างานวิจัยด้านนี้มีระยะเวลาอันมีบทความและเอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก ซึ่งผู้วิจัยนั้นได้เลือกเฉพาะส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือมีส่วนคล้ายกับงานวิจัยที่กำลังดำเนินการอยู่นี้มานำเสนอเท่านั้น

นอกเหนือจากนั้นส่วนที่สองของในบทนี้ ผู้วิจัยจะนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยจะแบ่งหลัก ๆ เป็นสามส่วนคือในส่วนแรกจะกล่าวถึงพื้นฐานทางด้านอากาศพลศาสตร์ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมและเทคโนโลยีกังหันลมที่ใช้งานในปัจจุบัน สำหรับในส่วนที่สองผู้วิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและวิธีการควบคุมของอุปกรณ์สำคัญที่ใช้งาน อันได้แก่ มอเตอร์ อินเวอร์เตอร์ และเซนเซอร์วัดความเร็วลม และสำหรับส่วนสุดท้าย จะกล่าวถึงพื้นฐานการควบคุมแบบ PID รวมถึงการสร้างสัญญาณจากโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป LabVIEW ของบริษัท National Instrument หรือย่อว่า NI และในส่วนขอโปรแกรม LabVIEW นี้เองจะมี Module สำหรับการวิเคราะห์และประมวลผล สำหรับการใช้งานโปรแกรม LabVIEW นั้นผู้วิจัยไม่ได้อธิบายในส่วนนี้ แต่ในบทต่อไปผู้วิจัยได้อธิบายการทำงานของ SubVI สำเร็จรูปที่สำคัญ เพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถทำความเข้าใจหลักการการทำงาน และสามารถไปประยุกต์ใช้งานต่อไปได้อย่างถูกต้อง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือใกล้เคียงกับการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยต่าง ๆ ได้ดังนี้

Lanzafame and Messina (2007) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้พื้นฐานของทฤษฎี BEM เพื่อทำการออกแบบโรเตอร์ โดยเริ่มต้นจากการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกังหันลม เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ ชนิดของหน้าตัดแพนอากาศ ความโตของใบ มุมปะทะและ มุมบิด เป็นต้น จากนั้นจึงสามารถคำนวณแรงกระทำที่ใบกังหัน รวมทั้งแรงบิด และ พลังงานที่เพลารอเตอร์ อุปสรรคที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความเสถียร คือ กระบวนการในการคำนวณหาค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกน และความน่าเชื่อถือของพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบหน้าตัดแพนอากาศในอุโมงค์ลม อย่างไรก็ตาม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้จากการปรับปรุงทฤษฎี BEM ด้วยแบบจำลอง และ ค่าปรับแก้ต่าง ๆ เช่น แบบจำลองหลัง stall Viterna and Corrigan ตัวประกอบการสูญเสียปลายใบของ Prandtl และ แบบจำลองปรับแก้ค่าการเหนี่ยวนำเชิงแกนของ Buhl ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลแรงบิดจากการทดสอบกังหันลม NREL Phase VI และ ผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ พบว่าผลจากแบบจำลองนี้ค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดสอบ โดยเฉพาะในช่วงความเร็วลมต่ำ แต่ที่ความเร็วลม 13-20 m/s ผลการทำนายต่ำกว่าผลการทดสอบพอสมควรแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ดี และหลังจากความเร็วลม 20 m/s เป็นต้นไปผลการทำนายจึงกลับมาดีอีกครั้ง จึงถือได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถประเมินสมรรถนะของกังหันลมได้อย่างค่อนข้างดีในช่วงความเร็วลมที่กว้าง

วิกันดา ศรีเดช (2007) งานวิจัยนี้มุ่งหามุมปะทะที่ดีที่สุดของใบกังหัน โดยใช้วิธีการเชิงทฤษฎีร่วมกับสถิติลมเฉพาะพื้นที่เพื่อให้ได้งานรายปีสูงสุด วิธีนี้จึงไม่ได้ออกแบบที่ความเร็วลมเพียงจุดเดียวแต่คำนึงถึงความเร็วลมที่เปลี่ยนไปตลอดทั้งปี ทฤษฎีสำคัญที่ใช้คือทฤษฎี Blade element momentum ร่วมกับแบบจำลองชดเชยการสูญเสียการไหลเพื่อปรับแก้การไหลเชิงอุดมคติให้สอดคล้องกับความเป็นจริงยิ่งขึ้น ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในภาษา MATLAB บนพื้นฐานของทฤษฎีดังกล่าว ความน่าเชื่อถือของโปรแกรมได้จากการเปรียบเทียบการทำนายกับผลการทดลองของกังหันลมในสองลักษณะคือกังหันลมแบบใบตรงและกังหันลมแบบใบบิด ได้ใช้โปรแกรมค้นหาหามุมปะทะที่ดีที่สุด สถิติลมอันหนึ่ง โดยการปรับมุมปะทะไปจนกระทั่งได้งานรายปีสูงสุด จากนั้นได้คำนวณหามุมปะทะที่ดีที่สุด ณ กรณีที่สถิติลมเปลี่ยนไปจากเดิมโดยยังมีความเร็วลมเฉลี่ยเท่าเดิมแต่มีความแตกต่างของสถิติลมต่างไปจากเดิม พบว่ามุมปะทะที่ดีที่สุดเปลี่ยนไปจากเดิม ทั้งนี้เป็นสาเหตุจากการที่ค่าความเร็วลมที่ทำให้ความหนาแน่นกำลังงานลมสูงสุดเปลี่ยนไปตามความแตกต่างของสถิติลม พบว่าการปรับมุมปะทะเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลให้ได้งานรายปีต่างกันพอสมควรในสถิติลมที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐศาสตร์ของกังหันลมได้มากพอสมควร

ชโลธร ธรรมแท้ (2009) วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการพัฒนาวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamic หรือ CFD) ในระบบพิกัด 3 มิติให้มีความแม่นยำสำหรับการทำนายผลของ

การไหลผ่านกังหันลมแกนนอน โดยมุ่งหมายเพื่อใช้ในการสอบเทียบการออกแบบเชิงทฤษฎีของกังหันลม การศึกษาเน้นไปที่อิทธิพลของปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแม่นยำของ CFD คืออัลกอริทึม ขนาดของโดเมน กริด และ แบบจำลองความปั่นป่วน ซึ่งก่อนที่จะนำไปใช้เป็นตัวสอบเทียบระบบอื่น ได้นั้นจะต้องสอบเทียบความแม่นยำของ CFD เสียก่อน โดยใช้ข้อมูลการทดลองที่น่าเชื่อถือซึ่งในที่นี้ใช้การทดสอบกังหันลมของ National Renewable Energy Laboratory แห่งสหรัฐอเมริกา (NREL) งานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบ และ ทำนายประสิทธิภาพกังหันลมแกนนอนโดยใช้ทฤษฎี Blade-Element Momentum (BEM) อีกด้วยโดยมีการเสริมแต่งทฤษฎีหลักด้วยทฤษฎีย่อยต่าง ๆ ที่ทันสมัย เพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำให้กับการทำนายผล ได้ทำการตรวจสอบความแม่นยำของโปรแกรมนี้เทียบกับผลการทดลอง และ การทำนายของโปรแกรม BEM อื่นในวรรณกรรม พบว่ามีความแม่นยำเป็นที่น่าพอใจมาก กระบวนการออกแบบกังหันลมด้วยทฤษฎี และ สอบเทียบการออกแบบด้วย CFD ที่น่าเชื่อถือนี้จะสามารถนำไปใช้เพื่อออกแบบกังหันลมแกนนอนในกรณีทั่วไปได้อย่างมั่นใจ และ รวดเร็วเพราะช่วยลดเวลาในการทดลองลงไปได้มาก ณ จุดนี้ได้ใช้โปรแกรม BEM และ CFD ที่พัฒนาขึ้นค้นหาจุดประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ คือ มุม Pitch ความยาว Chord และ ความเร็วปลายปีก ได้ใช้วิธี BEM ปรับการออกแบบกังหันลมที่มีอยู่แล้วเสียใหม่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในขณะที่มีกำลังประเมิน (Rated Power) ต่ำลง แล้วทำการสอบเทียบด้วย CFD ที่ได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองความปั่นป่วนให้ดีขึ้นซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

นนทวุฒิ ปรีชาวุฒิ (2009) งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแบบแกนนอนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการปรับมุมใบทฤษฎีเบลคอดิเมนต์โมเมนต์ ซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานในการคำนวณสมรรถนะ และออกแบบใบกังหันที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน ถูกนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของกำลังงาน, ประสิทธิภาพ, แรงบิด ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการปรับมุมใบ ในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ ผลของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การปรับมุมใบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกังหันลมได้ อย่างไรก็ตามใบกังหันจะต้องถูกออกแบบเป็นพิเศษเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพดีที่สุดความสัมพันธ์ของการปรับมุมต่อสมรรถนะที่ได้จากการคำนวณในงานวิจัยชิ้นนี้ สามารถนำไปเป็นแนวทางการออกแบบรูปร่างของใบกังหัน ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานที่มีการปรับมุมใบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานได้เป็นอย่างดี

เมื่องมนต์ เนตรหาญ และ อำไพศักดิ์ ทิบุญมา (2011) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า ให้มีความเหมาะสมกับความเร็วลมต่ำตามศักยภาพพลังงานลมของจังหวัดนครพนม โดยได้ออกแบบกังหันลมชนิดแกนนอน มีพิกัดในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 800 วัตต์ ทำการติดตั้งเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพกังหันลม ที่ระดับความสูง 14 เมตร ผลจากการศึกษาพบว่ากังหันลมเริ่มผลิตกระแสไฟฟ้าที่ความเร็วลม 2.0 เมตร/วินาที กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 785 วัตต์ ที่ความเร็วลม 11.5 เมตร/วินาที โดยมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดเท่ากับ 0.34 ที่ความเร็วลม 3.5 เมตร/วินาที ในส่วนของการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า ต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย เท่ากับ 15.0

บาท และมีระยะคืนทุน เท่ากับ 26.6 ปี นอกจากนั้นยังพบว่า การผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้กังหันลม จะมีความน่าสนใจในการลงทุนก็ต่อเมื่อค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยมากกว่า 8 บาทต่อหน่วย

กองพล อารีรักษ์, อาทิตย์ ศรีแก้ว และสราวุฒิ สุจิตจร (2002) ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) หรือเรียกโดยย่อว่า GA ซึ่งเป็นวิธีที่นอกจากจะช่วยลดความยุ่งยากในการคำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์แล้ว วิธีการดังกล่าวยังมีความสามารถในการหาค่าพารามิเตอร์ได้อย่างแม่นยำและเหมาะสมที่สุดด้วย

Jianwen Shao, Dennis Nolan, and Thomas Hopkins (2002) นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยตรงจากขั้วของมอเตอร์ทั้ง 3 ขั้ว โดยใช้ข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสผ่านวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์โดยตรง ใช้ช่วงเวลาของเฟสที่ไม่ถูกเหนี่ยวนำแทนที่จะใช้วงจรรองความถี่ หลักการของกราวด์เสมือนนี้ทำให้ไม่ต้องใช้วงจรรองความถี่รับกวนออก และสามารถใช้ได้กับช่วงความเร็วที่กว้างขึ้น

Chang-Liang Xia and Wei Chen (2005) นำเสนอการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่ความเร็วต่ำด้วยเครือข่ายประสาทเทียม ในงานวิจัยนี้ใช้เครือข่ายประสาทเทียมเพื่อประมาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับจากกระแส และแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟส ซึ่งในความเร็วต่ำไม่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับได้โดยตรง และนำมาหาจุดผ่านศูนย์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับจะสามารถนำมาประมาณคอมมิวเตชันฟังก์ชัน และนำไปควบคุมการทำงานมอเตอร์ได้

Alfeu J. Sguarezi Filho, Jose L. Azcue P. and Ernesto Ruppert (2006) ได้นำเสนอ วิธีการ ในการออกแบบและปรับแต่ง PI regulators สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้รูปแบบฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน เมื่อเครื่องทำงานที่ความเร็วต่ำแนวคิดของ complex transfer function จะช่วยควบคุม โดยใช้การตอบสนองของฟังก์ชันความถี่ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นผลการดำเนินงานที่น่าพอใจของการควบคุมเนื่องจากความเร็วมอเตอร์เป็นไปตามเงื่อนไข ดังนั้นการออกแบบของ PI regulators มีประสิทธิภาพการทำงานที่ยอมรับได้ แม้ว่าการวิเคราะห์รายละเอียด การพิจารณาแบบพารามิเตอร์และการดำเนินงานอื่น ๆ อีกหลายตัว จะต้องมีการออกแบบแต่ละความเร็วที่ต้องการ หรือแต่ละช่วงความเร็ว ในงานวิจัยเป็นเพียงการใช้ PI regulators ในย่านความเร็วต่ำ จึงเหมาะในการควบคุม IM DTC- SVM ที่มีความซับซ้อนน้อย ดังนั้นแนวคิด complex transfer function ถือเป็นเครื่องมือที่น่าสนใจสำหรับการออกแบบ และปรับแต่ง PI regulators ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอนาคต

Touforti, R., Meziame, S., Benalla, H. (2007) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมแรงบิดโดยตรงสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยวิธีการปัญญาเชิงคำนวณ โดยใช้หลักการควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control) ร่วมกับวิธีพีซีเอสแอลเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรง ร่วมกับวิธีนิวรอนเน็ตเวิร์ค ผลที่ได้ คือ ลดแรงบิดกระเพื่อมและเพิ่มประสิทธิภาพ โดยที่การควบคุม

แรงบิดโดยตรงร่วมกับวิธีฟัซซีลอจิกจะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการควบคุมแรงบิดโดยตรงร่วมกับวิธีนิวรอลเน็ตเวิร์ค

Fallahi, M., and Azadi (2009) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี โดยวิธี Sliding mode fuzzy สำหรับการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากความไม่แน่นอนของแบบจำลองและการรบกวนจากภายนอกและยังมีความสามารถในการควบคุมระบบไม่เป็นเชิงเส้นและระบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต วิธีการนี้ยังใช้สำหรับการควบคุมที่จะเอาชนะความไม่แน่นอนที่ปรากฏเกิดขึ้นในแบบจำลองและความเสียหายต่อระบบ วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่ชาญฉลาดจะใช้ในการแก้ไขข้อบกพร่องเหล่านี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบเลื่อน โดยใช้ตรรกะแบบคลุมเครือ ประโยชน์ของงานวิจัยนี้คือ ปรับปรุงผลการตอบสนองของระบบในสภาวะที่มีภาระกรรณภายนอกมากระทำ พร้อมทั้งนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพโครงสร้างของระบบควบคุม

Jawad Faiz and Ghazanfar Shahgholian (2009) งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการส่งออกอินเวอร์เตอร์แบบหลายตัวกรองกับภาระกรรณไม่เชิงเส้น โดยอินพุตเข้าอินเวอร์เตอร์เป็นกระแสและแรงดันไฟฟ้า ในการตรวจสอบนำเสนอผลการจำลองแบบต่างๆ โดยใช้ Matlab / Simulink ภายใต้ภาระกรรณไม่เชิงเส้น

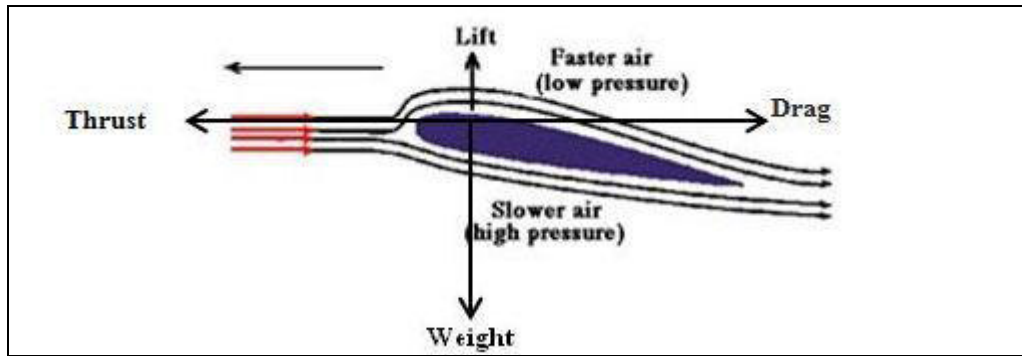
Sangam Singh (2011) ในบทความนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยทำการจำลอง ขับมอเตอร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป LabVIEW โดยผลการจำลองที่ได้เป็นประโยชน์ในการศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

2.3 ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์

2.3.1 อากาศพลศาสตร์

อากาศพลศาสตร์เป็นสาขาของกลศาสตร์ของไหลที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวของอากาศและของเหลวที่เป็นก๊าซอื่น ๆ และมีแรงที่กระทำต่อวัตถุในการเคลื่อนไหวที่สัมพันธ์กับของเหลว หลักการพื้นฐานของอากาศพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง มีดังนี้

(1) แรงยก (Lift) เกิดขึ้นโดย ความกดอากาศต่ำที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวด้านบนของปีก เมื่อเปรียบเทียบกับความกดอากาศที่พื้นผิวด้านล่างของปีก นั่นคือ แรงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวด้านบนของปีก น้อยกว่าแรงที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของปีกด้านล่าง ตามหลักของเบอร์นูลลี ทำให้เกิดแรงยกขึ้นข้างบนที่ปีก ลักษณะรูปร่างของปีกถูกออกแบบมาให้อากาศที่พัดไหลผ่านด้านบนของปีก จะมีระยะทางที่อากาศต้องเดินทางมากกว่า จึงทำให้ต้องไหลผ่านเร็วกว่าด้านล่าง ทำให้เกิดความกดอากาศ ดังนั้นจึงทำให้ปีกถูกยกขึ้น แรงยกก็คือ แรงที่อยู่ตรงข้ามกับน้ำหนักหรือ แรงดึงดูดของโลก



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดแรงยกและแรงต้าน [http://rmutphysics.com]

$$\text{Lift Equation} \quad L = C_L \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A \quad (2.1)$$

L = Lift

ρ = Density of Air

C_L = Lift Coefficient

V = Velocity of Air

A = Wing Area

(2) แรงต้าน (Drag) เป็นแรงที่กระทำตรงข้ามกับแรงที่ขับเคลื่อนไปข้างหน้า โดยเฉพาะเป็นแรงที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในอากาศ มีทิศทางขนานกับวัตถุที่เคลื่อนที่ นั่นก็คือ แรงเสียดทานของอากาศที่ผ่านส่วนต่างๆ แรงต้านเกิดจากการกระทบของอากาศ การเสียดทานของพื้นผิวและแรงดูดเนื่องจากอากาศแทนที่

$$\text{Drag Equation} \quad D = C_D \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A \quad (2.2)$$

D = Drag

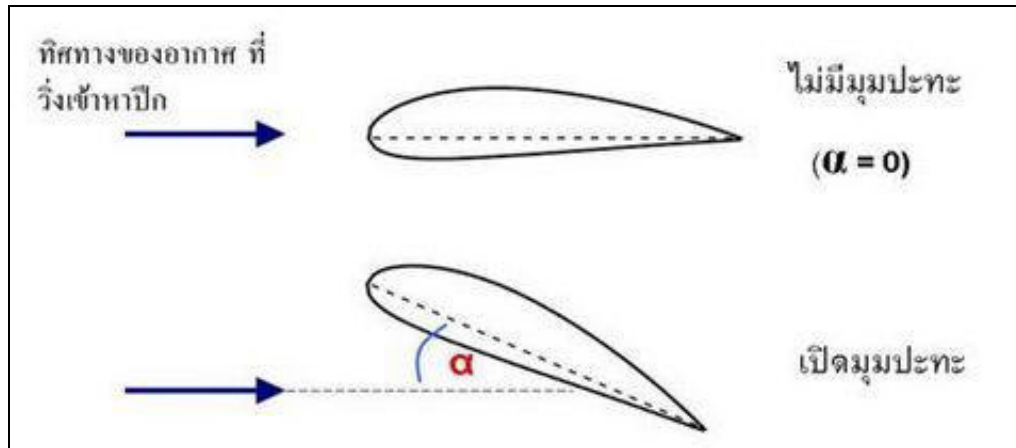
ρ = Density of Air

C_D = Drag Coefficient

V = Velocity of Air

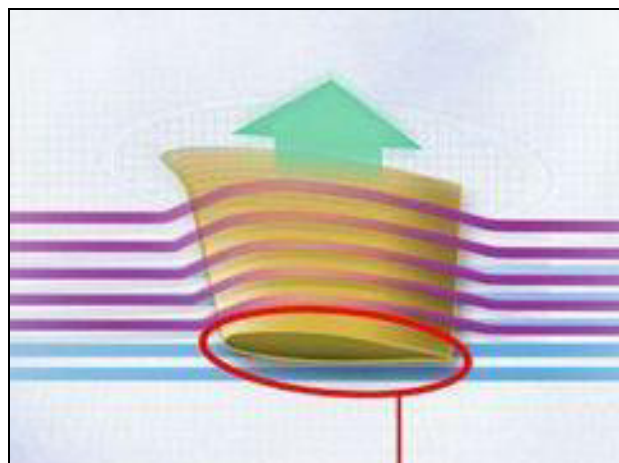
A = Wing Area

(3) มุมปะทะ (Angle of Attack) คือ มุมระหว่าง ทิศทางการเคลื่อนที่ กับ เส้นสมมุติ (chord line) และทิศทางสัมพัทธ์ของลม (relative wind) โดยที่มุมปะทะนี้จะเป็นส่วนสำคัญในทำให้เกิดแรงยก เมื่อลมมาปะทะที่ปีก



รูปที่ 2.2 แสดงการเปิดมุมปะทะของปีก [http://www.electron.rmutphysics.com]

(4) แพนอากาศ (Airfoil) คือ ลักษณะพื้นผิวของปีกซึ่งมีความโค้ง ซึ่งออกแบบเพื่อก่อให้เกิดแรงยกเมื่ออากาศไหลผ่าน ซึ่งรูปร่างโค้งเว้าของ airfoil นั้นมีหลากหลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป ตามการนำไปใช้งาน

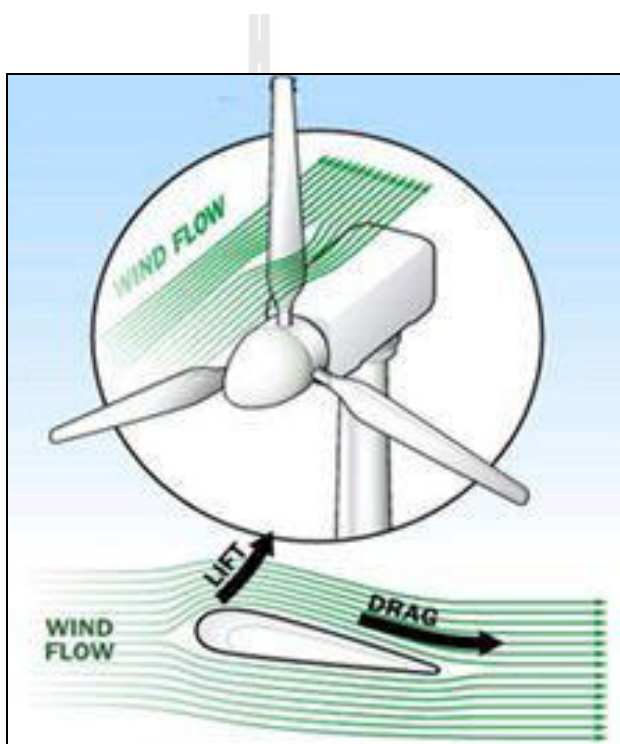


รูปที่ 2.3 แสดงส่วนของแพนอากาศ [http://www.electron.rmutphysics.com]

2.3.2 อากาศพลศาสตร์ของกังหัน (Turbine Aerodynamics)

ในกังหันลมสมัยใหม่ใบพัดกังหันมีลักษณะคล้ายกับปีกของเครื่องบิน จึงต้องอาศัยหลักการทางอากาศพลศาสตร์เพื่อสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานผลิตพลังงานจากลมให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด แรงพื้นฐานของอากาศพลศาสตร์จะมีอยู่สองแรงที่ทำให้กังหันลมเกิดการหมุนได้งาน ได้แก่ แรงยก (Lift) และแรงต้าน (Drag)

- แรงยก ซึ่งเป็นแรงที่กระทำทิศทางตั้งฉากกับการไหลของลม
- แรงต้าน ซึ่งเป็นแรงที่กระทำทิศทางขนานไปกับการไหลของลม



รูปที่ 2.4 แสดงแรงยก แรงต้านที่มีผลต่อการหมุนของกังหัน [<http://www.tpa.or.th>]

ใบของกังหันลมมีลักษณะคล้ายกับปีกของเครื่องบินมีการออกแบบแผนอากาศ ในแผนอากาศผิวด้านบนของใบพัด มีลักษณะ โค้ง ขณะที่ด้านล่างมีลักษณะพื้นผิวแบนราบ

หลักการ คือ เมื่อลมเคลื่อนที่มาปะทะกับใบพัด ลมจะพัดผ่านทั้งผิวโค้งด้านบนปีก และผิวเรียบด้านล่างใต้ปีกไปพร้อมกัน ลมที่วิ่งบนปีกจะมีความเร็วที่สูงกว่าลมที่วิ่งใต้ปีก เมื่อลมเคลื่อนที่ผ่านทั้งผิวโค้งด้านบน และผิวด้านล่างลมจะวิ่งไปบรรจบที่ปลายปีกใบพัดในเวลาเดียวกัน ผลที่เกิดขึ้นก็คือผิวโค้งด้านบนมีความเร็วลมสูงความกดดันอากาศจึงต่ำ เมื่อเทียบกับผิวเรียบด้านล่างซึ่งมีความกดดันอากาศที่สูงกว่า ทำให้เกิดแรงยกดันให้ใบพัดมีการยกตัว หรือมีแรงพยายามหมุนใบพัด อัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้าน เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการออกแบบประสิทธิภาพของใบพัดกังหัน

2.3.3 อากาศพลศาสตร์ของอุโมงค์ลม (Wind Tunnel Aerodynamics)

อุโมงค์ลม เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาการไหลของอากาศผ่านวัตถุแข็ง โดยอากาศจะถูกเป่าหรือสูบผ่านท่อนำลมที่มีวัตถุภายใต้การทดสอบอยู่ และมีช่องสำหรับสังเกตการณ์หรือมีอุปกรณ์วัดติดตั้งอยู่ อุโมงค์หรือท่อที่มีลมเคลื่อนที่ลอดผ่าน มีไว้ก็เพื่อทดลองหรือทดสอบทางอากาศ ยกตัวอย่างเช่น ในการผลิตเครื่องบินขึ้นมาต้องออกแบบปีกเครื่องบินซึ่งเป็นหัวใจหลักที่ทำให้เครื่องบินยกตัวสูงขึ้น และปีกเครื่องบินจะต้องมีรูปร่าง ส่วนโค้ง ส่วนเว้าเท่าใดจึงจะสามารถยกน้ำหนักมหาศาลของตัวเครื่องบิน และสิ่งที่บรรทุก ก็จะใช้อุโมงค์ลมเป็นตัวทดสอบ อาจจะนำแบบจำลองขนาดเล็กหรือต้นแบบที่มีอัตราส่วนเท่าของจริง มาติดตั้งในอุโมงค์ลม แล้วก็ดูผลการทดลองเมื่อปล่อยลมผ่าน และลมนี้สามารถปรับให้มีความเร็วต่าง ๆ ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.5 อุโมงค์ลมใหญ่ที่สุดในโลกที่สถาบันวิจัยแลงเลซของนาซ่า

(NASA's Langley Research Center) [<http://www.scimath.org>]

2.4 กังหันลม

กังหันลม คือเครื่องจักรกลอย่างหนึ่งที่สามารถรับและแปลงพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกลได้ และนำพลังงานกลมาใช้เพื่อสูบน้ำโดยตรงหรือผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า การพัฒนากังหันลมเพื่อนำมาใช้ประโยชน์เริ่มมีมาตั้งแต่สมัยอียิปต์โบราณจนถึงยุคปัจจุบัน โดยการออกแบบกังหันลมต้องอาศัยความรู้ทางด้านพลศาสตร์ของลมและหลักวิศวกรรมศาสตร์ในแขนงต่างๆ เพื่อให้ได้กำลังงาน พลังงาน และประสิทธิภาพสูงสุด

2.4.1 พลังงานลม

ลมเป็นแหล่งพลังงานสะอาดชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด ในปัจจุบันได้มีการใช้ประโยชน์จากพลังงานลมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า ทดแทนการผลิตด้วยพลังงานจากซากดึกดำบรรพ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแถบประเทศยุโรปได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ ซึ่งกังหันลมขนาดใหญ่แต่ละตัวสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 4-5 เมกะวัตต์ และนับวันจะยิ่งได้รับการพัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สำหรับประเทศไทยการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านพลังงานลมยังมีค่อนข้างน้อยมาก อาจเป็นเพราะศักยภาพพลังงานลมในประเทศเราไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับประเทศอื่น ๆ อย่างไรก็ตามหากเรามีพื้นฐานความรู้ก็สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลังงานลมร่วมกับแหล่งพลังงานอื่น ๆ เพื่อความมั่นคงในการผลิตไฟฟ้าได้ อย่างเช่นที่สถานีไฟฟ้าแหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต ได้ทดลองใช้กังหันลมผลิตไฟฟ้าร่วมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์และต่อเข้ากับระบบสายส่ง ดังนั้นการศึกษา เรียนรู้ วิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานลมก็เป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยลดการใช้พลังงานซากดึกดำบรรพ์จะเป็นการช่วยประเทศไทยลดการนำเข้าแหล่งพลังงานจากต่างประเทศอีกทางหนึ่ง

2.4.2 ส่วนประกอบหลักของกังหันลม (Part of a wind turbine)

กังหันลมมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

(1) ใบพัดโรเตอร์ (Rotor blades) ใบพัดเป็นชิ้นส่วนพื้นฐานที่สำคัญที่สุดของระบบ ในรูปแบบพื้นฐาน เป็นส่วนที่ปะทะกับลม (ในการออกแบบใบพัดสมัยใหม่ มีการออกแบบที่ทันสมัยกว่าในการปะทะกับลม) เมื่อแรงลมทำให้ใบพัดเคลื่อนที่ โรเตอร์จะหมุนเปลี่ยนไปเป็นพลังงาน



รูปที่ 2.6 แสดงใบพัดของกังหันลม [<http://pear1234.blogspot.com>]

(2) เพลา (Shaft) เพลาของกังหันลมต่อกับจุดศูนย์กลางของโรเตอร์ เมื่อโรเตอร์ หมุนเพลา ก็จะหมุนตามไปด้วย ฉะนั้นโรเตอร์หมุนเป็นงานทางกล เพลาหมุนที่ก่อให้เกิดพลังงาน ซึ่งจะต่อไปที่เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (Electrical generator) ในส่วนท้าย

(3) ระบบเบรก (Brake) เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการหยุดหมุนของใบพัดและเพลาแกนหมุนของกังหันลม

(4) คันบังคับเพลาแกนหมุน (Low speed shaft และ High speed shaft) เป็นส่วนที่คอยควบคุมความเร็วของเพลาแกนหมุนให้หมุนช้าหรือเร็วของใบพัดและส่งผ่านระบบส่งกำลัง

(5) ห้องส่งกำลัง (Gear box) เป็นระบบที่คอยปรับเปลี่ยนและควบคุมความสัมพันธ์ของความเร็วในการหมุนระหว่างเพลาแกนหมุนกับเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(6) ตัวควบคุม (Controller) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานเครื่องวัดความเร็วลม

(7) ห้องเครื่อง (Nacelle) เป็นห้องควบคุมขนาดใหญ่ อยู่ส่วนหลังของใบพัด ใช้บรรจุระบบต่างๆ เช่น ระบบเกียร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบเบรก และระบบควบคุม

(8) แกนคอหมุนรับทิศทางลม (Yaw drive) เป็นตัวควบคุมการหมุนของห้องเครื่อง เพื่อให้ใบพัดปรับรับทิศทางลม โดยมีมอเตอร์ (Yaw motor) เป็นตัวช่วยในการปรับทิศทาง

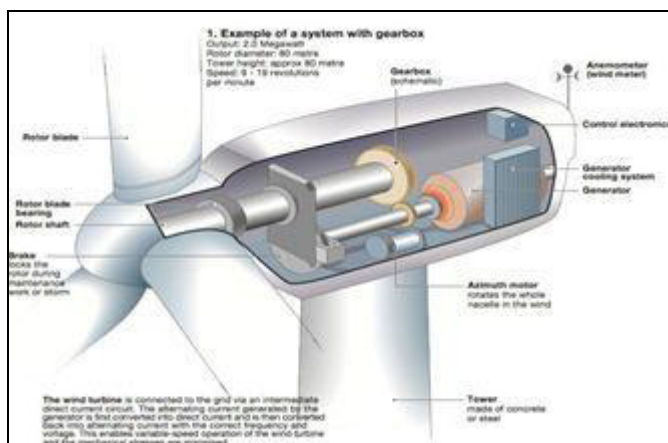
(9) เสาหรือหอคอย (Tower) เป็นส่วนที่แบกรับอุปกรณ์ทั้งหมดที่อยู่ข้างบน

(10) ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic system) ช่วยในการชะลอการหมุนและการหยุดหมุนของใบพัด

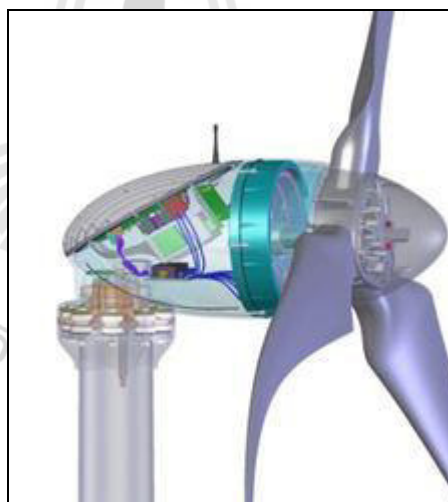
(11) ระบบระบายความร้อน (Cooling system) มีไว้สำหรับการระบายความร้อนจากการทำงานของระบบซึ่งเกิดความร้อนจากการทำงานอย่างต่อเนื่อง

(12) ชุดเครื่องมือสำหรับการวัดความเร็วลม (Anemometer) เพื่อวัดและเก็บข้อมูลความเร็วลมซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่กับชุดแพนหาง (Vane)

(13) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ใช้คุณสมบัติของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction) ที่ก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้า มีความต่างศักย์ในการประจุไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โวลต์ (Volt) เป็นแรงที่เคลื่อนที่ประจุไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้า เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปจุดหนึ่ง ดังนั้นกำเนิดแรงดันเป็นผลให้มีการกำเนิดกระแสไฟฟ้าด้วย



รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีชุด Gear box
[<http://thaiwindmill.com>]

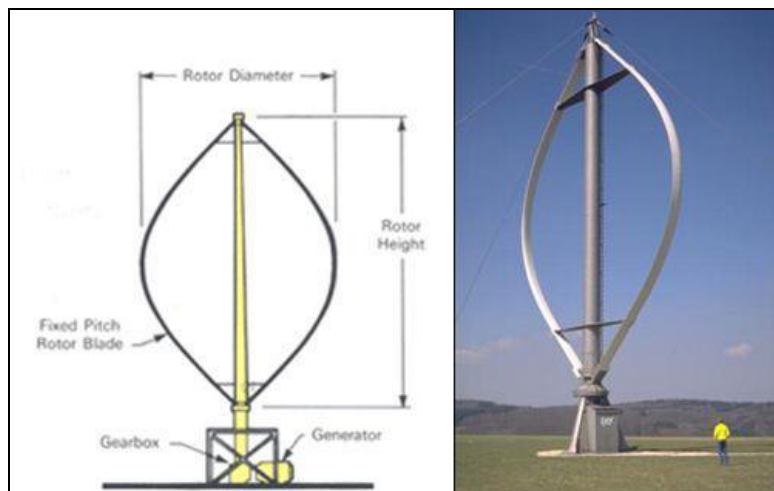


รูปที่ 2.8 แสดงกังหันลมขนาดเล็ก ของ Sky stream [<http://thaiwindmill.com>]

2.4.3 รูปแบบเทคโนโลยีกังหันลม

กังหันลมสามารถแบ่งออกตามลักษณะการจัดวางแกนของใบพัดได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

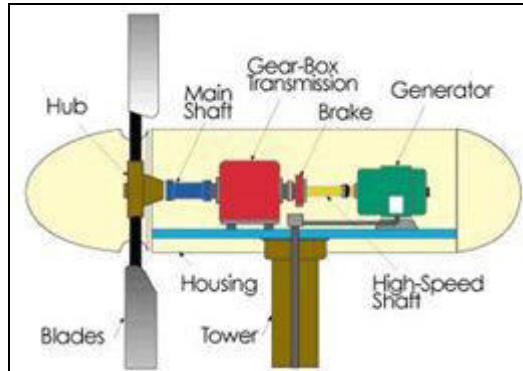
(1) กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbines (VAWTs)) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุน และ ใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ เป็นรูปแบบเดียวเท่านั้นในการผลิตเชิงพาณิชย์ คือ กังหันแบบดาร์ริอัส (Darrieus turbine) ซึ่งมองดูผิวเผินคล้าย กับเครื่องตีไข่



รูปที่ 2.9 แสดงกังหันลมแนวแกนตั้ง [http://www3.egat.co.th]

ใน VAWT เพลลาถูกตั้งในแนวตั้ง ตั้งฉากกับพื้น ใบพัดจะหมุนเป็นแนวเดียวกับลมเสมอ ซึ่งแตกต่างกับแบบเพลลานอน แต่จุดมุ่งหมายเหมือนกัน คือผลิตพลังงานไฟฟ้า กังหันลมเพลลาตั้งไม่สามารถออกตัวได้ด้วยตัวของมันเอง มันจะต้องมีตัวช่วยให้หมุนกังหัน โดยมีระบบไฟฟ้าช่วยหมุน อาจจะเป็นมอเตอร์ช่วยจุดให้หมุน หรือเป็นเครื่องยนต์เล็ก มีโครงสร้างสูง และมีขนาดใหญ่เพื่อเป็นที่รองรับใบกังหัน ดังนั้นโรเตอร์ใบพัดจำเป็นต้องยกให้สูงเพื่อรับลมที่จุดสูงที่สุด ความเร็วลมที่ใกล้พื้นดินจะมีความเร็วต่ำ แต่ถ้าต้องให้ใบพัดลงใกล้พื้นดิน ข้อดีก็คือบำรุงรักษาง่าย สะดวกในการทำงาน แต่ข้อเสียคือใบพัดรับลมต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ทำให้ต้องใช้พื้นที่มากขึ้น กังหันลมเพลลาตั้ง โดยทั่วไปแล้วจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่า แบบเพลลานอน ประโยชน์ของกังหันลมเพลลาตั้งในด้านอื่น อาจใช้กังหันที่มีขนาดเล็ก นำมาใช้เพื่อการสูบน้ำในชนบท แต่ส่วนใหญ่ก็นำมาใช้ในการผลิตในเชิงพาณิชย์

(2) กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbines (HAWTs)) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ โดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากรับแรงลม ในแบบเพลลานอนนี้ จะมีกล่องเฟืองทด เพื่อลดความเร็วกังหัน เพื่อใช้หมุนเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า มีกลไกบังคับตัวกังหันลมสามารถทำให้กังหันหมุนรับกับทิศทางลมตลอดเวลา โดยมีมอเตอร์คอยควบคุมการหมุนไปทางซ้ายหรือขวา (หรืออาจจะเป็นทางกลก็ได้ถ้ากังหันมีขนาดเล็กไม่ใหญ่นัก) มีอุปกรณ์ควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์คอยหาทิศทางลมเพื่อให้กังหันลมปะทะลมได้อย่างเต็มที่ ความสูงของกังหันลมแบบเพลลานอน โดยทั่วไปอยู่ที่ 80 เมตรจากภาคพื้นดิน



รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบกังหันลมเพลานอน [<http://www.tpa.or.th>]

2.4.4 ประสิทธิภาพกังหันลม

กังหันลม เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ในอากาศที่วิ่งผ่าน ให้เป็นพลังงานกลที่ได้จากเพลากองกังหันลม ดังนั้นประสิทธิภาพของกังหันลมจึงเป็นการแสดงถึงความสามารถในการที่จะเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ในลม ให้เป็นพลังงานกล

อย่างไรก็ตาม การวัดประสิทธิภาพของกังหันลมนั้นเราไม่นิยมที่จะใช้นิยามตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ คือใช้พลังงานเพลาคือค่าที่ได้หารด้วยพลังงานจลน์ของลมที่เป็นค่าที่ให้ แต่นิยมที่จะใช้กลุ่มไม่มีมิติตามนิยามกลุ่มไพน์ (Buckingham Pi Theorem) โดยจะใช้กลุ่มไม่มีมิติเป็นกำลังงานที่ได้จากเพลาคือค่ากำลังงานของอากาศที่วิ่งเข้าสู่กังหัน ตัวแปรไม่มีมิติตัวนี้เราเรียกว่าสัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient, C_p) ซึ่งนิยามว่า

$$C_p = \frac{\text{Shaft Power Output}}{\text{Wind Power Input}} \quad (2.3)$$

สำหรับกำลังที่ได้จากเพลานั้นได้จากแรงบิดคูณด้วยความเร็วรอบของเพลานั้นคือ

$$\text{Shaft Power} = \tau \cdot \omega \quad (2.4)$$

โดยที่ τ : แรงบิด (N*m)

ω : ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

สำหรับกำลังของลมนั้น หากจากพลังงานจลน์ของอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของกังหันในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งจะได้เท่ากับ

$$\text{Wind Power Input} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.5)$$

เมื่อ ρ : ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
 A : พื้นที่หน้าตัดของกังหันลม นั่นคือพื้นที่วงกลมที่มีใบกลีบเป็นรัศมี (m^2)
 V : ความเร็วลม (m/s)

เป็นที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่าประสิทธิภาพตามนิยามของกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เท่านั้น อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์กำลังนี้อาจจะแตกต่างกับการนิยามประสิทธิภาพโดยทั่วไปอยู่ที่ค่านี้สามารถที่จะมีค่ามากกว่าหนึ่งได้ สำหรับกังหันลมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีใช้กันทั่วไปในปัจจุบันนี้ จะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังอยู่ที่ประมาณ 0.3-0.4

2.4.5 กังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย

(1) บ้านอ่าวไผ่ อำเภอสรรพยา จังหวัดชลบุรี การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับพลังงานลมทั่วประเทศ ผลการศึกษาสรุปได้ว่าความเร็วลมในประเทศไทยโดยเฉลี่ยจัดอยู่ในระดับปานกลาง-ต่ำ คือ ต่ำกว่า 4 เมตร/วินาที โดยส่วนที่ความเร็วลมสูงสุดจะอยู่ในบริเวณชายฝั่งบริเวณเกาะต่างๆ ในอ่าวไทยและทางภาคใต้ของประเทศ เมื่อทราบข้อมูลเกี่ยวกับพลังงานลมแล้ว การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้ออกแบบสร้างกังหันลมแบบล้อยจกรยาน นำไปติดตั้งทดสอบใช้งานที่ชายฝั่งทะเล บริเวณบ้านอ่าวไผ่อำเภอสรรพยา จังหวัดชลบุรี

(2) แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต สถานีพลังงานทดแทนพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต ในปี พ.ศ. 2526 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้เลือกบริเวณแหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต ซึ่งเป็นจุดที่มีข้อมูลบ่งชี้ว่ามีความเร็วลมเฉลี่ยตลอดปี ประมาณ 5 เมตรต่อวินาที เป็นสถานที่ตั้งของสถานีทดลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม ใช้ชื่อว่า สถานีพลังงานทดแทนพรหมเทพ โดยตั้งอยู่ทางทิศเหนือของแหลมพรหมเทพ ประมาณ 1 กิโลเมตร เหตุผลในการเลือกสถานที่แห่งนี้คือ อยู่ติดกับทะเลได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ นับว่าเป็นตำแหน่งที่รับลมได้เกือบทั้งปี ได้รับความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจากส่วนราชการจังหวัดภูเก็ต ให้ใช้พื้นที่ตลอดมา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526-2535 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตได้เริ่มติดตั้งกังหันลมขนาดเล็ก เพื่อทดสอบการใช้งานที่สถานีแห่งนี้จำนวน 6 ชุด พร้อมทั้งติดตั้ง อุปกรณ์บันทึกข้อมูลคือ Digital Data Logger และ Strip Chart Recorder ไว้อย่างครบถ้วน สำหรับไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็นำมาใช้ให้แสงสว่างในบริเวณสถานีทดลองฯ โดยใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นสรุปได้ว่า การใช้กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าที่บริเวณสถานีพลังงานทดแทนพรหมเทพนี้มีผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ยังคงมีปัญหาเรื่องชิ้นส่วนบางชนิด เช่น ใบกังหันและคลัทช์ถูกป็นชำรุด นอกจากนี้ในบางกรณียังมีปัญหาเรื่องการจัดซื้ออะไหล่จากต่างประเทศอีกด้วย

ในปี พ.ศ. 2531 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) จึงได้กำหนดแผนงานเชื่อมโยงระบบกังหันลมมาผลิตไฟฟ้า เข้าสู่ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ในลักษณะของการใช้งานจริง และเพื่อศึกษาหาประสบการณ์ในการเชื่อมต่อเข้าระบบไปพร้อมๆกัน โครงการ

ดังกล่าวดำเนินไปด้วยดีตามแผนงาน โดยได้รับความร่วมมือจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) และสามารถจ่ายไฟเข้าสู่ระบบได้เมื่อต้นเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2533 นับเป็นครั้งแรกในประเทศไทยที่สามารถนำไฟฟ้าจากพลังงานลมมาใช้งานได้โดยเชื่อมโยงเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า จากความสำเร็จในการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ดังกล่าว ในปี พ.ศ.2533 กฟผ. ได้ติดตั้งกังหันลมขนาดกำลังผลิต 10 กิโลวัตต์ เพิ่มอีก 2 ชุดและเชื่อมโยงเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าเช่นกัน จากประสบการณ์ที่ได้รับจากการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากกว่า 13 ปี ตลอดจนผลจากการติดตามเทคโนโลยีด้านกังหันลมมาโดยตลอดทำให้ กฟผ. มีความพร้อมที่จะติดตั้งกังหันลมในขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นในปี พ.ศ. 2539 กฟผ. จึงติดตั้งกังหันลมขนาดกำลังผลิต 150 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นกังหันลมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่เคยติดตั้งมาในประเทศไทย รวมทั้งกังหันลมชนิดนี้มีเทคโนโลยีที่เชื่อถือได้สำหรับการผลิตไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ ขณะเดียวกันก็ยกเลิกการใช้งานกังหันลมขนาดเล็กที่ต้องซ่อมบำรุงบ่อยและชำรุดเสียหาย ทำให้มีกำลังผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมรวม 170 กิโลวัตต์

(3) ลำตะคอง อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา จากการเก็บสถิติความเร็วลมที่ระดับความสูง 45 เมตร ของ กฟผ. เพื่อตรวจวัดศักยภาพพลังงานลมสำหรับผลิตไฟฟ้าทั่วประเทศมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 พบว่า ที่บริเวณอ่างพักน้ำตอนบนโรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา ตำบลคลองไผ่ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมาแห่งนี้ มีศักยภาพพลังงานลมดีที่สุดแห่งหนึ่งของประเทศไทย มีลมพัดถึง 2 ช่วง คือ ช่วงฤดูลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ระหว่างเดือน พฤศจิกายนถึงปลายเดือนมีนาคม) และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (ระหว่างเดือนพฤษภาคม ถึง กลางเดือน ตุลาคม) มีความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 5-6 เมตรต่อวินาที ซึ่งสามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) จึงได้ดำเนิน โครงการติดตั้งกังหันลม ขนาดกำลังผลิต 1,250 กิโลวัตต์ จำนวน 2 ชุด รวมกำลังผลิต 2,500 กิโลวัตต์ ที่บริเวณอ่างพักน้ำตอนบนโรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา ตำบลคลองไผ่ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ติดตั้งแล้วเสร็จพร้อมทั้งเชื่อมโยงเข้าสู่ ระบบการจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2552 เป็นต้นมา

กังหันลมที่นำมาติดตั้งเป็นกังหันลมรุ่น D6-1250 ผลิตในประเทศจีน มีขนาดกำลังผลิต 1,250 กิโลวัตต์ เป็นกังหันลมชนิดแกนนอน ประกอบด้วย ใบกังหันลม 3 ใบ ใบกังหันลมทำด้วยวัสดุสังเคราะห์เสริมใยแก้ว เส้นผ่าศูนย์กลางการหมุนของใบกังหันลม 64 เมตร ความสูงของเสากังหันลม 68 เมตร การทำงานของกังหันลมจะเป็นแบบอัตโนมัติ เริ่มผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 2.8 เมตรต่อวินาที และสูงสุดที่ความเร็วลม 12.5 เมตรต่อวินาที และกังหันลมจะหยุดผลิตไฟฟ้าเมื่อความเร็วลม 23 เมตรต่อวินาที ส่วนความเร็วลมสูงสุดที่กังหันลมสามารถต้านทานได้อยู่ที่ 50.5 เมตรต่อวินาที กังหันลมรุ่นนี้มีความเร็วรอบสูงสุดของใบกังหันลม 22 รอบต่อนาที ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1,100 รอบต่อนาที มีแรงดันไฟฟ้า 690 โวลต์ 3 เฟส ส่วนการหมุนของกังหันลมจะใช้มอเตอร์ไฮดรอลิกส์ขับเคลื่อน ระบบเบรกจะมีทั้งแบบเบรกด้วยอากาศ และเบรกโดยใช้จานเบรก

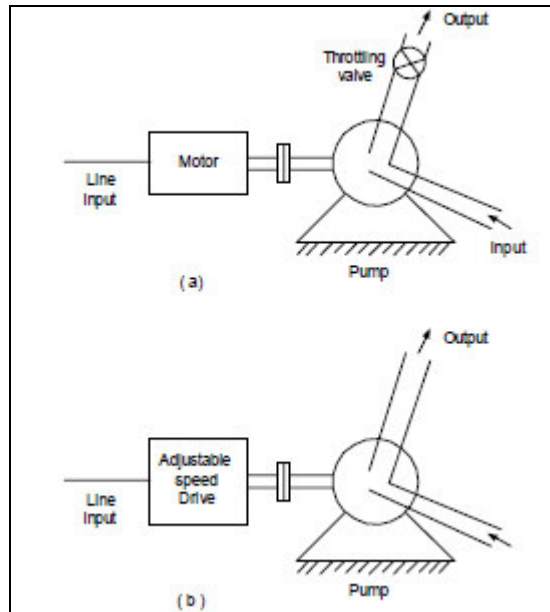
(4) อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครศรีธรรมราช โรงไฟฟ้ากังหันลมแห่งนี้ได้เริ่มเดินเครื่องครั้งแรกเมื่อวันที่ 8 มิ.ย. 2552 ขนาดกำลังการผลิต 1,500 กิโลวัตต์ โดยสามารถผลิตไฟฟ้าได้ถึงปีละ 3.4 ล้านหน่วย คิดเป็นมูลค่าประมาณ 20.7 ล้านบาท ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงเทียบเท่าน้ำมันดิบได้ปีละ 290 ตัน และสามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลดโลกร้อนได้ประมาณ 1,000 ตันต่อปี สามารถรองรับปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของประชาชนในพื้นที่และใกล้เคียงได้เป็นอย่างดี วัตถุประสงค์ของโครงการฯ นอกจากกังหันลมแห่งนี้จะใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้าแล้ว ยังเป็นการสาธิตการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทยให้ประชาชนและภาคเอกชนเห็นถึงความสำคัญของพลังงานลม รวมทั้งส่งเสริมให้ภาคเอกชนหันมาลงทุนผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมากขึ้น โดยเมื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้แล้วจะส่งเข้าสู่ระบบเพื่อจำหน่ายไฟฟ้าให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทั้งหมด ขนาดกำลังผลิตกระแสไฟฟ้า 1.5 MW. ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ปีละ 1.8 ล้านหน่วย คิดเป็นค่ากระแสไฟฟ้า 10 ล้านบาทต่อปี

2.5 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่พบว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) ชนิดโรเตอร์กรงกระรอก (squirrel-cage rotor) มีใช้อย่างแพร่หลายเพราะเป็นมอเตอร์ที่มีราคาต่ำโครงสร้างง่ายแข็งแรงและทนทาน เพียงแค่ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสก็ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่ค่อนข้างคงที่ได้ อย่างไรก็ตามเรายังสามารถเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้โดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นตัวจ่ายพลังงานให้ ในหัวข้อนี้จะรวบรวมพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะการใช้งานแบบต่างๆและแสดงหลักการคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การควบคุมมอเตอร์ให้ถูกต้องกับสภาวะการใช้งานจะทำให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะในสภาวะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถจำแนกได้ 2 ประเภทดังนี้

1. การขับเคลื่อนแบบปรับความเร็ว (Adjustable-speed drives) การใช้งานของการขับเคลื่อนแบบนี้ เป็นการควบคุมความเร็วของพัดลม คอมเพรสเซอร์ ปั๊ม โบรเวอร์และอื่นๆ
2. การขับเคลื่อนแบบความเร็วคงที่ (Constant-speed drives) เช่นการลำเรียงของบนสายพานลำเรียงที่ต้องการความเร็วคงที่ในการลำเรียงวัตถุดิบ



รูปที่ 2.11 ลักษณะการทำงานของปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal pump)

[กฤษ ไชย, 2549]

รูปที่ 2.11 (a) เป็นตัวอย่างการขับเคลื่อนแบบความเร็วคงที่ (Constant-speed drive) ของมอเตอร์กับปั๊มหอยโข่งโดยมอเตอร์ปั๊มจะหมุนที่ความเร็วค่อนข้างคงที่และทำให้อัตราการไหลคงที่ และหากต้องการลดอัตราการไหลเราสามารถทำได้โดยใช้ Throttling valve เป็นตัวปรับอัตราการไหลได้ แต่จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน อย่างไรก็ตาม เราสามารถที่จะหลีกเลี่ยงการสูญเสียนี้ได้โดยการถอด Throttling valve นี้ออกและใช้การขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์เป็นตัวปรับอัตราการไหลแทน

จากรูปที่ 2.11 (b) เป็นตัวอย่างการขับเคลื่อนแบบปรับความเร็ว (Adjustable-speed drive) เมื่อลดกำลังงานขาเข้าลงโดยการลดความเร็วของมอเตอร์ลงก็จะทำให้อัตราการไหลลดลงด้วยซึ่งกำลังที่ลดลงสามารถคำนวณได้

$$\text{Torque} \approx k_1 (\text{speed})^2 \quad (2.6)$$

ดังนั้นกำลังที่ปั๊มต้องการจากมอเตอร์

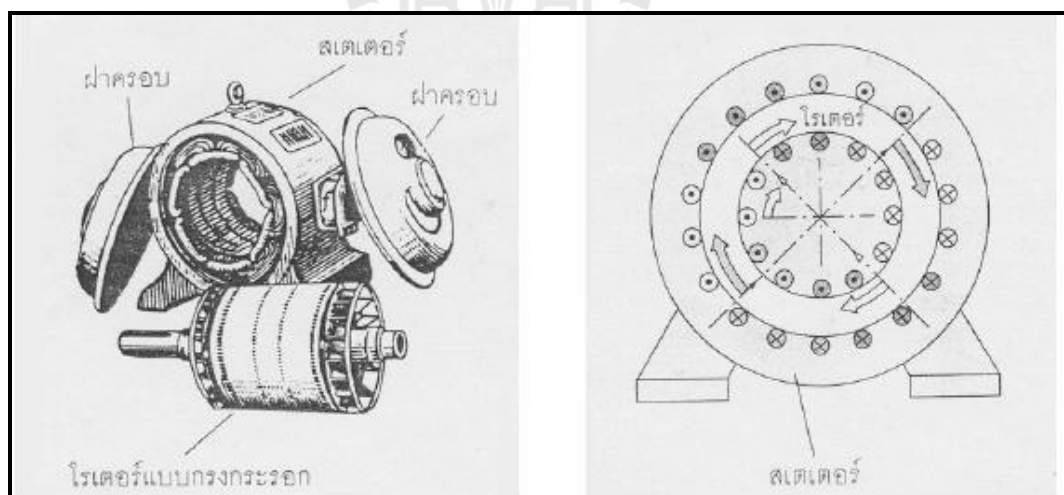
$$\text{Power} = \text{Speed} \times \text{Torque} \approx k_2 (\text{speed})^3 \quad (2.7)$$

โดย k_1 และ k_2 เป็นค่าคงที่

จากสมการที่ (2.7) จะเห็นได้ว่ากำลังที่ต้องการของมอเตอร์จะแปรผันตามความเร็วกำลังสาม เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมอัตราไหลโดยใช้ Throttling valve และการควบคุมโดยปรับค่าความเร็วของปั๊มจะเห็นได้ว่าการควบคุมความเร็วของปั๊มจะเป็นการประหยัดพลังงานมากกว่าเนื่องจากไม่ต้องเสียพลังงานให้กับ Throttling valve ในการควบคุมอัตราการไหล

2.5.1 ทฤษฎีการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบโรเตอร์กรงกระรอกประกอบด้วยสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งมีขดลวด 3 เฟสพันอยู่บนร่องของสเตเตอร์โดยวางเรียงห่างกันทำมุม 120° และส่วนประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือโรเตอร์ (Rotor) แบบกรงกระรอกที่ประกอบด้วยแท่งตัวนำวางเรียงกันโดยคั่นกลางด้วยฉนวนและที่ปลายทั้งสองข้างจะเชื่อมเข้าด้วยกันกับวงแหวนทำให้มีรูปร่างคล้ายกับกรงกระรอกซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่ายและมีราคาต่ำ



รูปที่ 2.12 ลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็ก

[กลยุทธ์, 2549]

เมื่อจ่ายสัญญาณรูปไซน์เวฟสมมูล 3 เฟสที่มีความถี่ $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ให้กับสเตเตอร์ กระแสที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสถานะสมมูลทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก B_{ag} กระจายออกมาในช่องว่างอากาศ (air gap) ซึ่ง

มีขนาดที่คงที่และหมุนรอบโรเตอร์ด้วยความเร็วที่คงที่เรียกว่าความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ω_s มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์สามารถหาได้จาก

$$\omega_s = \frac{2\pi / (p/2)}{1/f} = \frac{2}{p} (2\pi f) = \frac{2}{p} \omega \quad (2.8)$$

โดยที่ p คือจำนวนขั้วของมอเตอร์

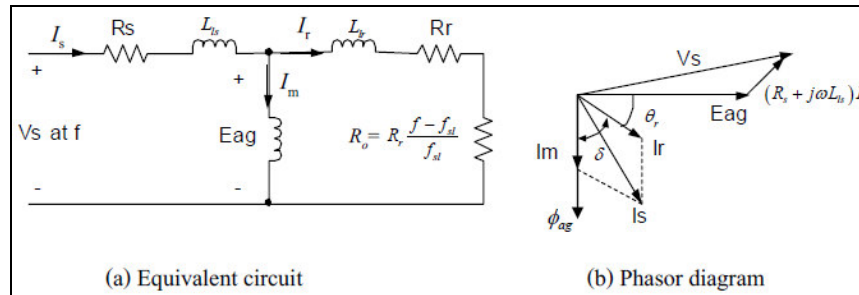
ที่ความถี่ f ซึ่งเป็นความถี่ของแรงดันและกระแสที่จ่ายให้กับสเตเตอร์เราสามารถคำนวณหาความเร็วซิงโครนัสในหน่วยของรอบ/นาทีได้จาก

$$n_s = 60 \times \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120}{p} f \quad (2.9)$$

2.5.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปที่ 2.13 แสดงวงจรเสมือนและ Phasor diagram ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โวลเตจ V_s จะทำให้กระแสสเตเตอร์ I_s ไหลในวงจรของขดลวดสเตเตอร์ที่ความถี่ f จากนั้น I_s จะสร้างสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ ϕ_{ag} (ช่องว่างระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ หรือ Air gap) และ ϕ_{ag} นี้จะหมุนรอบโรเตอร์โดยมีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส เมื่อ ϕ_{ag} หมุนรอบตัวโรเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดัน E_{ag} ซึ่งเป็นแรงดันที่เกิดจากการสะสมพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็กที่ Air gap แรงดัน E_{ag} นี้เองที่ทำให้กระแสลูปของวงจรโรเตอร์ (I_r) ไหล

จากรูปที่ 2.13a จะเห็นได้ว่ากระแส I_s ขึ้นอยู่กับค่า R_0 ซึ่งเป็นตัวชี้การใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์และเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลของระบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ค่า R_0 จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่สลิป f_{s1} ซึ่งความถี่สลิปจะมีค่าตั้งแต่ $0-f$ ดังนั้นค่า R_0 จะมีค่าตั้งแต่ $0-\infty$ ต่อไปนี้จะแสดงหลักการออกแบบวงจรเสมือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.13 Per phase representation [กฤษ ไชย, 2549]

เมื่อ

- V_s : เฟสโวลเตจ ($V_{LL} / \sqrt{3}$)
- E_{ag} : Air gap voltage
- R_s : ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์
- L_{ls} : Leakage inductance ของขดลวดสเตเตอร์
- I_m : Magnetizing current
- I_s : Stator current
- N_s : จำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์
- L_m : Magnetizing inductance

เมื่อพิจารณาโครงสร้างและวงจร Magnetic ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะได้

$$N_s \phi_{ag} = L_m I_m \quad (2.10)$$

จากกฎของฟาราเดย์ จะได้ว่า

$$E_{ag} = N_s \frac{d\phi_{ag}}{dt} \quad (2.11)$$

เมื่อแทน ฟลักซ์ที่เกิดที่ขดลวดสเตเตอร์ $\phi_{ag}(t) = \phi_{ag} \sin \omega t$ ในสมการ (2.11) จะได้

$$E_{ag} = N_s \omega \phi_{ag} \cos \omega t \quad (2.12)$$

เมื่อคิดเป็นค่า rms จะได้

$$E_{ag} = k_3 f \phi_{ag} \quad (2.13)$$

โดยที่ k_3 คือค่าคงที่

แรงบิด (Torque) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดจากการดูดและผลักกันระหว่างสนามแม่เหล็กในช่องอากาศกับสนามแม่เหล็กย้อนกลับที่เกิดจากกระแสโรเตอร์ ถ้าโรเตอร์หมุนที่ความเร็วซิงโครนัสจะไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่าง ϕ_{ag} กับโรเตอร์เป็นผลให้ไม่เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนที่โรเตอร์และกระแสจะไม่ไหลในวงจรโรเตอร์จึงไม่มีแรงบิดที่เกิดจากการดูดและผลักทางสนามแม่เหล็กทำให้ตัวโรเตอร์ไม่มีแรงบิด แต่ที่ความเร็วอื่นการหมุนของโรเตอร์ (Rotor speed; ω_r) จะเกิดขึ้นและมีทิศทางเดียวกับทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็ก ความเร็วที่แตกต่างกันของความเร็วซิงโครนัส ω_s กับความเร็วโรเตอร์ ω_r จะเรียกว่าความเร็วสลิป (slip speed ; ω_{sl})

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \quad (2.14)$$

ความเร็วสลิปถ้าทำการนอร์มอลไลซ์ด้วยความเร็วซิงโครนัสจะเรียกว่า “สลิป” s โดยมีนิยามดังนี้

$$slip(s) = \frac{\text{SlipSpeed}}{\text{SynchronousSpeed}} f_{sl} \quad (2.15)$$

ถ้า $s = 0$ หมายถึงไม่มีสลิป ความเร็วโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัส ($\omega_s = \omega_r$) จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำ หมุนตัวเปล่าไม่มีโหลด แต่ถ้า $s = 1$ ความเร็วโรเตอร์เท่ากับศูนย์ ($\omega_r = 0$) มอเตอร์หยุดนิ่งไม่หมุน ดังนั้น ความเร็วของฟลักในช่องอากาศของมอเตอร์คำนวณได้จาก

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r = s\omega_s \quad (2.16)$$

จากกฎของฟาราเดย์ แรงดันเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์ที่ความถี่สลิป (slip frequency ; f_{sl}) ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความเร็วสลิป

$$f_{sl} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s} f = sf \quad (2.17)$$

ขนาดแรงดัน E_r ของความถี่สลิปจะเหนี่ยวนำที่ตัวนำในโรเตอร์ซึ่งจะเหมือนกับการเหนี่ยวนำแรงดันที่สเตเตอร์การแพร่กระจายของฟลักแม่เหล็กในช่องอากาศจะหมุนที่ความเร็วสลิป ω_{sl} ดังนั้นการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก E_r ที่ตัวนำบนโรเตอร์สามารถหาได้โดยแทนค่าความถี่ f ในสมการที่ (2.13) ด้วยความถี่ f_{sl}

$$E_r = k_3 f_{sl} \phi_{ag} \quad (2.18)$$

ด้วยเหตุที่ขดลวดโรเตอร์กรงกระรอกถูกตัดวงจรด้วยวงแหวน การเหนี่ยวนำแรงดันที่ความถี่สลิปจะก่อผลให้เกิดกระแสโรเตอร์ (I_r) ที่ความถี่สลิป f_{sl}

$$E_r = R_r I_r + j2\pi f_{sl} L_{lr} I_r \quad (2.19)$$

เมื่อ R_r : Resistance ของโรเตอร์
 L_{lr} : Leakage inductance ของโรเตอร์

กระแสที่เกิดขึ้นจะผลิตสนามแม่เหล็กที่หมุนโรเตอร์ด้วยความเร็วสลิป ผลของ ϕ_{ag} และสนามที่เกิดจากกระแสโรเตอร์จะทำให้เกิดแรงหมุนสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การสูญเสียที่เกิดขึ้นในทางด้านทานขดลวดโรเตอร์คือ

$$P_r = 3R_r I_r^2 \quad (2.20)$$

คูณทั้งสองข้างของสมการที่ (2.19) ด้วย f / f_{sl} และใช้สมการที่ (2.13) และ (2.18) จะได้

$$E_{ag} = \frac{f}{f_{sl}} E_r = f \frac{R_r}{f_l} I_r + j2\pi f L_{lr} I_r \quad (2.21)$$

จากรูปที่ 2.13a $f \frac{R_r}{f_{sl}}$ จะแทนค่าผลบวก R_r และ $R_r \left(\frac{f - f_{sl}}{f_{sl}} \right)$ ในสมการที่ (2.21)

จากนั้นคูณทั้งสองข้างของสมการที่ (2.21) ด้วย I_r^* และจะได้ส่วนของจำนวนจริง real ($E_r I_r^*$), พลังงานที่ช่องว่างอากาศเรียกว่า air gap power P_{ag} หาได้จาก

$$P_{ag} = 3 \frac{f}{f_{sl}} R_r I_r^2 \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) และ (2.20)

$$P_{ag} = 3 \frac{f}{f_{sl}} R_r I_r^2 \quad \text{และ} \quad P_r = 3 R_r I_r^2$$

Electromechanical Power, P_{em} สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{em} &= P_{ag} - P_r \\ P_{em} &= 3 \frac{f}{f_{sl}} R_r \cdot I_r^2 - 3 R_r \cdot I_r^2 \\ P_{em} &= 3 R_r \cdot \left(\frac{f}{f_{sl}} - 1 \right) \cdot I_r^2 \\ P_{em} &= 3 R_r \cdot \left(\frac{f - f_{sl}}{f_{sl}} \right) \cdot I_r^2 \end{aligned} \quad (2.23a)$$

และ

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{P_{em}}{\omega_r} \\ T_{em} &= \frac{3 R_r \cdot \left(\frac{f - f_{sl}}{f_{sl}} \right) \cdot I_r^2}{\omega_r} \end{aligned} \quad (2.23b)$$

จากสมการที่ (2.14), (2.22), (2.23a) และ (2.23b) จะได้

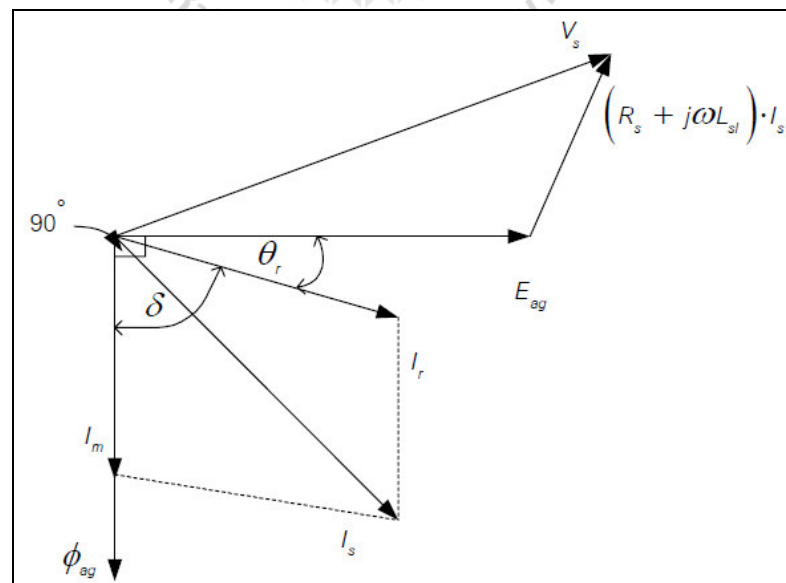
$$T_{em} = \frac{P_{ag}}{\omega_s}$$

$$T_{em} = \frac{3\left(\frac{f}{f_{sl}}\right) \cdot R_r \cdot I_r^2}{\omega_s} \quad (2.23c)$$

T_{em} คือ Electromagnetic Torque

จากวงจร Equivalent รูปที่ 2.13a พบว่าการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของ Rotor และ electromechanical power per phase ที่แสดงด้วยอัตราของความต้านทาน $f\left(\frac{R_r}{f_{sl}}\right)$ ในสมการที่ (2.21) จะถูกแสดงเป็น R_r และ $R_r(f - f_{sl}) / f_{sl}$ กระแสรวม I_s ที่เกิดขึ้นที่ Stator คือ ผลรวมของ Magnetizing current, I_m และ กระแสที่ Rotor, I_r ในที่นี้ I_r คือส่วนประกอบของ I_s ที่ไม่รวม ampere-turn ที่เกิดจากกระแส rotor จริง

$$I_s = I_m + I_r \quad (2.24)$$

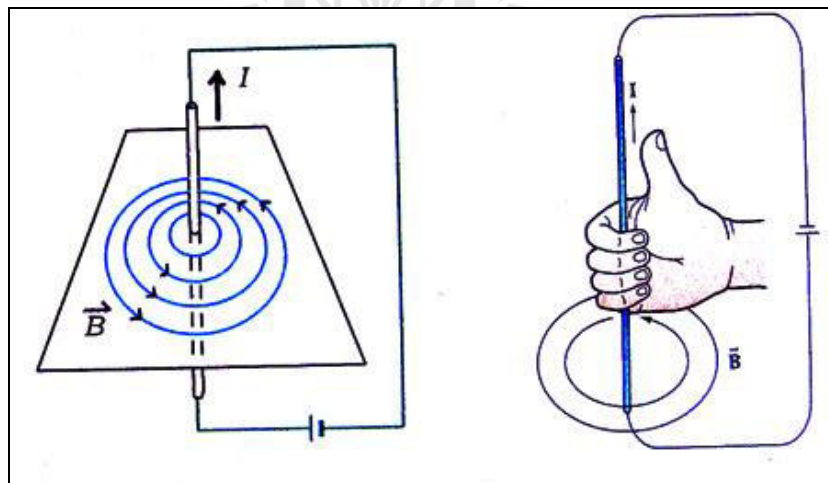


รูปที่ 2.14 Phasor diagram ของ แรงดันและ กระแสของ Stator [กฤษ เฉยไสย,2549]

Phasor diagram ของแรงดันและกระแสของ Stator ที่แสดงในรูปที่ 2.14 magnetizing (I_m) ซึ่งทำให้เกิด ϕ_{ag} ที่มุดล้าหลังแรงดันของ air gap (E_{ag}) เป็นมุม 90° ส่วนกระแสของ Rotor (I_r) ทำให้เกิด Electromagnetic torque จะล้าหลังแรงดันของ air gap (E_{ag}) เป็นมุม power factor θ_r ของวงจร Rotor

$$\theta_r = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi f_{sl} L_r}{R_r}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi f L_r}{R_r f / f_{sl}}\right) \quad (2.25)$$

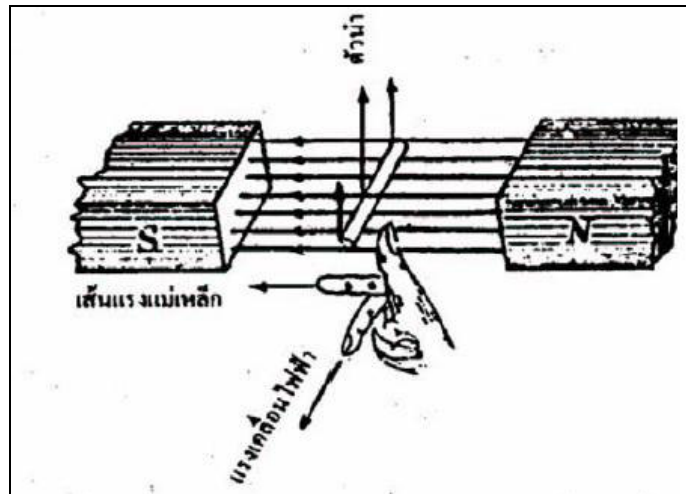
จากทฤษฎี Electromagnetic พบว่าสนามแม่เหล็กประกอบด้วยเส้นแรง (line of force) ที่มีลักษณะเป็นวงกลมล้อมรอบด้วยตัวนำ เส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมรอบตัวนำนี้จะมีศูนย์กลางอยู่ที่จุดศูนย์กลางของตัวนำด้วย ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสามารถที่จะหาได้โดยใช้กฎมือขวากำรอบตัวนำให้หัวแม่มือชี้ไปตามทิศทางของกระแสไฟไหล ส่วนนิ้วที่เหลือกำรอบตัวนำจะแสดงถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำนั้น



รูปที่ 2.15 แสดงวิธีหาทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำโดยใช้กฎมือขวา

[<http://www.vcharkarn.com>]

เป็นที่ทราบกันแล้วว่า เมื่อมีกระแสไฟไหลผ่านตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นมา รอบๆตัวนำทันที ส่วนการหาทิศทางของแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่และทิศทางของตัวนำเคลื่อนที่จะมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถหาได้โดยกฎมือขวาของเฟรมมิ่ง (Fleming's Right Hand Rule) หรือกฎของเลนซ์ (Lenz's Law)



รูปที่ 2.16 การหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [กฤษ เฉยใสย,2549]

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น สามารถหาค่าลึงทางไฟฟ้าได้ดังนี้

$$T_{em} = k_4 \phi_{ag} I_r \sin \delta \quad (2.26)$$

โดยที่

$$\delta = 90^\circ + \theta_r \quad (2.27)$$

δ คือ Torque angle ระหว่าง magnetizing current (I_m) ซึ่งทำให้เกิด ϕ_{ag} และ กระแสของ Rotor (I_r) ซึ่งแทนสนามแม่เหล็กของ Rotor แรงดันต่อ phase ที่จ่ายให้ Stator, (V_s) มีค่าเท่ากับ

$$V_s = E_{ag} + (R_s + j2\pi f L_s) I_s \quad (2.28)$$

ในการออกแบบ Induction motor โดยทั่วแล้วจะทำให้ f_{sl} มีค่าต่ำ (4%) ขณะที่ทำงานกับโหลดปกติ จึงทำให้สร้างควมสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$2\pi f_{sl} L_r \ll R_r \quad (2.29)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.25) $\theta_r = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi f_{sl} L_{lr}}{R_r}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi f L_{lr}}{R_r f / f_{sl}}\right)$ จะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ และจากสมการที่ (2.27) $\delta = 90^\circ + \theta_r$ จะเท่ากับ 90° ด้วยเหตุนี้ในสมการที่ (2.26) จะได้

$$T_{em} \cong k_4 \phi_{ag} I_r \sin \delta \cong k_4 \phi_{ag} I_r \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.18), $E_r = k_3 f_{sl} \phi_{ag}$ และ สมการที่(2.19), $E_r = R_r I_r + j2\pi f_{sl} L_{lr} I_r$ จะประมาณโดยการใช้สมการที่ (2.29) ได้ว่า

$$R_r I_r + j2\pi f_{sl} L_{lr} I_r = k_3 f_{sl} \phi_{ag}$$

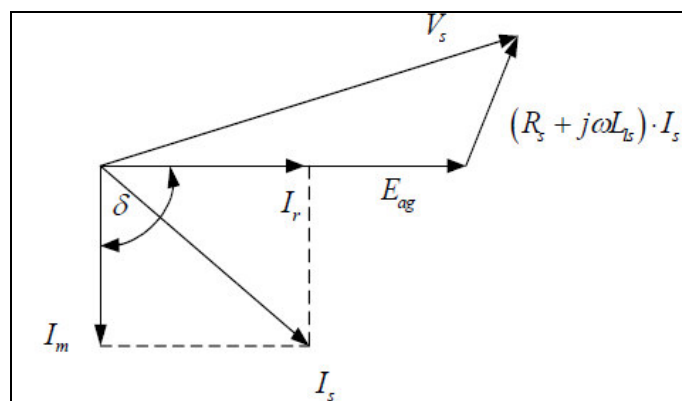
$$I_r = k_5 \phi_{ag} f_{sl} \quad (2.31)$$

แทนค่าสมการ(2.31)ในสมการที่(2.30)ได้ว่า

$$T_{em} = k_4 \phi_{ag} (k_5 \phi_{ag} f_{sl}) = k_6 \phi_{ag}^2 f_{sl} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.29) และ (2.24)

$$I_s = \sqrt{I_m^2 + I_r^2} \text{ เนื่องจากมุม } \theta_r \cong 0 \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.17 Vector เมื่อ $\theta_r \cong 0$ [กฤษ เฉยไสย,2549]

และในสมการที่(2.28)

$$V_s \approx E_{ag} + (R_s + j2\pi fL_s)I_s \approx E_{ag} \quad (2.34)$$

แทนสมการที่(2.13), $E_{ag} = k_3 f \phi_{ag}$ ในสมการที่ (2.34) จะได้ว่า

$$V_s = k_3 \phi_{ag} f \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.20) และ (2.23a) อัตราส่วนของ power loss ใน Rotor กับ electromechanical output power P_{em} เป็นดังนี้

$$\% P_r = \frac{P_r}{P_{em}} = \frac{f_{sl}}{f - f_{sl}} \quad (2.36)$$

ข้อสังเกตที่สำคัญจากความสัมพันธ์ข้างต้น

1. Synchronous Speed (ω_s) สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับค่าความถี่ f ของ supplied voltage V_s
2. $\% P_r$ (Percentage of power loss) จะมีค่าน้อยเมื่อ f_{sl} มีค่าน้อย ดังนั้น ในสภาวะ Steady state, f_{sl} ไม่ควรมีค่าเกิน Rated
3. เมื่อ f_{sl} มีค่าน้อยแล้ว Slip, s จะมีค่าน้อย และ motor speed (ω_s) จะเปลี่ยนแปลงเกือบเป็นเส้นตรงกับความถี่ f
4. Torque จะเท่ากับ Rated torque ที่ความถี่ใดๆ ได้เมื่อ ϕ_{ag} จะต้องมามีค่าเท่ากับ Rated และ V_s จะต้องเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนกับ f
5. การที่จะไม่ให้ I_s (Motor current) เกินค่า Rated นั้น ในสภาวะ Steady State ค่า f_{sl} จะต้องไม่เกิน Rated เนื่องจาก I_r เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ f_{sl}

2.5.3 การควบคุมแบบ Scalar ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

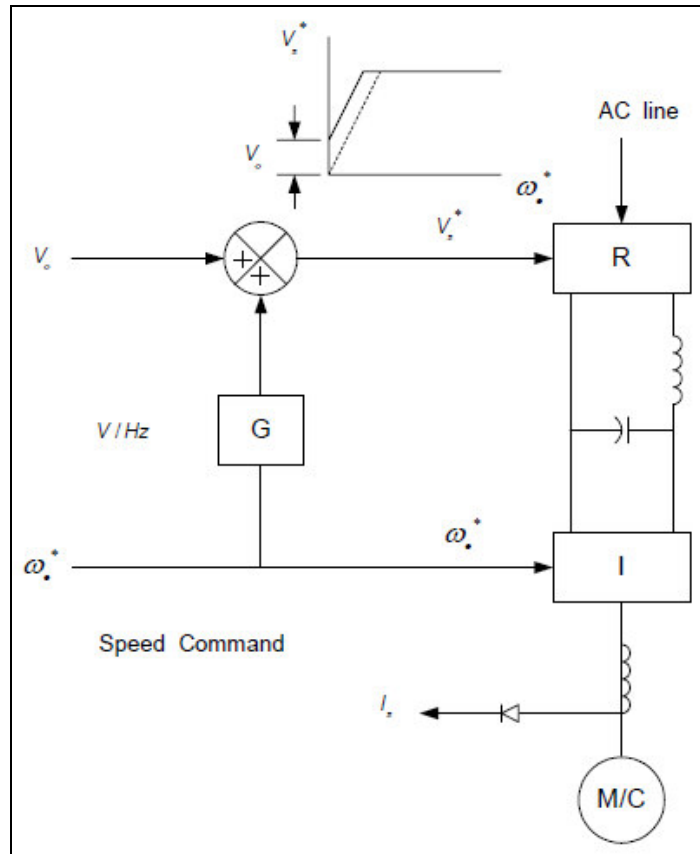
ในหัวข้อนี้จะแสดงวิธีการควบคุมแบบ Scalar Control Methods ซึ่งจะมีการควบคุมอยู่หลายวิธี ในแต่ละวิธีจะอธิบายหลักการโดยอาศัยทฤษฎีการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากบทที่ 2 และการใช้ระบบควบคุมเข้ามาประกอบ ตัวอย่างที่ได้นำมานี้จะใช้ Voltage-fed inverters, Current-fed inverters และ slip power recovery control ซึ่งเมื่อใช้ระบบของ Scalar control แล้วจะควบคุมเฉพาะขนาดของตัวแปรและการป้อนกลับสัญญาณที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เท่านั้น ดังนั้นการควบคุมแบบนี้จึงถือว่าเป็นระบบการควบคุมที่ง่ายและได้ผลดีคือระบบหนึ่ง

1. การควบคุมแบบ v/f control

Volts/hertz constant control เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับการควบคุม Induction motor คือการควบคุมความเร็วแบบ open-loop volts/hertz ดังแสดงในรูปที่ 2.18 วงจรกำลังประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสแบบควบคุมเฟส (phase-controlled rectifier) โดยจะมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) 1 เฟส หรือ 3 เฟสป้อนเข้าไป, วงจรกรองกระแสแบบ LC filter และ six step inverter ความถี่ ω_c^* คือตัวแปรอ้างอิงและมันมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วมอเตอร์เพราะทำงานที่ความถี่ slip ต่ำ ๆ

การควบคุมแบบ Volts/hertz จะใช้กระแสอ้างอิง (rectifier voltage command) V_s^* ที่สร้างขึ้นแล้วผ่านอัตราขยาย Volts/Hertz ของ G การทำงานแบบนี้จะทำให้ Air gap flux ของมอเตอร์ ψ_m มีค่าประมาณเท่ากับอัตราส่วนของ V_s^* / ω_c ดังนั้นแรงบิดต่อกระแสทางด้าน stator มีค่าสูงสุดซึ่งคล้ายกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง (dc machine) เมื่อความถี่เข้ามาใกล้ศูนย์ความเร็วของมอเตอร์เข้าใกล้ศูนย์เช่นกัน แรงดันทางด้านขดลวดสเตเตอร์ (stator) จะเข้าสู่ศูนย์เพราะมันจะตกคร่อมความต้านทานของ stator เกือบหมด ดังนั้นแรงดันช่วย V_0 จึงถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อให้มีค่าสูงเกินความต้านทานของ stator เพื่อให้สนามแม่เหล็กของช่องอากาศ air gap flux (ψ_m) และ torque เต็มพิกัดถ้า load torque เพิ่มขึ้นค่าของ slip จะเพิ่มขึ้นจนถึงสมมูลที่ทำให้แรงบิดมอเตอร์ (developed torque) เท่ากับแรงบิดของโหลด load torque

เมื่อเพิ่มความเร็วอ้างอิงเกินความถี่พื้นฐานของมอเตอร์ Rectifier voltage จะเข้าสู่สถานะอิมิตัวและมอเตอร์จะทำงานในช่วงการลดค่าสนามแม่เหล็ก (field weakening) ซึ่งแรงบิดมอเตอร์ (developed torque) จะลดลงในขณะที่กระแสทางด้านขดลวดสเตเตอร์ (Stator) เท่าเดิม การควบคุมแรงดันแบบ open-loop นี้การกระเพื่อมของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) และความต้านทานตกคร่อมเป็นเหตุให้ air gap flux กระเพื่อมได้ซึ่งการกระเพื่อมนี้สามารถป้องกันได้จากการทำการควบคุมแรงดันแบบ close-loop ในวงจร rectifier



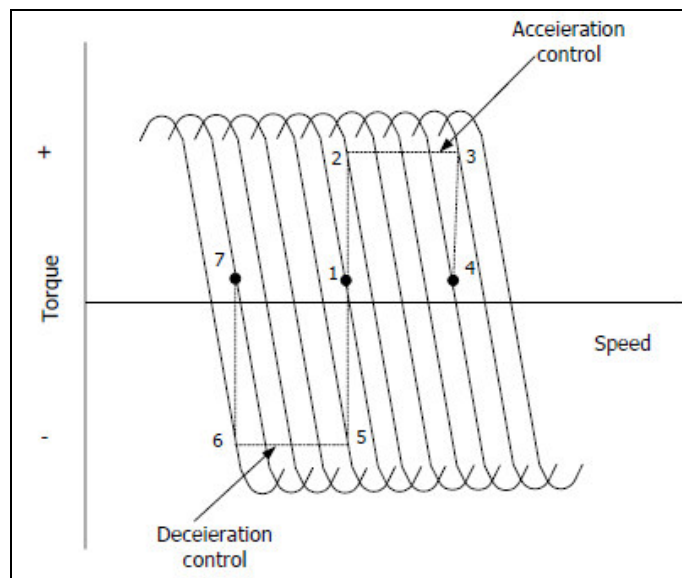
รูปที่ 2.18 Open loop volts/hertz control [กฤษ เฉยไสย,2549]

ในรูปที่ 2.19 แสดงลักษณะคุณสมบัติของการเร่งและการหน่วงความเร็วขณะทำงานที่สภาวะคงตัว (จุดที่ 1) ถ้าเพิ่มความเร็วอ้างอิง ω_r^* ขึ้นเป็นขั้น ๆ slip จะเกินแรงบิดสูงสุด (breakdown torque) และมอเตอร์จะไม่มีเสถียรภาพ ในทางเดียวกันระบบจะไม่มีเสถียรภาพถ้าลดความเร็วอ้างอิงลงเป็นขั้นๆ ดังนั้นระหว่างที่มีการเร่ง (Acceleration) และการหน่วงความเร็ว (Deceleration) จะต้องปรับความถี่อ้างอิงให้สอดคล้องกับความเร็วเพื่อไม่ให้ค่า slip เกินแรงบิดสูงสุด (breakdown torque) การควบคุมแบบปรับขีดจำกัดกระแสช่วยให้การเร่งและการหน่วงความเร็วเป็นไปได้ดังรูปที่ 2.19

สำหรับการเพิ่มความถี่อ้างอิงแบบเป็นขั้นๆ (step-up) slip จะมีค่าเพิ่มขึ้นและกระแสสเตเตอร์ (I_s) จะเพิ่มขึ้นจนถึงขีดจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงจากจุด 1 ไปยังจุดที่ 2 ในกราฟคุณสมบัติ torque-speed ต่อจากนั้นความถี่จะเพิ่มในอัตราคงที่เพื่อ ให้แรงบิดคงที่ตลอดช่วงที่ 2 ถึง 3 ระหว่างจุด 3 และ 4 กระแสจะลดลงต่ำกว่าขีดจำกัด และถึงสภาวะสมดุลของแรงบิดในจุดที่ 4 ซึ่ง slip มีค่าต่ำลง

สำหรับการลดความถี่อ้างอิงแบบเป็นขั้นๆ (Step-down) การเปลี่ยนจุดทำงานเป็นไปตามเส้นทางจากจุด 1-5-6-7 ดังรูปที่ 2.19 ระหว่างที่มีการหน่วงความเร็วความถี่ สเตเตอร์จะลดลงต่ำกว่าความเร็วมอเตอร์และพลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์จะถูกป้อนเข้าสู่ DC link ทำให้แรงดัน DC link เพิ่มขึ้น

ถ้าตัวเรียงกระแสไม่สามารถรับกระแสย้อนกลับได้จำเป็นต้องมีตัวต้านทานต่อกับสวิตช์ที่ทำหน้าที่เป็น วงจรสับเพื่อรับพลังงานเบรกแบบไดนามิกและเป็นการควบคุมแรงดัน DC link ไม่ให้สูงเกินไป

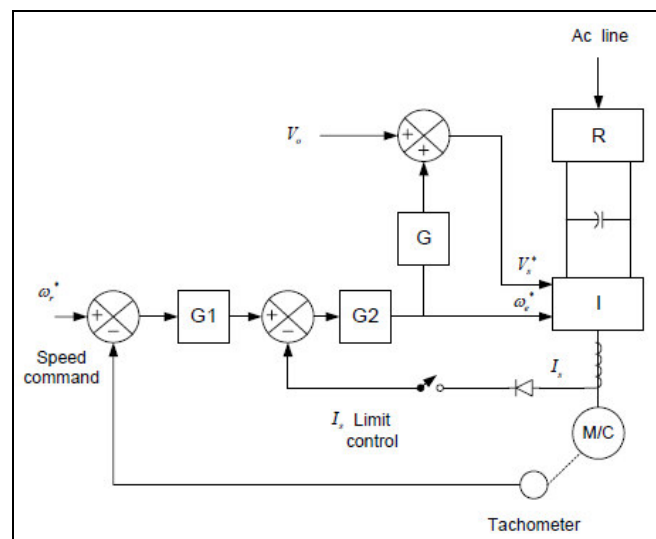


รูปที่ 2.19 acceleration and deceleration characteristics [กฤษ เฉยไสย,2549]

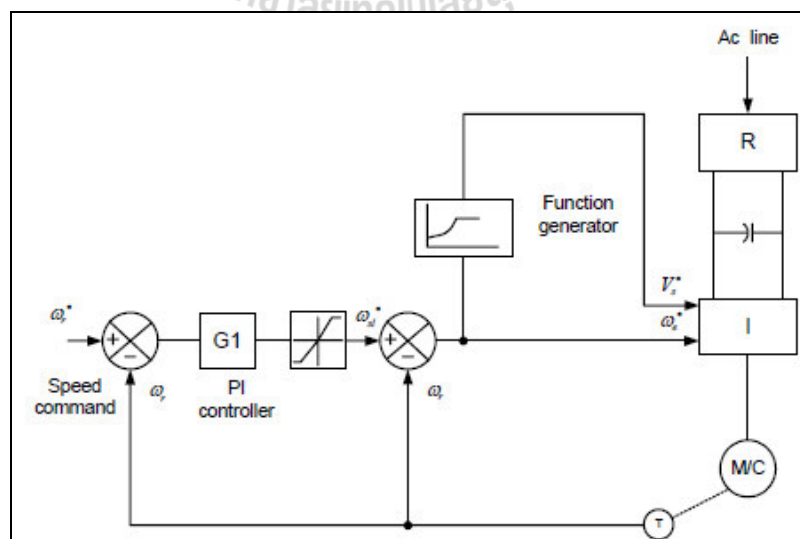
ในการควบคุมแบบ Open loop นี้ความเร็วมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตาม load torque และการกระเพื่อมของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ถ้าการควบคุมแบบ open loop นี้ทำให้ความเร็วมีการ กระเพื่อมจนยอมรับไม่ได้ ก็สามารถควบคุมแบบ closed-loop speed control ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ได้ เช่นกัน ค่า error ของลูบสัญญาณความเร็วจะเป็นสัญญาณควบคุมความถี่ PWM inverter โดยผ่าน current-limit controller ดังแสดงในรูป

การควบคุม volts/hertz อีกวิธีหนึ่งคือการควบคุมสลลิป (slip regulation) ดังแสดง ในรูปที่ 2.21 error ที่เกิดจาก loop ที่ควบคุมความเร็วจะสร้างสลลิปอ้างอิง (slip command) ω_{sl}^* โดยผ่าน PI controller และ limiter ค่า slip อ้างอิงจะรวมกับ speed signal ω_r เพื่อสร้าง ความถี่อ้างอิง (frequency command ω_e^*) ความถี่อ้างอิงจะสร้างแรงดันอ้างอิง (voltage command ω_e^*) โดยผ่าน volts/hertz function generator ซึ่งรวมเข้าด้วยกันกับการชดเชยแรงดันที่ความถี่ต่ำไว้ด้วยเนื่องจาก slip แปรผันตามแรงบิดมอเตอร์ (developed torque) ดังนั้นอาจจะพูดได้ว่าเราสามารถควบคุม torque ไปได้ การควบคุมของ loop ความเร็วได้ซึ่งต่างกับวิธีก่อนที่ torque limit control สามารถหาได้โดยอ้อมจาก stator current limit control ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่ต้องใช้ตัว sensor กระแสราคาแพงแต่ใช้สัญญาณ ความเร็วในการควบคุมทั้ง 2 loop

ในการเปลี่ยนแปลงความเร็วอ้างอิงแบบ Step up มอเตอร์จะเร่งความเร็วอย่างอิสระ โดย slip ถูกจำกัดโดย torque สูงสุดและที่สภาวะคงตัว slip จะขึ้นอยู่กับ load torque ถ้าความเร็วอ้างอิง (ω_r^*) ลดลง ค่า slip กลายเป็นค่าลบและมอเตอร์จะอยู่ในสภาวะ braking mode ซึ่งได้อธิบายไว้ในตอนแรกแล้ว



รูปที่ 2.20 Closed-loop volts/hertz speed control [กฤษ เฉยไสย,2549]



รูปที่ 2.21 Constant volts/hertz speed control with slip regulation [กฤษ เฉยไสย,2549]

หากควบคุม Slip ให้คงที่ได้ error ที่เกิดจากลูปความเร็วอาจจะใช้ควบคุมเพียงแค่แรงดัน output ของ inverter อย่างเดียว การเปลี่ยนแปลงในรูปอัตราส่วน volts/hertz อาจเป็นเหตุให้ air gap flux และ torque เปลี่ยนแปลงตามไปด้วยที่ light-load การลด air gap flux จะช่วยทำให้ efficiency ดีขึ้นเพราะเป็นการลดการสูญเสียในแกน (core loss) กับ copper loss ลงแต่ข้อเสียของมันก็คือ การตอบสนองของ flux จะช้าลง ทำให้มอเตอร์ไม่มีเสถียรภาพ (unstable) เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ load torque แบบทันทีทันใด

2.6 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) หรือเรียกว่า AC Drives คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของ 3-Phase Squirrel-Cage Induction Motor โดยวิธีการปรับแรงดันและความถี่ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับมอเตอร์

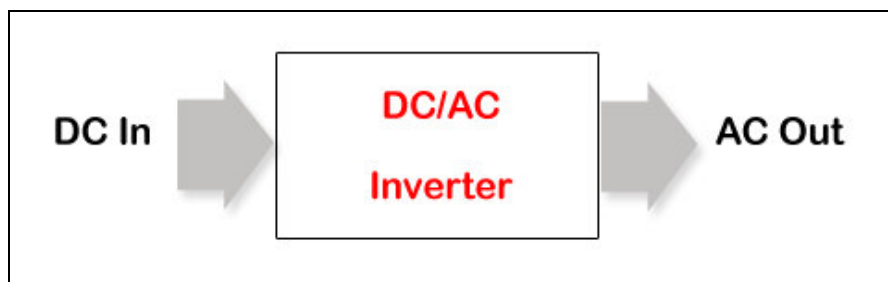
บางครั้งจะเรียกว่า V/F Control อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ยังมีชื่อเรียกอีกหลายอย่างเช่น

- VSD : Variable Speed Drives
- VVVF : Variable Voltage Variable Frequency
- VC : Vector Control

2.6.1 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) จะแปลงไฟกระแสสลับ (AC) จากแหล่งจ่ายไฟทั่วไปที่มีแรงดันและความถี่คงที่ ให้เป็นไฟกระแสตรง (DC) โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter Circuit) จากนั้นไฟกระแสตรงจะถูกแปลงเป็นไฟกระแสสลับที่สามารถปรับขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) วงจรทั้งสองนี้จะเป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่น และผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์

โดยทั่วไปแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับมีรูปคลื่นไซน์ แต่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปไซน์ นอกจากนั้นยังมีชุดวงจรควบคุม (Control Circuit) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของ 3-phase Induction motor



รูปที่ 2.22 แสดงหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ [<http://www.stcontrol.com>]

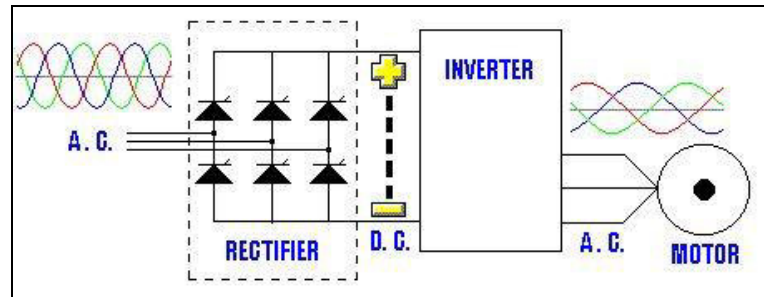
2.6.2 โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์

1. ชุดวงจรเรกติไฟเออร์ หรือชุดวงจรเรียกกระแส (Rectifier Circuit) ทำหน้าที่แปลงผันหรือเปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรประกอบด้วย เพาเวอร์ไดโอด 4 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบเฟสเดียว หรือมีเพาเวอร์ไดโอด 6 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบ 3 เฟส ดังรูปที่ 2.23 (สำหรับอินเวอร์เตอร์บางประเภทจะใช้ SCR ทำหน้าที่เป็นวงจรเรกติไฟเออร์ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมระดับแรงดันในวงจรได้)

2. ชุดวงจรเชื่อมโยงทางดีซี (DC Link Circuit) คือวงจรเชื่อมโยงระหว่างเรียกกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ พักดแรงดันไฟฟ้า 400VDC หรือ 800VDC โดยขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุตว่าเป็นแบบเฟสเดียวหรือ 3 เฟส ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรกติไฟเออร์ให้เรียบยิ่งขึ้นและทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้าขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงสั้น เนื่องจากการเบรกหรือมีการลดความเร็วรอบลงอย่างรวดเร็ว (สำหรับกรณีที่ใช้ร่วมกับโหลดที่มีแรงเฉื่อยมากๆ และต้องการหยุดอย่างรวดเร็ว จะเกิดแรงดันสูงย้อนกลับมาตกคร่อมคาปาซิเตอร์ และทำให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจะมีวงจรชอปเปอร์โดยต่อค่ากระแสไหลผ่านค่าความต้านทานเพื่อลดพลังงานที่เกิดขึ้น)

3. ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ที่ผ่านการกรองจากวงจรดีซีลิงค์) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรจะประกอบไปด้วยเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กำลัง 6 ชุด (ปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้ IGBT) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ PWM (Pulse Width Modulation)

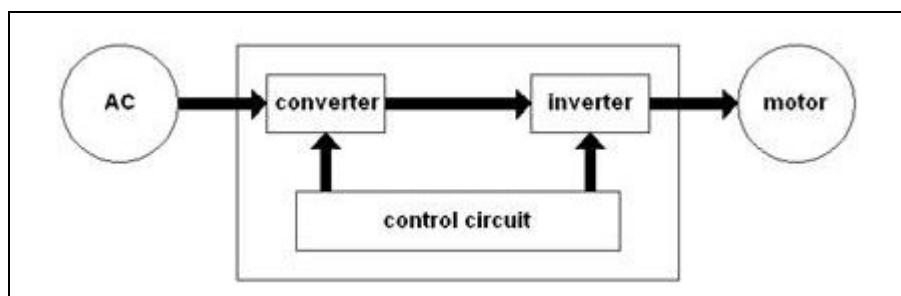
4. ชุดวงจรควบคุม (Control Circuit) จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ใช้ เช่น รับข้อมูลความเร็วรอบที่ต้องการเข้าไปทำการประมวลผล และส่งเอาต์พุตออกไปควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์ เพื่อจ่ายแรงดันและความถี่ให้ได้ความเร็วรอบและแรงบิดตามที่ผู้ใช้งานต้องการ



รูปที่ 2.23 แสดงโครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) [<http://ap-machinery.com>]

ตัวอย่างการทำงานของอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่พบเห็นได้ในปัจจุบัน ได้แก่ การใช้ อุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟสำรอง หรือที่เรียกว่า UPS (Uninterruptible Power Supply) เพื่อแก้ปัญหาไฟเกิน ไฟตก ไฟดับ และคลื่นรบกวน ช่วยป้องกันการเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า โดยไฟฟ้าที่สำรองไว้ จะเก็บในแบตเตอรี่

ยกตัวอย่าง ถ้ากระแสไฟฟ้าดับ ระบบสำรองไฟจะสวิตช์มาใช้ไฟจากแบตเตอรี่โดยทันที ต่อจากนั้นไฟฟ้าซึ่งเป็นกระแสตรง จะเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงนั้นให้เป็นไฟฟ้า กระแสสลับที่มีความถี่คงที่ และถูกต้อง ไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกมาจากอินเวอร์เตอร์ก็จะป้อนสู่เครื่อง ไฟฟ้าทั่วไป โดยที่ไฟกระแสสลับที่ได้ออกมาจะถูกนำไปป้อนกลับมาทำการเปรียบเทียบกับความถี่อ้างอิง ค่าหนึ่ง แล้วนำผลจากการเปรียบเทียบไปควบคุมการกำเนิดความถี่ของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้ไฟฟ้า กระแสสลับที่มีความถี่คงที่และถูกต้อง ตามที่เครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับต้องการ



รูปที่ 2.24 แสดงกระบวนการทำงานของอินเวอร์เตอร์ [<http://ap-machinery.com>]

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ถูกนำมาใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เช่น เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น โทรทัศน์ และระบบเซอร์โวควบคุมมอเตอร์ (Servo Motor) เนื่องจากความต้องการลดการสูญเสีย กำลังงานที่สูง โดยเฉพาะขณะเริ่มต้นทำงาน และจากการสูญเสียในแกนเหล็ก และในตัวขดลวด

(สำหรับเครื่องเชื่อมแบบมือหมุน และมอเตอร์) ซึ่งการสูญเสียกำลังงานหรือค่าไฟฟ้าเป็นดังนี้คือ เมื่อเครื่องใช้ไฟฟ้าเริ่มทำงาน จะมีค่ากระแสเริ่มทำงาน I (Start) สูงกว่า ขณะเดินปกติถึง 4 – 6 เท่าตัว เช่น มอเตอร์เครื่องปรับอากาศ ที่มีขนาด 220 V ,1 A

$$P_{\text{normal}} = 220\text{V} \times 1\text{A} = 220\text{W}$$

ขณะเริ่มต้นมอเตอร์หรือหม้อแปลงจะดึงกระแสเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กอย่างน้อย 4 เท่าของขณะปกติ

$$P_{\text{start}} = 220\text{V} (4 \times 1\text{A}) = 880\text{W}$$

ทำให้ระบบเดิมที่ไม่มีการใช้อินเวอร์เตอร์จะต้องเสียดค่าไฟสูงมาก และทำให้ระดับของแรงดันไฟฟ้าในสายไม่เสถียร (Stable) รวมถึงทำให้เกิดแรงดันสไปค์ ขณะหยุดการทำงานซึ่งสิ่งเหล่านี้จะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดการเสียหาย หรือบั่นทอนอายุการใช้งานให้สั้นลง

ตัวอย่างปัญหาและการแก้ไข โดยนำอินเวอร์เตอร์ (Inverter) มาใช้งาน

การทำงานของเครื่องปรับอากาศ ระบบเดิมนั้นจะทำงานติดๆ ดับๆ อยู่บ่อยครั้ง ซึ่งสร้างปัญหากับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ อีกทั้งยังกินไฟสูง จึงได้มีการนำเอาระบบอินเวอร์เตอร์เข้ามาแก้ไข ทำให้มอเตอร์แอร์ทำงานต่อเนื่องไม่มีการติด-ดับ ดังเช่นในระบบเดิม ซึ่งจากการพิสูจน์แล้วพบว่าการทำงานของมอเตอร์ทำงานต่อเนื่องจะช่วยประหยัดพลังงาน และค่าไฟฟ้าได้มากกว่าการหยุด และเริ่มเดินใหม่อย่างน้อย 1 เท่าตัวขึ้นไป ซึ่งก็มีหลักการทำงาน คือ ขณะที่เข้าสู่สถานะการทำงานแล้ว ชุดอินเวอร์เตอร์จะสั่งให้มอเตอร์ทำงานมากขึ้น (หมุนเร็วขึ้น) โดยการเพิ่มความถี่หรือปรับเปลี่ยน Duty Cycle และขณะสแตนด์บาย หรืออุณหภูมิคงที่ระบบอินเวอร์เตอร์จะลดการทำงานของมอเตอร์ลง (หมุนช้าลง) แต่ไม่หยุดการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งจะช่วยลดกำลังงานที่ใช้ขึ้นเอง

2.6.3 อินเวอร์เตอร์สำหรับการควบคุมมอเตอร์

มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ใช้ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลโดยนำพลังงานที่ได้นี้ไปทำการขับเคลื่อนเครื่องจักรอื่นๆต่อไป ความเร็วของมอเตอร์สามารถกำหนดได้โดย

1. แรงบิดของโหลด
2. จำนวนขั้วของมอเตอร์
3. ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟที่ใช้กับมอเตอร์
4. แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์

ความเร็วของมอเตอร์สามารถหาได้จากสูตร ดังต่อไปนี้

$$N = \left(\frac{120f}{P}\right) \cdot (1-S) \quad (2.37)$$

| | | |
|-------|---------|---------------------------|
| เมื่อ | N | : ความเร็วรอบ (RPM) |
| | f | : ความถี่ (Hz) |
| | P | : จำนวนขั้ว |
| | $(1-S)$ | : เป็นเทอมที่กำหนดโดยโหลด |

จากสูตรข้างต้นจะพบว่า ถ้าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ เปลี่ยนแปลงไปก็จะมีผลทำให้มอเตอร์มีความเร็วเปลี่ยนแปลงได้ด้วย แต่เมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ โดยให้แรงดันคงที่ จะมีผลทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นจนอิ่มตัว ซึ่งอาจทำให้มอเตอร์ ร้อนจนเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยนแรงดันควบคู่ไปกับความถี่ด้วย

จากรูปที่ 2.24 แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ไปยังคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง แล้วนำไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ต่อเป็นอินพุตเข้าไปในวงจรมอเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงนี้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเลือกความถี่ได้ เพื่อไปควบคุมมอเตอร์ให้มีความเร็วตามต้องการได้

การเปลี่ยนขนาดแรงดันของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่ โดยวิธีการแปรรูปคลื่นของแรงดันสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

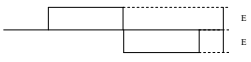
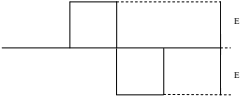
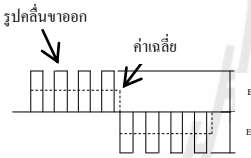
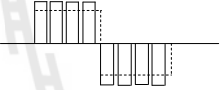
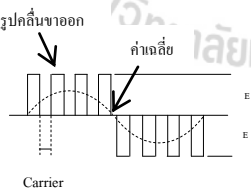
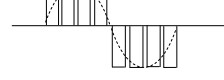
1. วิธีแปรขนาดแรงดันของไฟตรง (PAM : Pulse Amplitude Modulation)
2. วิธีแปรความกว้างของพัลส์ที่ใช้เปิด-ปิดทรานซิสเตอร์ (PWM: Pulse Width

Modulation)

- เป็น Square Wave
- เป็น Sine Wave

โดยแต่ละวิธีจะทำให้เกิดผลต่อมอเตอร์ดังตารางที่ 2.1

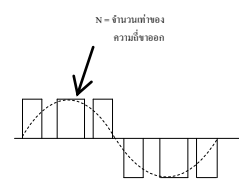
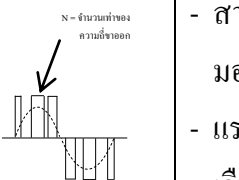
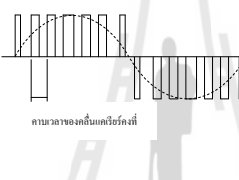
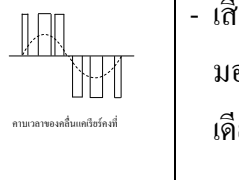
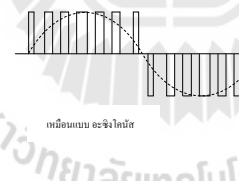
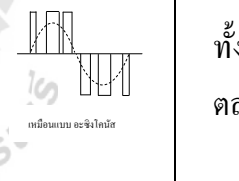
ตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนขนาดแรงดันของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่โดยวิธีการแปรรูปคลื่นของแรงดัน

| วิธีควบคุม | ความถี่ต่ำ(แรงดันต่ำ) | ความถี่สูง(แรงดันสูง) | จุดเด่น |
|---------------------------------------|---|--|--|
| วิธี PAM (Pulse Amplitude Modulation) |  |  | <ul style="list-style-type: none"> - เสียงมอเตอร์เบา - ประสิทธิภาพดี - ควบคุมขนาดแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ - ผลตอบสนองช้า |
| วิธี PWM (Pulse Width Modulation) |  |  | <ul style="list-style-type: none"> - ส่วนอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมความถี่และแรงดันได้ทั้งหมด - ได้ยินเสียงความถี่สูงจากมอเตอร์ |
| วิธี PWM ที่แรงดันเป็นรูป Sine |  |  | <ul style="list-style-type: none"> - เดินมอเตอร์ได้เร็วที่ความเร็วต่ำ - ฮาร์มอนิกความถี่ต่ำมีขนาดเล็ก - ได้ยินเสียงความถี่สูงจากมอเตอร์ |

(E: แรงดันไฟตรง)

วิธี PWM แบบ Sine Wave นั้นจะมีการเปิด-ปิดสวิตช์หลาย ๆ ครั้งในหนึ่งไซเคิลและการเปิด-ปิดในแต่ละครั้งจะใช้เวลาไม่เท่ากัน จำนวนการเปิด-ปิดใน 1 วินาที เรียกว่าความถี่แคเรียร์ (Carrier Frequency) ซึ่งวิธี PWM แบบ Sine Wave มีรูปแบบควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ 3 แบบดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 รูปแบบควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ของวิธี PWM แบบ Sine Wave

| รูปแบบการควบคุม | | ความถี่ต่ำ | ความถี่สูง | จุดเด่น |
|--------------------|--|---|--|---|
| แบบ ซิงโครนัส | ความถี่แคเรียร์ แปรตามความถี่ ขาออก |  |  | <ul style="list-style-type: none"> - สามารถควบคุม ฮาร์โมนิกได้ - แรงดันขาออกสูงสุด เกือบเท่าแรงดันของ แหล่งจ่ายไฟ |
| แบบอะ ซิงโครนัส | ความถี่แคเรียร์ คงที่ไม่สัมพันธ์ กับความถี่ขา ออก |  |  | <ul style="list-style-type: none"> - เสียกรบกวนจาก มอเตอร์ จะเป็นเสียง เดียวไม่น่ารำคาญ |
| แบบผสม | ย่านความถี่ต่ำ เป็น อะซิงโครนัส ย่านความถี่สูง เป็นซิงโครนัส |  |  | <ul style="list-style-type: none"> - สามารถควบคุมได้ดี ทั้งย่านความถี่ต่ำ ตลอดจนถึงความถี่สูง |

2.6.4 การควบคุมมอเตอร์

1. การสตาร์ท ทำได้โดยให้สัญญาณตั้งความถี่แก่อินเวอร์เตอร์ด้วยความถี่สตาร์ทที่มอเตอร์ก็จะผลิตแรงบิด จากนั้นอินเวอร์เตอร์จะค่อย ๆ เพิ่มความถี่ขึ้นไป จนกระทั่งแรงบิดของมอเตอร์สูงกว่าแรงบิดของโหลดมอเตอร์จึงเริ่มหมุน

2. การเร่งความเร็วและการเดินเครื่องด้วยความเร็วคงที่ หลังจากสตาร์ทอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์แล้ว ความถี่ขาออกจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนถึงความถี่ที่ต้องการ ช่วงเวลาในการเพิ่มความถี่นี้คือเวลาการเร่งความเร็ว และเมื่อความถี่ขาออกเท่ากับความถี่ที่ต้องการ การเร่งความเร็วก็จบ อินเวอร์เตอร์จะเข้าสู่การทำงานในช่วงเวลาการเดินเครื่อง ด้วยความเร็วคงที่

3. การลดความเร็ว ทำได้โดยตั้งความถี่ให้ต่ำกว่าความถี่ขาออก อินเวอร์เตอร์จะลดความถี่ลงมาเรื่อย ๆ ตามช่วง เวลาการลดความเร็วที่ได้ตั้งไว้ ในขณะที่ลดความถี่ ความเร็วรอบของมอเตอร์

จะมีค่ามากกว่าความถี่ขาออกของอินเวอร์เตอร์ มอเตอร์จะทำงาน เหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลิตไฟฟ้าจ่ายกลับไปให้อินเวอร์เตอร์ (regeneration) ทำให้แรงดันไฟตรง (แรงดัน คร่อม คอนเดนเซอร์) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นภายในอินเวอร์เตอร์จะมีวงจรที่ทำหน้าที่รับพลังงานที่เกิดจากการ regeneration ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเบรกมอเตอร์ วงจรนี้เรียกว่า วงจรเบรกคืนพลังงาน

ในช่วงการลดความเร็วจะทำงานในลักษณะนี้หลาย ๆ ครั้ง ถ้าพลังงานมีค่าน้อย (แรงบิดที่จำเป็นสำหรับการลด ความเร็วมีขนาดเล็ก) อัตราการใช้งานวงจรเบรกก็จะต่ำ บางครั้งอาจจะไม่ทำงานเลยก็มี

อัตราการใช้งานวงจรเบรกนี้ ได้รับการออกแบบโดยการพิจารณาในแง่ของการระบายความร้อนไว้ที่ 2-3 % เท่านั้น ถ้ามีการใช้เบรกบ่อย หรือใช้เบรกนานเกินไป จะทำให้เกิดปัญหาการระบายความร้อนของตัวต้านทาน และอาจ ทำให้อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์เสื่อมได้

4. การหยุด อินเวอร์เตอร์จะลดความถี่ลงจนถึงระดับหนึ่ง และจะผลิตไฟตรงเข้าไปในมอเตอร์เพื่อทำงานเป็นเบรก จนมอเตอร์หยุด เรียกว่า การเบรกด้วยไฟตรง

2.6.5 การใช้งานอินเวอร์เตอร์ในระบบงานต่างๆ

1. ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง ที่เรียกว่า Stand by power supply หรือ Uninterruptible Power Supplies (UPS) เพื่อใช้ทดแทนในกรณีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหลักเกิดความขัดข้อง
2. ใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้หลักการควบคุมความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อต้องการให้แรงบิด (Torque) คงที่ทุกๆ ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไป
3. ใช้แปลงไฟฟ้าจากระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงชนิดไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อบริการให้แก่ผู้ใช้
4. ใช้ในระบบเตาถลุงเหล็กที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน (Induction heating) ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงในการทำงาน

2.7 อุปกรณ์วัดความเร็วลม

เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) มีหลายประเภท หลายหัววัด ซึ่งสามารถเลือกใช้ตามความต้องการ อาทิ เช่น แบบ Thermal probe, Vane probe, Hot wire และ Pitot tube (กรณีใช้แบบ Pitot tube ซึ่งจะสามารถวัดความดันอากาศ เป็นการคำนวณค่า Differential pressure สำหรับวัดความเร็วลม ความดันในท่อ ซึ่งอาจมีอุณหภูมิสูงและเป็นลมที่ไม่สะอาด

เราสามารถแบ่งประเภท และช่วงการวัดความเร็วลม ตั้งแต่ช่วง 0-100 m/s คือ

1. ความเร็วลมต่ำ (low speed) คือความเร็วลมช่วง 0-5 m/s เหมาะกับหัววัดแบบวัดความร้อน (Thermal probe)

2. ความเร็วลมกลาง (mid speed) คือความเร็วลมช่วง 5-40 m/s เหมาะกับหัววัดแบบใบพัด (Vane probe) หรือ (Hot wire)

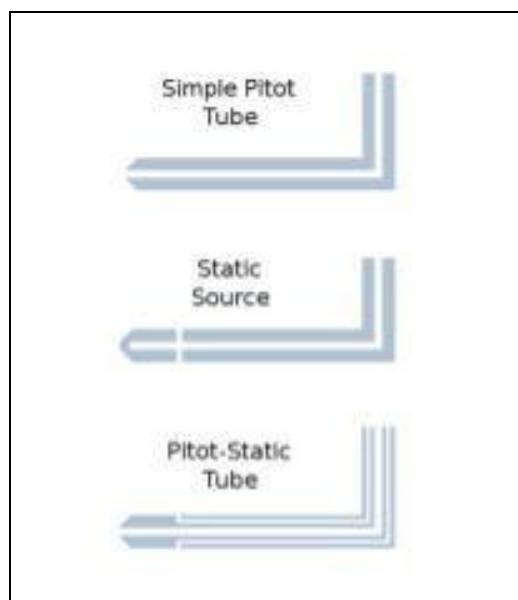
3. ความเร็วลมสูง (High speed) คือความเร็วลมช่วง 40-100 m/s เหมาะกับหัววัดแบบ Pitot tube

2.7.1 หลักการทำงานของหัววัดความเร็วลมแบบต่าง ๆ

1. หัววัดแบบวัดความร้อน (Thermal Probe) จะใช้หลักการคือ วัสดุที่ร้อนจะถูกถ่ายเทความร้อนเมื่อมีลมที่เย็นกว่ามากระทำ ซึ่งจากหลักการนี้เอง หัววัดชนิดนี้จึงทำจากลวดความร้อน โดยตัวเครื่องจะจ่ายกระแสให้ลวดความร้อนและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลา ซึ่งการควบคุมกระแสจะมีสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วลม แต่หัววัดชนิดนี้ค่อนข้างบอบบาง ต้องวัดในลมที่สะอาดและอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส

2. หัววัดแบบใบพัด (Vane Probe) จะใช้หลักการนับความเร็วรอบของใบพัดที่หมุนด้วย Proximity switch โดยใบพัดขนาดใหญ่ (60 mm, 100 mm) จะเหมาะกับลมที่มีลักษณะปั่นป่วน (Turbulent flows) เช่น ขาออกของท่อลม ฯลฯ และใบพัดขนาดเล็ก จะเหมาะสมกับการวัดลมในท่อ

3. หัววัดแบบพิทอททิว (Pitot tube) เป็น sensor วัดความดันที่ใช้ในการวัดความเร็วของของไหล Pitot tube ถูกคิดค้นขึ้นมาโดยวิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ Henri Pitot ในต้นศตวรรษที่ 18 และได้รับการปรับเปลี่ยนเพื่อให้รูปแบบทันสมัยขึ้นในกลางศตวรรษที่ 19 โดยวิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ Henry Darcy มันถูกใช้อย่างแพร่หลายในการวัดความเร็วลมในการบินและเป็นเครื่องมือวัดความเร็วของอากาศและก๊าซในงานอุตสาหกรรม



หลักการทํางานของ Pitot tube คือความดันทั้งหมด(Total pressure)จะเข้าไปในรูด้านหน้าของ Pitot tube โดยที่ให้ด้านหน้าของ Pitot tube ปะทะกับแรงลมและความดันคงที่ (Static pressure) จะเข้าไปในรูรอบๆด้านข้างของ Pitot tube และนำไปคำนวณเพื่อเปลี่ยนเป็นความเร็วได้ ดังนี้

จากสมการของ Bernoulli's

$$\text{Total pressure} = \text{Static pressure} + \text{Dynamic pressure}$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P_t = P_s + \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) \quad (2.38)$$

ซึ่งเมื่อแก้สมการให้เป็นความเร็วจะได้

$$V = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}} \quad (2.39)$$

โดย

- V : ความเร็วของของไหล (m/s)
 P_t : ความดันของของไหลทั้งหมด (Total Pressure), (Pa)
 P_s : ความดันคงที่ (Static Pressure), (Pa)
 ρ : ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

การใช้งาน Pitot tube sensor จะถูกนำไปต่อกับเครื่องมือวัดความดันแตกต่าง (Differential pressure) แล้วนำมาคำนวณตามสมการเบื้องต้น โดยเครื่องมือวัดจะสามารถคำนวณให้ได้ภายในตัวและแสดงผลเป็นทั้งความเร็วและอัตราการไหล

ตำแหน่งวัดความเร็วลมในท่อที่เหมาะสม ถ้าเป็นไปได้ ควรวัดที่ตำแหน่ง 10 เท่าของขนาดท่อที่มีแนวตรงก่อนจุดวัด และ 4 เท่าของขนาดท่อที่มีแนวตรงหลังจุดวัด ซึ่งจุดนี้จะทำให้ความเร็วลมในท่อสงบ เหมาะกับการวัด

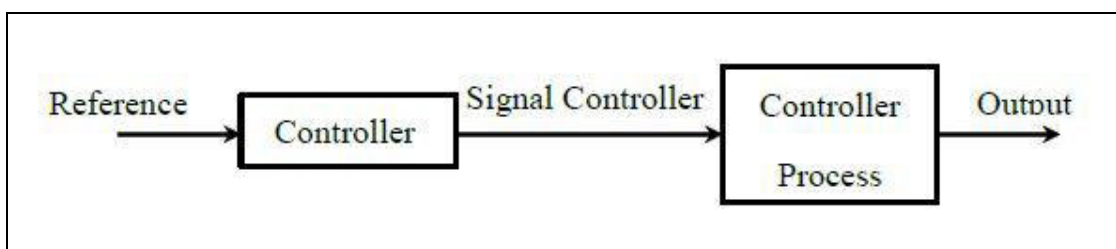
2.8 การควบคุมระบบ

ในปัจจุบันนี้ระบบควบคุมอัตโนมัติ ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนา ความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเป็นอย่างมาก ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดในชีวิตประจำวันได้แก่ระบบ ควบคุมในเครื่องปรับอากาศซึ่งจะคอยควบคุมอุณหภูมิภายในห้องให้คงที่ ในอุตสาหกรรมได้มีการ นำระบบควบคุมอัตโนมัติไปใช้ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ควบคุมการทำงานของเครื่องจักร และอื่น ๆ อีกมากมาย เทคโนโลยีทางด้านอวกาศและการผลิตอาวุธยุทโธปกรณ์ก็ได้ มีการนำระบบ ควบคุมไปใช้ในระบบนำวิถี ระบบควบคุมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เป็นต้น

2.8.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ

(Open - loop Control Systems, Nonfeedback Control Systems)

ในระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้การควบคุมส่วนใหญ่ต้องอาศัยการคาดคะเนและการตัดสินใจของมนุษย์ ตัวอย่างเช่น การควบคุมอุณหภูมิภายในห้องโดยเตาผิง ถ้าเตาผิงที่ใช้มีเพียงอุปกรณ์ตั้งเวลาเปิด - ปิด เท่านั้น ผู้ใช้หรือผู้ควบคุมจะต้องคาดคะเนและตั้งเวลาในการเปิดเตาผิงที่นานพอเหมาะ เพื่อให้อุณหภูมิห้องอยู่ในระดับที่ต้องการ แต่การควบคุมโดยมนุษย์เช่นนี้จะไม่แม่นยำและน่าเชื่อถือนัก เนื่องจากผู้ควบคุมไม่สามารถรู้ถึงคุณสมบัติเฉพาะในการสร้างความร้อนของเตาผิงนี้อีกทั้งยังมีปัจจัยต่าง ๆ จากภายนอก เช่น อุณหภูมิภายนอกห้องที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในห้อง จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้ไม่สามารถปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงของระบบอันเนื่องมาจากปัจจัยจากภายนอกได้



รูปที่ 2.26 ระบบควบคุมแบบวงเปิด [นิตยสาร, 2555]

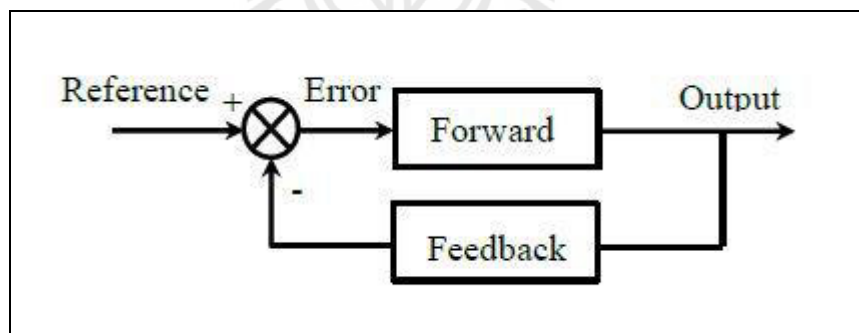
รูปที่ 2.26 แสดงแผนผังของระบบควบคุมแบบวงเปิด โดยสัญญาณอินพุตหรือสัญญาณสั่งการหรือสัญญาณอ้างอิงส่งผ่าน Controller ออกมาเป็นสัญญาณกระตุ้นหรือ สัญญาณควบคุมเพื่อสั่งให้ Controlled Process ขับเอาท์พุตที่ต้องการออกมา

2.8.2 ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

(Closed – loop Control Systems, Feedback Control Systems)

จากหัวข้อที่แล้วจะเห็นว่าเมื่อปัจจัยภายนอกมา มีอิทธิพลต่อระบบจะทำให้ ผู้ควบคุมไม่สามารถควบคุมเอาต์พุตให้เป็นไปตามต้องการได้ในหัวข้อนี้ได้แก้ไขโดยการส่งสัญญาณเอาต์พุต $c(t)$ ป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณตั้งการหรือสัญญาณอ้างอิงจะทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอ้างอิงทางด้านอินพุตเพื่อนำไปสร้าง สัญญาณกระตุ้นและส่งต่อไปแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของเอาต์พุตให้น้อยลงระบบที่กล่าวมานี้เรียกว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับ กิจกรรมส่วนใหญ่ที่มนุษย์ปฏิบัติในชีวิตประจำวัน นั้นเป็นตัวอย่างหนึ่งของระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ซับซ้อน

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับจากหลักการพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถกล่าวได้ว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับประกอบด้วยเส้นทางหรือวงรอบของสัญญาณป้อนกลับซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุตตั้งแต่หนึ่งวงรอบขึ้นไปแล้วนำสัญญาณป้อนกลับนี้มาเปรียบเทียบกับสัญญาณตั้งการหรือสัญญาณอ้างอิงจะได้ผลต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองเป็น Error เพื่อนำไปควบคุมสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าตามที่กำหนดโดยสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 2.27 ตัวควบคุม PID ที่ต่อเข้าควบคุมแบบอนุกรม [นิติศักดิ์,2555]

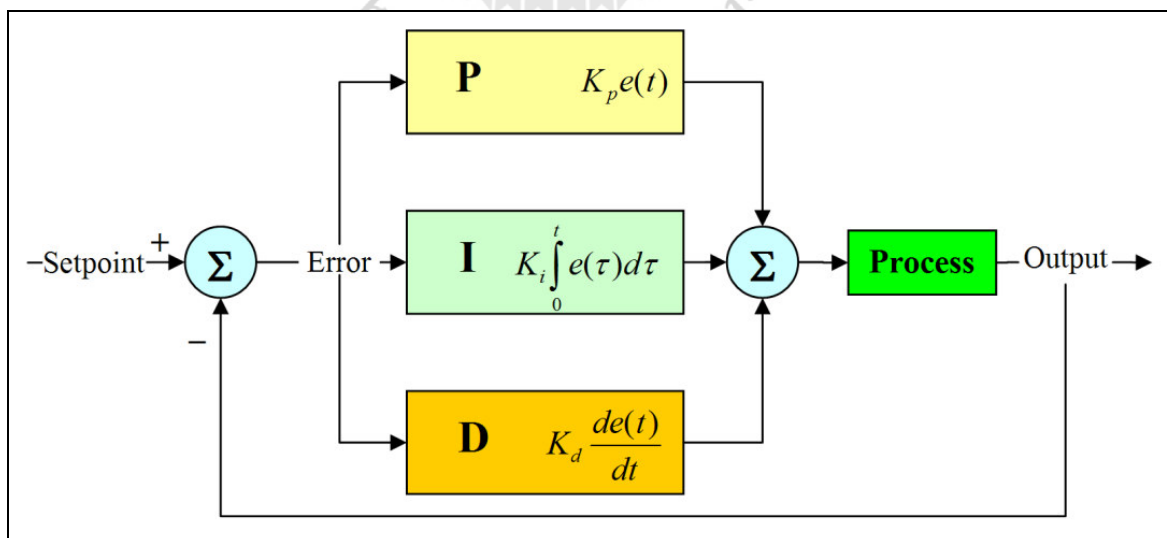
รูปที่ 2.27 แสดงแผนผังของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ระบบควบคุมนี้ประกอบด้วย ส่วน Forward (Forward Path) ส่วนป้อนกลับ (Feedback Path) และส่วนตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อน (Error – Sensing Device) ส่วนตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะเปรียบเทียบค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับค่าสัญญาณเอาต์พุตจริง ๆ หรือค่าที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณเอาต์พุต แล้วส่งสัญญาณที่เกิดจากผลต่างของสัญญาณทั้งสองนี้ออกไป

2.9 พื้นฐานการควบคุมแบบ PID

ระบบควบคุมแบบ PID ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบวิธีคำนวณของ PID ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าสัดส่วน ปริพันธ์ และ อนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งพ่วงผ่านไปและค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการ

โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะสมกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และ ค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) วิธี PID ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน

การประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ PID บางครั้งจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่าใช้รูปแบบใดบ้าง



รูปที่ 2.28 แผนภาพบล็อกตัวควบคุมแบบ PID [<http://th.wikipedia.org>]

การควบคุมแบบ PID ได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามตามสมการ

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (2.40)$$

เมื่อ P_{out} , I_{out} และ D_{out} เป็นผลของสัญญาณขาออกจากระบบควบคุม PID ประกอบด้วยเทอมส่วนประกอบ 3 ส่วนหลัก ซึ่งแต่ละเทอมซึ่งนิยามตามรายละเอียดดังนี้

- เทอมสัดส่วน (Proportional Term)
- เทอมปริพันธ์ (Integral Term)
- เทอมอนุพันธ์ (Derivative Term)

2.9.1 เทอมสัดส่วน (Proportional Term)

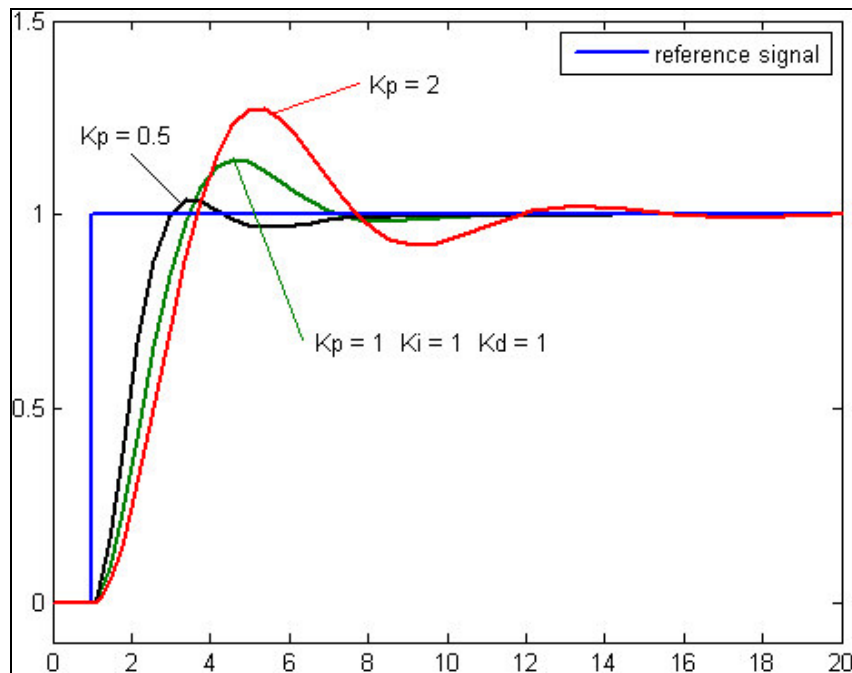
เทอมของสัดส่วน (บางครั้งเรียก อัตราขยาย) จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่า ความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วน เทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการ (2.41)

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.41)$$

เมื่อ

| | |
|-----------|--------------------------------------|
| P_{out} | : สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน |
| K_p | : อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้ |
| e | : ค่าความผิดพลาด $SP - PV$ |
| t | : เวลา |

ผลอัตราขยายสัดส่วนที่สูงค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน แต่ถ้าสูงเกินไประบบจะไม่เสถียรได้ ในทางตรงกันข้าม ผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำ ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองต่อกระบวนการน้อยตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.29 เปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ค่า K_p ต่าง ๆ



รูปที่ 2.29 กราฟแสดงค่า PV ที่ค่า K_p ต่าง ๆ (K_i และ K_d คงที่) [<http://th.wikipedia.org>]

2.9.2 เทอมปริพันธ์ (Integral Term)

ผลจากเทอมปริพันธ์ (บางครั้งเรียก Reset) เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์, K_i เทอมปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการ (2.42)

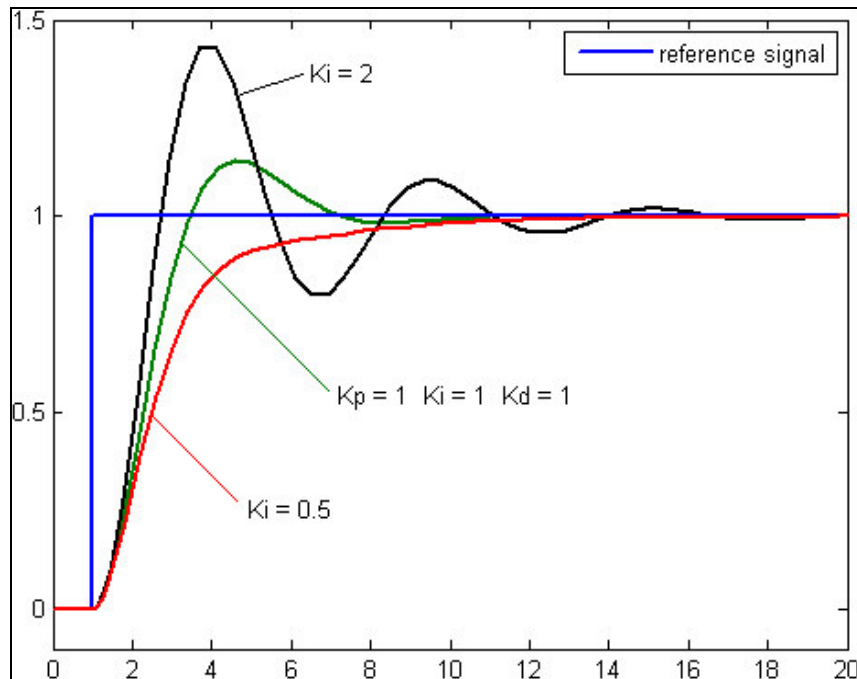
$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.42)$$

เมื่อ

- I_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์
- K_i : อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้
- e : ความผิดพลาด $SP - PV$
- t : เวลา
- τ : ตัวแปรปริพันธ์หุ่น

เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัด ความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม เทอมปริพันธ์เป็นการ

ตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ (ข้ามจุดที่ต้องการและเกิดการหันเหไปทางทิศทางอื่น) ดังแสดงในรูปที่ 2.30 เปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ค่า K_i ต่าง ๆ



รูปที่ 2.30 กราฟแสดงค่า PV ที่ค่า K_i ต่าง ๆ (K_p และ K_d คงที่) [<http://th.wikipedia.org>]

2.9.3 เทอมอนุพันธ์ (Derivative Term)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้นคำนวณหาจากความชันของความผิดพลาดทุกๆเวลา (นั่นคือ เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ K_d ขนาดของผลของเทอมอนุพันธ์ (บางครั้งเรียก อัตรา) ขึ้นกับอัตราขยายอนุพันธ์ K_d เทอมอนุพันธ์เป็นไปตามสมการ (2.43)

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.43)$$

เมื่อ

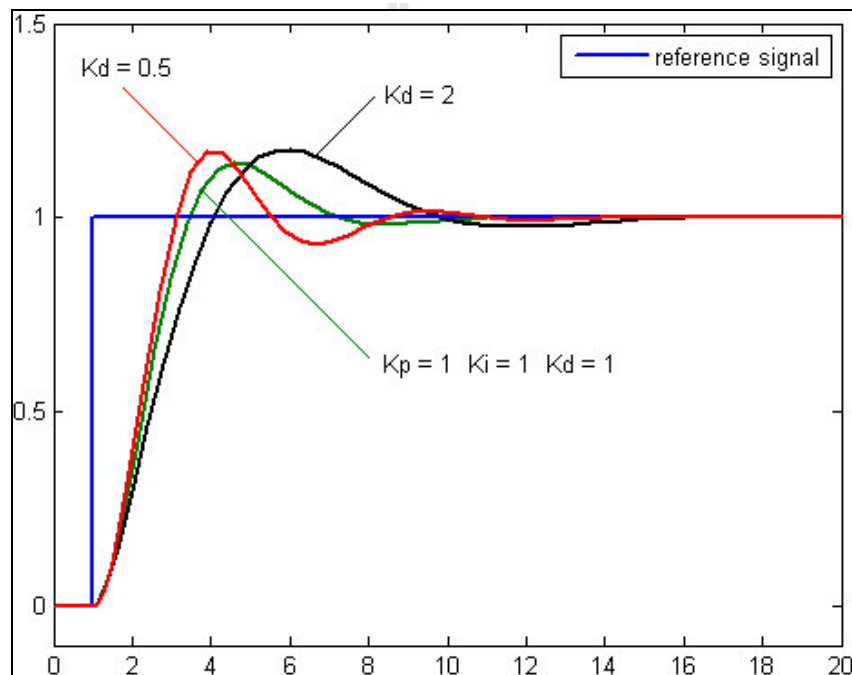
D_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน

K_d : อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้

e : ค่าความผิดพลาด $SP - PV$

t : เวลา

เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุมและด้วยผลนี้จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจากเทอมปริพันธ์และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้นแต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวน ในเทอมของความผิดพลาดและสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ ดังแสดงในรูปที่ 2.31 เปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ค่า K_d ต่าง ๆ



รูปที่ 2.31 กราฟแสดงค่า PV ที่ค่า K_d ต่าง ๆ (K_p และ K_i คงที่) [<http://th.wikipedia.org>]

2.9.4 ผลรวม PID Controller

เทอมสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ จะนำมารวมกันเป็นสัญญาณขาออกของการควบคุมแบบ PID กำหนดให้ $U(t)$ เป็นสัญญาณขาออก สมการสุดท้ายของตัวควบคุมแบบ PID คือ

$$U(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.44)$$

2.9.5 การปรับจูน PID Controller

การปรับจูน PID Controller สามารถทำได้หลายวิธีซึ่งวิธีที่เป็นที่นิยมคือการปรับจูนด้วยมือ (Manual) และการปรับจูนตามวิธีการของ Ziegler–Nichols

1) การปรับจูนแบบ Manual

ถ้าระบบยังคงทำงานขึ้นแรกให้ตั้งค่า K_i และ K_d เป็นศูนย์ เพิ่มค่า K_p จนกระทั่งสัญญาณขาออกเกิดการแกว่ง (Oscillate) แล้วตั้งค่า K_p ให้เหลือครึ่งหนึ่งของค่าที่ทำให้เกิดการแกว่งสำหรับการตอบสนองชนิด (Quarter Amplitude Decay) แล้วเพิ่ม K_i จนกระทั่งออฟเซตถูกต้องในเวลาทีพอเพียงของกระบวนการ แต่ถ้า K_i มากไปจะทำให้ระบบไม่เสถียรสุดท้ายถ้าต้องการให้เพิ่มค่า K_d จนกระทั่งลู่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่ถ้าค่า K_d มากเกินไปจะเป็นเหตุให้การตอบสนองและโอเวอร์ชูตเกินยอมรับได้ ปกติการปรับจูน PID ถ้าเกิดโอเวอร์ชูตเล็กน้อยจะช่วยให้เข้าสู่จุดที่ต้องการเร็วขึ้น แต่ในบางระบบไม่สามารถยอมให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ และถ้าค่า K_d น้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดการแกว่ง

ตารางที่ 2.3 ค่าตัวแปรการปรับจูนแบบ Manual

| ตัวแปร | ช่วงเวลานขึ้น (Rise time) | โอเวอร์ชูต (Overshoot) | เวลาสู่สมดุล (Settling time) | ความผิดพลาดสถานะคงตัว (Steady-state error) | เสถียรภาพ |
|--------|---------------------------|------------------------|------------------------------|--|---------------------------|
| K_p | ลด | เพิ่ม | เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย | ลด | ลด |
| K_i | ลด | เพิ่ม | เพิ่ม | ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ | ลด |
| K_d | ลดลงเล็กน้อย | ลดลงเล็กน้อย | ลดลงเล็กน้อย | ตามทฤษฎีไม่มีผล | ดีขึ้นถ้า K_d มีค่าน้อย |

2) วิธีปรับจูนแบบ Ziegler–Nichols

วิธีการนี้นำเสนอโดย John G. Ziegler และ Nathaniel B. Nichols ในคริสต์ทศวรรษที่ 1940 ขึ้นแรกให้ตั้งค่า K_i และ K_d เป็นศูนย์ เพิ่มอัตราขยาย P สูงที่สุด K_u จนกระทั่งเริ่มเกิดการแกว่ง นำค่า K_u และค่าช่วงการแกว่ง P_u มาหาค่าตัวแปรที่เหลือดังตารางที่ 2.4

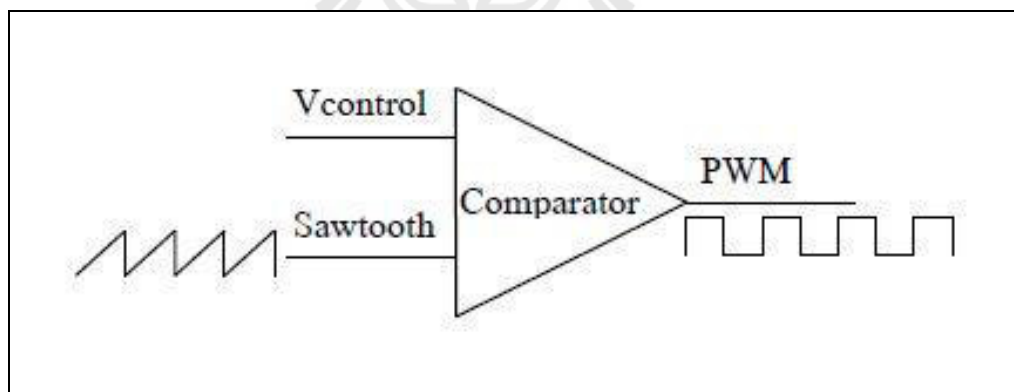
ตารางที่ 2.4 ค่าตัวแปรการปรับจูนแบบ Ziegler–Nichols

| Control Type | K_p | K_i | K_d |
|--------------|------------|-----------------|---|
| P | $0.50 K_u$ | - | - |
| PI | $0.45 K_u$ | $1.2 K_p / P_u$ | - |
| PID | $0.60 K_u$ | $2 K_p / P_u$ | $K_p n_s = 60 \times \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120}{p} f$ |

2.10 สัญญาณ PWM (Pulse width modulation)

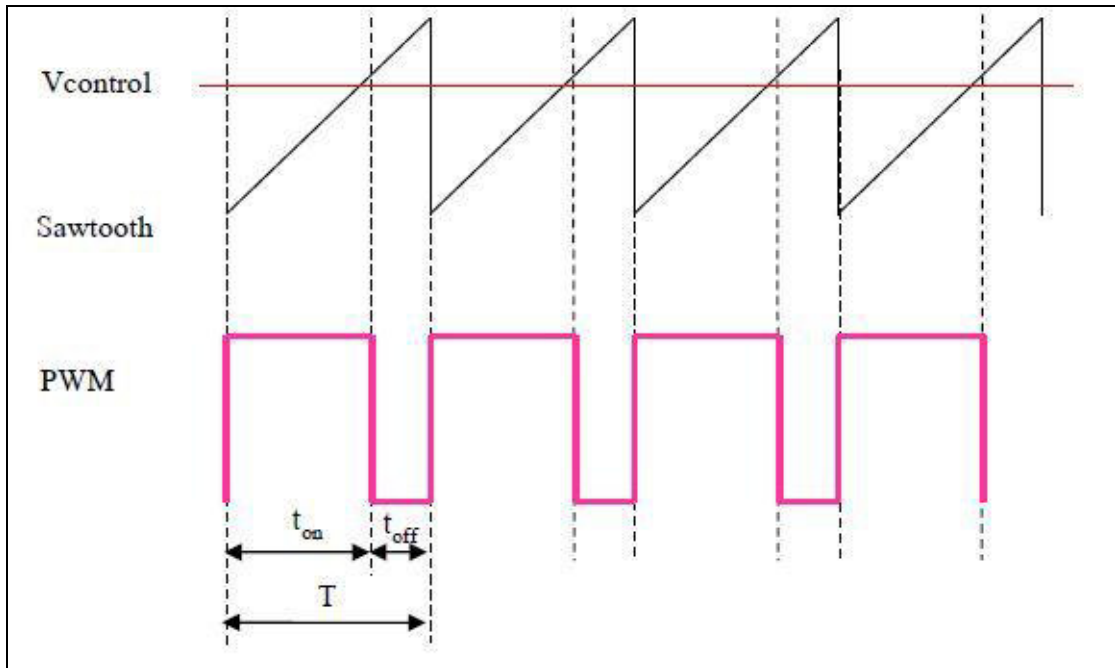
2.10.1 การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวงจรถอนาล็อก

การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวงจรถอนาล็อกจะใช้การสร้างสัญญาณฟันเลื่อยหรือสัญญาณแบบขั้นบันไดมาเปรียบเทียบกับระดับอ้างอิงที่เป็นระดับสัญญาณกระแสดตรงหรือสัญญาณรูป Sine ตามรูปแบบของสัญญาณ PWM ที่ต้องการสร้างสัญญาณ PWM แบบอนาล็อกจากรูป 2.32 สัญญาณ Sawtooth จะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณ V_{control} ผลของการเปรียบเทียบทำให้ได้สัญญาณดังแสดงตามรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.32 การเปรียบเทียบสัญญาณ PWM แบบอนาล็อก

[สมเกียรติ,2555]



รูปที่ 2.33 ผลการสร้างสัญญาณ PWM [สมเกียรติ,2555]

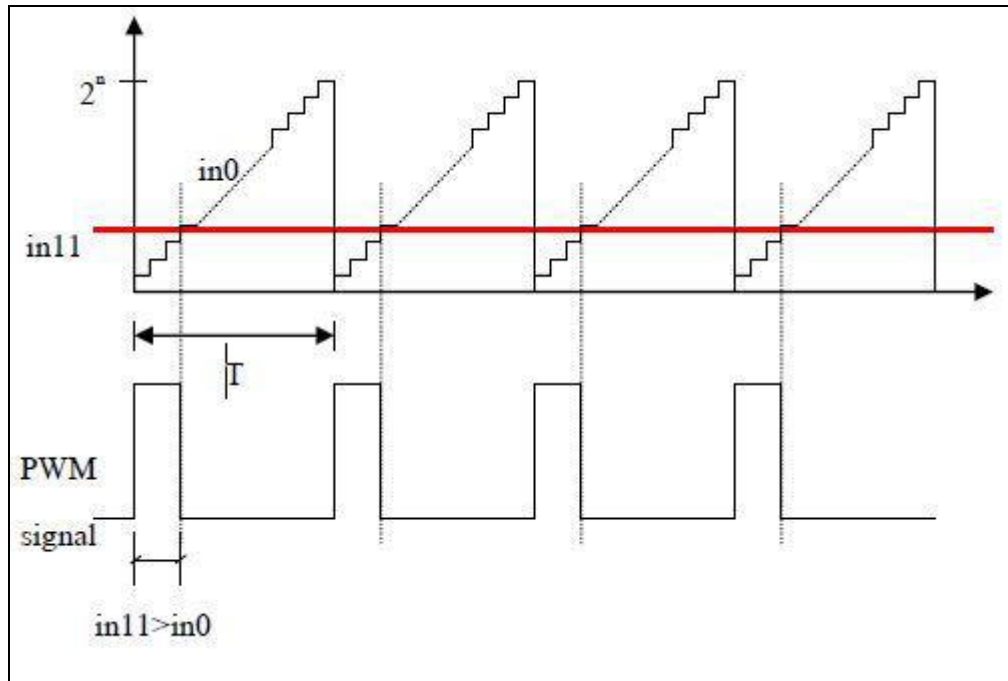
สัญญาณ Sawtooth จะทำให้ได้ระดับของ PWM เป็น High แต่เมื่อระดับของสัญญาณ $V_{control}$ ต่ำกว่าระดับของสัญญาณ Sawtooth จะทำให้ได้ระดับของ PWM เป็น Low ซึ่งคำนวณค่า %Duty cycle ได้เท่ากับ

$$\%Duty cycle = \frac{t_{on}}{T} \times 100\% \quad (2.45)$$

เมื่อ t_{on} : แทนค่าช่วงเวลาในสภาวะ High
 t_{off} : แทนค่าช่วงเวลาในสภาวะ Low
 T : คาบเวลา

2.10.2 การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวงจรถติจิตอล

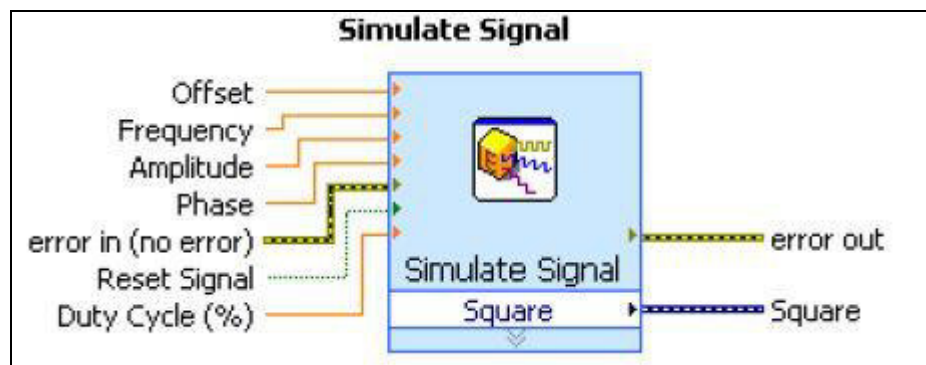
การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวงจรถติจิตอลจะใช้วงจรถับเป็นตัวนับสัญญาณ นาฬิกา in 0 ที่เข้ามา ซึ่งค่าที่นับได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นรูปขั้นบันไดตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปและนำสัญญาณขั้นบันไดดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับระดับสัญญาณอ้างอิง in11 ที่กำหนดผลของการเปรียบเทียบทำให้ได้สัญญาณ PWM เป็นระดับลอจิก High และ Low ตามรูป 2.34



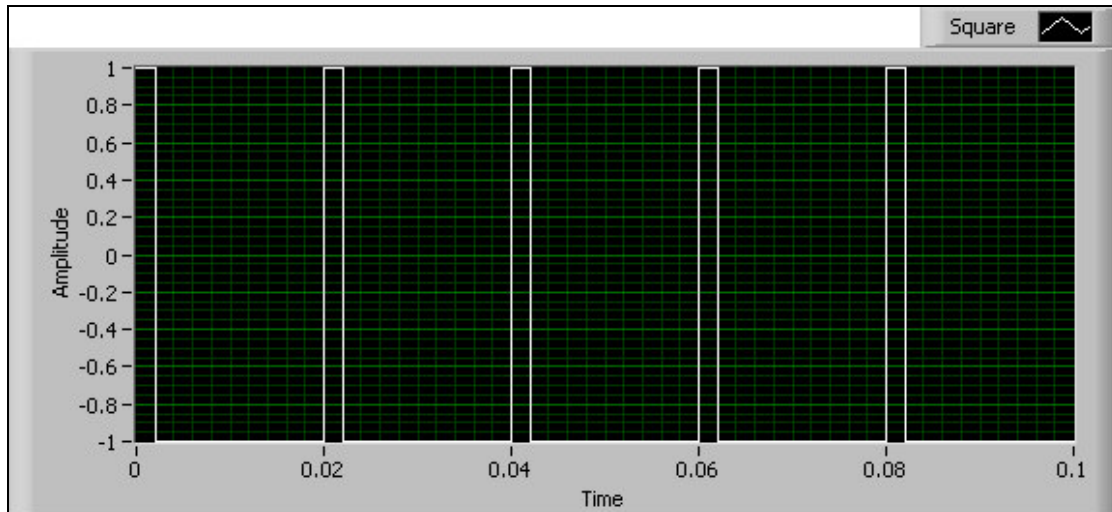
รูปที่ 2.34 การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยหลักการทางดิจิทัล [สมเกียรติ,2555]

2.10.3 การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยโปรแกรม LabVIEW

เราสามารถสร้างสัญญาณ Analog PWM ได้ด้วย Block Simulate Signal โดยต้องมีการกำหนดค่า Parameter ที่จำเป็นเช่น ค่า Frequency และค่า %Duty cycle และอื่น ๆ ตามรูป 2.35



รูปที่ 2.35 แสดง block Simulate Signal [สมเกียรติ,2555]



รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะสัญญาณ PWM จาก block Simulate Signal
[สมเกียรติ,2555]

บทที่ 3

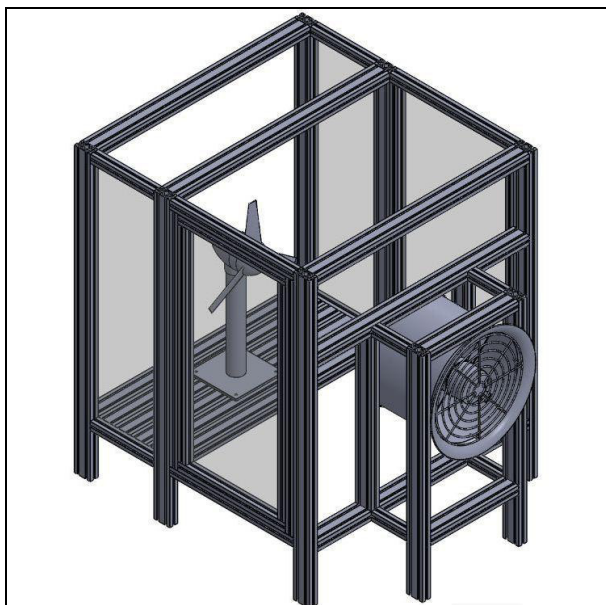
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

สาระสำคัญของบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงกระบวนการทำงานทั้งหมด ซึ่งจะเริ่มต้นจากออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์ การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ทดสอบความเร็วลมตลอดหน้าตัดใบพัด จำลองการสั่งงานด้วยโปรแกรม MATLAB ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของแหล่งกำเนิดลมโดยจะทำให้สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วรอบเพื่อปรับความเร็วลมที่หน้ากึ่งหุ่นยนต์ให้สามารถมีความเร็วในรูปแบบต่างๆ ตามที่ต้องการได้ โดยในที่นี่จะทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบเป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อนได้ 3 รูปแบบ แบบแรกเป็นฟังก์ชันแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นขั้นบันได แบบที่สองเป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบอัตราเร่งคงที่ และแบบสุดท้ายจะเป็นการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของฮาร์มอนิก โดยเมื่อเครื่องต้นแบบรับคำสั่งจากผู้ใช้งานทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ มอเตอร์จะทำงานตามชุดคำสั่ง เมื่อใบพัดหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะส่งข้อมูลแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า ผลคูณของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าก็จะให้ค่ากำลังไฟฟ้า เปรียบเสมือนกับการเป็น Power output ของระบบนั่นเอง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของแหล่งกำเนิดลม โดยใช้ทฤษฎีระบบควบคุมแบบ PID ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้เป็นแนวทางนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานลมต่อไป

3.2 การออกแบบต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับหลักการทางด้านอากาศพลศาสตร์ ลักษณะลมท้องถิ่น และหลักการสร้างอุโมงค์ลม จากนั้นได้ทำการออกแบบต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks 2011 ทำการออกแบบเครื่องต้นแบบมีขนาดความกว้างเท่ากับ 130 เซนติเมตร ความยาว 146 เซนติเมตร และความสูง 160 เซนติเมตร ใช้อะลูมิเนียมโปรไฟล์ เป็น โครงสร้างหลัก ส่วนผนังทำจากอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร และใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ความถี่ 50 Hz. กำลัง 0.37 kW. เป็นแหล่งกำเนิดลม



รูปที่ 3.1 ต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้

3.3 การสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้

ต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ถูกสร้างขึ้นด้วยส่วนประกอบสำคัญหลายส่วนด้วยกัน ส่วนของโครงสร้างหลักของเครื่องต้นแบบใช้อะลูมิเนียมโปรไฟล์แหล่งกำเนิดลมสร้างจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 50 Hz. กำลัง 0.37 kW. ซึ่งทำงานโดยใช้งานร่วมกับชุดควบคุมสัญญาณ โดยสั่งงานจากโปรแกรม LabVIEW 2013 ส่งสัญญาณตามคำสั่งของผู้ใช้งานไปยังอินเวอร์เตอร์ จากนั้นอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่มีการติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าของเครื่องต้นแบบ นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วลมที่บริเวณด้านหน้าของชุดใบพัดกังหันลมเพื่อประมวลผล ส่งสัญญาณป้อนกลับมายังคอมพิวเตอร์โดยใช้ควบคุมแบบ PID ดังแสดงในรูป 3.2 ซึ่งรายละเอียดอุปกรณ์จะมีการกล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 3.2 ต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้

3.3.1 3-phase AC motor

เนื่องจากในระบบผู้วิจัยต้องการสร้างแหล่งกำเนิดลมให้มีความเร็วลมตั้งแต่ 0-6 เมตร/วินาที ดังนั้นจึงได้ทำการคำนวณเพื่อเลือกมอเตอร์ที่จะนำมาติดตั้ง โดยกำหนดให้ขนาดของพื้นที่หน้าตัดวงกลมมอเตอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร (ความยาวใบพัดเท่ากับ 0.52 เมตร) โดยคำนวณอัตราการไหลจากสมการ

$$Q = AV \quad (3.1)$$

$$Q = \pi r^2 v$$

$$Q = \frac{22}{7} \times 0.3m \times 0.3m \times 6m / s$$

$$Q = 1.7m^3 / s$$

จากนั้นคำนวณหาค่าลมมอเตอร์จากสมการ

$$P = \dot{w} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \quad (3.2)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho Q v^2$$

$$P = \frac{1}{2} \times 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.8 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

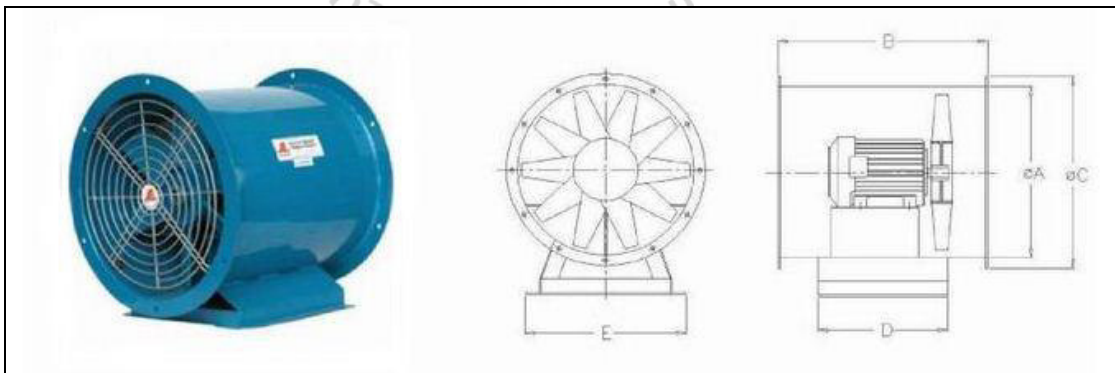
$$P = 38.88 \text{ watt}$$

โดยค่า $\rho_{\text{air}@25^\circ\text{C}} = 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

ผู้วิจัยคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์เป็น 30 % ดังนั้นหากต้องการกำลังเท่ากับ 38.88 watt ต้องใช้มอเตอร์ที่มีกำลังเท่ากับ $\frac{38.88 \times 100}{30} = 129.6 \text{ watt}$ หรือประมาณ 130 watt

ผู้วิจัยคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบเป็น 50 % ดังนั้นหากต้องการกำลังเท่ากับ 130 watt ต้องใช้มอเตอร์ที่มีกำลังเท่ากับ $\frac{130 \times 100}{50} = 260 \text{ watt}$

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ 3-phase AC motor ขนาด 0.5 hp นั่นคือมีกำลังอยู่ที่ 0.37 kW. นั่นคือแหล่งกำเนิดลมเป็นพัดลมถึงกลมแบบมอเตอร์ขับเคลื่อน (Axial fan : Direct drive) Model : VFD-3122 ของบริษัท ซาปะ เอ็นจิเนียริง จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 พัดลมถึงกลมแบบมอเตอร์ขับเคลื่อน Model : VFD-3122

[<http://www.sapaengineer.com>]

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเทคนิคของพัดลมถังกลมแบบมอเตอร์ขับเคลื่อน Model : VFD-3122

| Model | Impeller mm. | Motor | | | CMM | SP mmWG | Dimension | | | | |
|----------|-----------------|-------|------|---------|-----|------------|-----------|-----|-----|-----|-----|
| | | HP | RPM | V | | | A | B | C | D | E |
| VFD-3122 | 280 | 1/2 | 2800 | 220/380 | 42 | 22 | 300 | 400 | 368 | 250 | 280 |

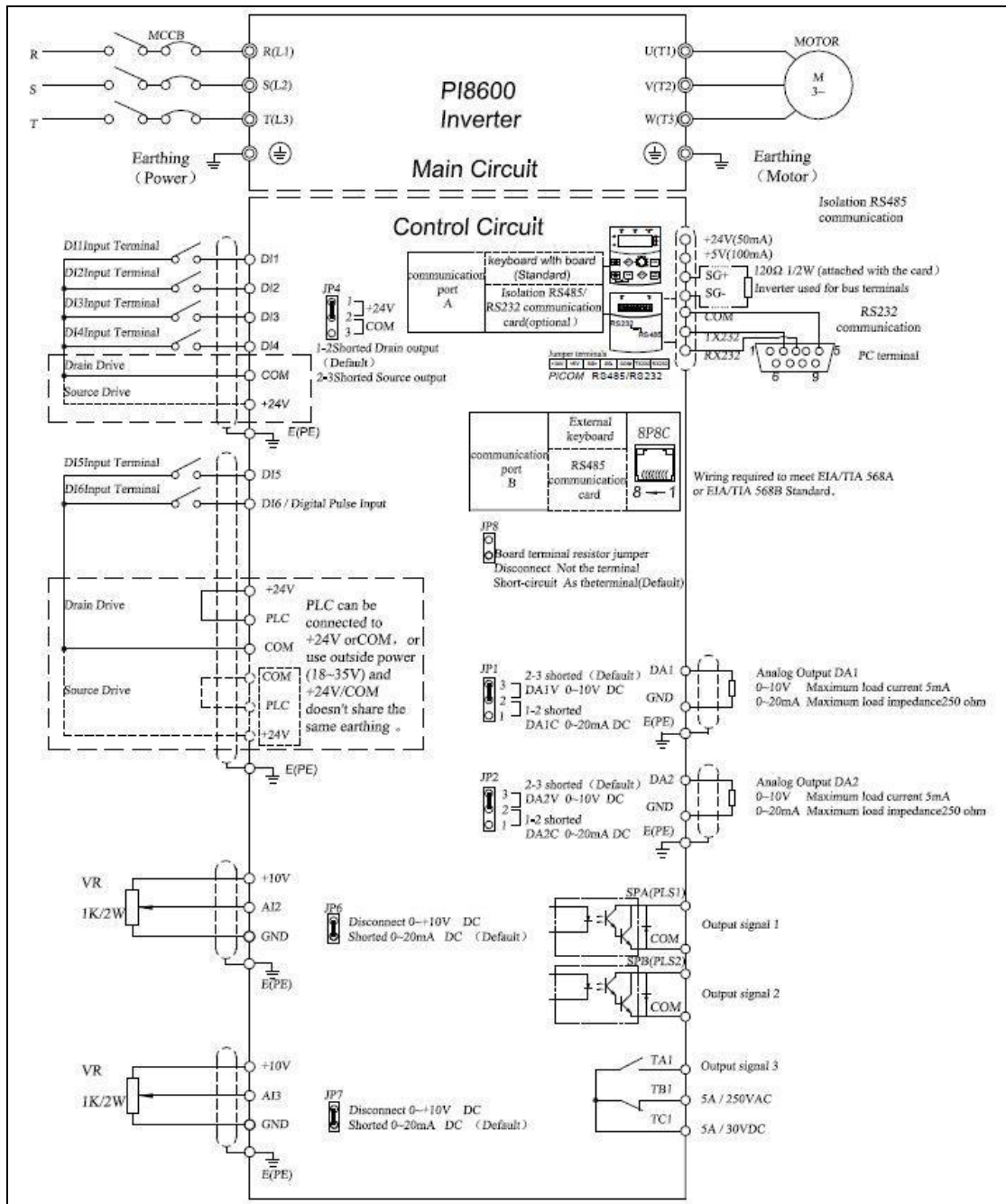
3.3.2 INVERTER

เนื่องจาก AC motor จำเป็นต้องใช้ร่วมกับ Inverter หรือ AC Drive เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ควบคุมการทำงานของทำงานมอเตอร์ ซึ่งถือเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญตัวหนึ่งที่จะทำให้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้อย่างราบเรียบ และต้องมีความถูกต้องในการควบคุม เพราะต้องนำค่าความต่างศักย์จาก NI-DAQ ป้อนให้กับ Inverter เพื่อแปลงเป็นสัญญาณความถี่ให้กับมอเตอร์ ดังนั้นทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ Inverter ยี่ห้อ POWTRAN รุ่น PI8600 ดังแสดงใน รูปที่ 3.4 ซึ่งมีความสามารถสั่งงานได้อย่างแม่นยำและมีเสถียรภาพในการทำงานสูง อีกทั้งยังมีความสามารถในการปรับค่าของการควบคุมได้ที่ตัวชุดควบคุม และวงจรการต่อใช้งานเพื่อควบคุมมอเตอร์ดังแสดงในรูป 3.5



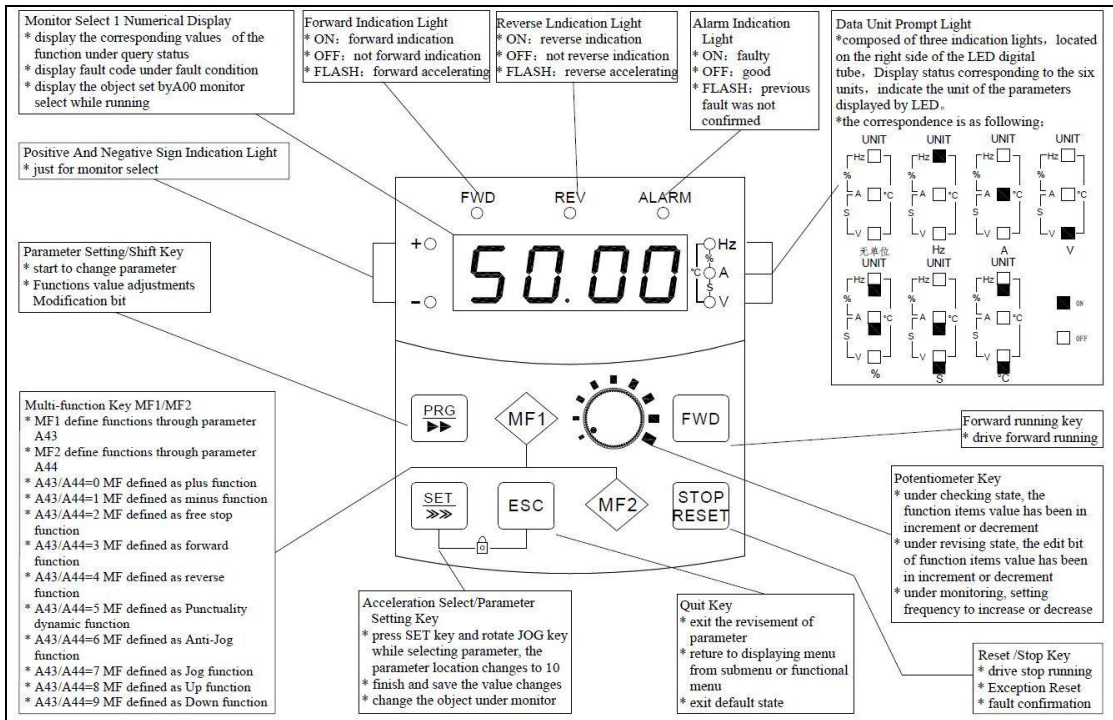
รูปที่ 3.4 Inverter ยี่ห้อ POWTRAN รุ่น PI8600

[<http://www.electricmotorshop.co.uk>]



รูปที่ 3.5 Diagram ต่อใช้งาน Inverter ยี่ห้อ POWTRAN รุ่น PI8600

[<http://www.powtranthailand.com>]



รูปที่ 3.6 คุณสมบัติและฟังก์ชันใช้งาน Inverter ยี่ห้อ POWTRAN รุ่น PI8600

[<http://www.powtranthailand.com>]

3.3.3 NI-USB 6008

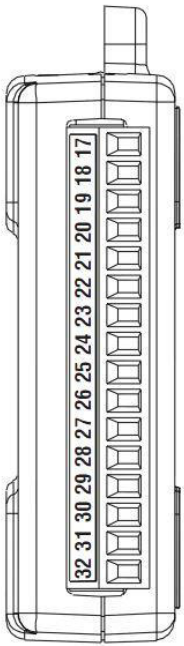
NI-USB ของบริษัท National instrument รุ่น 6008 สามารถเชื่อมต่ออนาล็อกอินพุต (AI) ได้ทั้งหมด 8 ช่องสัญญาณ และอนาล็อกเอาต์พุต (AO) 2 ช่องสัญญาณ อีกด้านจะเป็นการรับสัญญาณดิจิทัลอินพุต / เอาต์พุต (DIO) ทั้งหมด 12 ช่องสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 โดยสัญญาณที่ออกจาก NI-USB 6008 จะอยู่ในลักษณะสัญญาณพัลส์แบบอนาล็อก ส่งออกมาเพื่อใช้ควบคุมความเร็วของ motor ผ่านอินเวอร์เตอร์ โดยอินเวอร์เตอร์จะรับและแปลงสัญญาณอนาล็อกจาก NI-USB 6008 ไปควบคุมการทำงานของ motor (V/F control) สำหรับสัญญาณที่ส่งไปยังอินเวอร์เตอร์นั้น จะอยู่ในลักษณะสัญญาณแบบPWM (Pulse Width Modulation) ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนค่าความกว้างสัญญาณพัลส์นั่นเอง



รูปที่ 3.7 NI -USB 6008 [<http://www.ni.com>]

| Module | Terminal | Signal, Single-Ended Mode | Signal, Differential Mode |
|--------|----------|------------------------------|------------------------------|
| | 1 | GND | GND |
| | 2 | AI 0 | AI 0+ |
| | 3 | AI 4 | AI 0- |
| | 4 | GND | GND |
| | 5 | AI 1 | AI 1+ |
| | 6 | AI 5 | AI 1- |
| | 7 | GND | GND |
| | 8 | AI 2 | AI 2+ |
| | 9 | AI 6 | AI 2- |
| | 10 | GND | GND |
| | 11 | AI 3 | AI 3+ |
| | 12 | AI 7 | AI 3- |
| | 13 | GND | GND |
| | 14 | AO 0 | AO 0 |
| | 15 | AO 1 | AO 1 |
| | 16 | GND | GND |

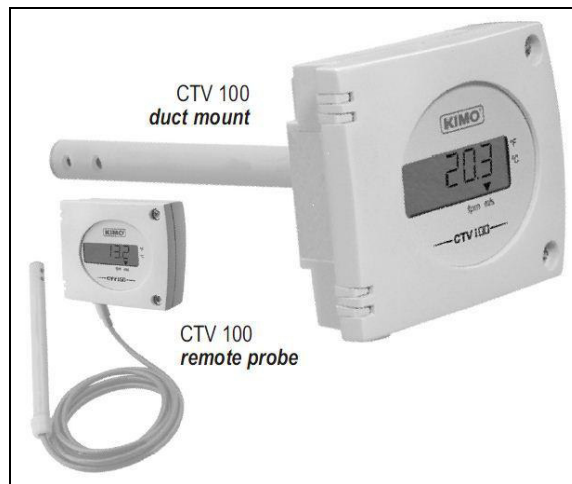
รูปที่ 3.8 Analog Terminal Assignments [<http://www.ni.com>]

| Module | Terminal | Signal |
|--|----------|--------|
|  | 17 | P0.0 |
| | 18 | P0.1 |
| | 19 | P0.2 |
| | 20 | P0.3 |
| | 21 | P0.4 |
| | 22 | P0.5 |
| | 23 | P0.6 |
| | 24 | P0.7 |
| | 25 | P1.0 |
| | 26 | P1.1 |
| | 27 | P1.2 |
| | 28 | P1.3 |
| | 29 | PFI 0 |
| | 30 | +2.5 V |
| | 31 | +5 V |
| | 32 | GND |

รูปที่ 3.9 Digital Terminal Assignments [<http://www.ni.com>]

3.3.4 Air Velocity Transmitter

เซนเซอร์วัดความเร็วลมที่ใช้เป็นของบริษัท KIMO Instruments รุ่น CTV 100 วัดความเร็วลมโดยอาศัยหลักการทำงานของ Hotwire ซึ่งเมื่อมีอากาศไหลผ่าน Air Velocity Transmitter จะทำการส่งสัญญาณอนาล็อกมายัง NI-USB 6008 โดยสัญญาณที่รับมานั้นจะเป็นค่ากระแสตั้งแต่ 4-20 mA. เพื่อเป็นข้อมูลป้อนกลับให้แก่ระบบ จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณและใช้ทฤษฎีควบคุม PID ในการปรับแต่งสัญญาณต่อไป

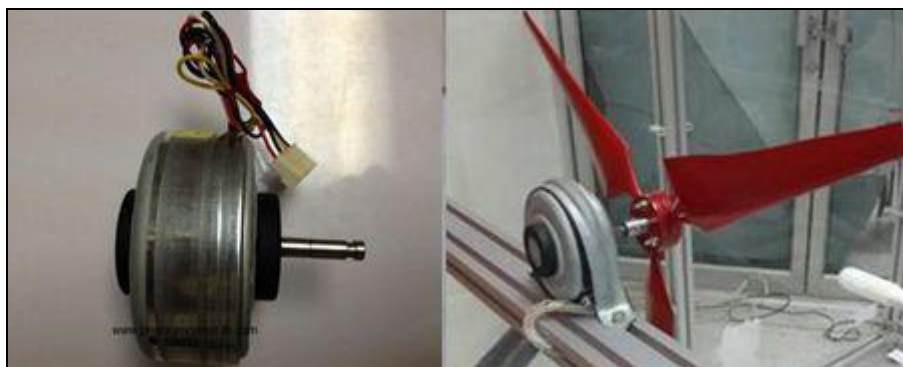


รูปที่ 3.10 Air Velocity Transmitter รุ่น CTV 100 [www.envirolab.rs]

3.3.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่เราใช้ในการวัดกำลังว่าใบพัดของกังหันลมนั้นสามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์ในอากาศมาเป็นพลังงานกลได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างแรงเคลื่อนและกระแสไฟได้แล้ว ผลคูณของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าก็จะให้ค่ากำลังไฟฟ้า ซึ่งในอุปกรณ์การทดลองนี้จะเปรียบเสมือนกับการเป็น Power output ของระบบนั่นเอง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกที่จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารุ่น Generator 28 W มีค่า Output voltage : 0-140 VDC และกระแสที่สามารถผลิตได้ 10 mA สาเหตุที่เลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้เพราะมีขนาดเล็ก และสามารถรองรับกำลังที่กังหันลมสร้างขึ้นได้อย่างพอเพียง ลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เป็นไปตามรูปที่ 3.11 ทั้งก่อนที่จะติดตั้งและหลังจากที่ติดตั้งเข้ากับระบบแล้ว



รูปที่ 3.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง [www.premiumcenter-th.com]

3.3.6 ใบพัดกังหันลม

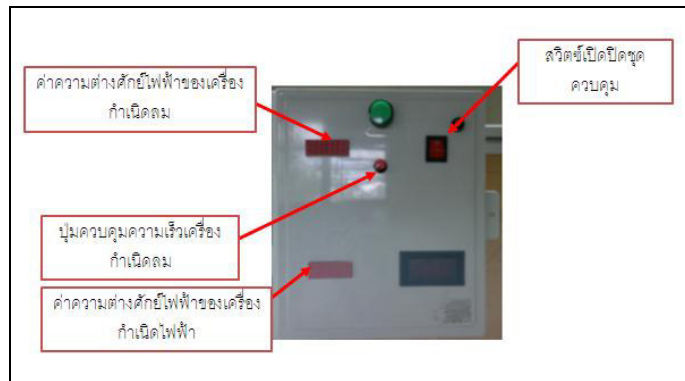
ใบพัดกังหันลมที่ใช้ในการทดลอง เป็นใบพัดกังหันลมขนาดเล็ก NACA 64518 โดยออกแบบจากโปรแกรม SolidWorks จากนั้นขึ้นรูปจากเครื่อง 3D PRINT (Rapid Prototype) โดยชุดใบพัดที่ใช้ในการทดลองมีทั้ง 2 และ 3 ใบพัด



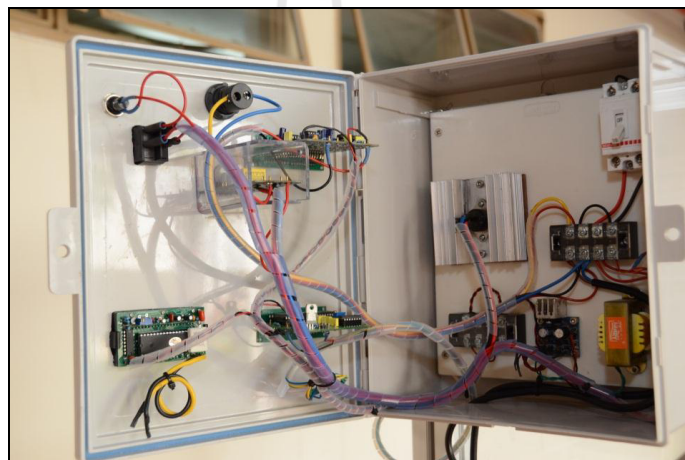
รูปที่ 3.12 ชุดใบพัดกังหันลม

3.3.7 ชุดควบคุมความเร็วลมด้วยการปรับมือและชุดแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้า

เป็นอุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งไว้บริเวณด้านหน้าของเครื่องต้นแบบ ประกอบด้วยชุดควบคุมความเร็วลมด้วยการปรับมือและชุดแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 3.13 โดยจะสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยการปรับมือในกรณีที่ไม่ต้องการสั่งงานจากโปรแกรม โดยอาศัยหลักการการปรับค่าความต้านทาน



รูปที่ 3.13 ลักษณะภายนอกชุดควบคุมและชุดแสดงผล



รูปที่ 3.14 ลักษณะภายในชุดควบคุมและชุดแสดงผล

3.4 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

ต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ถูกสร้างขึ้นด้วยส่วนประกอบสำคัญหลายส่วนด้วยกัน ส่วนของแหล่งกำเนิดลมสร้างจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 50 Hz. กำลัง 0.37 kW. และเพื่อความแม่นยำ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและจำลองการทำงานของมอเตอร์ก่อนใช้งานจริงด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งในการวิเคราะห์นั้นมีความจำเป็นที่จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เพื่อใช้ในการจำลองการทำงานต่อไป

โดยทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ Model VFD - 3122 ขนาด 3ϕ , 0.5 hp , 2 pole , 380 V , 50 Hz , 3000 rpm

ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่าประกอบด้วย จำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ (N_s), ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (R_s), ค่า Leakage inductance ของขดลวดสเตเตอร์ (L_{ls}), ค่า Resistance ของโรเตอร์ (R_r), ค่า Leakage inductance ของโรเตอร์ (L_{lr}) และ ค่า Magnetizing inductance (L_m) ซึ่งมีวิธีการหาค่าดังต่อไปนี้

3.4.1 คำนวณหาความเร็วเชิงโรตัสในหน่วยของรอบ/นาที

เมื่อจ่ายสัญญาณรูปไซน์เวฟสมมูล 3 เฟสที่มีความถี่ $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ให้กับสเตเตอร์ กระแสที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสถานะสมมูลทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก B_{ag} กระจายออกมาในช่องว่างอากาศ (air gap) ซึ่งมีขนาดที่คงที่และหมุนรอบโรเตอร์ด้วยความเร็วที่คงที่เรียกว่าความเร็วเชิงโรตัส (synchronous speed) ω_s มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที ความเร็วเชิงโรตัสของมอเตอร์สามารถหาได้จาก

$$\omega_s = \frac{2\pi(p/2)}{1/f} = \frac{2}{p}(2\pi f) = \frac{2}{p}\omega \quad (3.3)$$

โดยที่ p คือจำนวนขั้วของมอเตอร์

ที่ความถี่ f ซึ่งเป็นความถี่ของแรงดันและกระแสที่จ่ายให้กับสเตเตอร์เราสามารถ คำนวณหาความเร็วเชิงโรตัสในหน่วยของรอบ/นาทีได้จาก

$$N_s = 60 \times \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120}{p} f \quad (3.4)$$

จะได้ $N_s = \frac{120}{2} \times (50)$

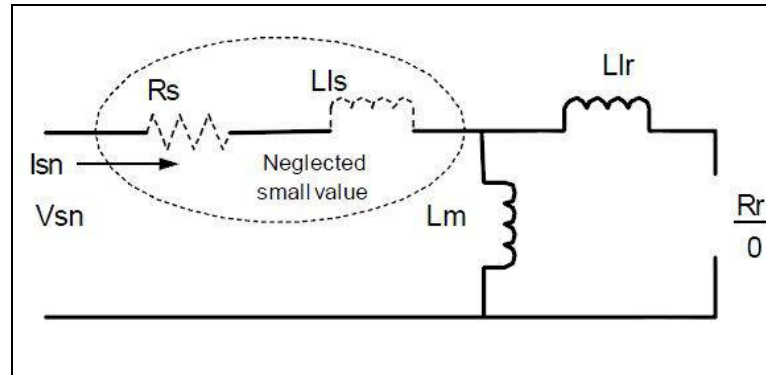
$$N_s = 3000 \text{ รอบ/นาที}$$

3.4.2 มอเตอร์อยู่นิ่ง

ในสถานะที่มอเตอร์ยังไม่ทำงานจากโครงสร้างของมอเตอร์สามารถประมาณค่าความต้านทานสเตเตอร์ได้จากการวัดค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์โดยใช้โอห์มมิเตอร์

3.4.3 มอเตอร์ทำงานที่สภาวะไม่มีโหลด

มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็วรอบสูงสุด ประมาณว่า $s = 0$ และ $R_s \ll X_{Lm}$



รูปที่ 3.15 วงจรเสมือนมอเตอร์เหนี่ยวนำสภาวะไม่มีโหลด [กลยุทธ์, 2549]

ทำการวัดค่าต่างๆ ได้ดังนี้ $V_{L-L} = 380\text{V}$

เฟสโวลเตจ (V_s) $V_s = \frac{380}{\sqrt{3}}$ (เท่ากับแรงดัน $\frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}}$)

Stator current (I_s) $I_s = 0.672\text{ A}$

Power (P) $P = 93.4\text{ Watt}$

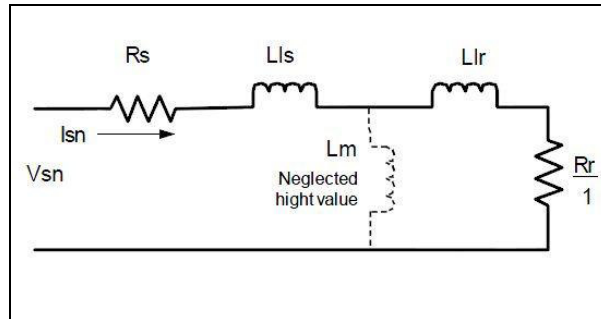
Power Factor (PF) $PF = 0.21$

จากสมการ
$$L_{ls} + L_m = \frac{V_s}{I_s 2\pi f} \quad (3.5)$$

แทนค่า
$$L_{ls} + L_m = \frac{380\sqrt{3}}{(0.672)2\pi(50)}$$

จะได้
$$L_{ls} + L_m = 1.0392 \quad (3.6)$$

3.4.4 มอเตอร์ทำงานที่สภาวะโรเตอร์ถูกล๊อคไม่ให้หมุน ค่าสลลิป (S=1) ของมอเตอร์จะมีค่าเป็นหนึ่ง



รูปที่ 3.16 วงจรเสมือนมอเตอร์เหนี่ยวนำสภาวะ โรเตอร์ถูกล๊อคไม่ให้หมุน
[กลยุทธ์เลขไทย, 2549]

ทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ผลทดสอบค่าต่างๆดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าจากการทดสอบมอเตอร์ทำงานที่สภาวะ โรเตอร์ถูกล๊อคไม่ให้หมุน

| ครั้งที่ | 1 | 2 | 3 |
|---------------|---------|---------|-------|
| I (A) | 0.64667 | 0.80833 | 0.97 |
| V_{L-L} (V) | 71 | 86.8 | 102.8 |
| I_ϕ (A) | 0.64 | 0.81 | 0.973 |
| PF | 0.74 | 0.76 | 0.77 |
| P | 58 | 92.3 | 133.7 |

3.4.5 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์

ค่าความต้านทานโรเตอร์คำนวณจากสมการ

$$R_r = R_{eq} - R_s \quad (3.7)$$

และค่าความเหนี่ยวนำรั่วสเตเตอร์เท่ากับค่าความเหนี่ยวนำรั่วโรเตอร์

$$L_{ls} = L_{lr} = \frac{L_{eq}}{2} \quad (3.8)$$

โดย $R_{eq} = \frac{V_s}{I_s} \cos \theta \quad (3.9)$

$$X_{eq} = \frac{V_s}{I_s} \sin \theta \quad (3.10)$$

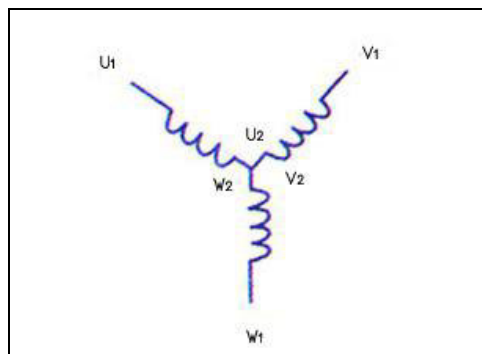
และ $\cos \theta = PF \quad (3.11)$

จากสมการข้างต้นสามารถหาค่า θ , R_{eq} และ X_{eq} ได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่า θ , R_{eq} และ X_{eq} จากการทดสอบมอเตอร์

| ค่า | θ | R_{eq} | X_{eq} |
|------------|----------|----------|----------|
| ครั้งที่ 1 | 42.2686 | 82.0937 | 74.6143 |
| ครั้งที่ 2 | 40.5358 | 81.442 | 69.646 |
| ครั้งที่ 3 | 39.6461 | 81.3525 | 67.411 |
| ค่าเฉลี่ย | | 47.1288 | 40.7367 |

หาค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (R_s) จากการวัดค่าความต้านทานของขดลวดในแต่ละเฟสซึ่งจะมีความสมดุลกันทางไฟฟ้า (Balance Phase)



รูปที่ 3.17 ขดลวดเหนี่ยวนำ 3 เฟส

โดยทำการวัดค่าความต้านทาน ได้ค่าดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าความต้านทานของขดลวดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

| ค่า | ค่าความต้านทาน (Ω) |
|-------------|--|
| $v_1 - w_1$ | 38.8 |
| $u_1 - v_1$ | 38.8 |
| $u_1 - w_1$ | 38.8 |
| v | 19.4 (มีค่าเท่ากับ $\frac{v_1 - w_1}{2}$) |
| u | 19.4 (มีค่าเท่ากับ $\frac{v_1 - w_1}{2}$) |
| w | 19.4 (มีค่าเท่ากับ $\frac{v_1 - w_1}{2}$) |

นั่นคือค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (R_s) มีค่าเท่ากับ 19.4 Ω

ดังนั้นจากสมการ (3.7) จะสามารถหาค่าความต้านทานโรเตอร์

$$\begin{aligned} \text{นั่นคือ} \quad R_r &= 47.1288 - 19.4 \\ R_r &= 27.7288 \Omega \end{aligned}$$

และจากสมการ (3.8) จะสามารถหาค่า Leakage inductance ของขดลวดสเตเตอร์ (L_{ls}) และค่า Leakage inductance ของโรเตอร์ (L_{lr})

$$\begin{aligned} L_{ls} = L_{lr} &= \frac{L_{eq}}{2} \\ L_{ls} = L_{lr} &= \frac{X_{eq}}{2\pi f} \times \frac{1}{2} \\ L_{ls} = L_{lr} &= \frac{40.7367}{2\pi(50)} \times \frac{1}{2} \\ L_{ls} = L_{lr} &= 0.06483H \end{aligned}$$

ดังนั้นจากสมการ (3.6) จะสามารถหาค่า Magnetizing inductance (L_m) ได้

$$L_m = 1.0392 - 0.06483$$

$$L_m = 0.9352H$$

สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ได้ดังตารางที่ 3.5

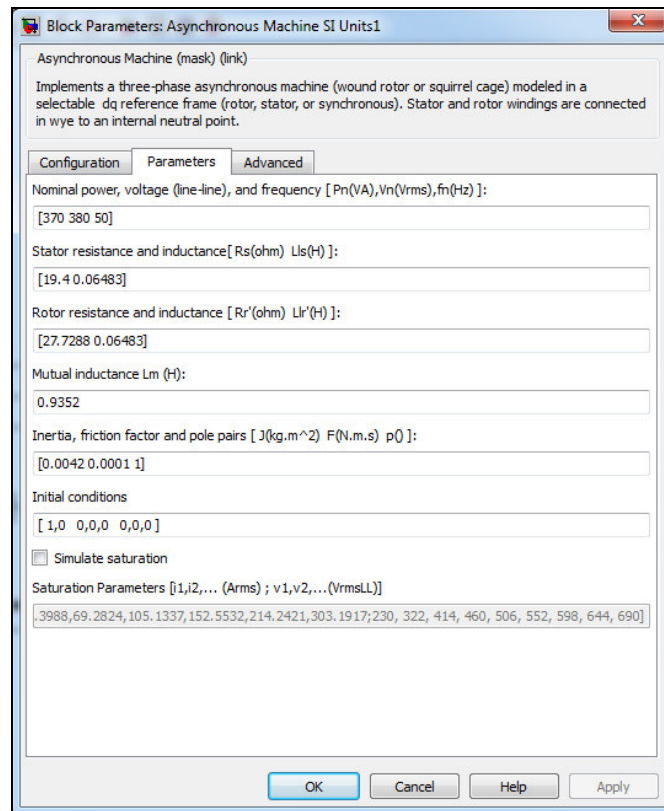
ตารางที่ 3.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

| พารามิเตอร์ | ค่า |
|--|------------------|
| จำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ (N_s) | 3000 RPM |
| Resistance ของขดลวดสเตเตอร์ (R_s) | 19.4 Ω |
| Resistance ของโรเตอร์ (R_r) | 27.7288 Ω |
| Leakage inductance ของขดลวดสเตเตอร์ (L_{ls}) | 0.06483 H |
| Leakage inductance ของโรเตอร์ (L_{lr}) | 0.06483 H |
| Magnetizing inductance (L_m) | 0.93520 H |

3.5 การจำลองการควบคุมมอเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB

ในงานวิจัยนี้จะมีการจำลองการควบคุมมอเตอร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปก่อน เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และเป็นแนวทางในการนำไปใช้งานจริง โดยโปรแกรมที่ใช้คือ โปรแกรม MATLAB R2011a โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ที่กล่าวไว้ข้างต้น มาใช้และออกแบบโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อควบคุมมอเตอร์ ในที่นี้จะทำการจำลองการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ผ่านชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ โดยทำการตั้งค่าอินพุตเป็นค่าความเร็วรอบที่ต้องการ โปรแกรมจะทำการคำนวณและควบคุมการทำงานแบบ PID Controller โดยมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

3.5.1 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์

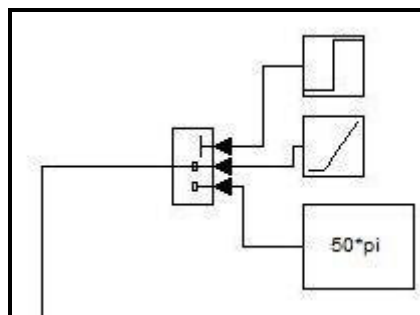


รูปที่ 3.18 การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับค่าเงื่อนไขเริ่มต้น

3.5.2 การออกแบบโปรแกรมควบคุม

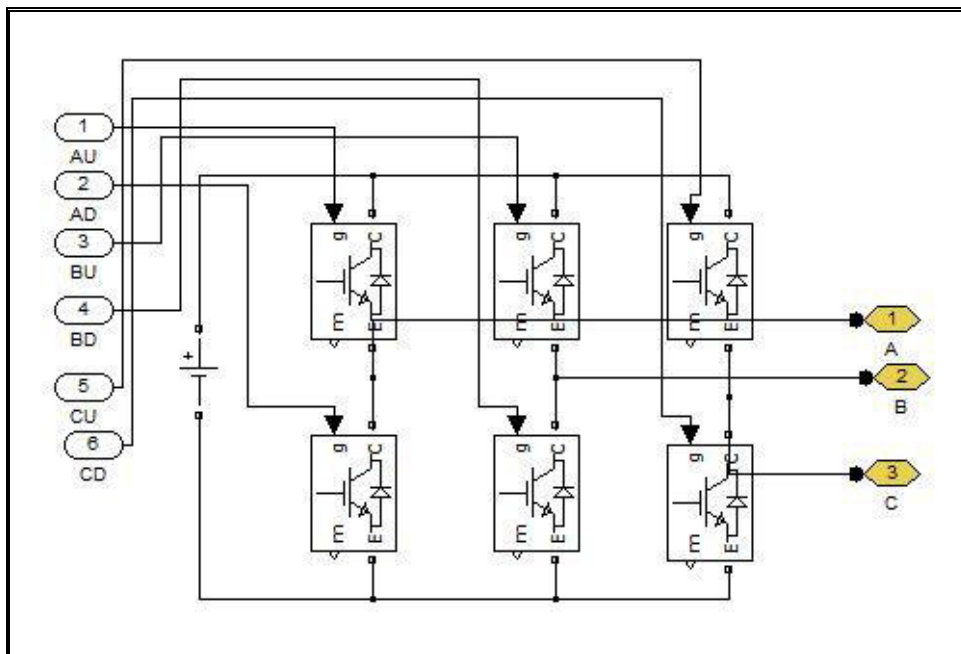
ทำการออกแบบโปรแกรมโดยประกอบไปด้วยส่วนสำคัญดังต่อไปนี้

- การรับค่าอินพุต



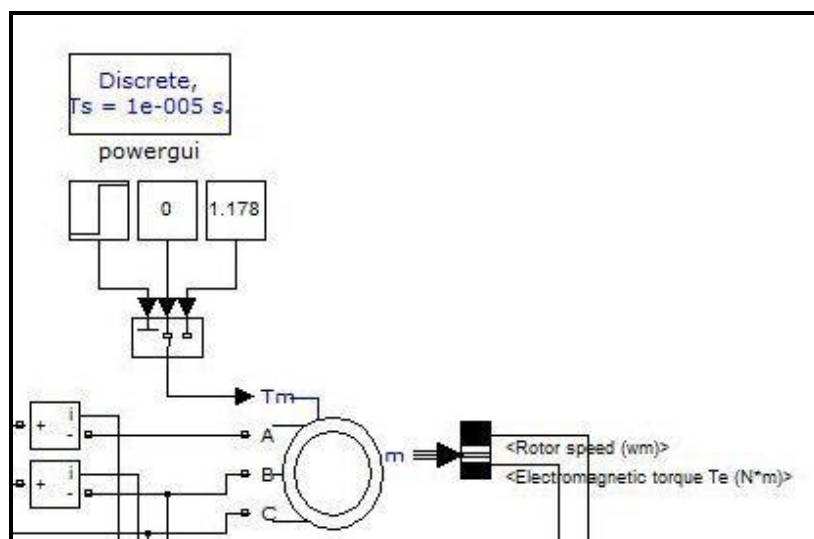
รูปที่ 3.19 การรับค่าอินพุตของโปรแกรม

- อินเวอร์เตอร์



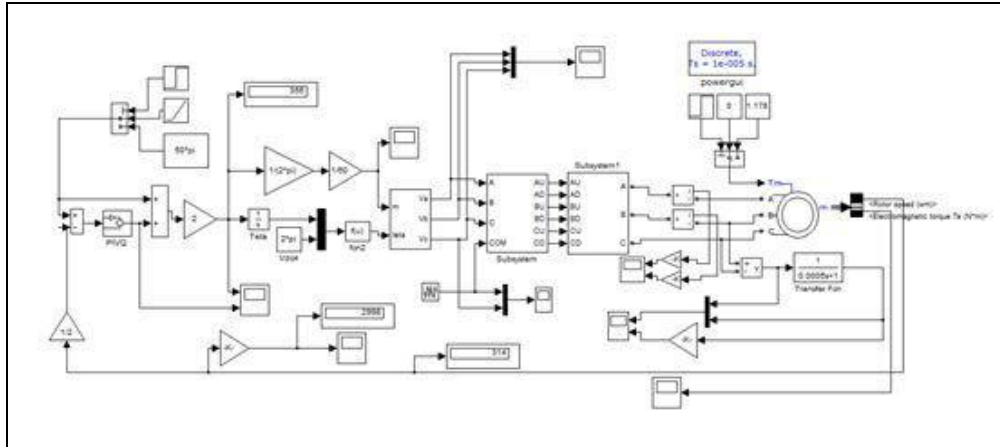
รูปที่ 3.20 ชุดอินเวอร์เตอร์ในโปรแกรม MATLAB

- มอเตอร์



รูปที่ 3.21 มอเตอร์ในโปรแกรม MATLAB

- PID Controller



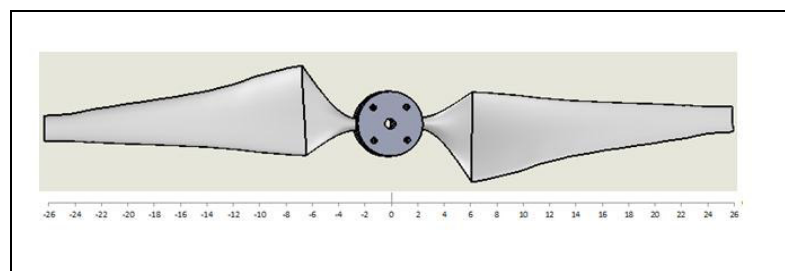
รูปที่ 3.22 โปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์แบบ PID Controller

3.6 การทดสอบความเร็วลม

ทำการทดลองวัดค่าความเร็วลมหน้าใบพัดกังหันลม ในแนวระนาบทั้งหมด 27 จุด แต่ละจุดห่างกัน 2 เซนติเมตร โดยทำการทดลองที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz ตามลำดับ โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาพฤติกรรมค่าความเร็วลมหน้าใบพัดกังหันที่มีโครงสร้างของเครื่องทดสอบกังหันลมที่แตกต่างกันทั้งหมด 7 กรณี โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.6.1 ตำแหน่งการวัดค่าความเร็วลม

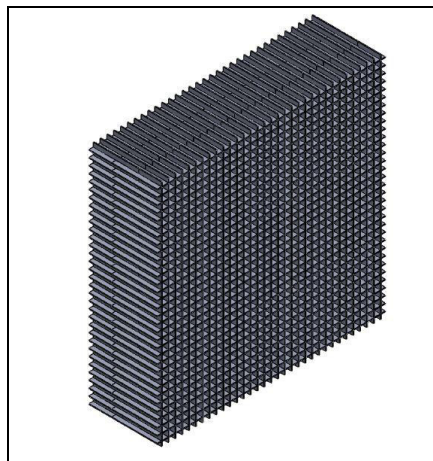
จากรูปที่ 3.23 ผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งใบพัดกังหันลมที่บริเวณด้านหลัง เครื่องต้นแบบ โดยทำการวัดความเร็วลมในแนวระนาบทั้งหมด 27 จุด แต่ละจุดห่างกันเป็นระยะ 2 เซนติเมตร โดยทำการทดลองที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz ตามลำดับ



รูปที่ 3.23 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วลม

3.6.2 โครงสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งแห้งที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้

- ในการวัดค่าความเร็วลมหน้าใบพัดกังหันนั้น ผู้วิจัยได้ทำการวัดความเร็วลมที่มีโครงสร้างของต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งแห้งที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 กรณี โดยมีตัวแปรคือ ชุดรังผึ้งและ Nozzle (มี 2 ขนาด คือ nozzle₁ มีขนาด $\theta_1 = 310$ mm., $\theta_2 = 210$ mm., L = 350 mm. และ nozzle₂: $\theta_1 = 310$ mm., $\theta_2 = 260$ mm., L = 225 mm)



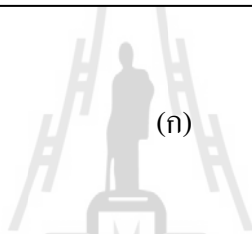
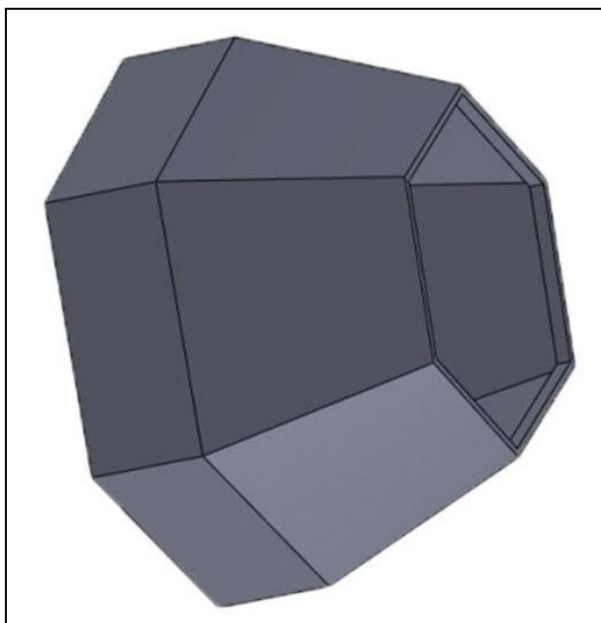
(ก)



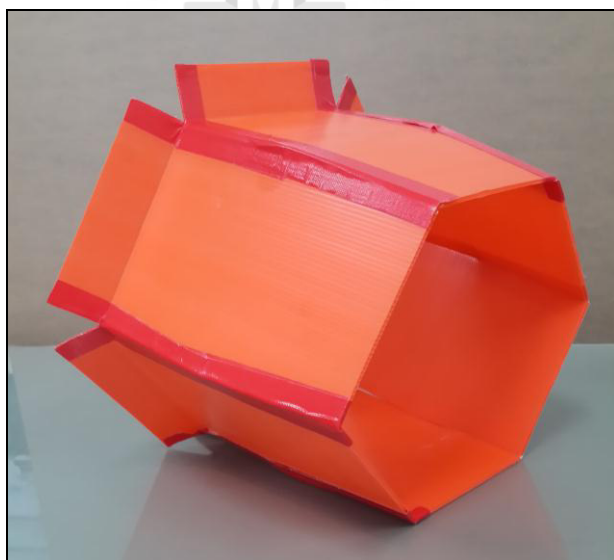
(ข)

รูปที่ 3.24 (ก) รังผึ้งออกแบบโดยโปรแกรม Solid Works

(ข) รังผึ้งทำจากอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.25 (ก) Nozzle ออกแบบโดยโปรแกรม Solid Works

(ข) Nozzle ทำจากกระดาษลูกฟูก

- โครงสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้
ผู้วิจัยทำการศึกษาทั้งหมด 6 กรณีดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 โครงสร้างของต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 กรณี

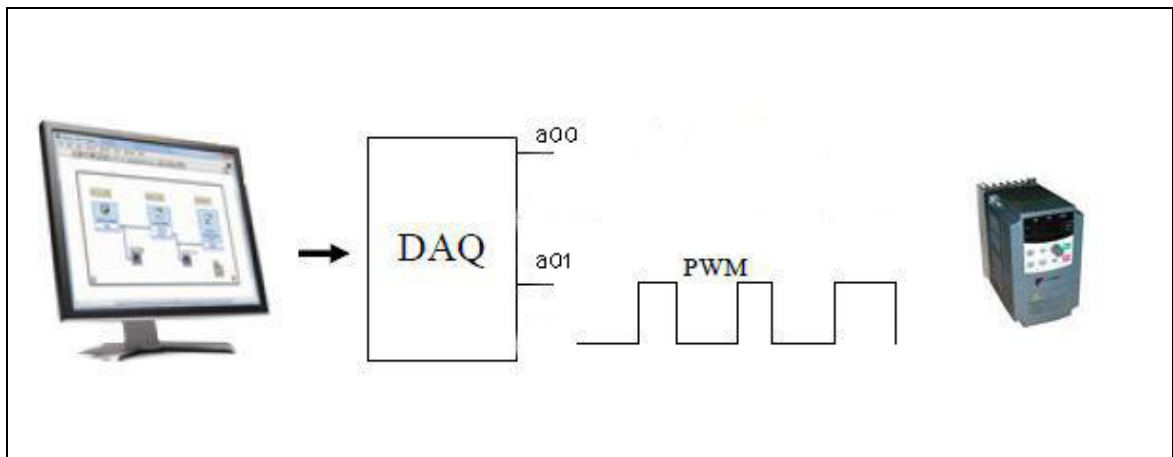
| case | structural |
|------|--|
| 1 | prototyping of a wind turbine tester +honeycomb |
| 2 | prototyping of a wind turbine tester +honeycomb+nozzle ₁ |
| 3 | prototyping of a wind turbine tester +honeycomb +nozzle ₂ |
| 4 | prototyping of a wind turbine tester +2honeycomb+nozzle ₂ |
| 5 | prototyping of a wind turbine tester |
| 6 | prototyping of a wind turbine tester +nozzle ₂ |

3.7 อัลกอริทึมสำหรับการประมวลผลการควบคุมการทำงานของมอเตอร์

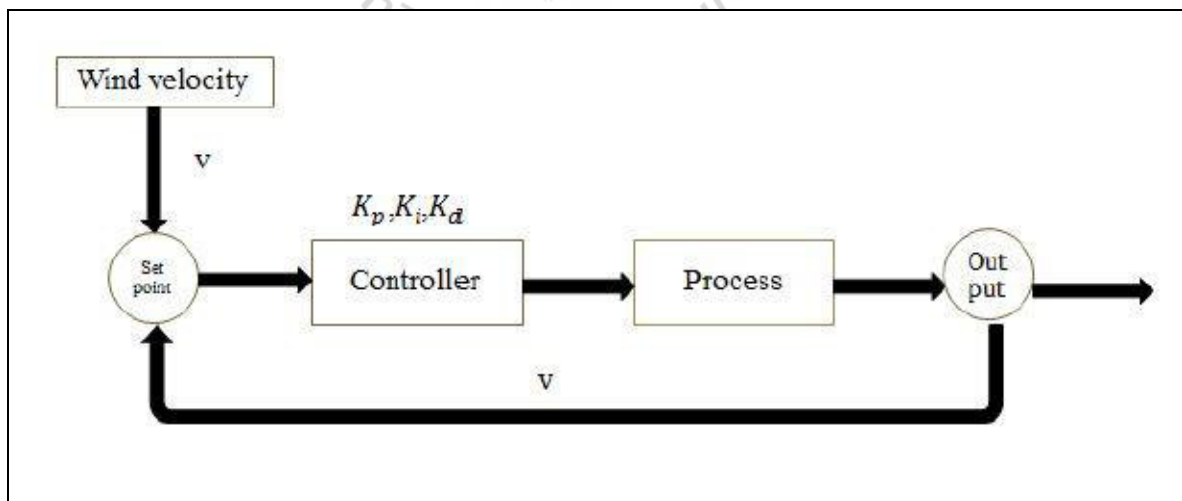
เบื้องต้นงานวิจัยนี้ต้องการที่จะสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ซึ่งสามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติโดยผู้ใช้เพียงป้อนข้อมูลของรูปแบบความเร็วลมที่ต้องการ โดยใช้การประมวลผลการทำงานของมอเตอร์เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับควบคุมการปรับเปลี่ยนความเร็วลม ซึ่งในปัจจุบันมีการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในหลากหลายรูปแบบจากการศึกษาข้อมูลผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการควบคุมการทำงานที่เรียกว่า V/F Control นั่นคือการปรับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จากการปรับค่าความถี่ที่ป้อนให้มันเอง โดยการใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW 2013 ร่วมกับ NI-USB 6008 ของบริษัท National Instruments และอินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ POWTRAN รุ่น PI8600 สำหรับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งมีความสามารถในการรับและส่งค่าจากซอฟต์แวร์การเปรียบเทียบค่ากับข้อมูลป้อนกลับ เหมาะแก่การออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ โดยสามารถแบ่งรูปแบบของความเร็วลมออกเป็น 3 รูปแบบคือ รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบขั้นบันได (Step Signals) รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบความชันคงที่ (Ramp Signals) และรูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Signals)

สำหรับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์จะใช้โปรแกรม LabVIEW ในการตั้งค่าเงื่อนไขรูปแบบความเร็วลม เพื่อการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ โดยคำสั่งการทำงานทั้งหมดจะมาจาก

การประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นคำสั่งจากคอมพิวเตอร์จะส่งสัญญาณออกมาเพื่อใช้ควบคุมชุดอินเวอร์เตอร์เพื่อส่งค่าความถี่ไปยังมอเตอร์ต่อไป ซึ่งเป็นทำงานแบบอัตโนมัติทั้งหมด การรับส่งสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์กับชุดอุปกรณ์ NI-USB 6008 ของบริษัท National Instruments ซึ่งมีช่องสัญญาณ Output ชนิดสัญญาณอนาล็อก 2 ช่อง การต่อใช้งาน DAQ ร่วมกับอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.26 การต่อใช้งาน DAQ ร่วมกับ อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.27 Block diagram of controller

3.7.1 รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบขั้นบันได (Step Signals)

ผู้วิจัยทำการออกแบบรูปแบบของสัญญาณที่ส่งไปยังชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้เป็นรูปแบบของสัญญาณขั้นบันได ค่าที่แสดงในแกน X คือค่าของเวลา (วินาที) และค่าที่แสดงในแกน Y คือค่าของแรงดัน (โวลต์) โดยได้กำหนดคฟังก์ชันที่ใช้คือ

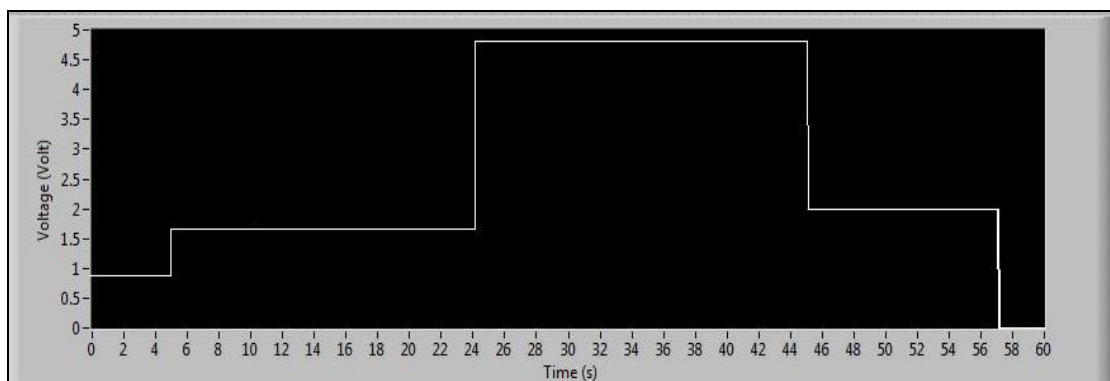
```

if(t>=0 && t<=5)
y=0.8;
if(t>5 && t<=24)
y=1.65;
if(t>24 && t<=45)
y=4.8;
if(t>45 && t<=57)
y=2;
if(t>57)
y=0;

```

เมื่อทำการรันโปรแกรมตามฟังก์ชันดังกล่าว จะได้รูปแบบของสัญญาณตามแสดงในรูป

รูปที่ 3.28



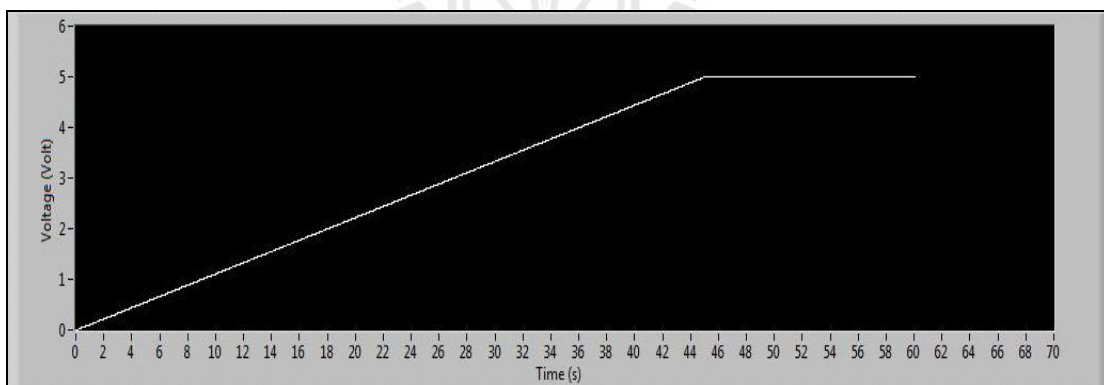
รูปที่ 3.28 สัญญาณแบบขั้นบันได

3.7.2 รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบความชันคงที่ (Ramp Signals)

ผู้วิจัยทำการออกแบบรูปแบบของสัญญาณที่ส่งไปยังชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้เป็นรูปแบบของสัญญาณแบบความชันคงที่ ค่าที่แสดงในแกน X คือค่าของเวลา (วินาที) และค่าที่แสดงในแกน Y คือค่าของแรงดัน (โวลต์) โดยได้กำหนดฟังก์ชันที่ใช้คือ

```
if(t>=0 && t<=45)
y=(5/45)*t;
if(t>45)
y=5;
```

เมื่อทำการรัน โปรแกรมตามฟังก์ชันดังกล่าว จะได้รูปแบบของสัญญาณตามแสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 สัญญาณแบบความชันคงที่

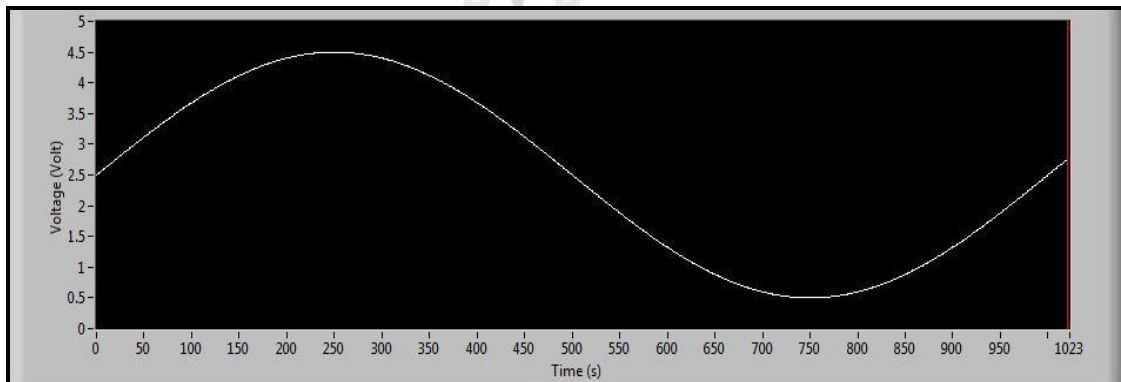
3.7.3 รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Signals)

ผู้วิจัยทำการออกแบบรูปแบบของสัญญาณที่ส่งไปยังชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้เป็นรูปแบบของสัญญาณแบบฮาร์มอนิก ค่าที่แสดงในแกน X คือค่าของเวลา (วินาที) และค่าที่แสดงในแกน Y คือค่าของแรงดัน (โวลต์) โดยทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ในฟังก์ชัน Simulate Signal ดังนี้

การตั้งค่าในส่วนของ Block Simulate Signal

| | |
|--------------------------|-----------|
| Signal Type | sine wave |
| Frequency | 0.01 |
| Phase | 0 |
| Amplitude | 2 |
| Offset | 2.5 |
| Sampling per second (Hz) | 100 |

เมื่อทำการรัน โปรแกรมตามฟังก์ชันดังกล่าว จะได้รูปแบบของสัญญาณตามแสดง ในรูป
ที่ 3.30

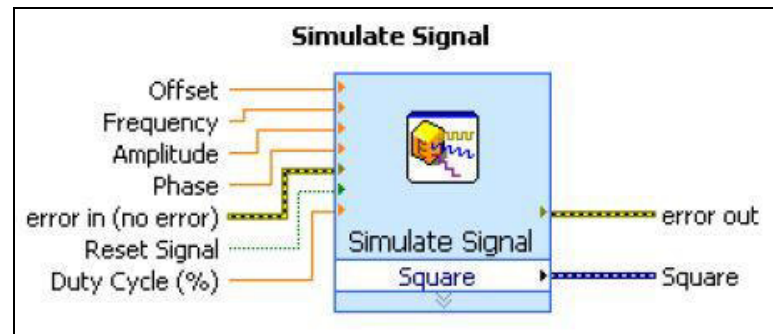


รูปที่ 3.30 สัญญาณแบบซาร์โมนิก

3.7.4 ฟังก์ชันที่สำคัญและการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

การควบคุมมอเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW ร่วมกับ NI-USB 6008 ซึ่งมีฟังก์ชันการทำงานที่สามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อให้ได้รูปแบบความเร็วลมที่กำหนด โดยมีฟังก์ชันที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ดังนี้

1. Simulate Signal เป็นฟังก์ชันสำหรับการจำลองสัญญาณ สามารถสร้างสัญญาณได้หลากหลายรูปแบบ เช่น คลื่นรูปซายน์ คลื่นรูปสี่เหลี่ยม คลื่นรูปฟันเลื่อย และสามารถสร้างสัญญาณรบกวนเข้าได้อีกด้วย ซึ่งในการทดลองฟังก์ชัน Simulate Signal ถูกใช้เพื่อสร้างสัญญาณรูปซายน์โดยมีการปรับค่าความกว้างของสัญญาณ เพื่อใช้สำหรับการควบคุมมอเตอร์ โดยมีสัญลักษณ์ของฟังก์ชันและการกำหนดค่าให้กับฟังก์ชันดังรูปที่ 3.31



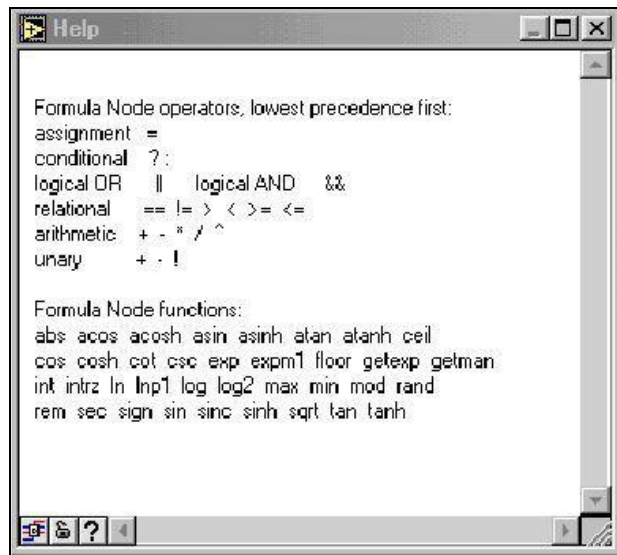
รูปที่ 3.31 ฟังก์ชัน Simulate Signal

จากรูปที่ 3.31 ฟังก์ชันนี้สามารถกำหนดข้อมูลในการทำงานของฟังก์ชันและประมวลผลส่งค่าออกมาได้ดังนี้

- Offset กำหนดค่าสัญญาณ offset ของสัญญาณ ค่าเริ่มต้นคือ 0
- Frequency กำหนดค่าความถี่ของสัญญาณ ในหน่วย Hz.
- Amplitude กำหนดขนาดของสัญญาณค่าเริ่มต้นคือ 1
- Phase กำหนดเฟสเริ่มต้นของสัญญาณในหน่วยองศา
- Reset Signal กำหนดสัญญาณสำหรับการรีเซ็ตสัญญาณ
- Duty Cycle กำหนดค่า %Duty Cycle ของสัญญาณซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่าง

ช่วงเวลาของสัญญาณช่วงที่ On หารด้วยคาบเวลาของลูกคลื่น

2. Formula Node ลักษณะของ Formula Node จะเป็นโครงสร้างที่ทำให้เรากำหนดรูปแบบได้สามารถกำหนดตัวแปรอิสระ (ซึ่งปกติจะเป็น X) ที่เป็นอินพุตของ Node และกำหนดเอาต์พุต (ซึ่งปกติจะเป็น Y) การสร้าง Formula Node จะสร้างจาก Structure Sub palette ของ Function Palette เมื่อเราวาง node นี้ลงไป ใน Block Diagram แล้วขยายขนาดให้เป็นไปตามต้องการ จากนั้นเราสามารถสร้างคำสั่งไม่ว่าจะเป็นสูตรคณิตศาสตร์ หรือ ฟังก์ชันอื่นได้อีกหลายรูปแบบ การเขียนสมการใน Formula Node ยังมีฟังก์ชันสำเร็จรูปจำนวนหนึ่งเพื่อให้เราได้เลือกใช้งาน เช่น ฟังก์ชันตรีโกณมิติ ฟังก์ชันยกกำลังต่างๆ เป็นต้น ฟังก์ชันต่างๆที่มีใช้ใน Formula Node แสดงอยู่ในรูปที่ 3.32

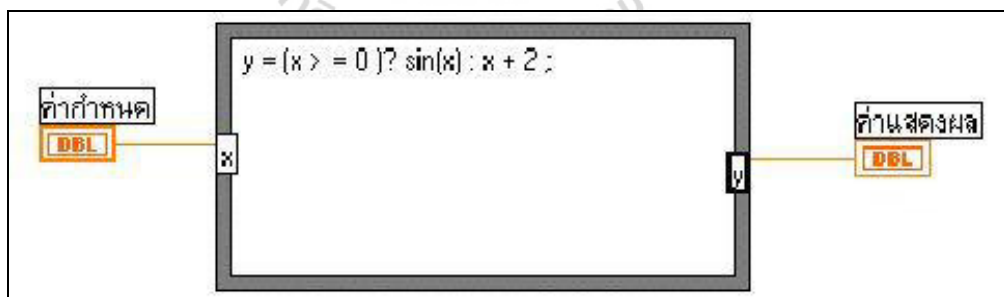


รูปที่ 3.32 ฟังก์ชันต่างๆที่มีใช้ใน Formula Node [กนต์ธร,2548]

นอกเหนือจากการเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้โดยทั่วไป เรายังสามารถเขียนโปรแกรมในลักษณะของ Logic ได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการ Logic

ถ้า x มากกว่า 0 แล้วให้ $y = \sin(x)$ ไม่เช่นนั้นให้ $y = x+2$ เราสามารถเขียนเป็น Logic ใน Formula Node ได้เป็น

$$y = (x >= 0) ? \sin(x) : x + 2 ;$$



รูปที่ 3.33 ตัวอย่างการเขียน Logic ใน Formula Node [กนต์ธร,2548]

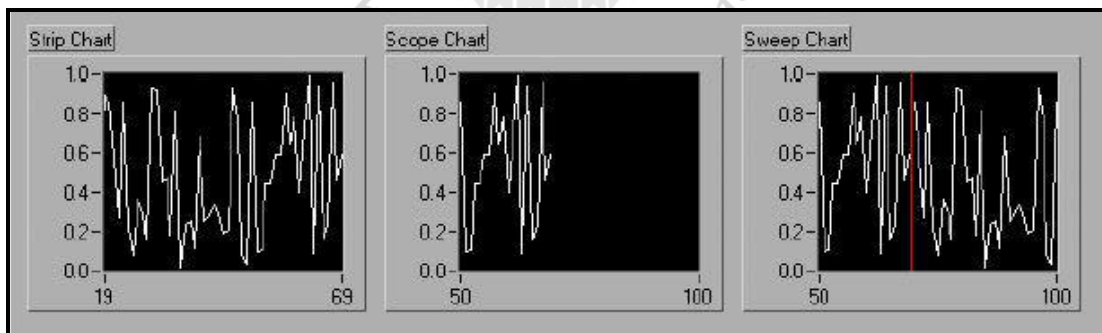
โดย ? จะเป็น Condition Operator ในขณะที่พจน์ตามหลัง ? จะเป็น TRUE Condition และพจน์ที่ตามเครื่องหมาย colon : จะเป็น FALSE Condition ส่วน semicolon(;) จะเป็นการกำหนดให้สิ้นสุดสมการแต่ละสมการ

การต่อสายเข้าหรือออกจาก Structure เราสามารถทำได้โดยใช้ Pop-up menu ที่กรอบของโครงสร้าง แล้วเลือก Add Input หรือ Add Output จากนั้นพิมพ์ชื่อตัวแปรเข้าไปที่ Input หรือ Output box

3. Waveform Chart ใน LabVIEW เราสามารถแสดงผลหรือเขียนชาร์ตได้ในลักษณะเดียวคือ ลักษณะข้อมูลที่เป็นรูปคลื่น (Waveform) โดยการพลอตจะเป็นการแสดงค่า x และ y โดยทั่วไป y จะเป็นขนาดของข้อมูล และ x จะเป็นเวลา การสร้าง Waveform Chart นี้จะปรากฏอยู่ใน Graph sub palette ของ Controls palette ซึ่งเป็น indicator พิเศษที่ใช้แสดงข้อมูลหลายๆชุดพร้อมกันบน Indicator เดียวได้ โดยปกติมักจะเป็นการแสดงผลภายใน Loop โดยจะทำให้เกิดการปรับปรุงข้อมูลทุกครั้งที่ Loop ได้ทำข้อมูลซ้ำ ในชาร์ตหนึ่งๆ ค่า y ที่พลอตใหม่จะเป็นข้อมูลที่ได้รับการประมวลผลมาใหม่ ในขณะที่ x คือเวลาที่ได้ข้อมูลนั้นมา แม้ว่า LabVIEW จะมีชาร์ตให้เลือกใช้เพียงแบบเดียว แต่ชาร์ตสามารถเลือกวิธีปรับปรุงข้อมูลได้ 3 วิธีคือ

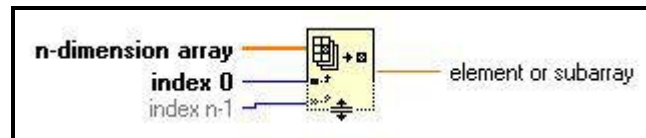
- Strip Chart
- Scope Chart
- Sweep Chart

ลักษณะการปรับปรุงข้อมูลทั้ง 3 แบบนี้ สามารถเลือกได้โดยเลือกจาก Pop-up menu ของชาร์ต แล้วเลือก Data Operation > Update Mode ลักษณะของชาร์ต สำหรับรูปแบบการปรับปรุงข้อมูลแต่ละวิธีแสดงในรูปที่ 3.34

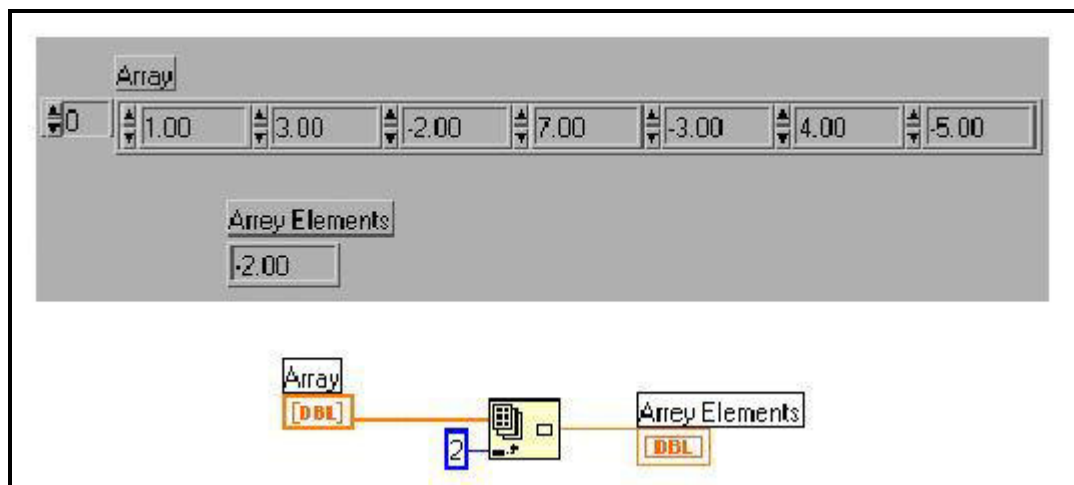


รูปที่ 3.34 รูปแบบการปรับปรุงข้อมูลแต่ละวิธีของ Waveform Chart [กนต์ธร,2548]

4. Index Array ฟังก์ชันนี้ใช้เมื่อต้องการเข้าสู่ element ที่ต้องการ ตามที่กำหนดโดย ครรชนิ ดังแสดงในรูปที่ 3.35 จะเห็นว่าถ้าต้องการให้ค่าย่อยลำดับที่ 3 ต้องใช้ค่าครรชนิเท่ากับ 2 เพราะ LabVIEW ใช้ครรชนิฐานศูนย์ และแสดงตัวอย่างการใช้งานดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.35 ฟังก์ชัน Index Array [กนต์ธร,2548]



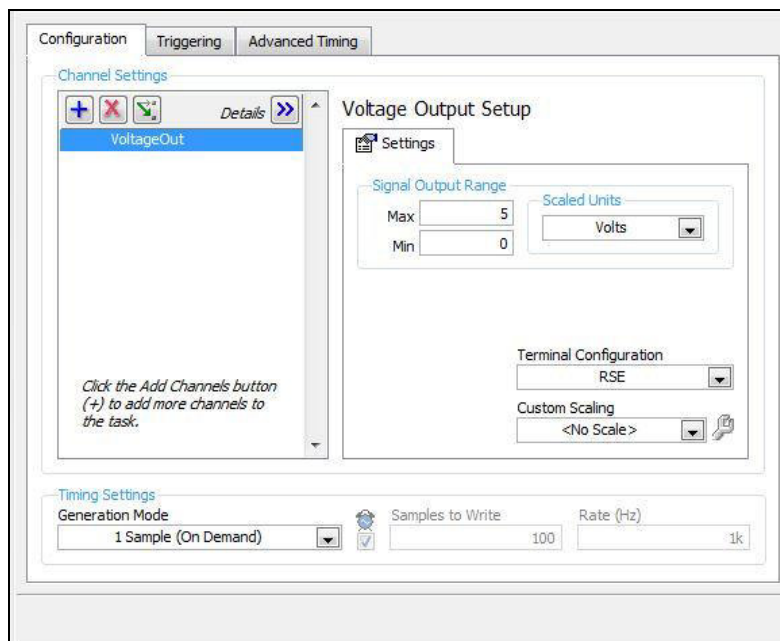
รูปที่ 3.36 ตัวอย่างการใช้งานฟังก์ชัน Index Array [กนต์ธร,2548]

จากรูปที่ 3.36 เป็นการดึงส่วนย่อยออกจาก array 1 มิติ เราสามารถทำได้กับ array 2 มิติ เช่นกัน โดยขยายขนาดของฟังก์ชันนี้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย Positioning Tool แล้วกำหนดครรชนิทั้งตำแหน่งแถวตั้งและแถวนอน นอกเหนือจากนั้นเราสามารถที่จะเลือกเอาแถวตั้ง หรือแถวนอนแถวใดแถวหนึ่งออกมาจาก array 2 มิติ เพื่อให้ผลออกมาเป็น array 1 มิติได้ การกระทำเช่นนี้ อันดับแรกต้องทราบว่าเราต้องการแถวนอนหรือแถวตั้งของ array 2 มิตินั้น ถ้าหากต้องการแถวตั้งที่ n กำหนดค่าคงที่ n-1 เข้ากับ terminal ของแถวตั้ง ซึ่งจะเป็น terminal ด้านล่าง จากนั้นที่ terminal บนซึ่งเป็น terminal ของแถวนอน ให้ใช้ Pop-up menu แล้วเลือก Disable Indexing จะพบว่าสัญลักษณ์ที่ terminal นั้นจะเปลี่ยนไปจากเดิม เป็นสี่เหลี่ยมทึบเป็นสี่เหลี่ยมโปร่งใส

5. DAQ Assistant

การตั้งค่าในส่วนของ DAQ Assistant

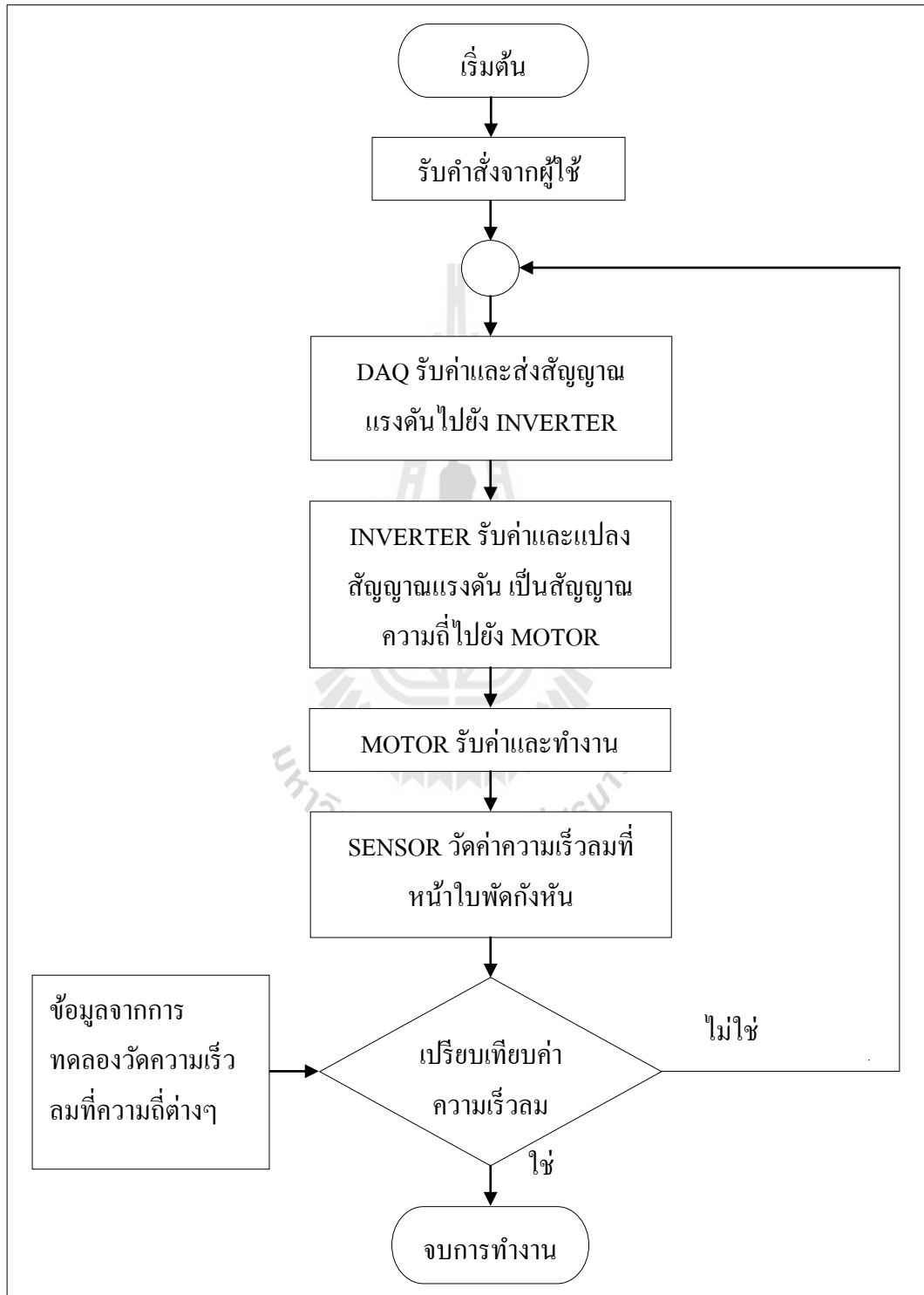
| | |
|-----------------|--------------------|
| Chanel | a00 |
| Max voltage | 5 volt |
| Min voltage | 0 volt |
| Generation Mode | Continuous Samples |



รูปที่ 3.37 การตั้งค่าในส่วนของ DAQ Assistant [กนต์ธร,2548]



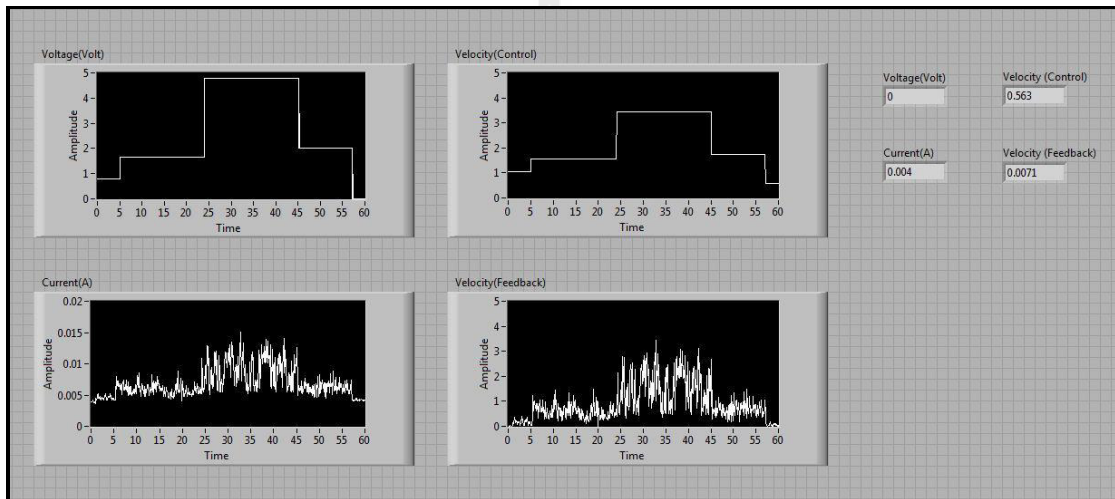
3.8 แผนผังแสดงกระบวนการทำงาน



รูปที่ 3.38 แผนผังแสดงกระบวนการทำงาน

3.9 การรับค่าจากผู้ใช้

การควบคุมต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ โดยใช้วิธีการประมวลผลอัตโนมัติ ก่อนเริ่มการใช้งานในแต่ละครั้งผู้ควบคุมจะต้องมีการป้อนรูปแบบของสัญญาณที่ต้องการ ผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งข้อมูลที่คอมพิวเตอร์ได้รับจะถูกรวบรวมไปใช้ร่วมกับการประมวลผลในการสั่งงานมอเตอร์และอ่านค่าของเครื่องมือวัดความเร็วลม ซึ่งการทำงานเป็นไปอย่างอัตโนมัติทั้งหมด ในขั้นตอนการประมวลผลจะมีการแสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับแก้ไข โปรแกรม หน้าต่างโปรแกรมส่วนการรับค่าจากผู้ใช้และการแสดงผลดังในรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 หน้าต่างแสดงผลระหว่างการประมวลผล

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 กล่าวนำ

สาระสำคัญของบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการทดลองและผลของการควบคุมมอเตอร์อัตโนมัติ โดยการประมวลผลด้วยโปรแกรม LabVIEW 2013 โดยกระบวนการวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ

1. ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB
2. ผลการทดสอบความเร็วลม
3. ผลการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธี PID Controller

ดังนั้นจากการดำเนินงานวิจัยทั้ง 3 ส่วนหลัก ผลที่ได้จากการทดลองเมื่อนำมาวิเคราะห์และปรับปรุงแก้ไขจนกระทั่งได้ผลตามวัตถุประสงค์แล้วนั้น ทำให้ได้ต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

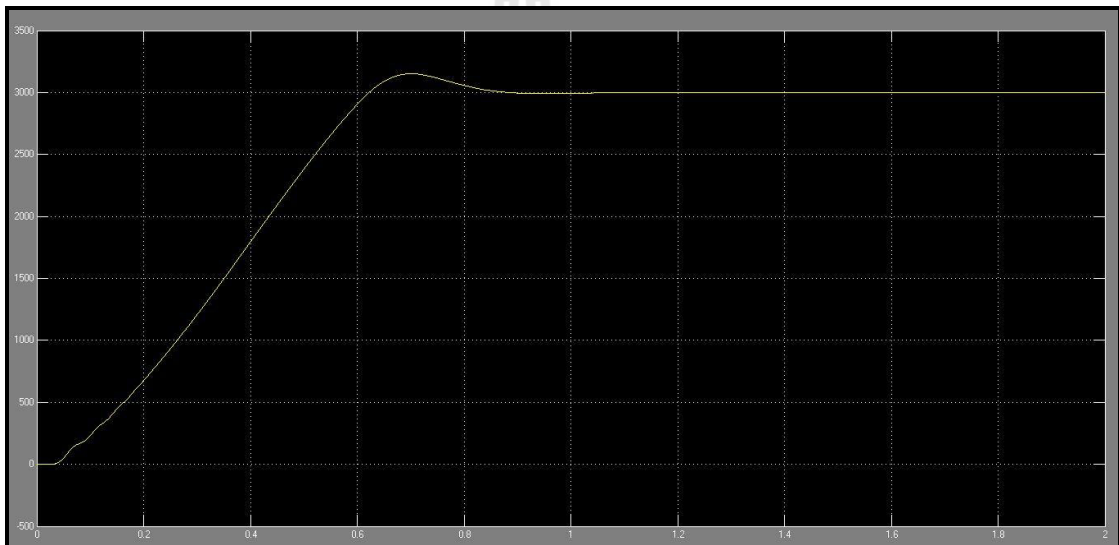


รูปที่ 4.1 ต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้

4.2 ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB

4.2.1 ผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระกรรม

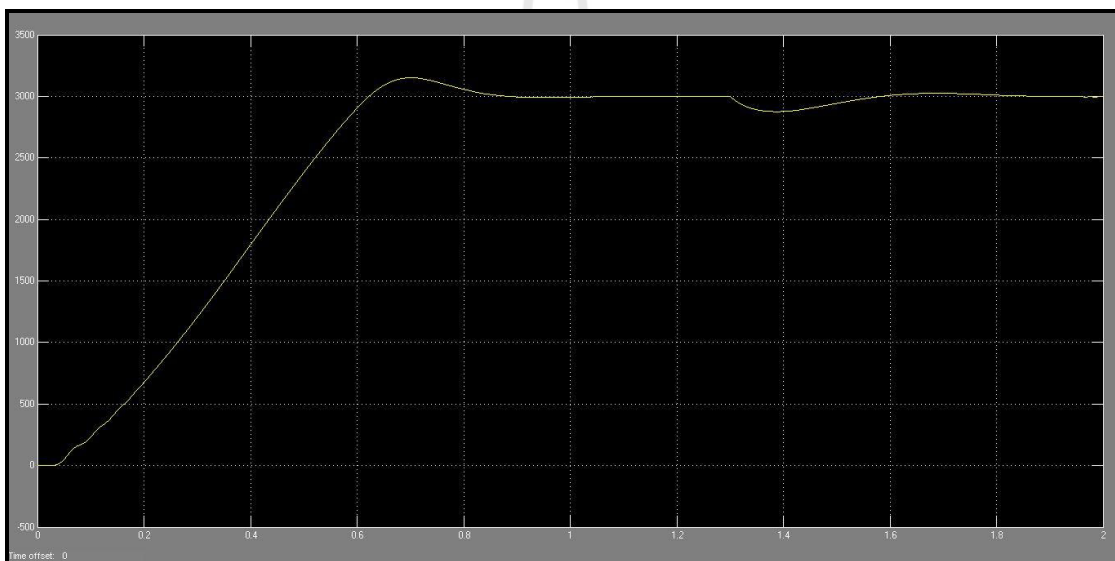
จากการออกแบบโปรแกรมจำลองการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสด้วยโปรแกรม MATLAB พบว่าในสถานะไม่มีภาระกรรม มอเตอร์สามารถตอบสนองการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากรูปที่ 4.2 ผู้วิจัยได้ป้อนความถี่ให้กับมอเตอร์ เป็นค่าสูงสุดนั่นคือ 50 Hz. (Set point = 3000 RPM) เมื่อทำการรันโปรแกรม พบว่าผลการตอบสนองของมอเตอร์เป็นไปอย่างถูกต้อง และสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว นั่นคือค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้ทำจากการทดสอบ มีค่าถูกต้องและการควบคุมแบบ PID Controller สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพนั่นเอง



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะไม่มีภาระกรรม

4.2.2 ผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะมีภาระกรรม

จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะมีภาระกรรม จากรูปที่ 4.3 ผู้วิจัยได้ป้อนค่าอินพุตเป็นค่าความถี่สูงสุดเท่ากับ 50 Hz. (Set point = 3000 RPM) เมื่อเริ่มทำการรันโปรแกรม พบว่ามอเตอร์มีการตอบสนองและเข้าสู่สภาวะคงตัวอย่างรวดเร็ว จากนั้นมีการรบกวนระบบโดยการเพิ่มภาระกรรมให้กับมอเตอร์ จะเห็นว่าค่าความเร็วรอบลดลงเล็กน้อยและมีการตอบสนองของมอเตอร์ ทำให้ค่าความเร็วรอบที่ลดลงเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว นั่นคือมอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากการควบคุมแบบ PID Controller นี้ ผู้วิจัยยังได้มีศึกษาพฤติกรรมของกระแส แรงดัน ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ด้วย ซึ่งรายละเอียดจะแสดงในภาคผนวก ข.



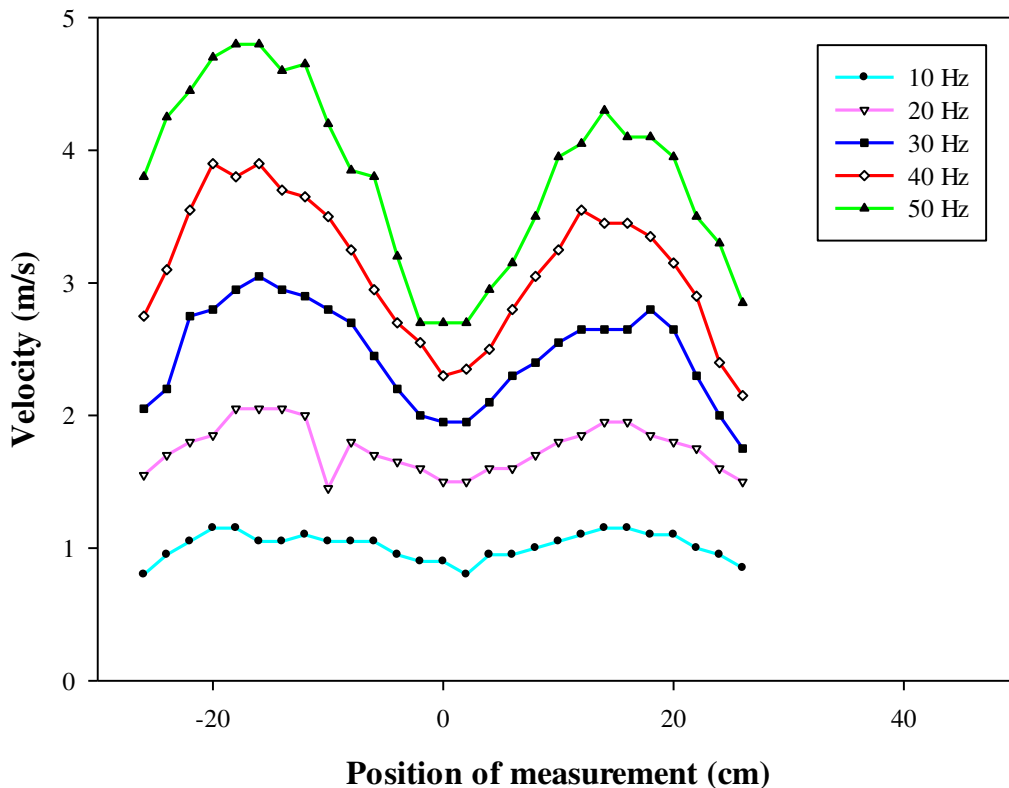
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะมีภาระกรรม

4.3 ผลการทดสอบความเร็วลม

หลังจากที่ได้สร้างต้นแบบเครื่องทดสอบความเร็วลมเรียบร้อยแล้วนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของลมตลอดหน้าตัดใบพัดกังหันลม ซึ่งมีโครงสร้างของเครื่องต้นแบบแตกต่างกันทั้งหมด 6 กรณีดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งจากการทดลองวัดความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. นั้น ได้ผลการทดสอบแต่ละกรณีดังต่อไปนี้

4.3.1 Prototyping of a wind turbine tester + Honeycomb

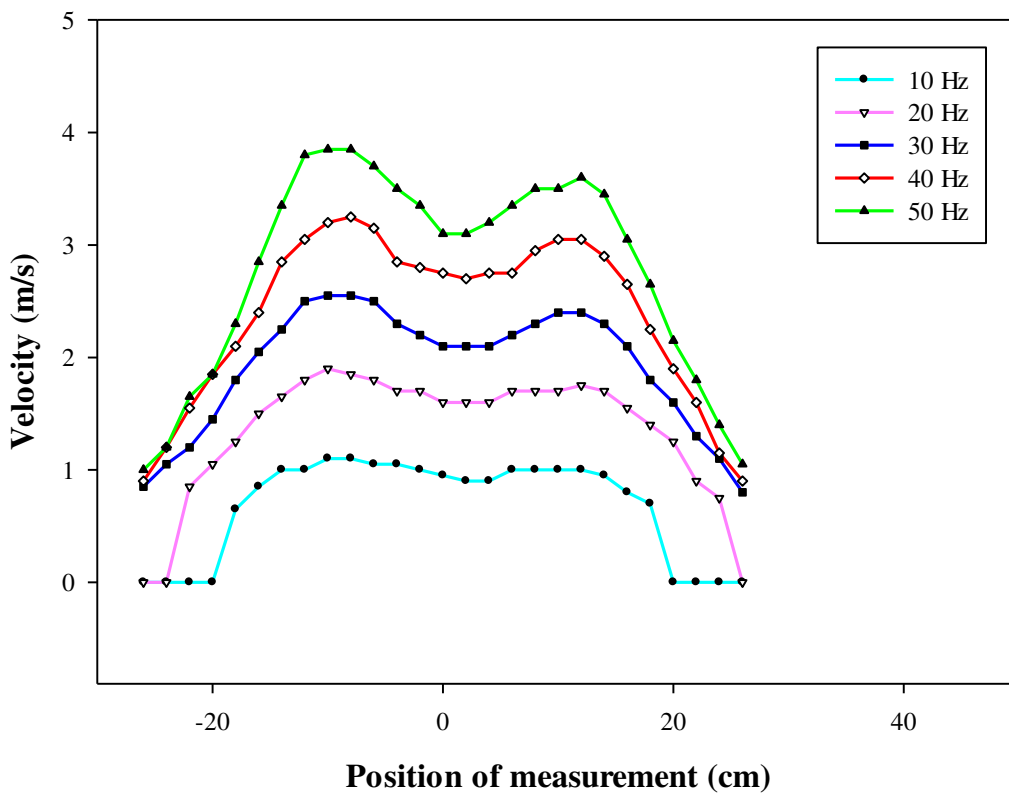
ผลจากการทดสอบในกรณีที่ 1 พบว่าเมื่อทำการติดตั้งรังผึ้งจะทำให้เกิดการเรียงตัวของอากาศเมื่ออากาศไหลผ่านช่องของรังผึ้ง แต่เมื่อไหลผ่านรังผึ้งไปแล้วนั้น พบว่าเกิดการกระจายตัวของอากาศ นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วลมจะลดลงบริเวณแกนเพลลาของมอเตอร์ (ตรงกับจุดกึ่งกลาง Hub) ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวัดกับความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. สำหรับโครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 1

4.3.2 Prototyping of a wind turbine tester + Honeycomb + Nozzle₁

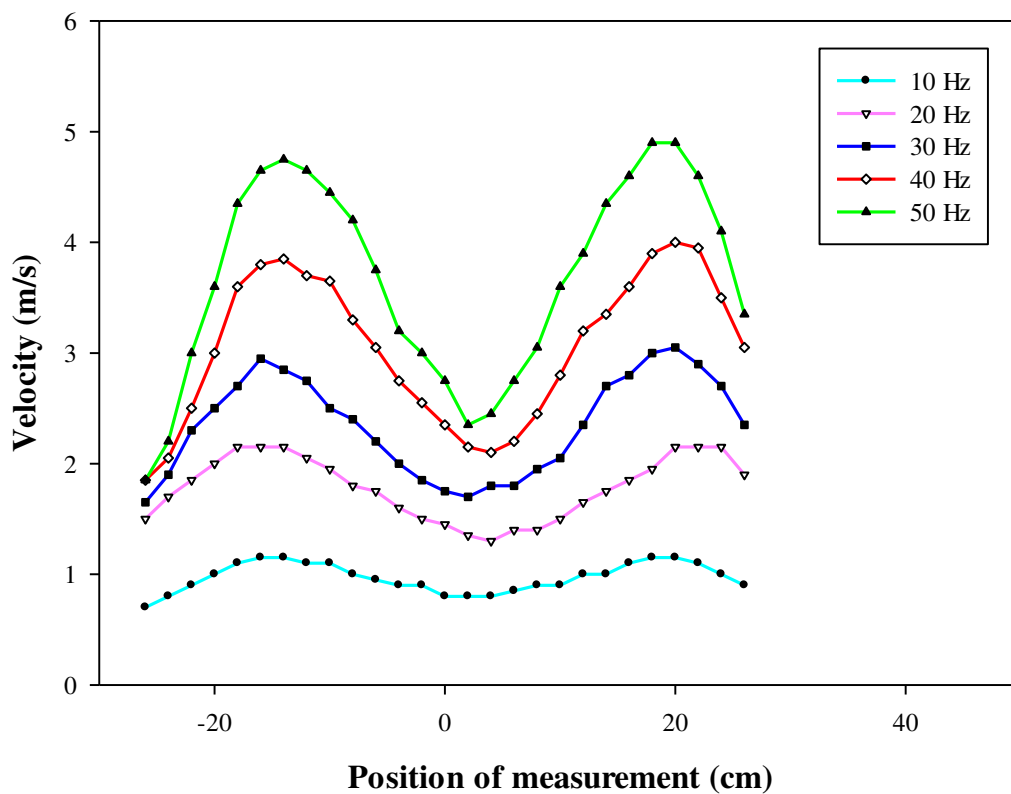
เมื่อทำการติดตั้ง Nozzle₁ เข้าไปพบว่าค่าความเร็วลมบริเวณแกนเพลลาของมอเตอร์ มีค่าความแตกต่างน้อยกว่ากรณีแรกแต่ยังคงมีค่าลดลงอยู่ เนื่องมาจากเมื่อทำการติดตั้ง Nozzle₁ เข้าไปจะทำให้เกิดการรบกวนอากาศให้เข้ามาในจุดกึ่งกลางของแกนเพลลาของมอเตอร์มากยิ่งขึ้น แต่นั่นก็ส่งผลให้บริเวณส่วนปลายของใบพัดกั้นหันลมไม่ได้รับลมที่ค่าความถี่ต่ำและได้รับลมเพียงเล็กน้อยที่ค่าความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวัดกับความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. สำหรับโครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 2

4.3.3 Prototyping of a wind turbine tester + Honeycomb + Nozzle₂

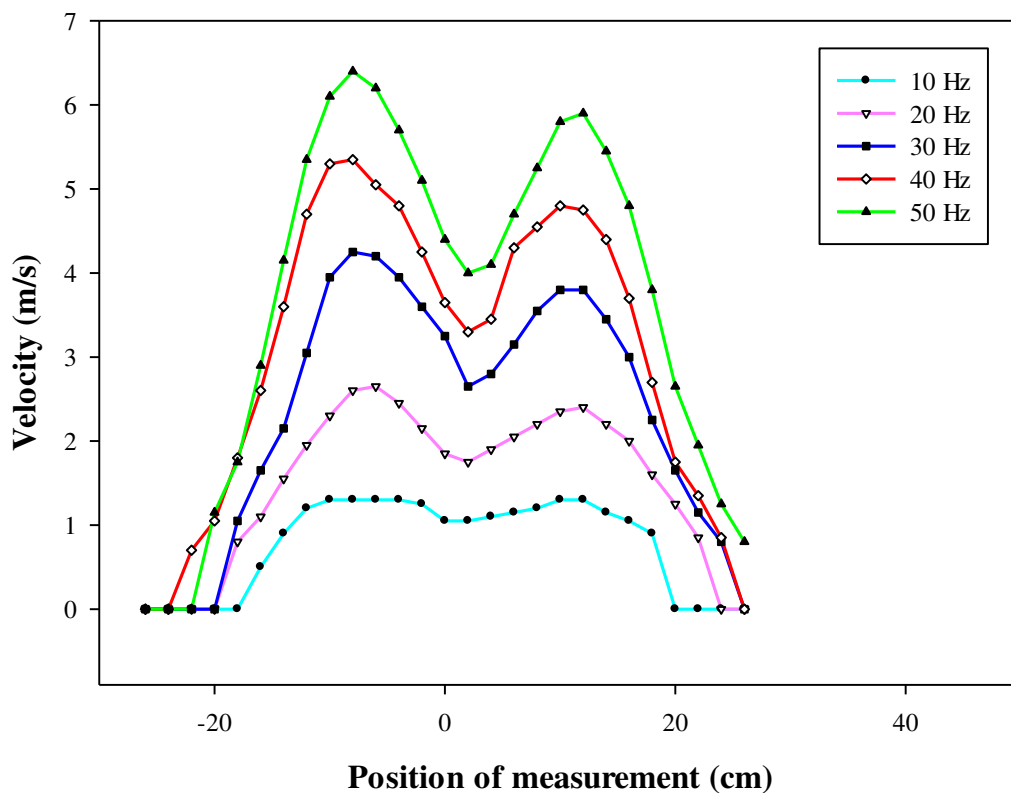
จากกรณีที่ 2 ทำให้อากาศถูกบีบเข้าจุดกึ่งกลางจนทำให้บริเวณส่วนปลายของใบพัดไม่ได้รับลมที่ความถี่ต่ำ ผู้วิจัยจึงทำการปรับปรุงให้ Nozzle₂ ให้มีขนาดความยาวที่สั้นลง เพื่อจะทำให้เกิดการกระจายตัวของอากาศได้ดี ดังนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนมาติดตั้ง Nozzle₂ แทนที่นั้น พบว่ามีการกระจายตัวของอากาศมากขึ้น จนถึงบริเวณส่วนปลายของใบพัดกึ่งหันลม แต่เมื่อลดความยาวของ Nozzle₂ ลงนั้น ปัญหาที่ตามมาคือ ค่าความเร็วลมที่บริเวณแกนเพลลาของมอเตอร์มีค่าลดลงเช่นเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวัดกับความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. สำหรับโครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 3

4.3.4 Prototyping of a wind turbine tester + 2Honeycomb + Nozzle₂

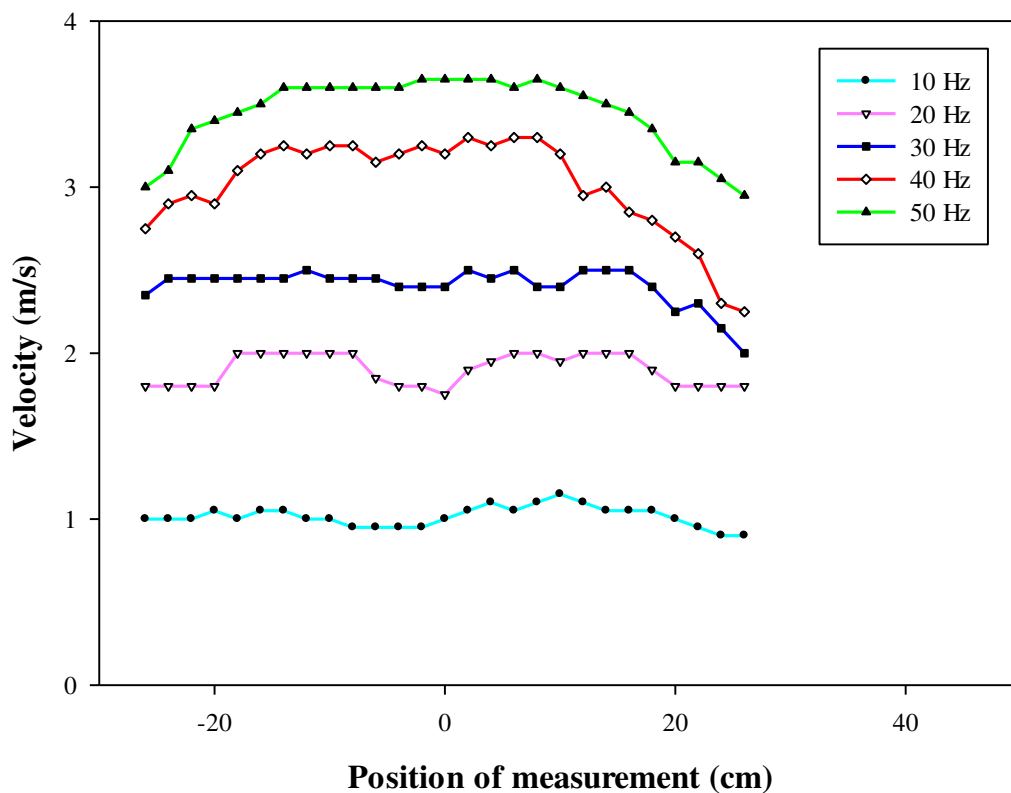
เมื่อพบว่าค่าความเร็วลมมีค่าลดลงที่บริเวณแกนเพลลาของมอเตอร์นั้น ผู้วิจัยจึงทำการติดตั้งรังผึ้งเข้าไปอีก 1 ชุด ที่บริเวณด้านหน้าของมอเตอร์ เพื่อจะช่วยให้การจัดเรียงตัวของอากาศตั้งแต่จุดกำเนิดลม เมื่อทำการทดลองพบว่า ความเร็วลมมีค่าสูงมาก มีการจัดเรียงตัวของอากาศตั้งแต่แหล่งกำเนิดลม เมื่ออากาศผ่านเข้ามาสู่ **Nozzle₂** ก็จะทำให้เกิดการรีดอากาศเข้าสู่บริเวณแกนเพลลาของมอเตอร์ และเมื่ออากาศที่ออกมาจาก **Nozzle₂** เข้าสู่ชุดรังผึ้งอีก 1 ชุดนั้น อากาศจะไหลผ่านช่องของรังผึ้ง ซึ่งมีอากาศไหลผ่านเพียงบริเวณที่มีอากาศไหลผ่านออกมาจากส่วนปลายของ **Nozzle₂** และมีค่าความเร็วลมที่สูงมากกว่ากรณีอื่น แต่ปัญหาที่พบคือ ไม่เกิดการกระจายตัวของอากาศ ทำให้บริเวณส่วนปลายของใบพัดกักหันลมไม่ได้รับลมที่ทุกๆค่าความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวัดกับความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. สำหรับโครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 4

4.3.5 Prototyping of a wind turbine tester

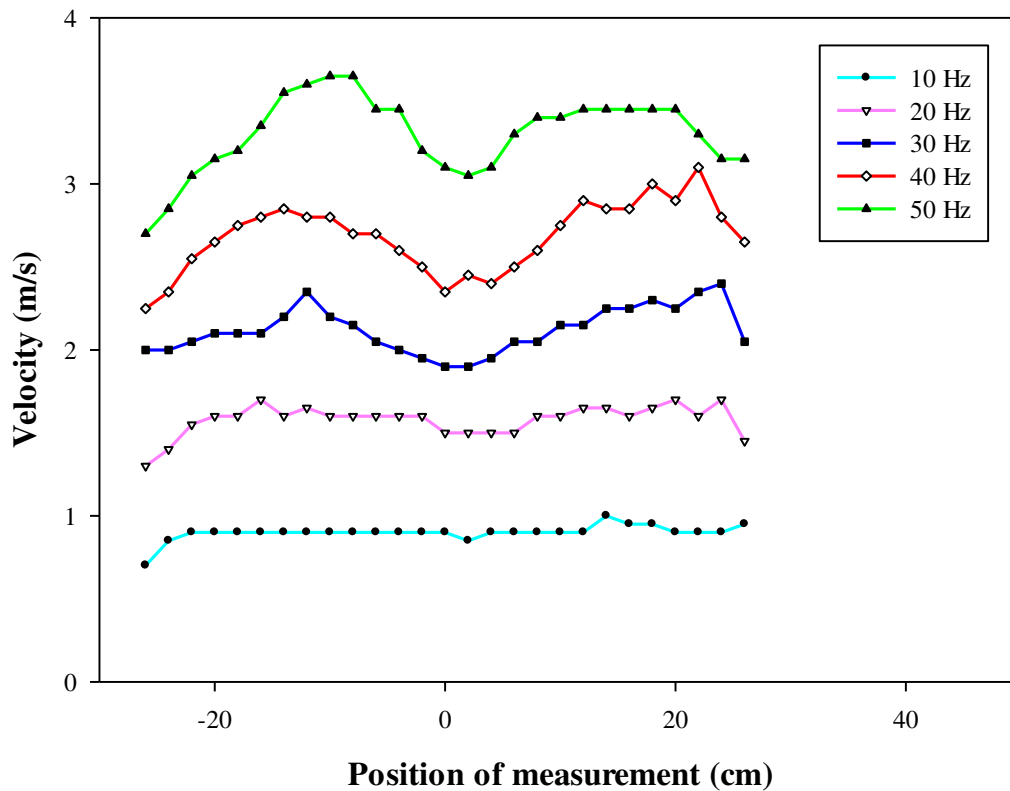
จากนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการถอด Nozzle₂ และชุดรังผึ้งทั้ง 2 ชุดออก ทำการทดลอง วัดค่าความเร็วลม พบว่าอากาศมีการกระจายตัวที่ดี ค่าความเร็วลมตลอดหน้าตัดของใบพัดมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด จะมีการลดลงของความเร็วลมที่บริเวณปลายของใบพัดกึ่งหันลมที่ค่าความถี่สูงเพียงเล็กน้อย นอกเหนือจากนี้บริเวณแกนเพลลาของมอเตอร์ยังมีค่าความเร็วลมใกล้เคียงกับความเร็วลมบริเวณอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวัดกับความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. สำหรับโครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 5

4.3.6 Prototyping of a wind turbine tester + nozzle₂

และผู้วิจัยได้ทำการติดตั้ง Nozzle₂ เข้าไปอีกครั้งเพื่อรีดอากาศให้ค่าความเร็วลมมีค่าสูงมากขึ้น เมื่อทำการวัดค่าความเร็วลม พบว่า เกิดการบีบอัดของอากาศ ความเร็วลมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ลมบริเวณแกนเพลลาของมอเตอร์มีค่าความเร็วลมลดลงที่ค่าความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวัดกับความเร็วลมที่ความถี่ 10, 20, 30, 40 และ 50 Hz. สำหรับโครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 6

จากการทดสอบความเร็วลม ซึ่งมีโครงสร้างของเครื่องต้นแบบแตกต่างกันทั้งหมด 6 กรณีพบว่า โครงสร้างที่ดีที่สุดที่มีการกระจายตัวของอากาศที่ดี และค่าความเร็วลมตลอดหน้าตัดของใบพัด มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด คือ โครงสร้างในกรณีที่ 5 คือโครงสร้างหลักของเครื่องต้นแบบนั่นเอง

จากนั้นผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลของการทดสอบความเร็วลมในกรณีที่ 5 มาใช้ในการหาสมการ เส้นตรง (Estimate Line) โดยใช้วิธี Least Square Method คือ $y = ax + b$ โดยที่

$$a = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.1)$$

$$b = \frac{n \sum x_i \sum y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4.2)$$

โดย y คือค่าความเร็วลม (m/s) และแกน x คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย ให้กับชุดอินเวอร์เตอร์ (volt) จะได้สมการเส้นตรงดังนี้คือ

$$y = 0.597x + 0.563 \quad (4.3)$$

และเนื่องจากเซนเซอร์วัดความเร็วลมที่ใช้นั้น ค่าสัญญาณที่วัดได้เป็นค่าของกระแส (4-20 mA) ผู้วิจัยจึงได้ทำการหาสมการเส้นตรงเพื่อหาความสัมพันธ์ของความเร็วลมและค่ากระแสที่จ่ายออกมาจาก เซนเซอร์วัดความเร็วลม โดย y คือค่าความเร็วลม (m/s) และแกน x คือค่ากระแสไฟฟ้าที่ออกมาจาก เซนเซอร์วัดความเร็วลม (mA) จะได้สมการเส้นตรงดังนี้คือ

$$y = 312.5x - 1.25 \quad (4.4)$$

จากนั้นจึงได้นำความสัมพันธ์ของสมการทั้งสองมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธี PID Controller ด้วยโปรแกรม LabVIEW ซึ่งอธิบายในหัวข้อถัดไป

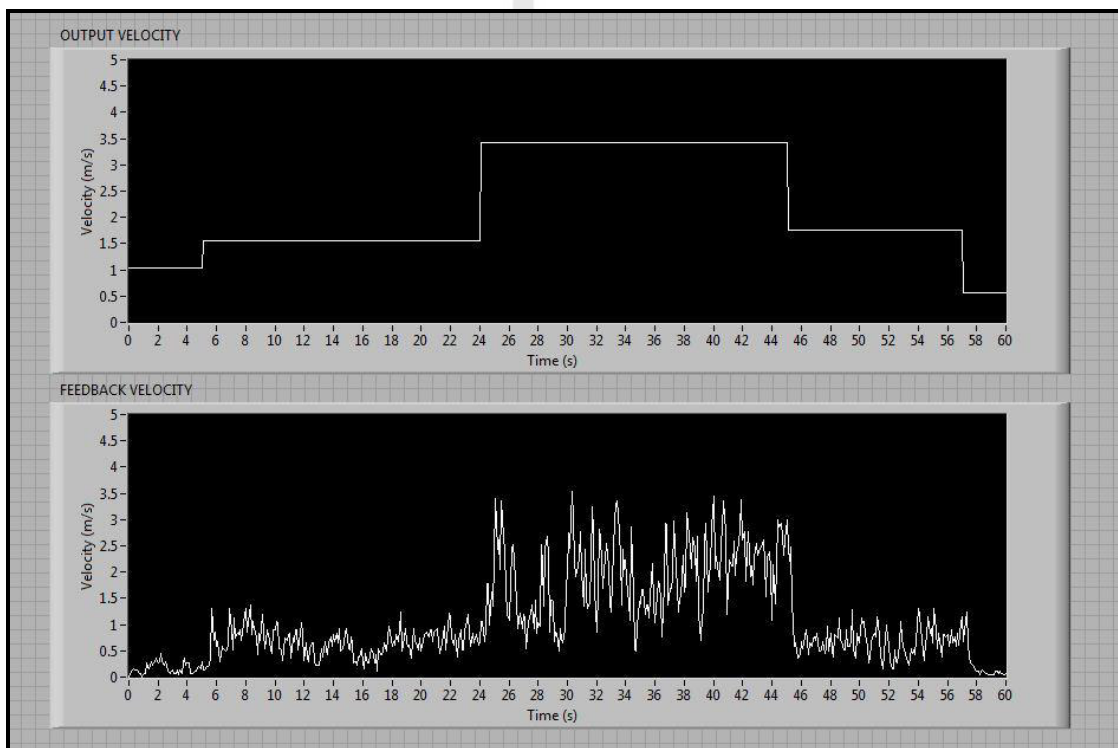
4.4 ผลการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธี PID Controller

จากการออกแบบโปรแกรมควบคุมรูปแบบความเร็วลมด้วยโปรแกรม LabVIEW พบว่าสามารถควบคุมรูปแบบความเร็วลมได้ทั้ง 3 รูปแบบ นั่นคือ รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบขั้นบันได (Step Signals) รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบความชันคงที่ (Ramp Signals) และรูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Signals) เมื่อทำการควบคุมสัญญาณด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อควบคุมความเร็วลมในรูปแบบต่างๆ แล้วนั้น จะใช้ Air Velocity Transmitter วัดค่าความเร็วลมที่เกิดขึ้นและส่งสัญญาณเป็นค่า Feedback เพื่อเปรียบเทียบความเร็วลมที่เกิดขึ้นกับสัญญาณเริ่มต้น แต่เนื่องจากลมที่ออกมาจากมอเตอร์นั้นเป็นลมที่มีพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซึ่งเป็นลักษณะลมที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อมีการควบคุมด้วยวิธี PID Controller จึงไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ โดยผู้วิจัยได้ใช้ NI -USB 6008 ซึ่งสามารถรับค่าอินพุตได้ตั้งแต่ 0-5 โวลต์เท่านั้น ดังนั้นในช่วงที่มีการแกว่งของสัญญาณสูง อุปกรณ์ไม่สามารถรองรับการทำงาน of โปรแกรมได้ จึงเป็นสาเหตุให้การควบคุมรูปแบบความเร็วลมด้วยวิธี PID Controller ไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นผู้วิจัยจะแสดงเพียงในส่วนของการควบคุมรูปแบบความเร็วลมทั้ง 3 รูปแบบ พร้อมทั้งแสดงสัญญาณ Feedback ดังนี้



4.4.1 รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบขั้นบันได (Step Signals)

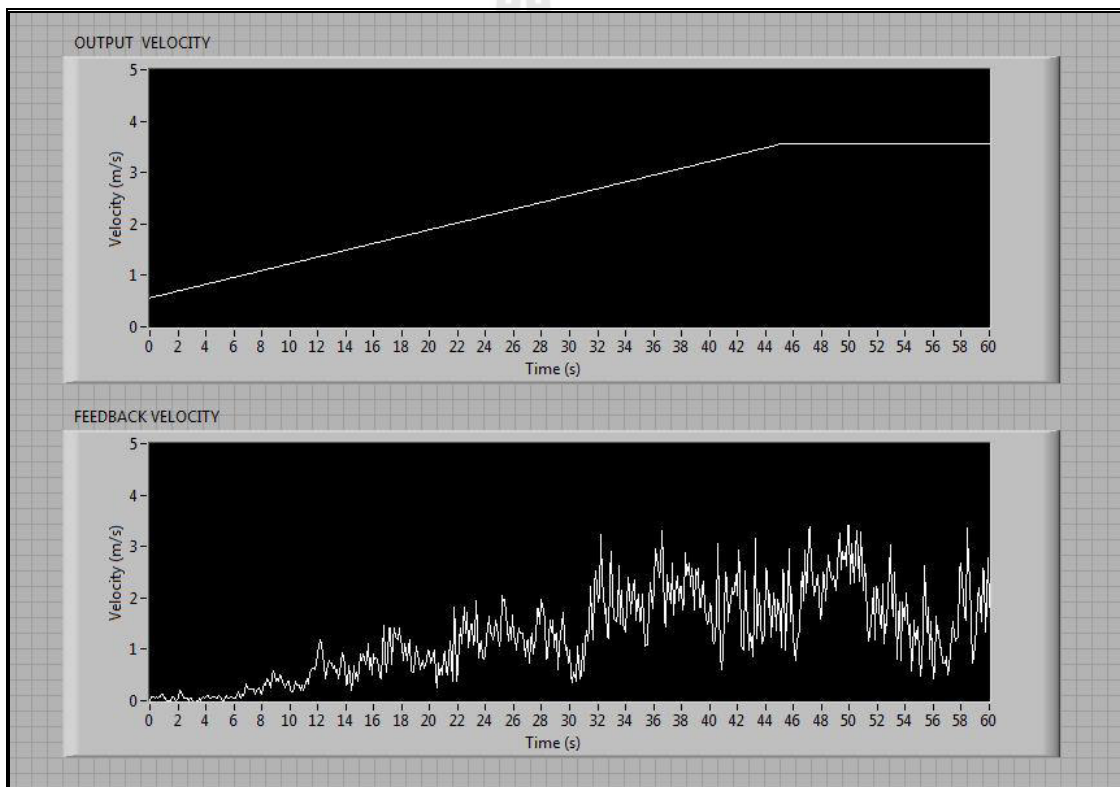
จากรูปที่ 4.10 เป็นการควบคุมรูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบขั้นบันได (Step Signals) ซึ่งมีฟังก์ชันการทำงานดังแสดงในบทที่ 3 นั้น พบว่าลมที่เกิดขึ้นนั้นมีแนวโน้มเป็นไปตามฟังก์ชันที่กำหนด ในช่วงของการเปลี่ยนความเร็วลม มอเตอร์สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว โดยสังเกตจากสัญญาณของ Air Velocity Transmitter นอกจากนี้ยังพบว่าที่ค่าสัญญาณแรงดันสูง (ความถี่สูง) จะมีการแกว่งของสัญญาณสูงเช่นกัน นั่นคือที่ค่าความเร็วลมสูง ลมจะมีพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วน ช่วงความกว้างของความเร็วลมจะสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงสัญญาณแบบขั้นบันได (Step Signals)

4.4.2 รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบความชันคงที่ (Ramp Signals)

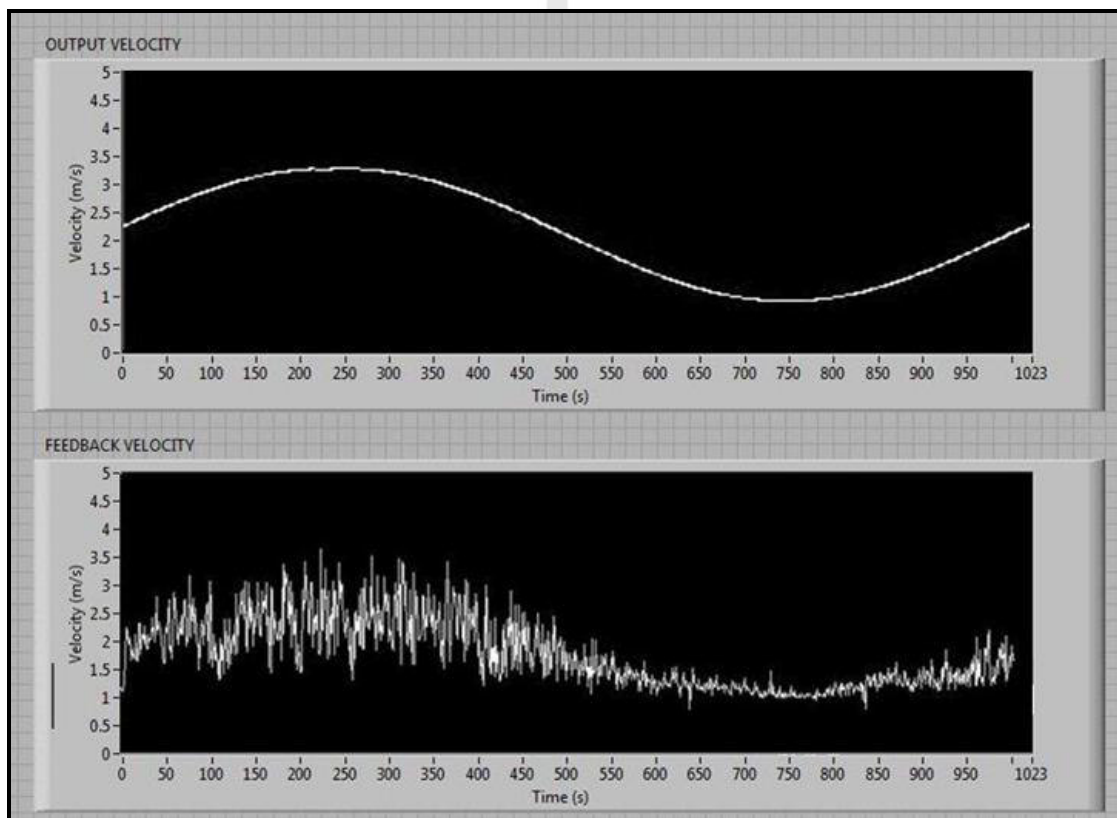
จากรูปที่ 4.11 เป็นการควบคุมรูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบความชันคงที่ (Ramp Signals) ซึ่งมีฟังก์ชันการทำงานดังแสดงในบทที่ 3 นั้น ในช่วงแรกพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของ Air Velocity Transmitter เนื่องจากมอเตอร์จะเริ่มทำงานเมื่อมีการจ่ายแรงดันที่มีค่ามากกว่า 0.8 โวลต์ เมื่อแรงดันมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแล้วนั้น มอเตอร์สามารถทำงานและสร้างลมขึ้น ซึ่งลักษณะของลมมีแนวโน้มเป็นไปตามฟังก์ชันที่กำหนด ความเร็วลมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง มอเตอร์สามารถตอบสนองได้ตามรูปแบบความเร็วลมที่ต้องการ แต่ที่ค่าสัญญาณแรงดันสูง (ความถี่สูง) จะมีการแกว่งของสัญญาณสูงเช่นกัน



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงสัญญาณแบบความชันคงที่ (Ramp Signals)

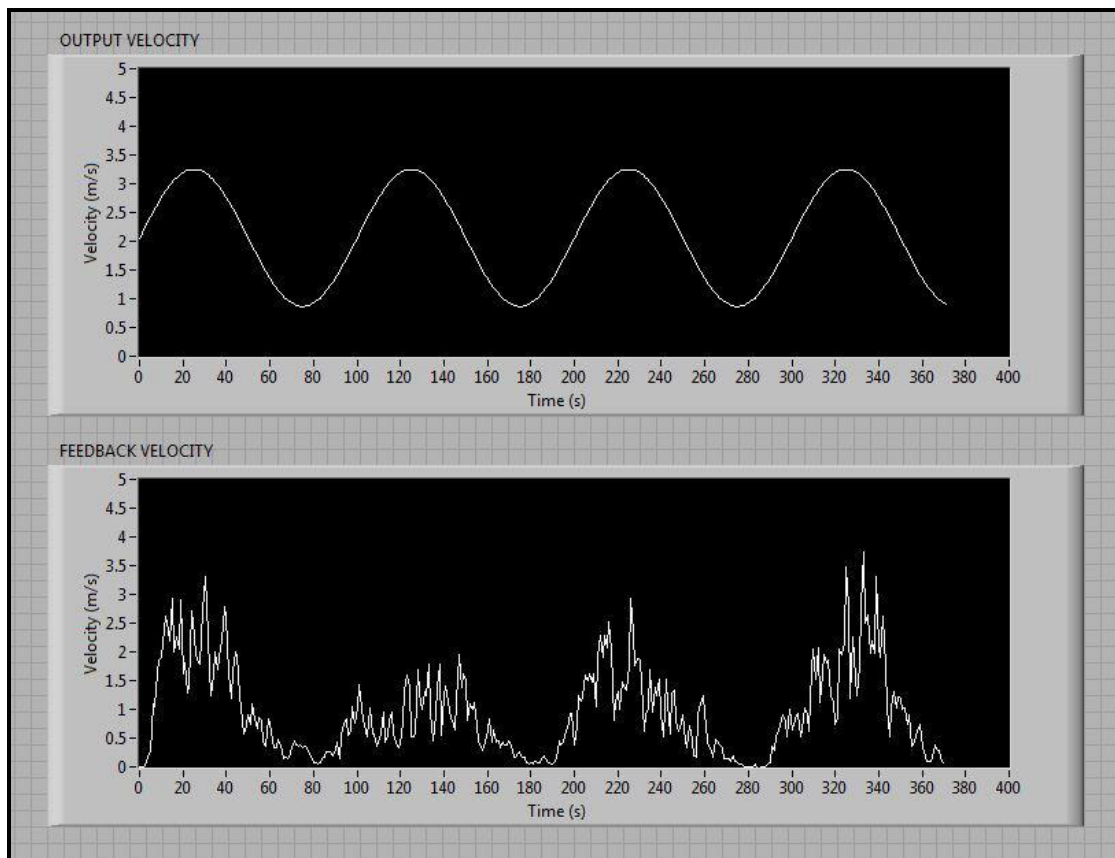
4.4.3 รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Signals)

จากรูปที่ 4.12 เป็นการควบคุมรูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Signals) ซึ่งมีฟังก์ชันการทำงานดังแสดงในบทที่ 3 นั้น ซึ่งกำหนดให้มีความถี่ของสัญญาณ 0.01 Hz. และมีแอมพลิจูดเท่ากับ 2 พบว่าลักษณะของลมมีแนวโน้มเป็นไปตามฟังก์ชันที่กำหนด สัญญาณของ Air Velocity Transmitter มีลักษณะเป็นสัญญาณคลื่นไซน์ ซึ่งตรงตามรูปแบบความเร็วลมที่ต้องการมอเตอร์สามารถตอบสนองได้ดี แต่มีการแกว่งของสัญญาณในช่วงแรกที่มีค่าสัญญาณแรงดันสูง (ความถี่สูง)



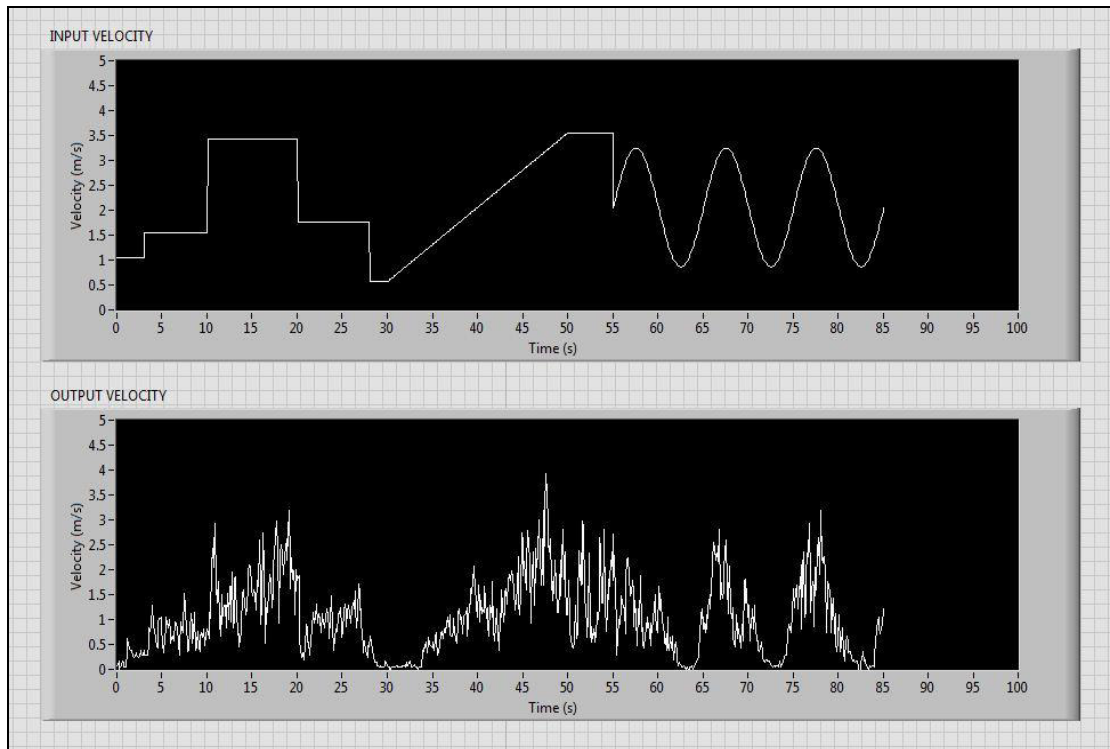
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงสัญญาณแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Signals)

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการรันรูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบฮาร์มอนิกต่อเนื่อง พบว่าสัญญาณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน การทำงานของโปรแกรมสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและสามารถปรับเปลี่ยนความถี่และค่าแอมพลิจูดได้ตลอดเวลาตามความต้องการของผู้ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงสัญญาณแบบฮาร์มอนิกหลายลูกคลื่น

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำโปรแกรมมาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งทำการรันโปรแกรมต่อเนื่อง โดยเริ่มจากรูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบขั้นบันได รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบความชันคงที่ และรูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบฮาร์มอนิก ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าสัญญาณของ Air Velocity Transmitter มีแนวโน้มเป็นไปตามฟังก์ชันที่กำหนด มอเตอร์สามารถตอบสนองได้ตามรูปแบบความเร็วลมที่ต้องการ



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงสัญญาณแบบผสม (Compound Signals)

4.5 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลักนั้น ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้คือ ส่วนที่ 1 ผลการจำลองการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB พบว่าเมื่อทำการป้อนค่าความถี่สูงสุด (50 Hz) ให้กับมอเตอร์แล้วนั้น มอเตอร์มีการตอบสนองอย่างมีประสิทธิภาพและเข้าสู่สภาวะคงตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการเพิ่มภาระกรรมให้กับมอเตอร์ ค่าความเร็วรอบลดลงเล็กน้อย จากนั้นมอเตอร์สามารถปรับเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยการควบคุมแบบ PID Controller นั่นคือค่าพารามิเตอร์และการออกแบบโปรแกรมสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนที่ 2 ผลการทดสอบความเร็วลม พบว่าโครงสร้างที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของอากาศตลอดหน้าตัดใบพัดกังหันลมมีค่าความเร็วลมสม่ำเสมอที่สุดคือโครงสร้างในกรณีที่ 5 นั่นคือโครงสร้างหลักนั่นเอง โดยไม่มีการติดตั้งชุดรังผึ้งและ Nozzle เข้าไป โดยค่าความเร็วลมสูงสุด (ที่ความถี่ 50 Hz) มีค่าประมาณ 3.44 m/s และส่วนที่ 3 ผลการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธี PID Controller พบว่าสามารถควบคุมรูปแบบความเร็วลมได้ทั้ง 3 รูปแบบ นั่นคือ รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบขั้นบันได (Step Signals) รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบความชันคงที่ (Ramp Signals) และรูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Signals) สัญญาณที่วัดได้จาก Air Velocity Transmitter มีแนวโน้มเป็นไปตามฟังก์ชันที่กำหนด

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ ซึ่งเครื่องต้นแบบได้ถูกสร้างและทดสอบความเร็วลมเพื่อให้ได้เครื่องต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ได้ทำการออกแบบโปรแกรมในการควบคุมรูปแบบความเร็วลมทั้ง 3 รูปแบบพร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ในการแสดงผล จากผลการทดลองสามารถสรุปผลและประมวลผลเป็นข้อเสนอแนะที่จะขยายผลสำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

5.2 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบกึ่งหุ่นยนต์ที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้ ซึ่งเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ โดยในส่วนของ การออกแบบโปรแกรมจำลองการควบคุมมอเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB พบว่าโปรแกรมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มอเตอร์สามารถตอบสนองและเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วทั้งการทดลองในสภาวะที่ไม่มีภาระกรรมและมีภาระกรรม นั่นคือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองมีความถูกต้องและการควบคุมแบบ PID Controller สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนที่สองในการทดสอบความเร็วลม พบว่าโครงสร้างที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของอากาศตลอดหน้าตัดใบพัดกึ่งหุ่นยนต์มีค่าความเร็วลมสม่ำเสมอที่สุดคือ โครงสร้างในกรณีที่ 5 นั่นคือโครงสร้างหลักนั่นเอง โดยไม่มีการติดตั้งชุดรีดแรงและ Nozzle เข้าไป โดยค่าความเร็วลมสูงสุด (ที่ความถี่ 50 Hz) มีค่าประมาณ 3.44 m/s และส่วนสุดท้าย ผลการควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธี PID Controller พบว่าสามารถควบคุมรูปแบบความเร็วลมได้ทั้ง 3 รูปแบบ นั่นคือ รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบขั้นบันได (Step Signals) รูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบความชันคงที่ (Ramp Signals) และรูปแบบความเร็วลมสัญญาณแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Signals) แต่เนื่องจากลมที่ออกมาจากมอเตอร์นั้นเป็นลมที่มีพฤติกรรมไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซึ่งเป็นลักษณะลมที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อมีการควบคุมด้วยวิธี PID Controller จึงไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ โดยผู้วิจัยได้ใช้ NI -USB 6008 ซึ่งมีค่าการตอบสนองที่ต่ำ ดังนั้นในช่วงที่มีการแกว่งของสัญญาณสูง อุปกรณ์ไม่สามารถรองรับการทำงานของโปรแกรมได้ จึงเป็นสาเหตุให้การควบคุมรูปแบบความเร็วลมด้วยวิธี PID Controller ไม่สามารถทำงานได้นั่นเอง

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ปัญหาในการทดลอง

1. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลองมีกำลังไม่เพียงพอในการสร้างความเร็วลมตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีกำลังสูงนั้นจะมีราคาที่สูงมาก
2. สำหรับใบพัดที่ใช้ในการทดลองได้ถูกออกแบบให้ทำงานที่ความเร็วลมค่าหนึ่ง ดังนั้นที่ความเร็วลมต่ำนั้น ใบพัดจึงไม่สามารถทำงานได้ จะเริ่มหมุนที่ความเร็วลมประมาณ 2 เมตรต่อวินาที
3. เนื่องจากการทดลองเป็นการจำลองลักษณะลมที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ นั้นคือเป็นลมที่มีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ดังนั้นเมื่อมีการควบคุมด้วยวิธี PID Controller จึงไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์

5.3.2 งานวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการพัฒนาในส่วนของมอเตอร์ที่นำมาใช้งาน ให้มีกำลังเพียงพอในการสร้างความเร็วลม หากมีการนำไปใช้งานจริง
2. นอกเหนือจากการทดสอบประสิทธิภาพของกังหันลมสำหรับรูปแบบความเร็วลมทั้ง 3 รูปแบบที่ได้ทำการวิจัยมาแล้วนั้น ยังสามารถทำการศึกษาได้อีกหลากหลายรูปแบบ เพื่อศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของกังหันลมต่อไป
3. ศึกษาและทำวิจัยเกี่ยวกับใบพัดที่มีความเหมาะสมกับลักษณะความเร็วลมในรูปแบบต่าง ๆ พร้อมทั้งทำการออกแบบกังหันลมที่สามารถปรับมุมปะทะได้อย่างอัตโนมัติเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด
4. สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานจริง ควรมีการปรับปรุงและพัฒนาในส่วนของคุณสมบัติให้มีการแสดงค่าต่างๆมากขึ้น เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน

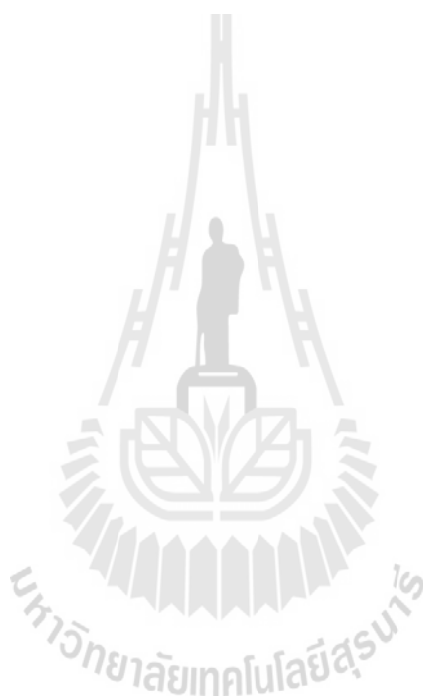
รายการอ้างอิง

- กนต์ธร ชำนิประศาสน์ (2548). การวัดเชิงกลด้วย LabVIEW. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 240 หน้า.
- กฤษ เฉยไสย (2549). พื้นฐานการควบคุมมอเตอร์. ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 114 หน้า.
- จิระพล ศรีเสริฐผล (2553). **Controller Design**, เอกสารประกอบการเรียนรายวิชา 425440, สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 12 หน้า.
- ชโลธร ธรรมแท้ (2552). กระบวนการเชิงตัวเลขที่แม่นยำเพื่อสอบเทียบการออกแบบกังหันลมเชิงทฤษฎี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. หน้า 34-45.
- นนทวุฒิ ปรีชาวุฒิ อุดมเกียรติ นนทแก้ว และ บุญชัย วัจจะตรากุล (2552). การศึกษาสมรรถนะของ กังหันลมแบบแกนนอนที่มีการปรับมุมใบ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. เชียงใหม่ ประเทศไทย.
- นิติศักดิ์ หนูมาน้อย (2555). การวิเคราะห์และควบคุมการสั่นของเพลาโดยใช้แบริงแม่เหล็กแบบกระตุ้น รองรับด้านเดียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. หน้า 17-19.
- เมืองมนต์ เนตรหาญ และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา (2554). การวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพกังหันลม ผลิตไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- สมเกียรติ แก้วจันทร์ (2555). ระบบการมองเห็นสำหรับการควบคุมรถขนส่งแบบอิสระ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. หน้า 58-68.
- Wood, D. (2011). **Small Wind Turbines Analysis, Design, and Application**. Springer; pp.57-76.
- Manwell, J. F. and McGowan, J.G., and Rogers, A. L. (2009). **Wind Energy Explained Theory, Design and Application**. 2nd edition, John Wiley & Sons Ltd., New York. pp.360-378.
- Faiz, J., and Shahgholian, G. (2009). **Modeling and Simulation of a Three-Phase Inverter with Rectifier-Type Nonlinear Loads**. The Armenian Journal of Physics, 2009, Vol.2; Issue 4, pp.307-316.

- Lanzafame, R., and Messina, M. (2007). **Fluid Dynamics Wind Turbine Design: Critical Analysis, Optimization and Application of BEM Theory**. *Renewable Energy*, Vol.32; Issue 4, November 2007, pp.2291-2305.
- Maalawi, K.Y. and Badawy, M.T.S. (2001). **A Direct Method for Evaluating Performance of Horizontal Axis Wind Turbines**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.5; Issue 2, June 2001, pp.175-190.
- Hansen, M.O.L. (2007). **Aerodynamics of Wind Turbines**. 2nd edition, Engineering and Transportation: Earthscan, London. 181pp.
- Naewngerndee, N., and Kulworawanichpong, T. (2009). **Voltage-Dependent Parameter Refinement for Single-Phase Induction Motors using Genetic Algorithms**. *The WSEAS Transactions on Systems and Control*, Vol.4; Issue 1, January 2009, pp. 45-54.
- Singh, S. (2011). **The Dynamic Simulation of the Three-Phase Brushless Permanent Magnet AC Motor Drives Using LabVIEW**. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering (IJMIE)*, Vol.1; Issue 2, pp.57-63.
- Sathyajith M., and Philip, G.S. (2011). **Advances in Wind Energy Conversion Technology**. Engineering and Transportation; Springer, April 20, 2011, 216pp.
- Shah, S., Rashid, A., and Bhatti, M.K.L. (2012) **Direct Quadrature (D-Q) Modeling of 3-Phase Induction Motor Using MATLAB/Simulink**. *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*. Vol.3; Issue 5, May 2012, pp.237-243.
- Musuroi, S., Sorandaru, C., Olarescu, V.N., and Svobodam M. (2006). **Mathematical Model of Three-Phase Asynchronous Servomotors in Stationary Non-Sinusoidal Regime**. The 9th WSEAS International Conference on Power Systems. 14-16 July, 2006. Vouliagmeni, Athens, Greece. pp.63-66.
- Poonsawat, S., and Kulworawanichpong, T. (2008). **Speed Regulation of a Small BLDC Motor using Genetic-Based Proportional Control**. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 21 November, 2008. pp.205-210.
- Tangler, J.L, and Kocurek, D.J. (2005). **Wind Turbine Post-stall Airfoil Performance Characteristics Guidelines for Blade-Element Momentum Methods**. The 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 10-13 January, 2005 Reno, Nevada.
- Venkatesh, G.C., and Kulkarni, S.V. (2006). **Energy Yield of Passive Stall Regulated Fixed Speed Wind Turbine With Optimal Rotor Speed**. *Electric Power Systems Research*. Vol.76; Issue 12, August 2006. pp.1019-1026.

Sridech, W., and Chitsomboon, T. (2011). **Optimal speed for stall-regulated wind turbines in Thailand**. The 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, Krabi, Thailand.

Aziz, Z. A., Bohun, C. S., Chung, K. W., Dai, H. H., Huo, Y. H., Ho, D., Huang, H. X., Wang, F. F., Wang, J., Wang, Y. B. (2009). **Mathematical Assessment of PWM Control of A Induction Motor**. Springer Heidelberg Dordrecht London New York. pp.10-14.

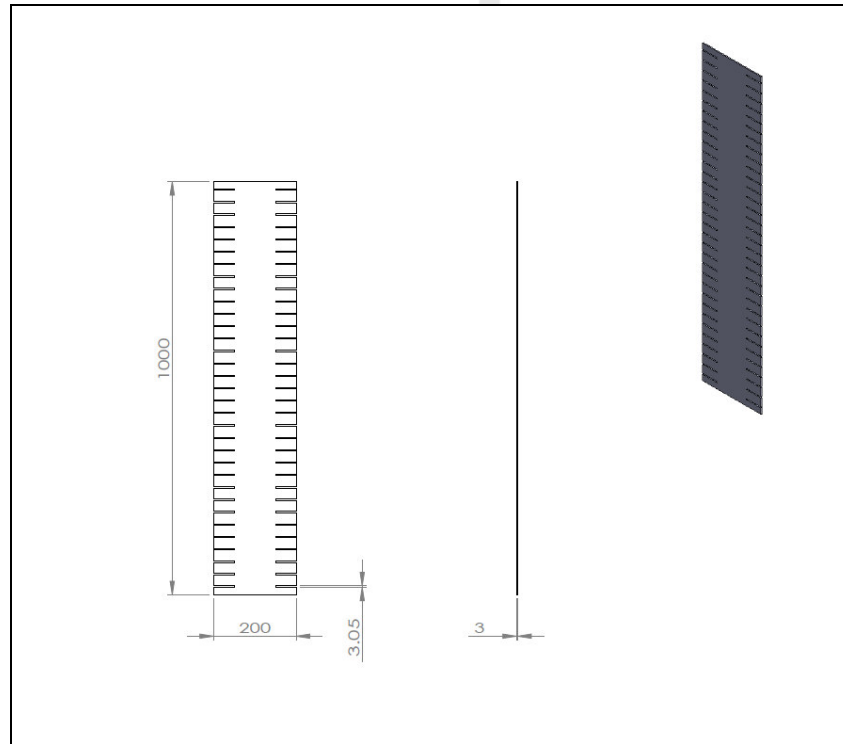


ภาคผนวก ก

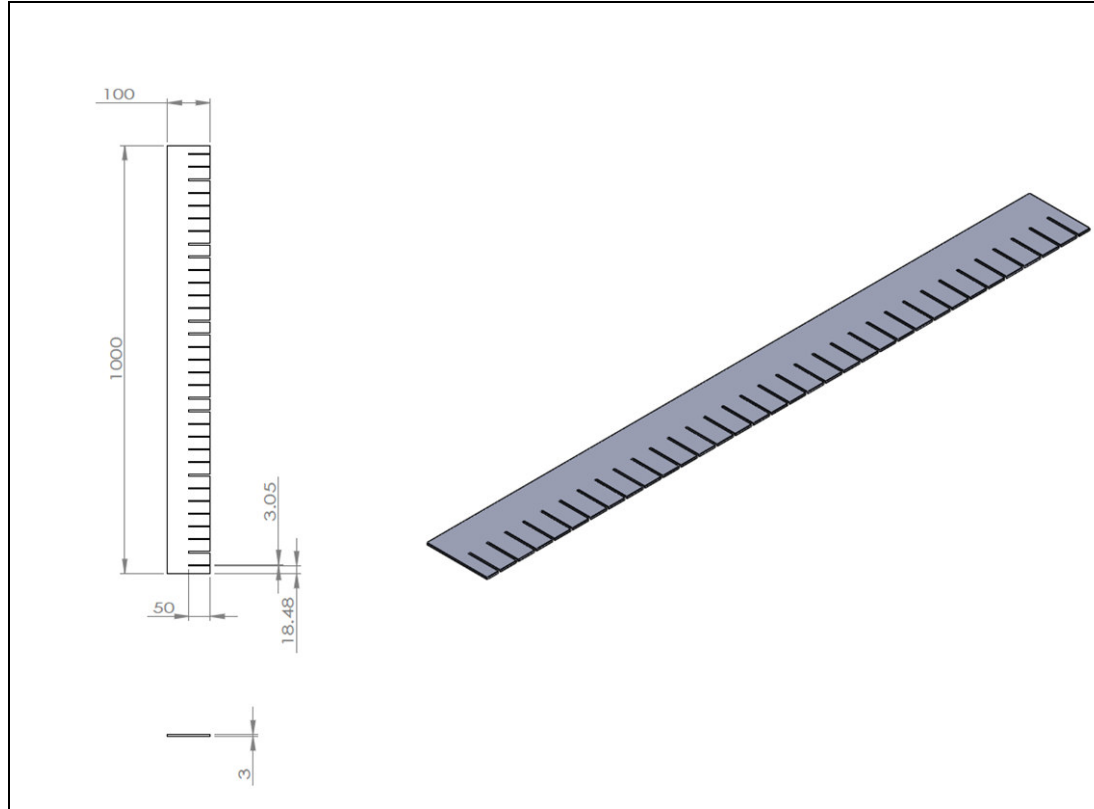
รายละเอียดการออกแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรม SolidWorks

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

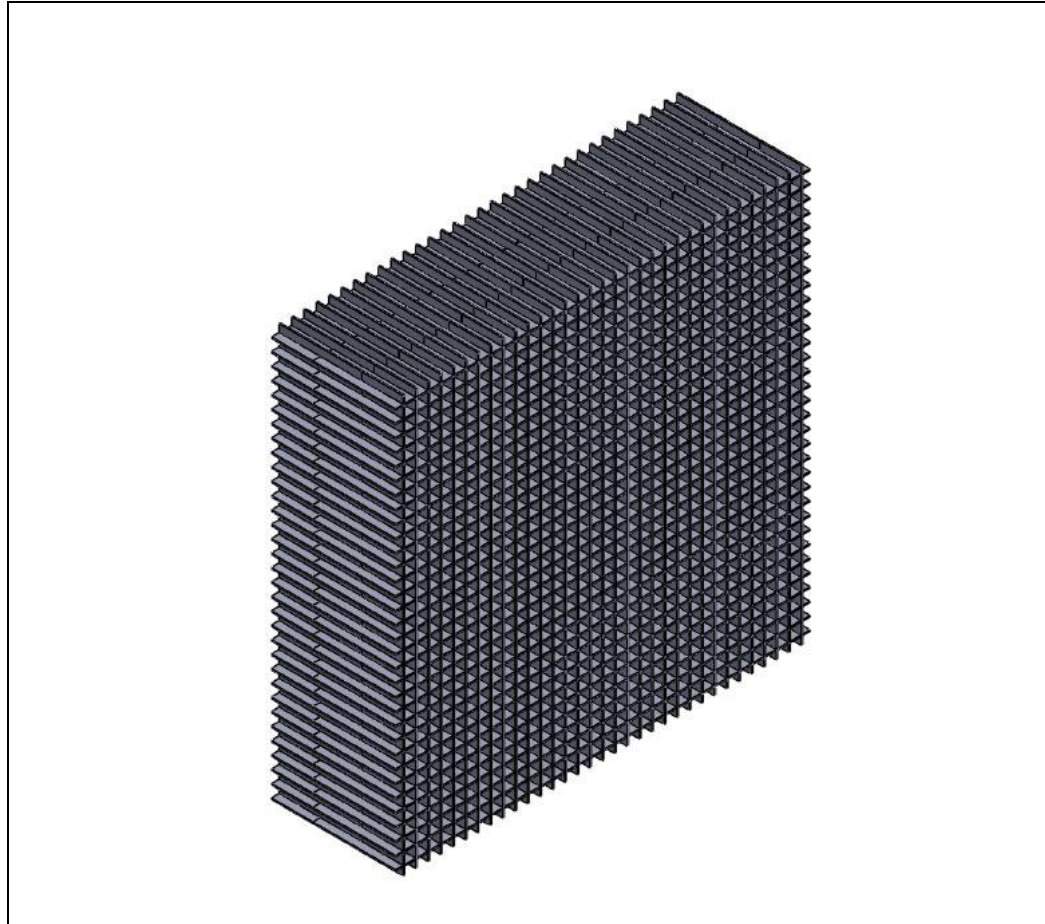
ชุดส่วนประกอบรังผึ้ง



รูปที่ ก.1 ส่วนประกอบของรังผึ้งส่วนที่ 1

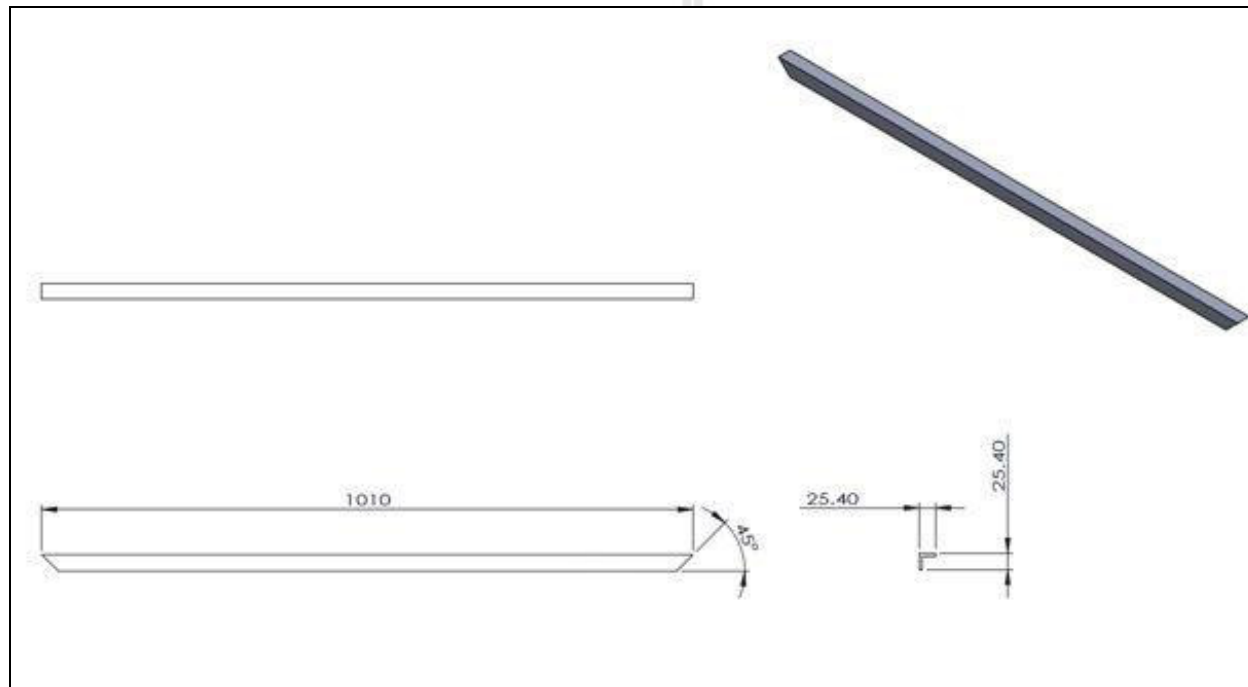


รูปที่ ก.2 ส่วนประกอบของรังผึ้งส่วนที่ 2

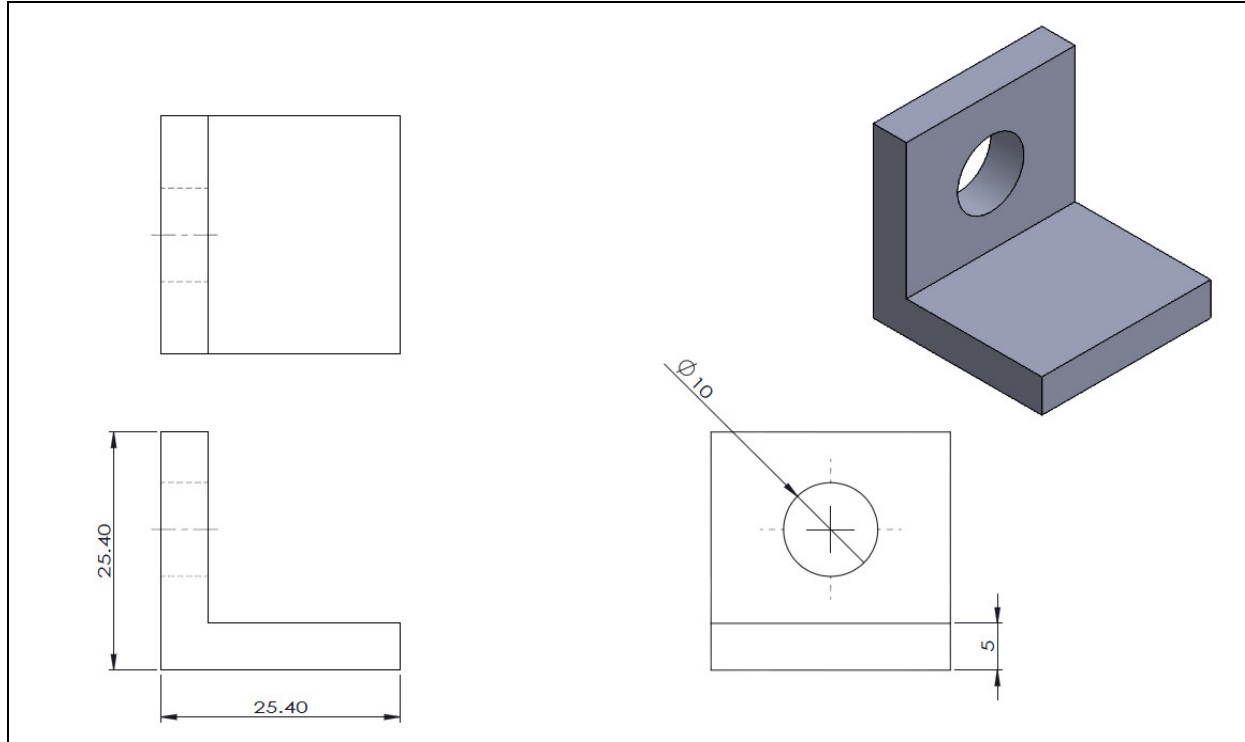


รูปที่ ก.3 รังผึ้ง

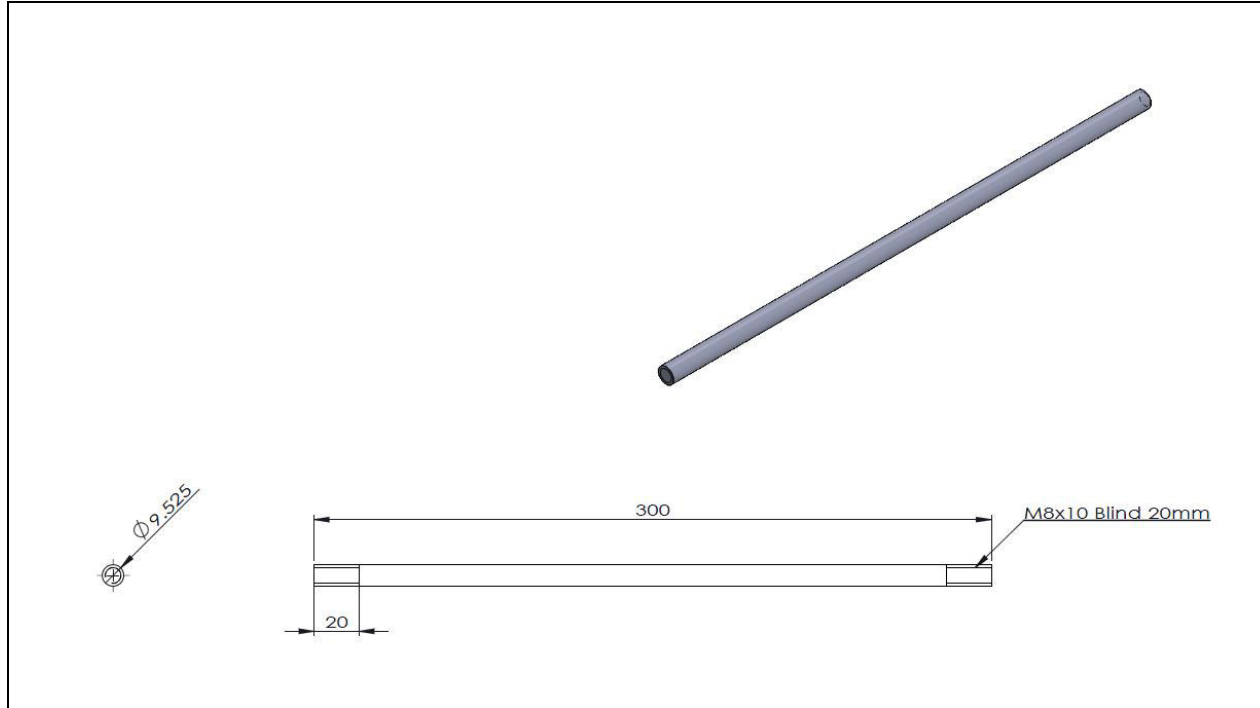
ชุดส่วนประกอบของฐานติดตั้งรังผึ้ง



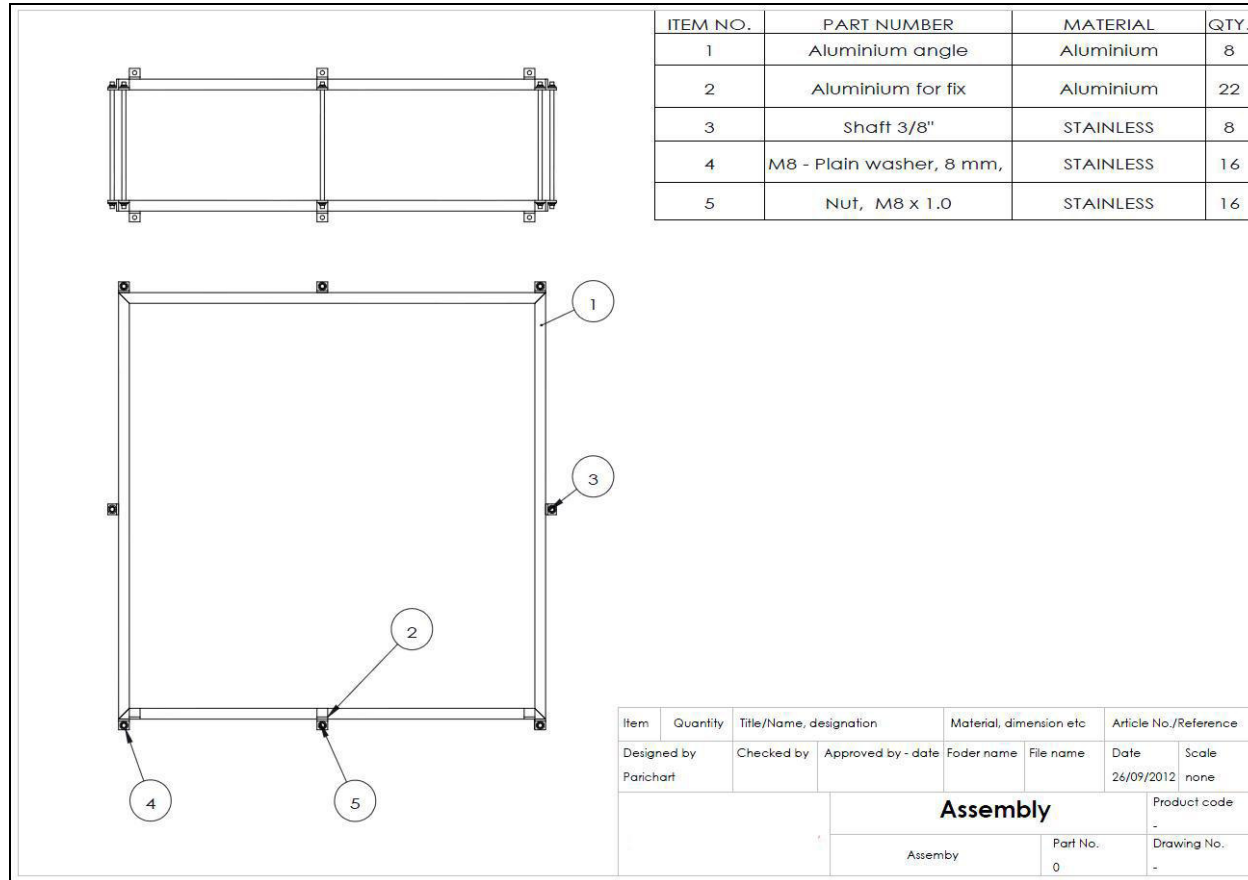
รูปที่ ๓.4 Aluminum angle



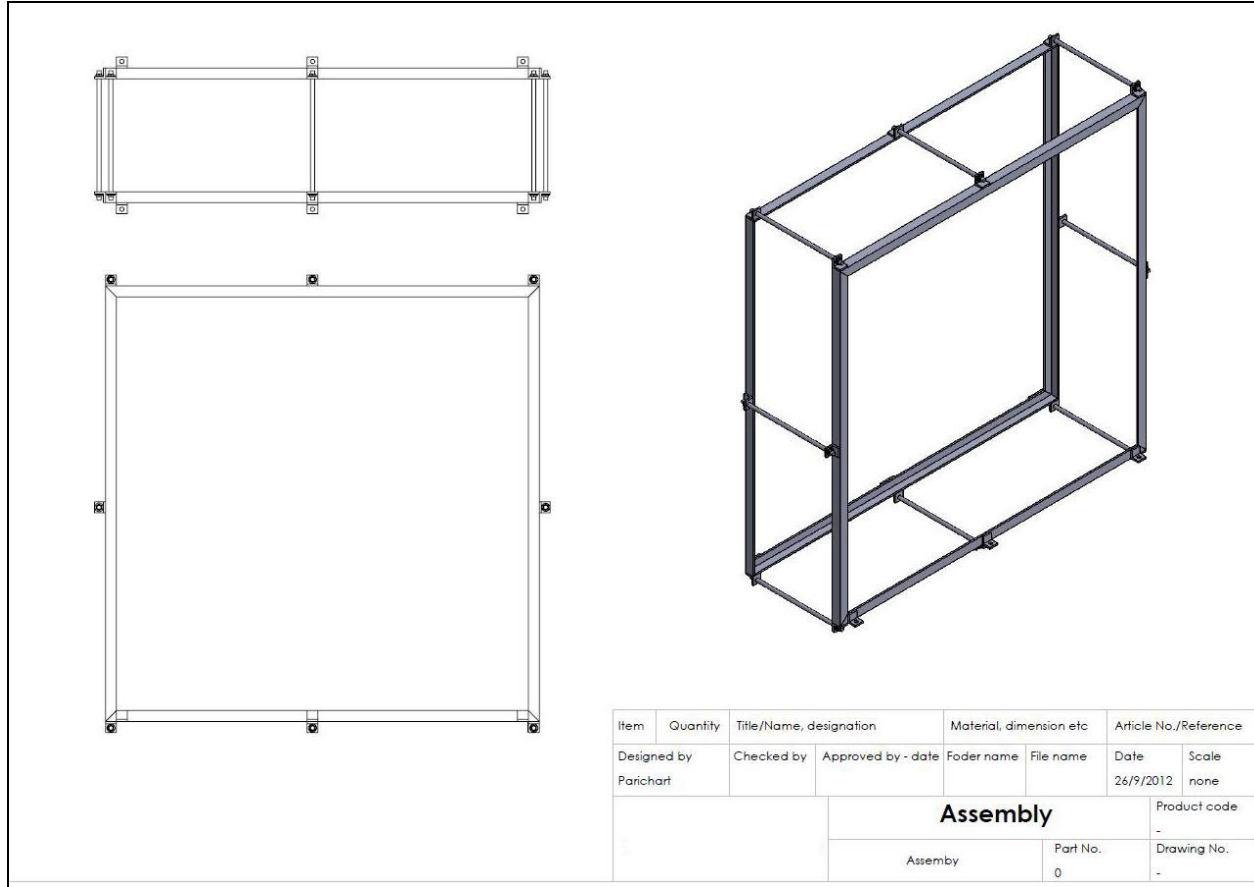
รูปที่ ๓.5 Aluminum for fix



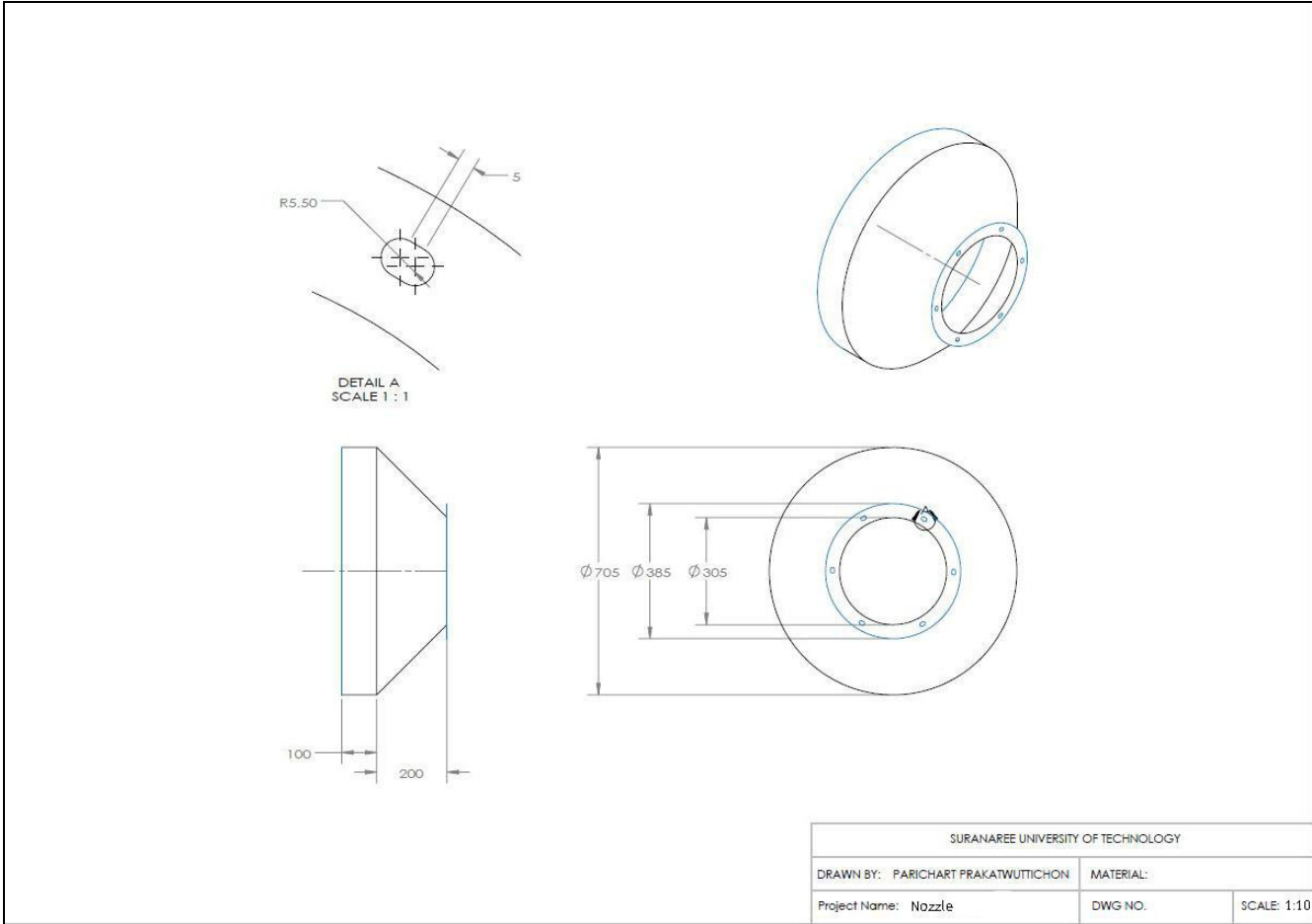
รูปที่ ก.6 Shaft 3/8"



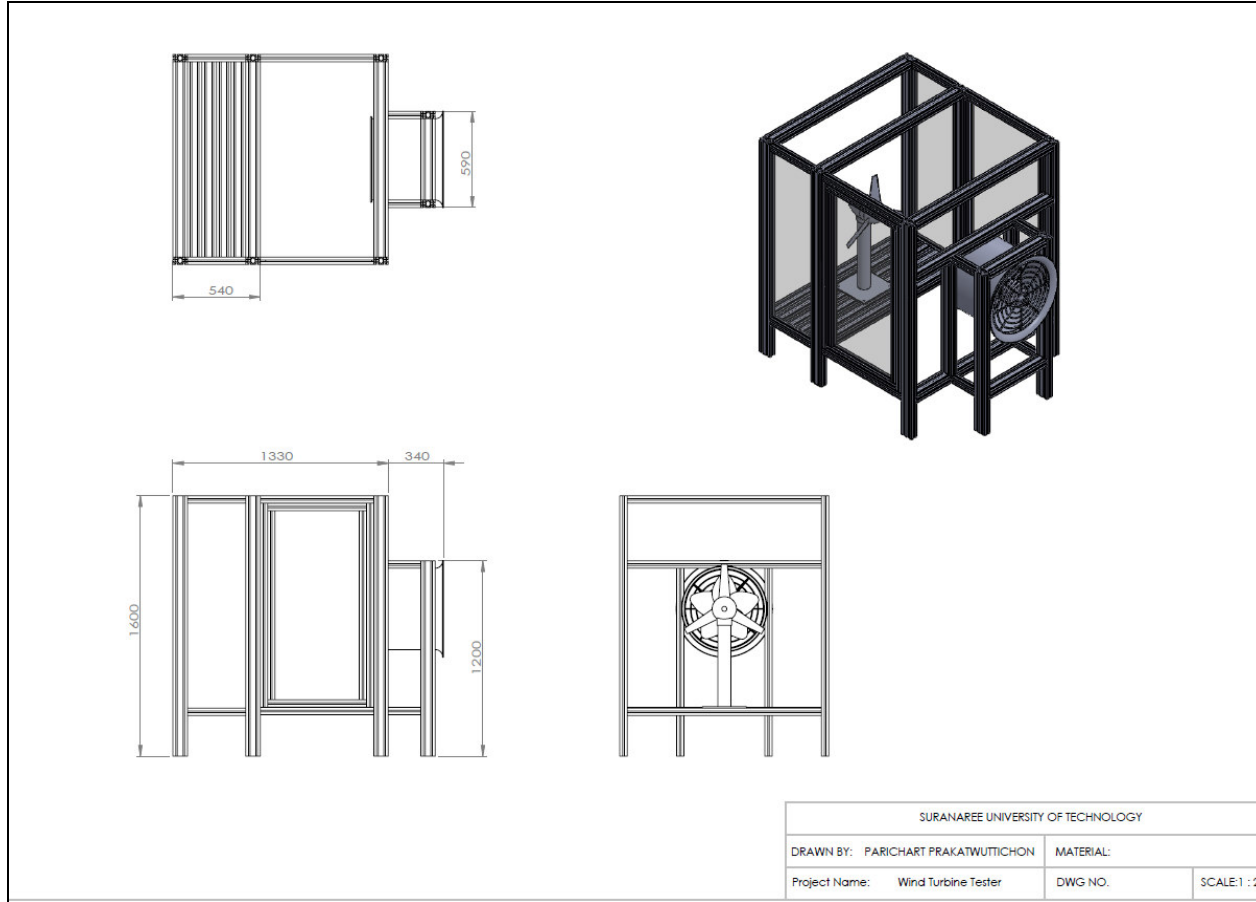
รูปที่ ก.7 แสดงส่วนประกอบของฐานติดตั้งรังผึ้ง



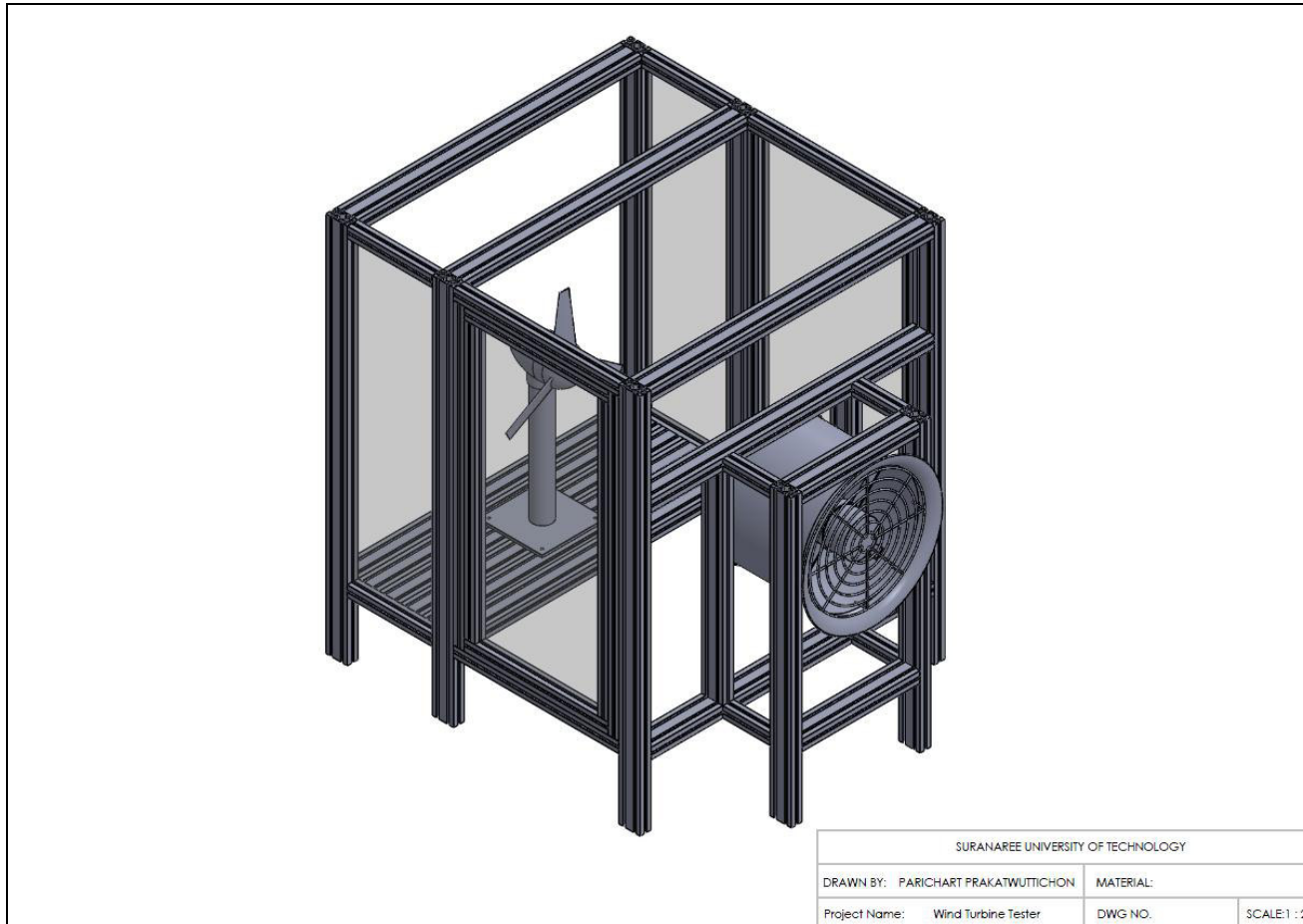
รูปที่ ก.8 แสดงโครงสร้างของฐานติดตั้งรังผึ้ง



รูปที่ ก.9 แสดงโครงสร้างของฐานติดตั้งรังผึ้ง



รูปที่ ก.10 ต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้

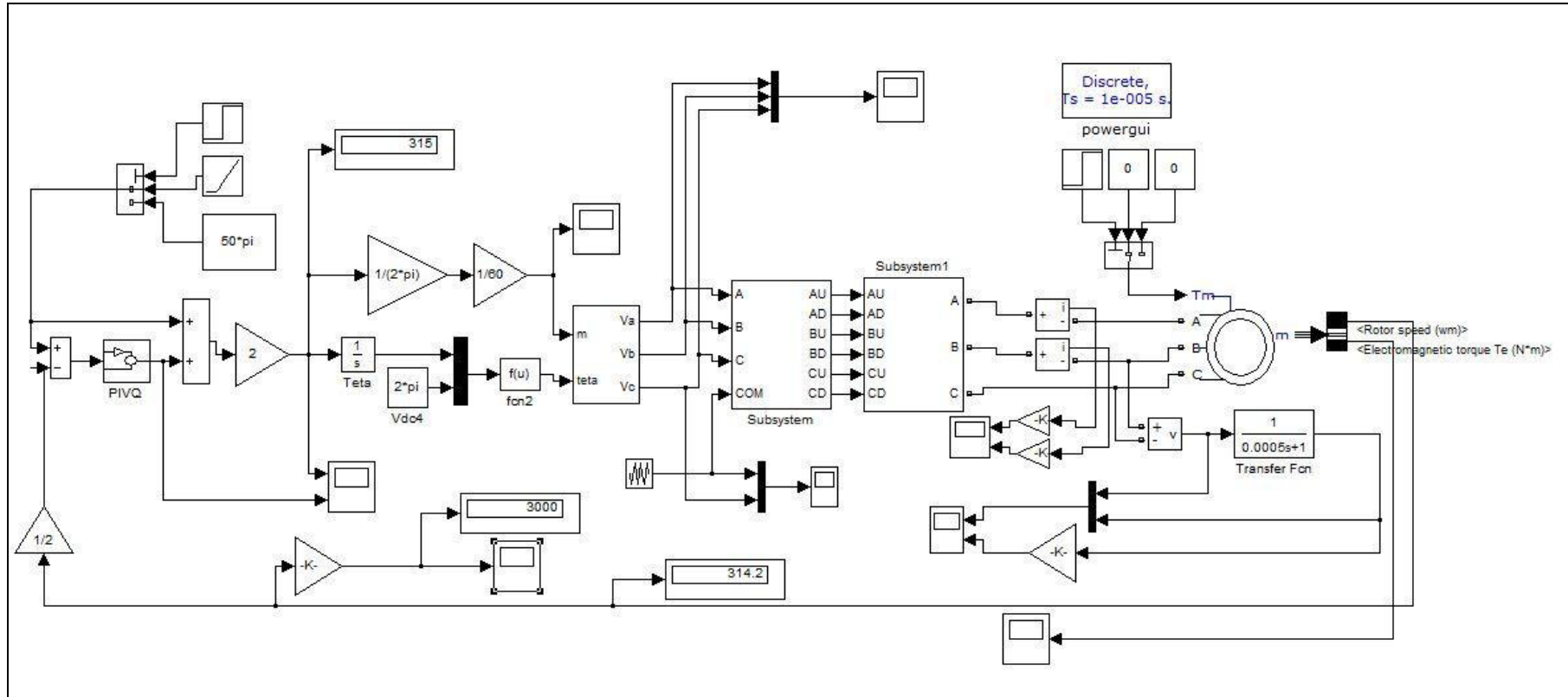


รูปที่ ก.11 ต้นแบบเครื่องทดสอบกังหันลมที่สามารถปรับรูปแบบความเร็วลมได้

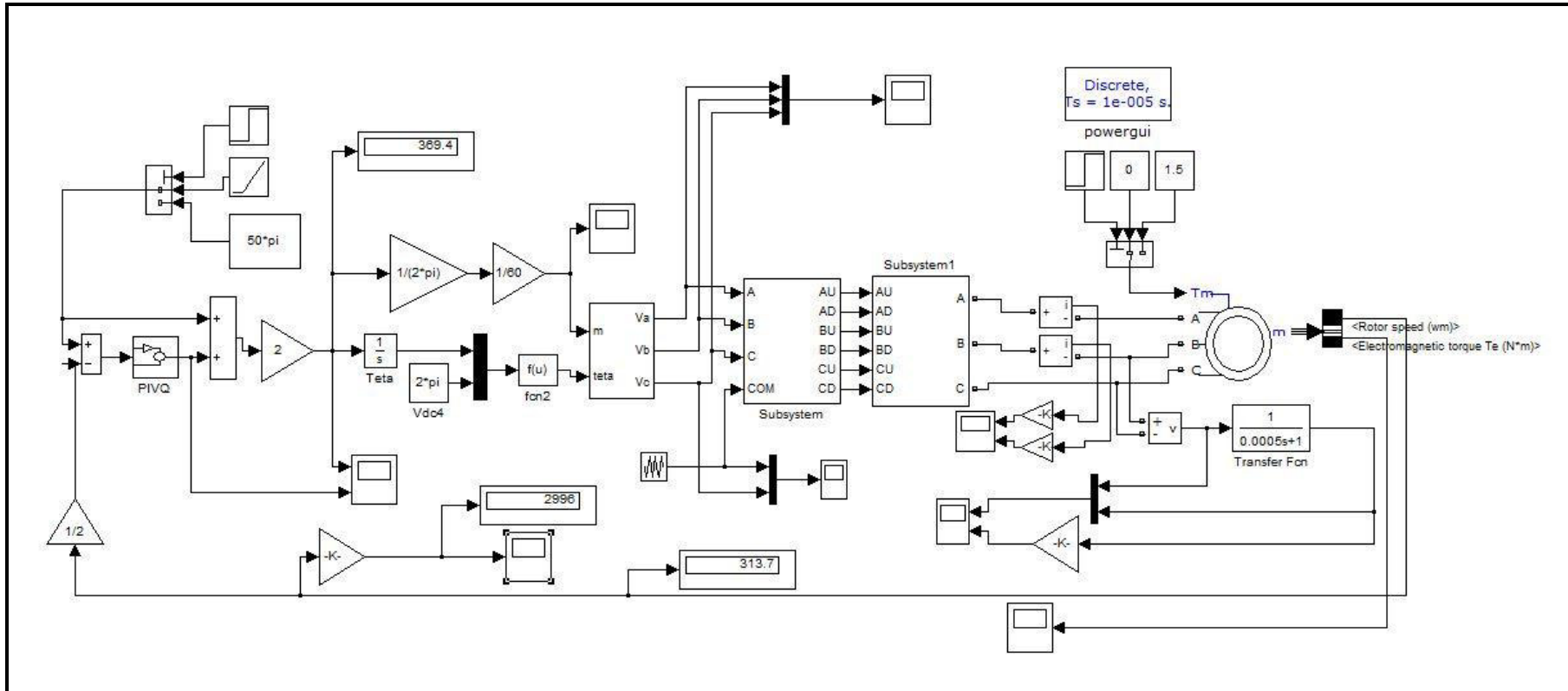


ภาคผนวก ข

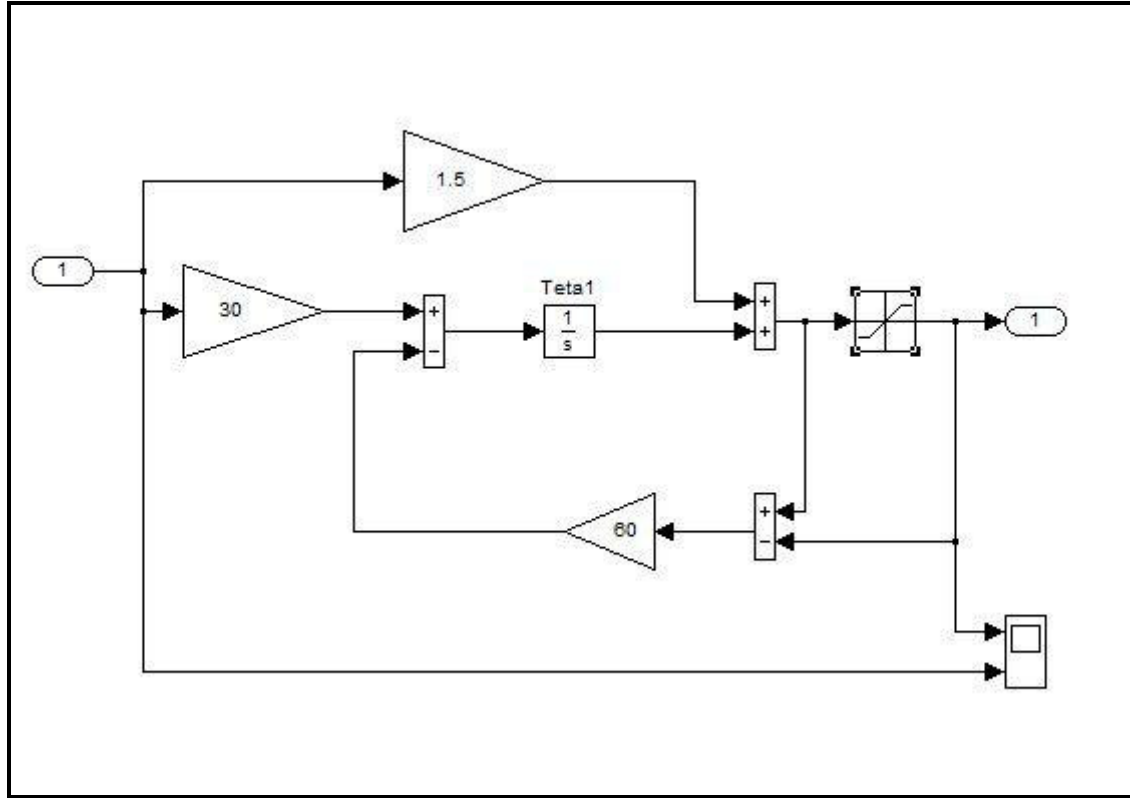
โปรแกรม MATLAB



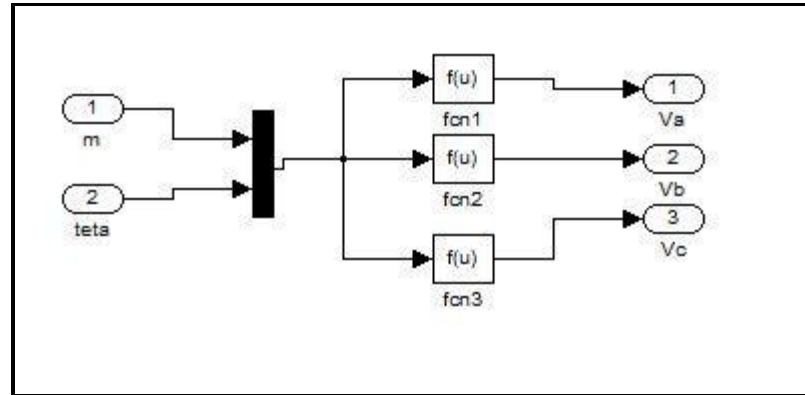
รูปที่ ข.1 โปรแกรมจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะไม่มีภาระกรรม



รูปที่ ข.2 โปรแกรมจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะมีภาระกรรม

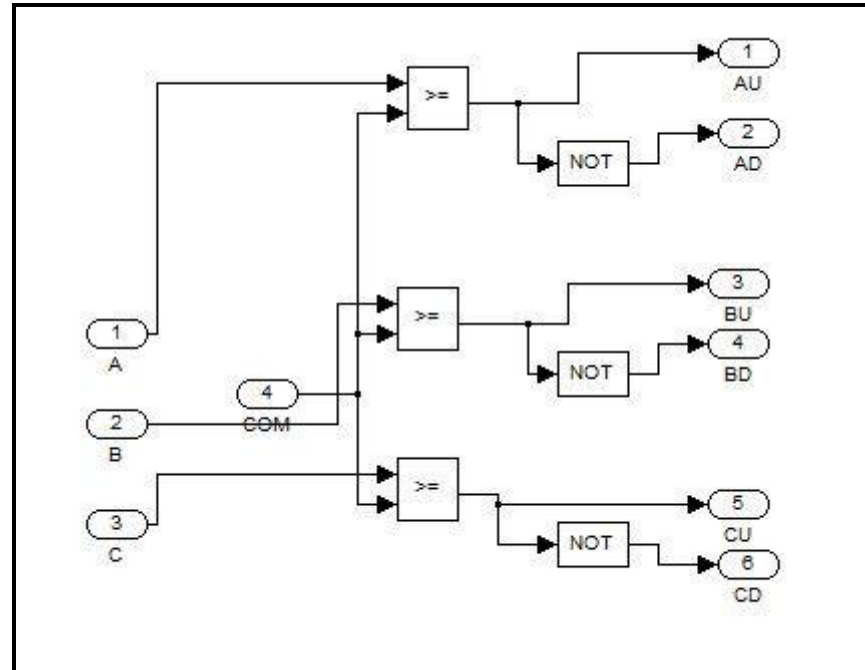


รูปที่ ข.3 แสดงรายละเอียดการทำงานในบล็อก PIVQ

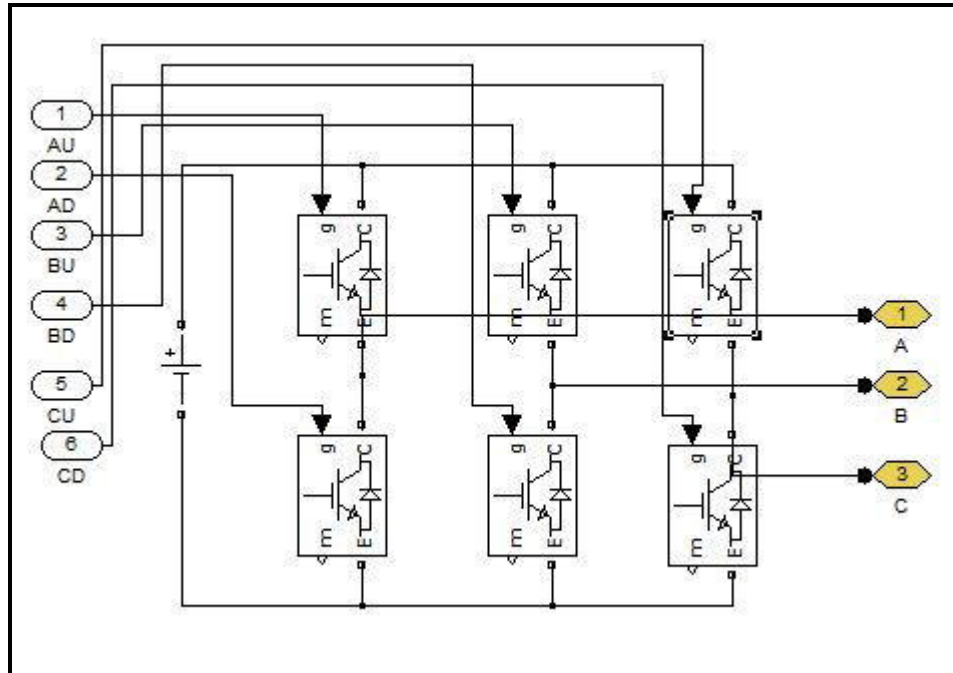


รูปที่ ข.4 แสดงรายละเอียดการแปลงค่าแรงดัน 3 เฟส

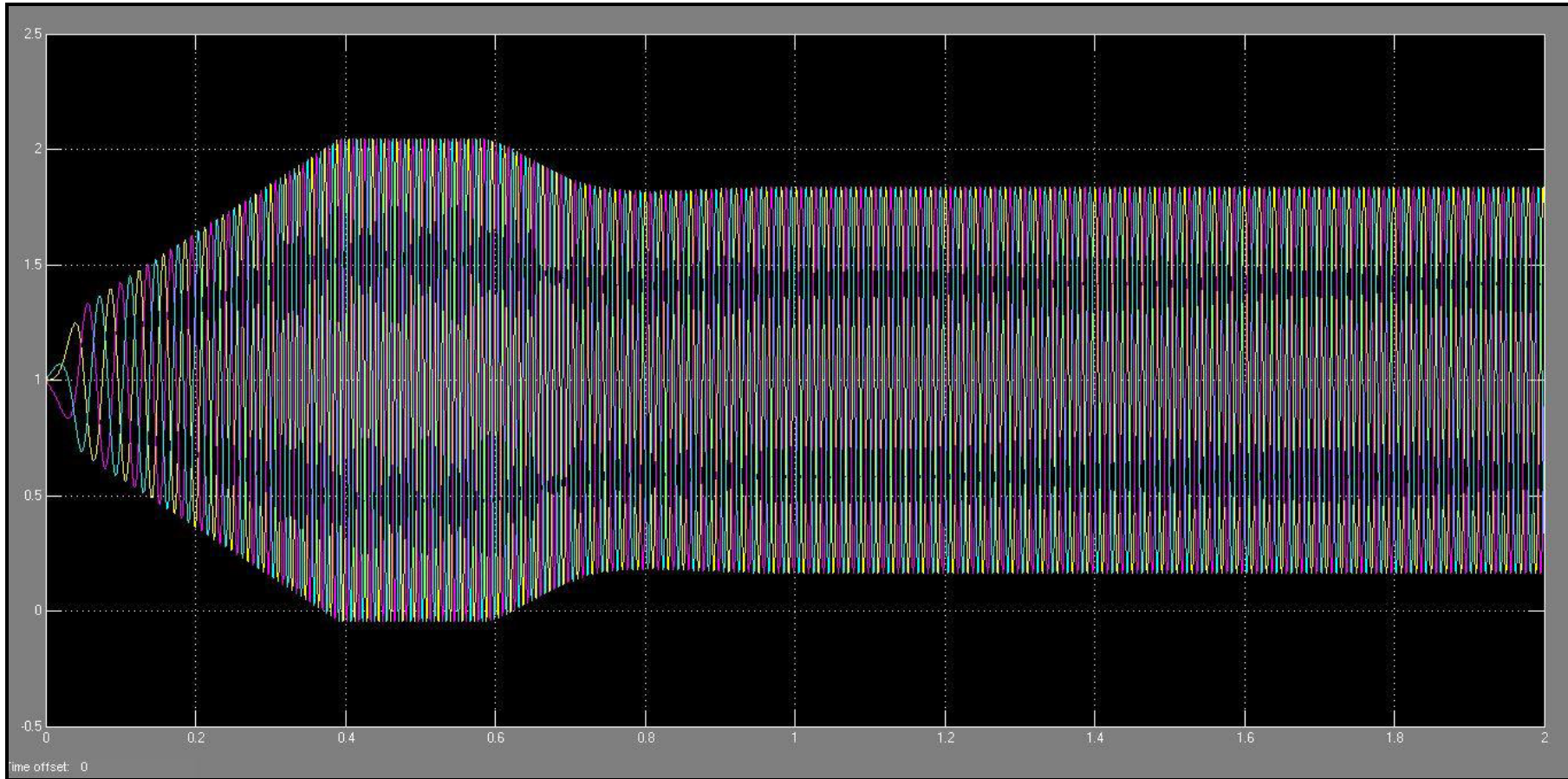




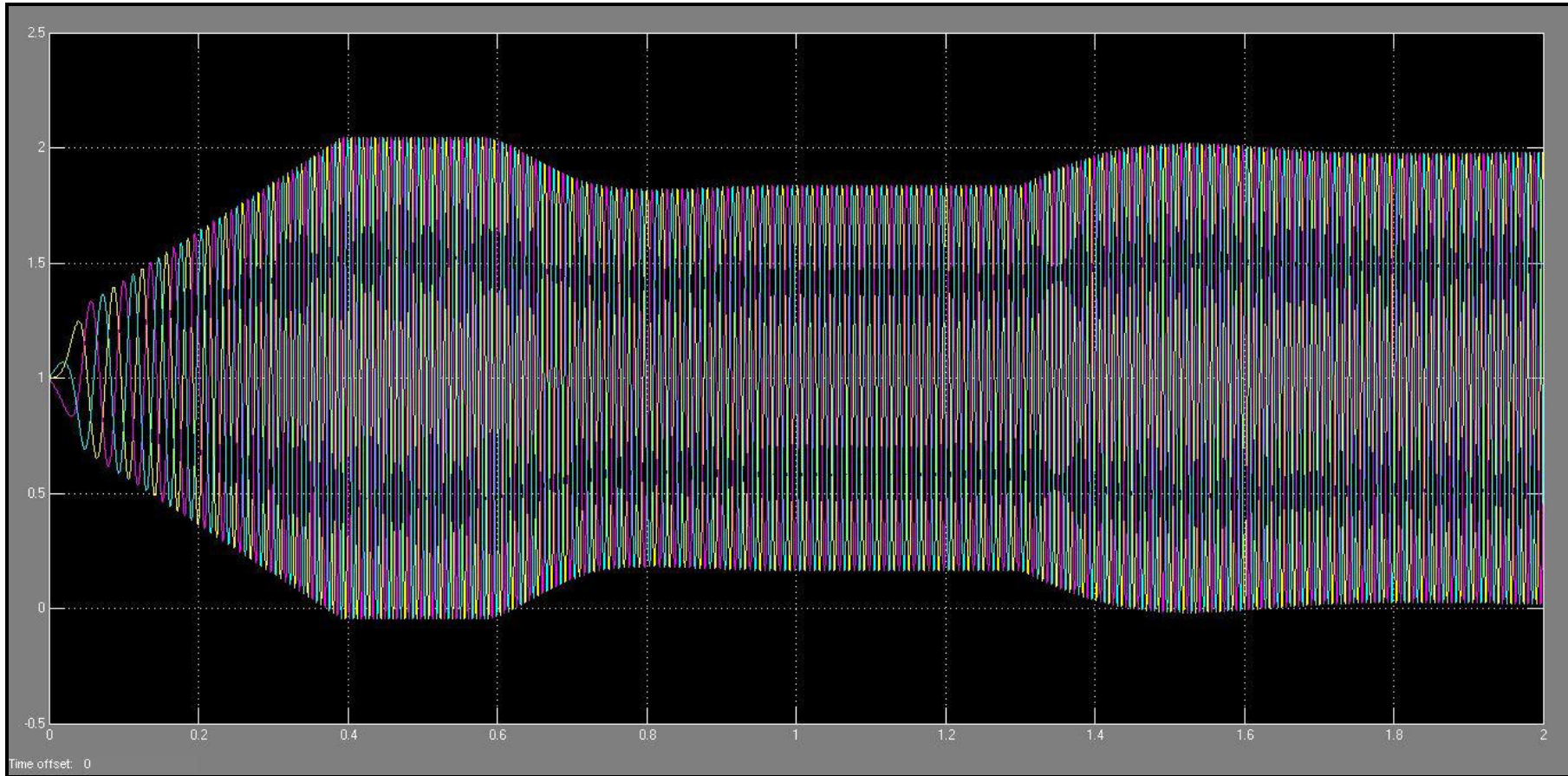
รูปที่ ข.5 แสดงรายละเอียดการทำงานในบล็อก Subsystem



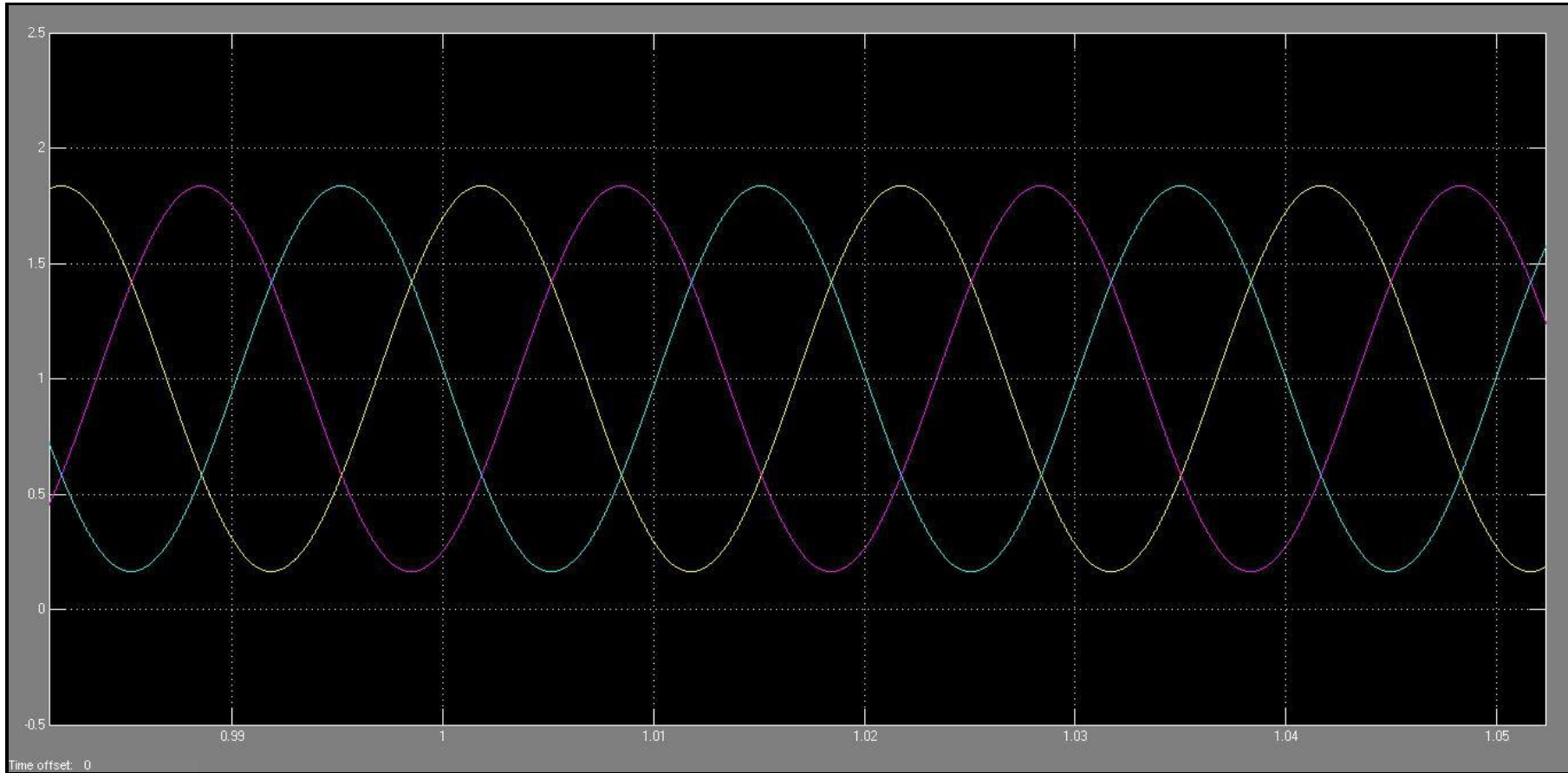
รูปที่ ข.6 แสดงรายละเอียดการทำงานในบล็อก Subsystem1



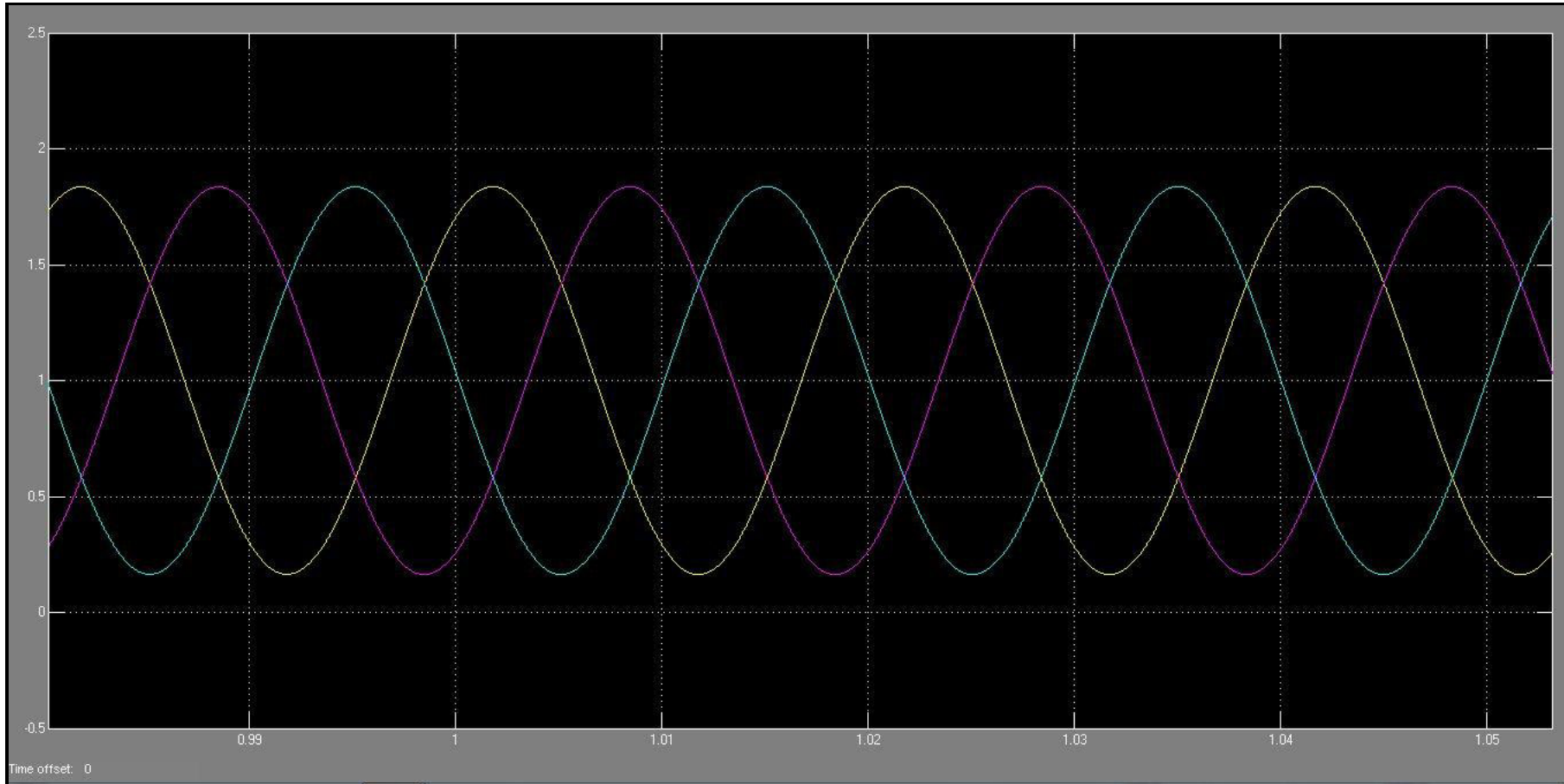
รูปที่ ข.7 แสดงค่าแรงดันที่จ่ายให้ Subsystem ในสภาวะไม่มีภาระกรรม



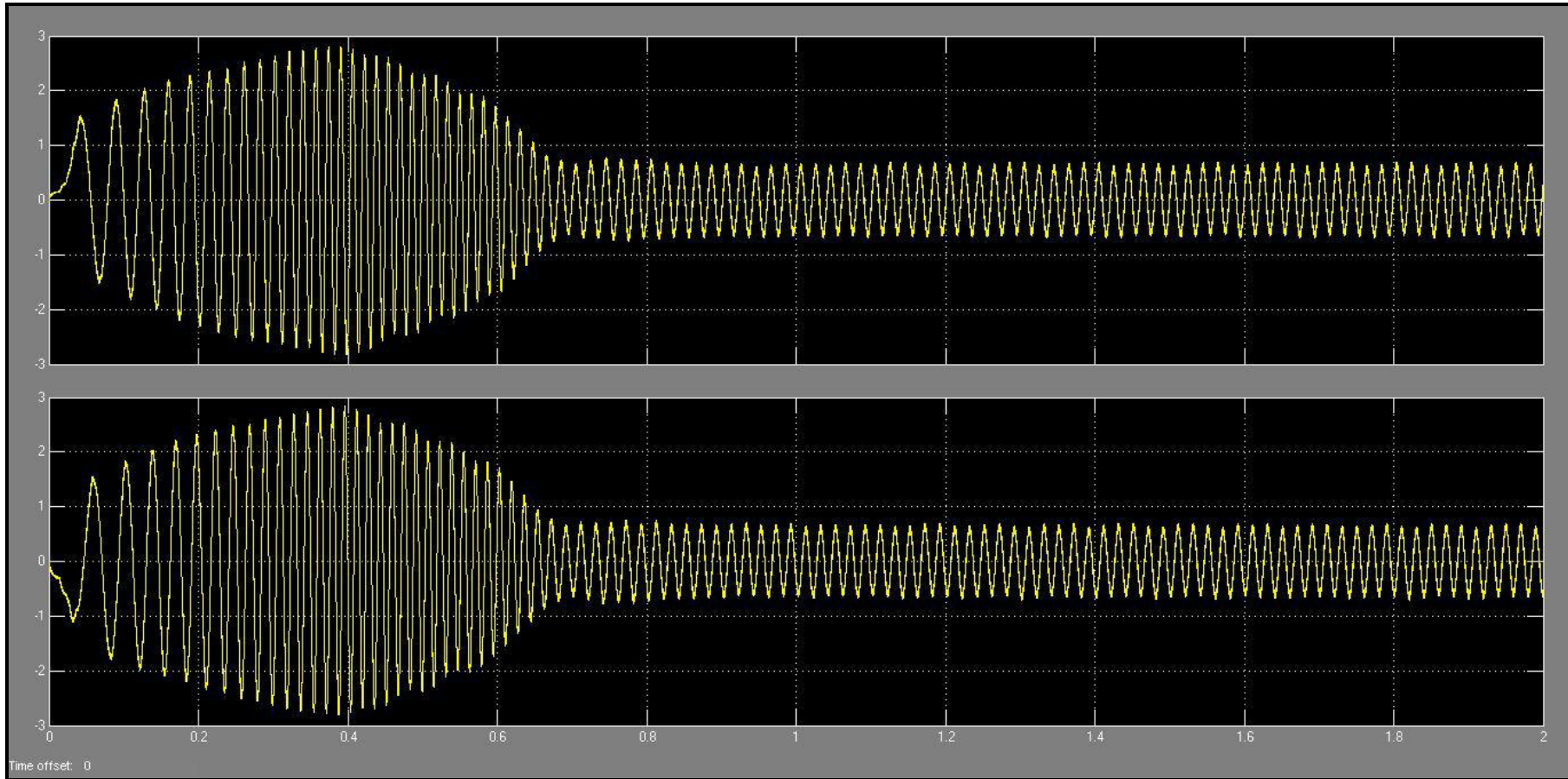
รูปที่ ข.8 แสดงค่าแรงดันที่จ่ายให้ Subsystem ในสภาวะมีภาระกรรม



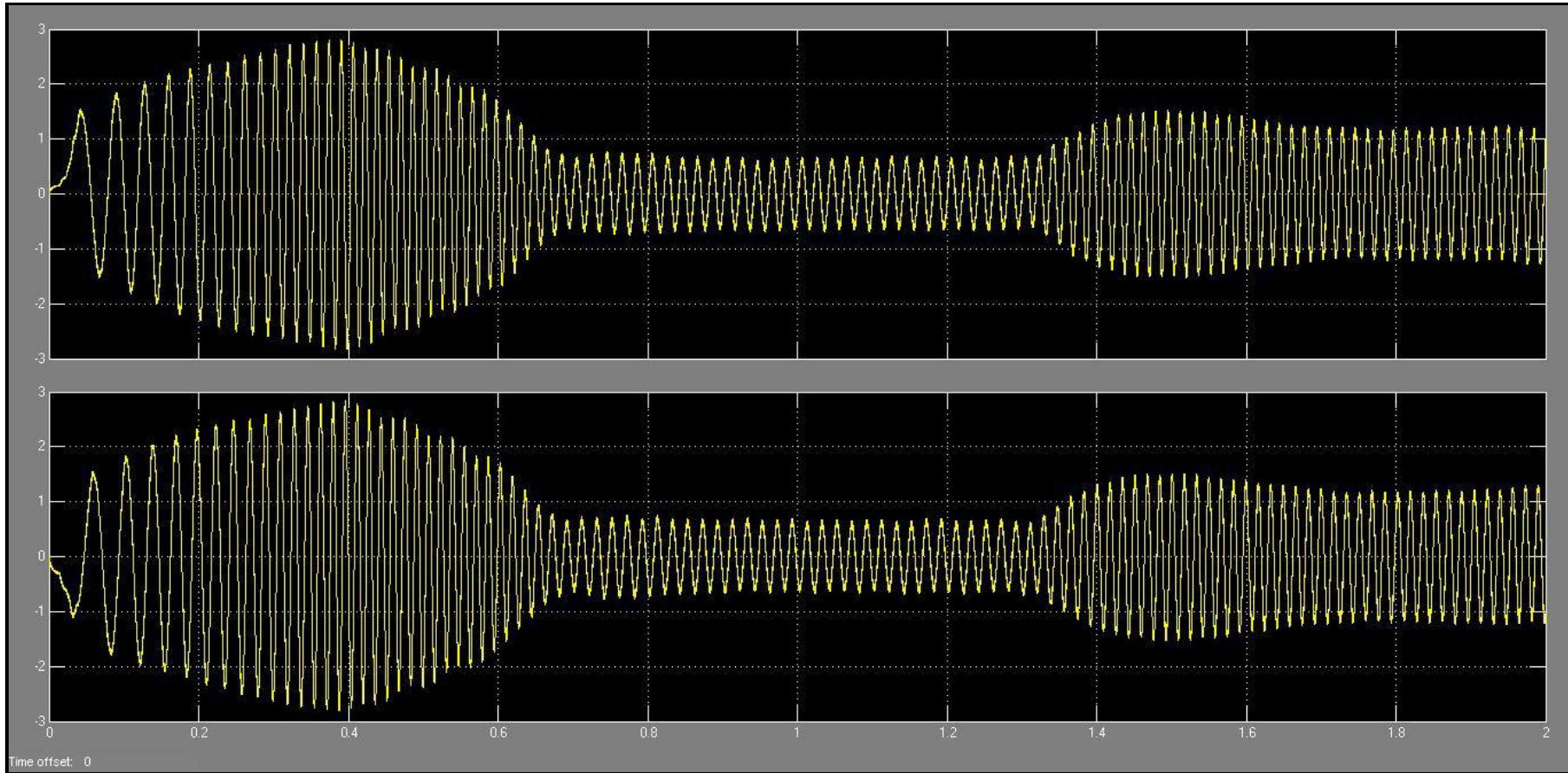
รูปที่ ข.9 แสดงค่าแรงดันที่จ่ายให้ Subsystem ในสภาวะไม่มีภาระกรรม (ขยาย)



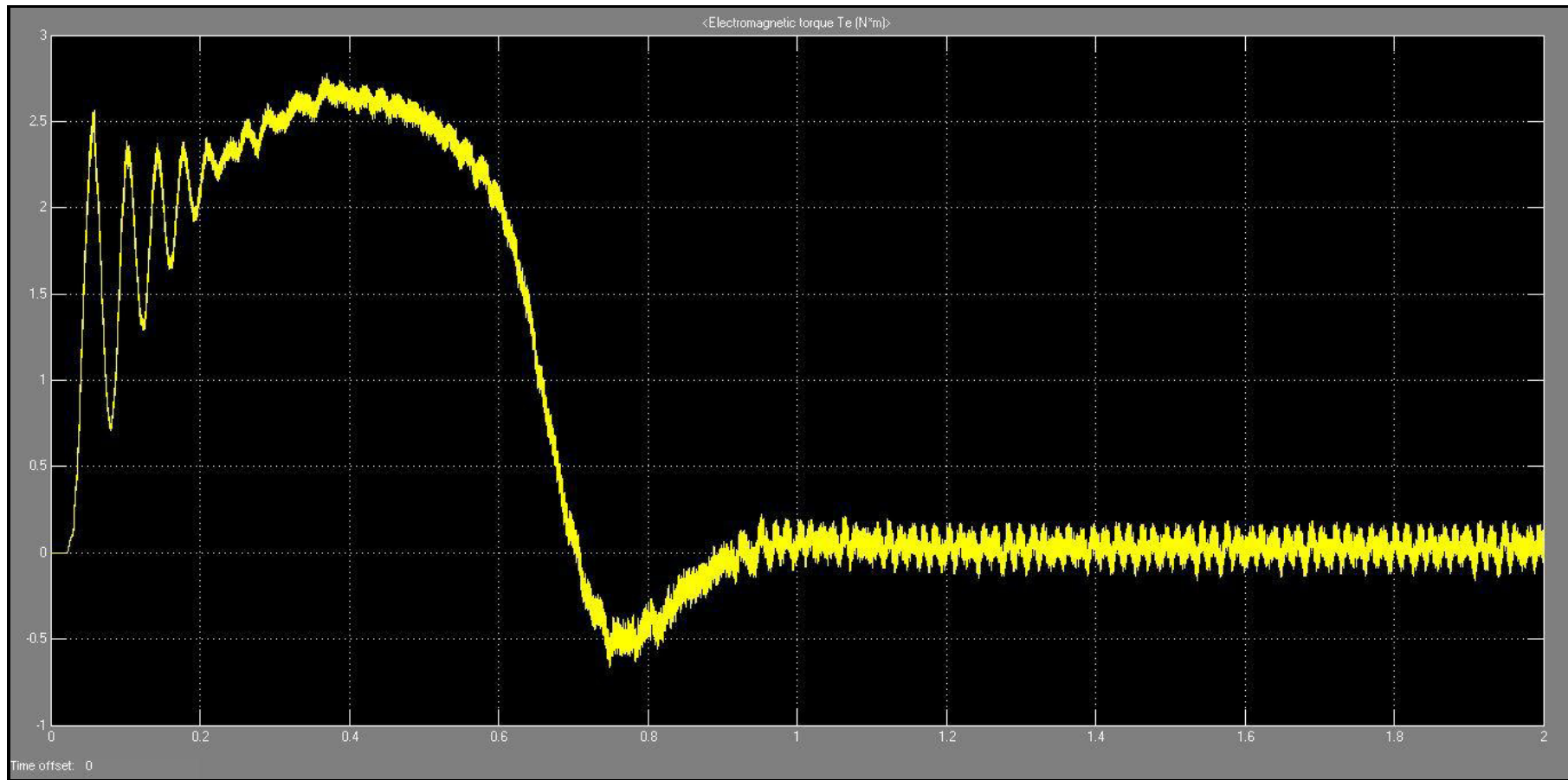
รูปที่ ข.10 แสดงค่าแรงดันที่จ่ายให้ Subsystem ในสภาวะมีภาระกรรม (ขยาย)



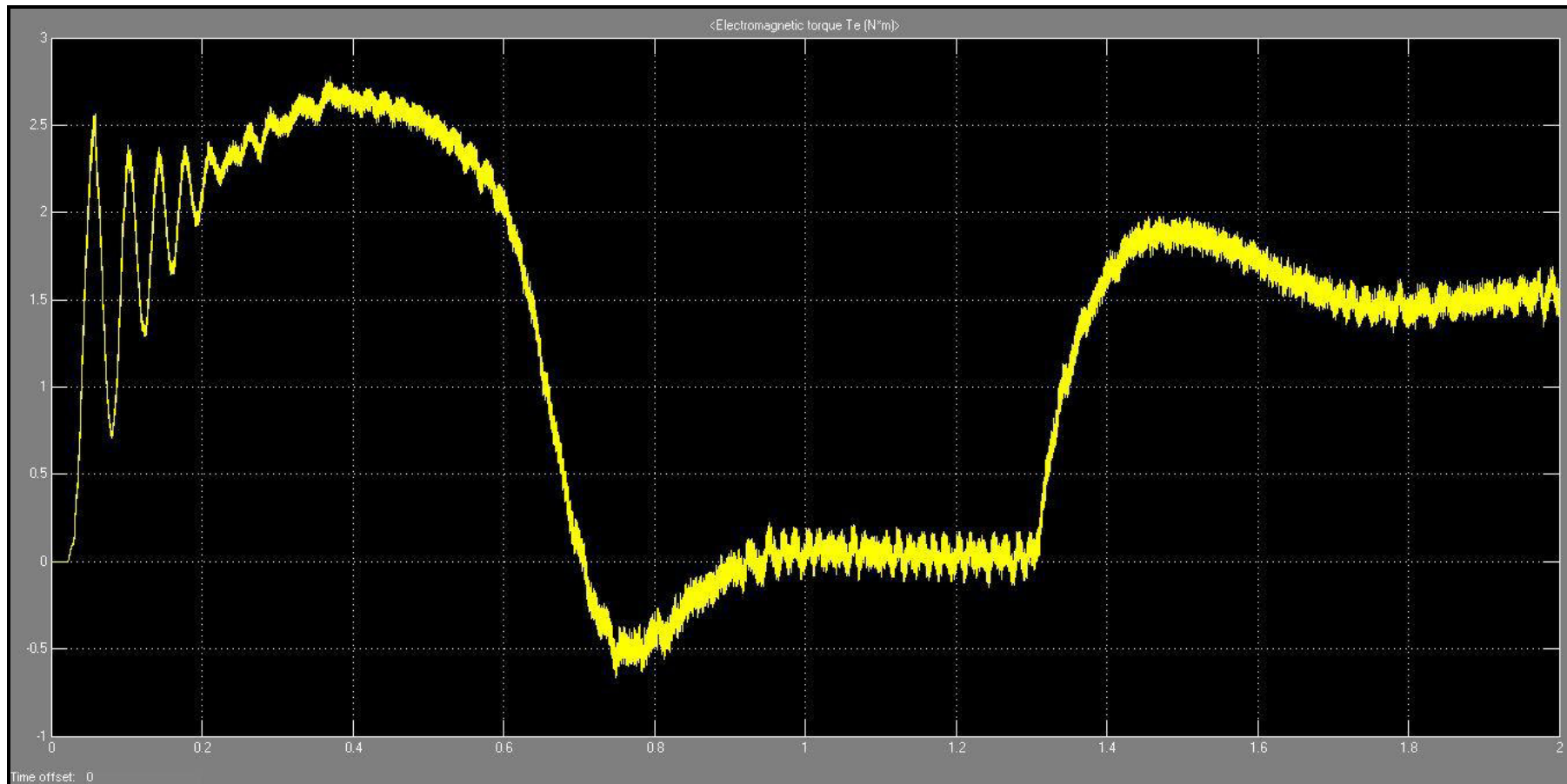
รูปที่ ข.11 แสดงค่ากระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ในสถานะไม่มีภาระกรรม



รูปที่ ข.12 แสดงค่ากระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ในสภาวะมีภาระกรรม



รูปที่ ข.13 แสดงค่าแรงบิดของมอเตอร์ในสภาวะไม่มีภาระกรรม



รูปที่ ข.14 แสดงค่าแรงบิดของมอเตอร์ในสภาวะมีภาระกรรม



ภาคผนวก ค

ข้อมูลของผลทดสอบความเร็วลม

ผลทดสอบความเร็วลม

ตารางที่ ค.1 แสดงค่าความเร็วลมที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz. สำหรับโครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 1

| ความถี่/ระยะ | 10 Hz. | | | 20 Hz. | | | 30 Hz. | | | 40 Hz. | | | 50 Hz. | | |
|--------------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg |
| -26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.8 | 0.9 | 0.85 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1 | 1 | 1 |
| -24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1.1 | 1.05 | 1.1 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| -22 | 0 | 0 | 0 | 0.9 | 0.8 | 0.85 | 1.3 | 1.1 | 1.2 | 1.5 | 1.6 | 1.55 | 1.6 | 1.7 | 1.65 |
| -20 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1.1 | 1.05 | 1.4 | 1.5 | 1.45 | 1.8 | 1.9 | 1.85 | 1.9 | 1.8 | 1.85 |
| -18 | 0.6 | 0.7 | 0.65 | 1.2 | 1.3 | 1.25 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.2 | 2 | 2.1 | 2.4 | 2.2 | 2.3 |
| -16 | 0.8 | 0.9 | 0.85 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2 | 2.1 | 2.05 | 2.5 | 2.3 | 2.4 | 2.9 | 2.8 | 2.85 |
| -14 | 1 | 1 | 1 | 1.6 | 1.7 | 1.65 | 2.2 | 2.3 | 2.25 | 2.9 | 2.8 | 2.85 | 3.4 | 3.3 | 3.35 |
| -12 | 1 | 1 | 1 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 3.1 | 3 | 3.05 | 3.8 | 3.8 | 3.8 |
| -10 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 2.5 | 2.6 | 2.55 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.8 | 3.9 | 3.85 |
| -8 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.9 | 1.8 | 1.85 | 2.6 | 2.5 | 2.55 | 3.2 | 3.3 | 3.25 | 3.8 | 3.9 | 3.85 |
| -6 | 1.1 | 1 | 1.05 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 3.1 | 3.2 | 3.15 | 3.6 | 3.8 | 3.7 |
| -4 | 1.1 | 1 | 1.05 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.8 | 2.9 | 2.85 | 3.4 | 3.6 | 3.5 |
| -2 | 1 | 1 | 1 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 3.3 | 3.4 | 3.35 |
| 0 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.7 | 2.8 | 2.75 | 3.1 | 3.1 | 3.1 |
| 2 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 3.1 | 3.1 | 3.1 |
| 4 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.8 | 2.7 | 2.75 | 3.3 | 3.1 | 3.2 |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.7 | 2.8 | 2.75 | 3.3 | 3.4 | 3.35 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.9 | 3 | 2.95 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 3.1 | 3 | 3.05 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| 12 | 1 | 1 | 1 | 1.8 | 1.7 | 1.75 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 3 | 3.1 | 3.05 | 3.6 | 3.6 | 3.6 |
| 14 | 1 | 0.9 | 0.95 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 3.5 | 3.4 | 3.45 |
| 16 | 0.9 | 0.7 | 0.8 | 1.5 | 1.6 | 1.55 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.7 | 2.6 | 2.65 | 3.1 | 3 | 3.05 |
| 18 | 0.8 | 0.6 | 0.7 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.2 | 2.3 | 2.25 | 2.7 | 2.6 | 2.65 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 1.2 | 1.3 | 1.25 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 2.2 | 2.1 | 2.15 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0.8 | 1 | 0.9 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.8 | 1.8 | 1.8 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0.7 | 0.8 | 0.75 | 1.2 | 1 | 1.1 | 1.2 | 1.1 | 1.15 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.1 | 1 | 1.05 |

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความเร็วลมที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz. สำหรับโครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 2

| ความถี่/ระยะ | 10 Hz. | | | 20 Hz. | | | 30 Hz. | | | 40 Hz. | | | 50 Hz. | | |
|--------------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg |
| -26 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.6 | 1.5 | 1.55 | 2 | 2.1 | 2.05 | 2.7 | 2.8 | 2.75 | 3.9 | 3.7 | 3.8 |
| -24 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 3 | 3.2 | 3.1 | 4.4 | 4.1 | 4.25 |
| -22 | 1 | 1.1 | 1.05 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.8 | 2.7 | 2.75 | 3.9 | 3.2 | 3.55 | 4.7 | 4.2 | 4.45 |
| -20 | 1.1 | 1.2 | 1.15 | 1.8 | 1.9 | 1.85 | 3 | 2.6 | 2.8 | 4 | 3.8 | 3.9 | 4.7 | 4.7 | 4.7 |
| -18 | 1.1 | 1.2 | 1.15 | 2 | 2.1 | 2.05 | 3.1 | 2.8 | 2.95 | 3.9 | 3.7 | 3.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 |
| -16 | 1 | 1.1 | 1.05 | 2 | 2.1 | 2.05 | 3.2 | 2.9 | 3.05 | 4.1 | 3.7 | 3.9 | 4.8 | 4.8 | 4.8 |
| -14 | 1 | 1.1 | 1.05 | 2.1 | 2 | 2.05 | 2.9 | 3 | 2.95 | 3.6 | 3.8 | 3.7 | 4.6 | 4.6 | 4.6 |
| -12 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2.8 | 2.9 | 3.8 | 3.5 | 3.65 | 4.7 | 4.6 | 4.65 |
| -10 | 1 | 1.1 | 1.05 | 1 | 1.9 | 1.45 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 3.7 | 3.3 | 3.5 | 4.3 | 4.1 | 4.2 |
| -8 | 1 | 1.1 | 1.05 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 3.5 | 3 | 3.25 | 3.8 | 3.9 | 3.85 |
| -6 | 1 | 1.1 | 1.05 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.4 | 2.5 | 2.45 | 3 | 2.9 | 2.95 | 3.8 | 3.8 | 3.8 |
| -4 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.7 | 1.6 | 1.65 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.8 | 2.6 | 2.7 | 3.2 | 3.2 | 3.2 |
| -2 | 0.8 | 1 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.9 | 2.1 | 2 | 2.7 | 2.4 | 2.55 | 2.4 | 3 | 2.7 |
| 0 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.9 | 2 | 1.95 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.6 | 2.8 | 2.7 |
| 2 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2 | 1.9 | 1.95 | 2.4 | 2.3 | 2.35 | 2.7 | 2.7 | 2.7 |
| 4 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.2 | 2 | 2.1 | 2.6 | 2.4 | 2.5 | 2.9 | 3 | 2.95 |
| 6 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.4 | 2.2 | 2.3 | 2.9 | 2.7 | 2.8 | 3.1 | 3.2 | 3.15 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.5 | 2.3 | 2.4 | 3.2 | 2.9 | 3.05 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| 10 | 1 | 1.1 | 1.05 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.7 | 2.4 | 2.55 | 3.2 | 3.3 | 3.25 | 3.9 | 4 | 3.95 |
| 12 | 1 | 1.2 | 1.1 | 1.8 | 1.9 | 1.85 | 2.8 | 2.5 | 2.65 | 3.6 | 3.5 | 3.55 | 4.1 | 4 | 4.05 |
| 14 | 1.1 | 1.2 | 1.15 | 2 | 1.9 | 1.95 | 2.6 | 2.7 | 2.65 | 3.5 | 3.4 | 3.45 | 4.3 | 4.3 | 4.3 |
| 16 | 1.1 | 1.2 | 1.15 | 2 | 1.9 | 1.95 | 2.6 | 2.7 | 2.65 | 3.3 | 3.6 | 3.45 | 4.2 | 4 | 4.1 |
| 18 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.8 | 1.9 | 1.85 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 3.1 | 3.6 | 3.35 | 4 | 4.2 | 4.1 |
| 20 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.6 | 2.7 | 2.65 | 3.3 | 3 | 3.15 | 3.9 | 4 | 3.95 |
| 22 | 1 | 1 | 1 | 1.8 | 1.7 | 1.75 | 2.2 | 2.4 | 2.3 | 2.7 | 3.1 | 2.9 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| 24 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2 | 2 | 2 | 2.5 | 2.3 | 2.4 | 3.2 | 3.4 | 3.3 |
| 26 | 0.8 | 0.9 | 0.85 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.8 | 1.7 | 1.75 | 2.1 | 2.2 | 2.15 | 2.9 | 2.8 | 2.85 |

ตารางที่ ค.3 แสดงค่าความเร็วลมที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz. สำหรับโครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 3

| ความถี่/ระยะ | 10 Hz. | | | 20 Hz. | | | 30 Hz. | | | 40 Hz. | | | 50 Hz. | | |
|--------------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg |
| -26 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 1.4 | 1.6 | 1.5 | 1.7 | 1.6 | 1.65 | 1.9 | 1.8 | 1.85 | 1.9 | 1.8 | 1.85 |
| -24 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.6 | 1.8 | 1.7 | 2 | 1.8 | 1.9 | 2 | 2.1 | 2.05 | 2.1 | 2.3 | 2.2 |
| -22 | 1 | 0.8 | 0.9 | 1.8 | 1.9 | 1.85 | 2.5 | 2.1 | 2.3 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 3.1 | 2.9 | 3 |
| -20 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2.6 | 2.4 | 2.5 | 3 | 3 | 3 | 3.7 | 3.5 | 3.6 |
| -18 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 2.2 | 2.1 | 2.15 | 2.8 | 2.6 | 2.7 | 3.7 | 3.5 | 3.6 | 4.4 | 4.3 | 4.35 |
| -16 | 1.1 | 1.2 | 1.15 | 2.1 | 2.2 | 2.15 | 3 | 2.9 | 2.95 | 3.9 | 3.7 | 3.8 | 4.7 | 4.6 | 4.65 |
| -14 | 1.1 | 1.2 | 1.15 | 2.1 | 2.2 | 2.15 | 2.9 | 2.8 | 2.85 | 3.8 | 3.9 | 3.85 | 4.8 | 4.7 | 4.75 |
| -12 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 2 | 2.1 | 2.05 | 2.7 | 2.8 | 2.75 | 3.7 | 3.7 | 3.7 | 4.7 | 4.6 | 4.65 |
| -10 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.9 | 2 | 1.95 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 3.6 | 3.7 | 3.65 | 4.3 | 4.6 | 4.45 |
| -8 | 1 | 1 | 1 | 1.7 | 1.9 | 1.8 | 2.3 | 2.5 | 2.4 | 3.4 | 3.2 | 3.3 | 4.3 | 4.1 | 4.2 |
| -6 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.7 | 1.8 | 1.75 | 2.1 | 2.3 | 2.2 | 3.1 | 3 | 3.05 | 3.8 | 3.7 | 3.75 |
| -4 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.9 | 2.1 | 2 | 2.7 | 2.8 | 2.75 | 3.1 | 3.3 | 3.2 |
| -2 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.8 | 1.9 | 1.85 | 2.7 | 2.4 | 2.55 | 2.9 | 3.1 | 3 |
| 0 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.4 | 1.5 | 1.45 | 1.7 | 1.8 | 1.75 | 2.4 | 2.3 | 2.35 | 2.8 | 2.7 | 2.75 |
| 2 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.3 | 1.4 | 1.35 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.2 | 2.1 | 2.15 | 2.3 | 2.4 | 2.35 |
| 4 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.4 | 2.5 | 2.45 |
| 6 | 0.9 | 0.8 | 0.85 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.9 | 1.7 | 1.8 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.8 | 2.7 | 2.75 |
| 8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 2 | 1.9 | 1.95 | 2.5 | 2.4 | 2.45 | 3.1 | 3 | 3.05 |
| 10 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.1 | 2 | 2.05 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 3.5 | 3.7 | 3.6 |
| 12 | 1 | 1 | 1 | 1.6 | 1.7 | 1.65 | 2.3 | 2.4 | 2.35 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.8 | 4 | 3.9 |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 1.7 | 1.8 | 1.75 | 2.6 | 2.8 | 2.7 | 3.5 | 3.2 | 3.35 | 4.4 | 4.3 | 4.35 |
| 16 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.8 | 1.9 | 1.85 | 2.7 | 2.9 | 2.8 | 3.7 | 3.5 | 3.6 | 4.6 | 4.6 | 4.6 |
| 18 | 1.1 | 1.2 | 1.15 | 1.9 | 2 | 1.95 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3.8 | 3.9 | 4.9 | 4.9 | 4.9 |
| 20 | 1.1 | 1.2 | 1.15 | 2.1 | 2.2 | 2.15 | 3 | 3.1 | 3.05 | 4 | 4 | 4 | 4.8 | 5 | 4.9 |
| 22 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 2.1 | 2.2 | 2.15 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 3.9 | 4 | 3.95 | 4.6 | 4.6 | 4.6 |
| 24 | 0.9 | 1.1 | 1 | 2.1 | 2.2 | 2.15 | 2.6 | 2.8 | 2.7 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 4.1 | 4.1 | 4.1 |
| 26 | 0.8 | 1 | 0.9 | 1.8 | 2 | 1.9 | 2.3 | 2.4 | 2.35 | 2.9 | 3.2 | 3.05 | 3.4 | 3.3 | 3.35 |

ตารางที่ ค.4 แสดงค่าความเร็วลมที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz. สำหรับโครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีี่ 4

| ความถี่/ระยะ | 10 Hz. | | | 20 Hz. | | | 30 Hz. | | | 40 Hz. | | | 50 Hz. | | |
|--------------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg |
| -26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.6 | 0.8 | 0.7 | 0 | 0 | 0 |
| -20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1.1 | 1.05 | 1.2 | 1.1 | 1.15 |
| -18 | 0 | 0 | 0 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1 | 1.1 | 1.05 | 2 | 1.6 | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 1.75 |
| -16 | 0.6 | 0.4 | 0.5 | 1 | 1.2 | 1.1 | 1.6 | 1.7 | 1.65 | 2.6 | 2.6 | 2.6 | 3.1 | 2.7 | 2.9 |
| -14 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.5 | 1.55 | 2.1 | 2.2 | 2.15 | 3.5 | 3.7 | 3.6 | 4.2 | 4.1 | 4.15 |
| -12 | 1.3 | 1.1 | 1.2 | 1.9 | 2 | 1.95 | 3 | 3.1 | 3.05 | 4.7 | 4.7 | 4.7 | 5.3 | 5.4 | 5.35 |
| -10 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 3.8 | 4.1 | 3.95 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 6 | 6.2 | 6.1 |
| -8 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 2.6 | 2.6 | 2.6 | 4.2 | 4.3 | 4.25 | 5.4 | 5.3 | 5.35 | 6.4 | 6.4 | 6.4 |
| -6 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 2.6 | 2.7 | 2.65 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 5.1 | 5 | 5.05 | 6.1 | 6.3 | 6.2 |
| -4 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 2.4 | 2.5 | 2.45 | 4 | 3.9 | 3.95 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 5.7 | 5.7 | 5.7 |
| -2 | 1.2 | 1.3 | 1.25 | 2.1 | 2.2 | 2.15 | 3.7 | 3.5 | 3.6 | 4.2 | 4.3 | 4.25 | 5 | 5.2 | 5.1 |
| 0 | 1.1 | 1 | 1.05 | 1.9 | 1.8 | 1.85 | 3.3 | 3.2 | 3.25 | 3.6 | 3.7 | 3.65 | 4.4 | 4.4 | 4.4 |
| 2 | 1.1 | 1 | 1.05 | 1.7 | 1.8 | 1.75 | 2.7 | 2.6 | 2.65 | 3.3 | 3.3 | 3.3 | 4 | 4 | 4 |
| 4 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 3.4 | 3.5 | 3.45 | 4.1 | 4.1 | 4.1 |
| 6 | 1.1 | 1.2 | 1.15 | 2.1 | 2 | 2.05 | 3.1 | 3.2 | 3.15 | 4.2 | 4.4 | 4.3 | 4.6 | 4.8 | 4.7 |
| 8 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 3.6 | 3.5 | 3.55 | 4.6 | 4.5 | 4.55 | 5.2 | 5.3 | 5.25 |
| 10 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 2.4 | 2.3 | 2.35 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 5.8 | 5.8 | 5.8 |
| 12 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 4.7 | 4.8 | 4.75 | 5.9 | 5.9 | 5.9 |
| 14 | 1.1 | 1.2 | 1.15 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 3.5 | 3.4 | 3.45 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 5.5 | 5.4 | 5.45 |
| 16 | 1 | 1.1 | 1.05 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3.6 | 3.8 | 3.7 | 4.8 | 4.8 | 4.8 |
| 18 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.3 | 2.2 | 2.25 | 2.8 | 2.6 | 2.7 | 3.8 | 3.8 | 3.8 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 1.3 | 1.2 | 1.25 | 1.7 | 1.6 | 1.65 | 1.8 | 1.7 | 1.75 | 2.6 | 2.7 | 2.65 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0.8 | 0.9 | 0.85 | 1.1 | 1.2 | 1.15 | 1.4 | 1.3 | 1.35 | 2.1 | 1.8 | 1.95 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 0.8 | 0.85 | 1.3 | 1.2 | 1.25 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |

ตารางที่ ค.5 แสดงค่าความเร็วลมที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz. สำหรับโครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณี 5

| ความถี่/ระยะ | 10 Hz. | | | 20 Hz. | | | 30 Hz. | | | 40 Hz. | | | 50 Hz. | | |
|--------------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg |
| -26 | 1 | 1 | 1 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.4 | 2.3 | 2.35 | 2.7 | 2.8 | 2.75 | 3 | 3 | 3 |
| -24 | 1 | 1 | 1 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.4 | 2.5 | 2.45 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 3.1 | 3.1 | 3.1 |
| -22 | 1 | 1 | 1 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.5 | 2.4 | 2.45 | 2.9 | 3 | 2.95 | 3.4 | 3.3 | 3.35 |
| -20 | 1.1 | 1 | 1.05 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.4 | 2.5 | 2.45 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 3.5 | 3.3 | 3.4 |
| -18 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2.4 | 2.5 | 2.45 | 3.2 | 3 | 3.1 | 3.4 | 3.5 | 3.45 |
| -16 | 1 | 1.1 | 1.05 | 2 | 2 | 2 | 2.4 | 2.5 | 2.45 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| -14 | 1 | 1.1 | 1.05 | 2 | 2 | 2 | 2.4 | 2.5 | 2.45 | 3.3 | 3.2 | 3.25 | 3.6 | 3.6 | 3.6 |
| -12 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2.4 | 2.6 | 2.5 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.6 | 3.6 | 3.6 |
| -10 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2.4 | 2.5 | 2.45 | 3.2 | 3.3 | 3.25 | 3.6 | 3.6 | 3.6 |
| -8 | 0.9 | 1 | 0.95 | 2 | 2 | 2 | 2.4 | 2.5 | 2.45 | 3.3 | 3.2 | 3.25 | 3.6 | 3.6 | 3.6 |
| -6 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.9 | 1.8 | 1.85 | 2.4 | 2.5 | 2.45 | 3.2 | 3.1 | 3.15 | 3.5 | 3.7 | 3.6 |
| -4 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.6 | 3.6 | 3.6 |
| -2 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 3.3 | 3.2 | 3.25 | 3.7 | 3.6 | 3.65 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1.8 | 1.7 | 1.75 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.6 | 3.7 | 3.65 |
| 2 | 1 | 1.1 | 1.05 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 3.3 | 3.3 | 3.3 | 3.6 | 3.7 | 3.65 |
| 4 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 2 | 1.9 | 1.95 | 2.4 | 2.5 | 2.45 | 3.2 | 3.3 | 3.25 | 3.6 | 3.7 | 3.65 |
| 6 | 1 | 1.1 | 1.05 | 2 | 2 | 2 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 3.3 | 3.3 | 3.3 | 3.6 | 3.6 | 3.6 |
| 8 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 2 | 2 | 2 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 3.4 | 3.2 | 3.3 | 3.6 | 3.7 | 3.65 |
| 10 | 1.1 | 1.2 | 1.15 | 1.9 | 2 | 1.95 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 3.3 | 3.1 | 3.2 | 3.6 | 3.6 | 3.6 |
| 12 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 2 | 2 | 2 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.9 | 3 | 2.95 | 3.6 | 3.5 | 3.55 |
| 14 | 1 | 1.1 | 1.05 | 2 | 2 | 2 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.9 | 3.1 | 3 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| 16 | 1 | 1.1 | 1.05 | 2 | 2 | 2 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.8 | 2.9 | 2.85 | 3.5 | 3.4 | 3.45 |
| 18 | 1 | 1.1 | 1.05 | 2 | 1.8 | 1.9 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.7 | 2.9 | 2.8 | 3.5 | 3.2 | 3.35 |
| 20 | 1 | 1 | 1 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.2 | 2.3 | 2.25 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 3.2 | 3.1 | 3.15 |
| 22 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.5 | 2.7 | 2.6 | 3.2 | 3.1 | 3.15 |
| 24 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.2 | 2.1 | 2.15 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 3.1 | 3 | 3.05 |
| 26 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2 | 2 | 2 | 2.3 | 2.2 | 2.25 | 2.9 | 3 | 2.95 |

ตารางที่ ค.6 แสดงค่าความเร็วลมที่ความถี่ 10,20,30,40 และ 50 Hz. สำหรับโครงสร้างเครื่องต้นแบบกรณีที่ 6

| ความถี่/ระยะ | 10 Hz. | | | 20 Hz. | | | 30 Hz. | | | 40 Hz. | | | 50 Hz. | | |
|--------------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|------------|------------|------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | avg |
| -26 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 2 | 2 | 2 | 2.2 | 2.3 | 2.25 | 2.7 | 2.7 | 2.7 |
| -24 | 0.9 | 0.8 | 0.85 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 2 | 2 | 2 | 2.3 | 2.4 | 2.35 | 2.9 | 2.8 | 2.85 |
| -22 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.5 | 1.6 | 1.55 | 2.1 | 2 | 2.05 | 2.6 | 2.5 | 2.55 | 3 | 3.1 | 3.05 |
| -20 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.7 | 2.6 | 2.65 | 3.1 | 3.2 | 3.15 |
| -18 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.7 | 2.8 | 2.75 | 3.2 | 3.2 | 3.2 |
| -16 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.7 | 2.9 | 2.8 | 3.3 | 3.4 | 3.35 |
| -14 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.8 | 2.9 | 2.85 | 3.5 | 3.6 | 3.55 |
| -12 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.7 | 1.6 | 1.65 | 2.3 | 2.4 | 2.35 | 2.9 | 2.7 | 2.8 | 3.5 | 3.7 | 3.6 |
| -10 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.5 | 1.7 | 1.6 | 2.1 | 2.3 | 2.2 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 3.7 | 3.6 | 3.65 |
| -8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.2 | 2.1 | 2.15 | 2.8 | 2.6 | 2.7 | 3.7 | 3.6 | 3.65 |
| -6 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2 | 2.1 | 2.05 | 2.8 | 2.6 | 2.7 | 3.5 | 3.4 | 3.45 |
| -4 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2 | 2 | 2 | 2.6 | 2.6 | 2.6 | 3.5 | 3.4 | 3.45 |
| -2 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.7 | 1.5 | 1.6 | 2 | 1.9 | 1.95 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 3.2 | 3.2 | 3.2 |
| 0 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 2.3 | 2.4 | 2.35 | 3.1 | 3.1 | 3.1 |
| 2 | 0.8 | 0.9 | 0.85 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 2.4 | 2.5 | 2.45 | 3 | 3.1 | 3.05 |
| 4 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2 | 1.9 | 1.95 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 3.1 | 3.1 | 3.1 |
| 6 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.1 | 2 | 2.05 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 3.3 | 3.3 | 3.3 |
| 8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.1 | 2 | 2.05 | 2.6 | 2.6 | 2.6 | 3.4 | 3.4 | 3.4 |
| 10 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.2 | 2.1 | 2.15 | 2.8 | 2.7 | 2.75 | 3.4 | 3.4 | 3.4 |
| 12 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.7 | 1.6 | 1.65 | 2.2 | 2.1 | 2.15 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 3.5 | 3.4 | 3.45 |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 1.6 | 1.7 | 1.65 | 2.2 | 2.3 | 2.25 | 2.8 | 2.9 | 2.85 | 3.5 | 3.4 | 3.45 |
| 16 | 1 | 0.9 | 0.95 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.2 | 2.3 | 2.25 | 2.8 | 2.9 | 2.85 | 3.5 | 3.4 | 3.45 |
| 18 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.6 | 1.7 | 1.65 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 3 | 3 | 3 | 3.4 | 3.5 | 3.45 |
| 20 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.2 | 2.3 | 2.25 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 3.4 | 3.5 | 3.45 |
| 22 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.3 | 2.4 | 2.35 | 3.1 | 3.1 | 3.1 | 3.2 | 3.4 | 3.3 |
| 24 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 3.2 | 3.1 | 3.15 |
| 26 | 0.9 | 1 | 0.95 | 1.4 | 1.5 | 1.45 | 2.1 | 2 | 2.05 | 2.6 | 2.7 | 2.65 | 3.2 | 3.1 | 3.15 |

ตารางที่ ค.7 แสดงค่าความเร็วลม 3 ตำแหน่ง

| Freq (Hz) | Front Honey Comb | | | | Rare Honey Comb | | | | Turbine | | | |
|-----------|------------------|-----|-----|---------|-----------------|-----|-----|---------|---------|-----|-----|---------|
| ครั้งที่ | 1 | 2 | 3 | average | 1 | 2 | 3 | average | 1 | 2 | 3 | average |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| 8 | 0 | 0 | 0.5 | 0.17 | 0.4 | 0 | 0 | 0.13 | 0.4 | 0 | 0 | 0.13 |
| 9 | 0.7 | 0 | 0.4 | 0.37 | 0.7 | 0.5 | 0 | 0.40 | 0.6 | 0.5 | 0.8 | 0.63 |
| 10 | 0.8 | 0 | 0.8 | 0.53 | 0.9 | 0.6 | 0.8 | 0.77 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 0.83 |
| 11 | 1 | 0.8 | 0.6 | 0.80 | 0.8 | 0.9 | 0.8 | 0.83 | 1 | 0.9 | 0.9 | 0.93 |
| 12 | 0.9 | 0.5 | 0.9 | 0.77 | 0.8 | 0.9 | 0.7 | 0.80 | 0.9 | 1 | 1 | 0.97 |
| 13 | 1.1 | 0.8 | 1 | 0.97 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.90 | 1 | 1.1 | 1.1 | 1.07 |
| 14 | 1.4 | 1 | 0.9 | 1.10 | 1 | 0.9 | 1 | 0.97 | 1.1 | 1.1 | 1.3 | 1.17 |
| 15 | 1.4 | 1.2 | 1 | 1.20 | 1 | 1.1 | 0.9 | 1.00 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.20 |
| 16 | 1.5 | 1.2 | 1.4 | 1.37 | 1.2 | 1 | 1.1 | 1.10 | 1.3 | 1.3 | 1.4 | 1.33 |
| 17 | 1.6 | 1.2 | 1 | 1.27 | 1.1 | 1.2 | 1.1 | 1.13 | 1.4 | 1.5 | 1.5 | 1.47 |
| 18 | 1.8 | 1.5 | 1.2 | 1.50 | 1.2 | 1 | 1.1 | 1.10 | 1.5 | 1.4 | 1.6 | 1.50 |
| 19 | 1.7 | 1.6 | 1.6 | 1.63 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.20 | 1.6 | 1.5 | 1.6 | 1.57 |
| 20 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 1.33 | 1.3 | 1.4 | 1.1 | 1.27 | 1.5 | 1.5 | 1.8 | 1.60 |
| 21 | 1.8 | 2.1 | 1.4 | 1.77 | 1.4 | 1.3 | 1.1 | 1.27 | 1.6 | 1.6 | 1.8 | 1.67 |
| 22 | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.70 | 1.3 | 1.4 | 1.3 | 1.33 | 1.6 | 1.8 | 1.8 | 1.73 |
| 23 | 2 | 1.6 | 2 | 1.87 | 1.2 | 1.5 | 1.4 | 1.37 | 1.8 | 1.8 | 1.9 | 1.83 |
| 24 | 2.1 | 1.9 | 1.4 | 1.80 | 1.5 | 1.6 | 1.6 | 1.57 | 1.9 | 1.8 | 1.9 | 1.87 |
| 25 | 2.2 | 1.8 | 1.6 | 1.87 | 1.5 | 1.7 | 1.4 | 1.53 | 2 | 1.9 | 2.1 | 2.00 |
| 26 | 2 | 2.1 | 1.9 | 2.00 | 1.6 | 1.5 | 1.7 | 1.60 | 2 | 2 | 2.1 | 2.03 |
| 27 | 2.5 | 2.3 | 2 | 2.27 | 1.6 | 1.6 | 1.3 | 1.50 | 2 | 1.9 | 2.3 | 2.07 |
| 28 | 2 | 2.3 | 1.9 | 2.07 | 1.6 | 1.7 | 1.5 | 1.60 | 2.1 | 2.1 | 2.5 | 2.23 |
| 29 | 2.5 | 2.5 | 2.1 | 2.37 | 1.6 | 1.6 | 1.3 | 1.50 | 2.2 | 2.1 | 2.4 | 2.23 |
| 30 | 2.2 | 2.8 | 2 | 2.33 | 1.6 | 1.7 | 1.6 | 1.63 | 2.3 | 2.1 | 2.6 | 2.33 |
| 31 | 2.5 | 2.6 | 2 | 2.37 | 1.8 | 1.7 | 1.4 | 1.63 | 2.4 | 2.2 | 2.7 | 2.43 |
| 32 | 2.8 | 2.6 | 2.2 | 2.53 | 1.7 | 1.8 | 1.8 | 1.77 | 2.1 | 2.2 | 2.5 | 2.27 |
| 33 | 2.5 | 2.5 | 2.2 | 2.40 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.60 | 2.2 | 2.3 | 2.7 | 2.40 |
| 34 | 2.7 | 2.6 | 2 | 2.43 | 1.9 | 1.8 | 1.6 | 1.77 | 2.3 | 2.2 | 2.5 | 2.33 |
| 35 | 2.8 | 2.7 | 2 | 2.50 | 1.6 | 1.8 | 1 | 1.47 | 2.1 | 2.4 | 2.8 | 2.43 |
| 36 | 2.5 | 2.6 | 2.3 | 2.47 | 1.5 | 2 | 1.5 | 1.67 | 2.3 | 2.6 | 3 | 2.63 |
| 37 | 3.3 | 2.9 | 2.1 | 2.77 | 1.6 | 1.9 | 1.7 | 1.73 | 2.3 | 2.6 | 3.2 | 2.70 |
| 38 | 3.3 | 2.7 | 2.3 | 2.77 | 1.6 | 2.1 | 1.8 | 1.83 | 2.2 | 2.4 | 3.2 | 2.60 |
| 39 | 2.5 | 2.5 | 2.4 | 2.47 | 1.7 | 2 | 1.4 | 1.70 | 2.4 | 2.4 | 3.2 | 2.67 |
| 40 | 3.6 | 3.6 | 2.2 | 3.13 | 1.8 | 2.2 | 1.4 | 1.80 | 2.5 | 2.4 | 3.5 | 2.80 |
| 41 | 2.2 | 3.1 | 2.3 | 2.53 | 2 | 2.2 | 1.6 | 1.93 | 2.7 | 2.6 | 3.5 | 2.93 |
| 42 | 2.8 | 3.4 | 2.4 | 2.87 | 2.3 | 2 | 1.9 | 2.07 | 2.7 | 2.7 | 3.3 | 2.90 |
| 43 | 3.5 | 3.2 | 2.8 | 3.17 | 2.2 | 2.1 | 2 | 2.10 | 2.8 | 2.8 | 3.2 | 2.93 |
| 44 | 2.9 | 3.1 | 2.8 | 2.93 | 2.1 | 1.6 | 1.9 | 1.87 | 2.6 | 2.5 | 3.6 | 2.90 |
| 45 | 3.3 | 2.9 | 2.9 | 3.03 | 2.2 | 1.7 | 1.9 | 1.93 | 2.7 | 2.5 | 3.5 | 2.90 |
| 46 | 3.1 | 3.7 | 2.5 | 3.10 | 2.2 | 2 | 1.9 | 2.03 | 2.9 | 2.5 | 3.3 | 2.90 |
| 47 | 3.2 | 3.2 | 2.8 | 3.07 | 2.3 | 2.3 | 2 | 2.20 | 3.1 | 2.7 | 3.4 | 3.07 |
| 48 | 3.2 | 3.1 | 3.1 | 3.13 | 2.3 | 1.9 | 2 | 2.07 | 3 | 3.3 | 3.9 | 3.40 |
| 49 | 2.6 | 3.2 | 2.5 | 2.77 | 2.1 | 2.2 | 2.1 | 2.13 | 3 | 3.4 | 4 | 3.47 |
| 50 | 2.7 | 3.7 | 3.1 | 3.17 | 2.1 | 1.8 | 1.8 | 1.90 | 3.1 | 3.3 | 3.8 | 3.40 |



ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Prakatwutthichon, P., Uangpairoj, P., and Chamniprasart, K. (2014). **Design and Prototyping Wind Turbine Tester with Variable Velocity Pattern.** The 8th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. March 4-5, 2014. Johor Bahru, Malaysia. 4 pp.



DESIGN AND PROTOTYPING OF WIND TURBINE TESTER WITH VARIABLE VELOCITY PATTERN

Parichart Prakatwutthichon, Pichitra Uangpairoj and Kontorn Chamniprasart

School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology

ABSTRACT

The prototype of a wind turbine tester with variable velocity patterns is presented in this research. It was designed to adjust the various wind speeds ranging from 3 m/s. to 12 m/s. which is normally found in Thailand. Then, this research created a device to control a fan that acted as a wind source. The wind source was adjusted to a desired wind speed at the front of wind turbine. The wind speed signals used in this experiment include step, ramp, and harmonic signals. The PID control theory was used to ensure that the wind at the front of the turbine would meet the designed pattern. Test results showed that the prototype could control the desired speed and pattern. The variations of wind speed and wind pattern are expected to help engineers for designing a better wind turbine.

1. INTRODUCTION

Nowadays energy security is important and the fuel prices become increasing. Renewable energy is alternative to solve these problems, especially wind energy. In Thailand, there are wind turbines in many areas. The wind turbines are used for both research and electricity production. However, wind turbine normally is optimized to run only in one climate, depending on variables such as wind speeds, direction and topographical. [1] The designed wind turbines need to be tested for their efficiency at various wind speeds. With these reasons, the authors realize the important of a wind turbine tester that is suitable for testing in a real condition of local areas. Therefore, wind turbine tester was designed and prototyped with variable velocity patterns. The wind speed signals used were step, ramp, and harmonic signals.

This research is aimed to optimization of a wind turbine tester for testing under various conditions of local areas. This research proposes an alternative

technique of testing the wind turbine which is beneficial for developing the wind power technology.

2. EXPERIMENT

2.1 Design Process

2.1.1 Prototype of Wind Turbine Tester The theory of aerodynamics, [2] local wind characteristics and the principles of building a wind tunnel were first studied. Then the knowledge obtained was used to design the prototype of the wind turbine tester using SolidWorks 2012. After the prototype was designed and adjusted, it was built using aluminum. Walls were made from acrylic with a thickness of 3 mm. The wind was generated using a 3-phase AC motor with frequency of 50Hz and power of 0.37 KW.

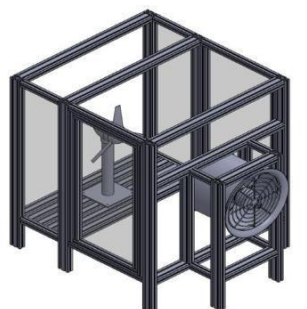


Fig. 1 Prototype of a wind turbine tester

2.1.2 PID Controller PID Control theory was applied with LabVIEW 2010 to control the output signals before sending them to an inverter. The output signals were used to control the characteristics of wind speed of motor. The wind speed was measured using air velocity transmitters.

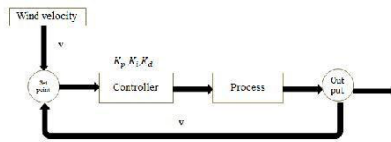


Fig. 2 Block diagram of controller

2.2 Technique

2.2.1 Data acquisition The wind speed was measured in front of the wind turbine in the horizontal plane, the interval space between the measured points was 2 cm, totally 27 points (Fig.3). The experiment was conducted at a frequency of 10, 20, 30, 40, and 50 Hz.

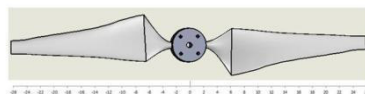


Fig.3 Position of measurement

The behaviors of wind speed with six different cases of the prototype structure were studied (Table 1).

| Case | structural |
|------|--|
| 1 | prototyping of a wind turbine tester +honeycomb |
| 2 | prototyping of a wind turbine tester +honeycomb+nozzle ₁ |
| 3 | prototyping of a wind turbine tester +honeycomb +nozzle ₂ |
| 4 | prototyping of a wind turbine tester +2honeycomb+nozzle ₂ |
| 5 | prototyping of a wind turbine tester |
| 6 | prototyping of a wind turbine tester +nozzle ₂ |

*nozzle₁: $\varnothing_1 = 310$ mm., $\varnothing_2 = 210$ mm., L = 350 mm.

nozzle₂: $\varnothing_1 = 310$ mm., $\varnothing_2 = 260$ mm., L = 225 mm.

Table 1 Different cases of structural prototype

2.2.2 Programmable Controllers LabVIEW was used to adjust the wind speed at the front of wind turbine. The wind speed signals used in the experiment were step, ramp, and harmonic signals.

3. ANALYSIS

3.1 Prototype of Wind Turbine Tester

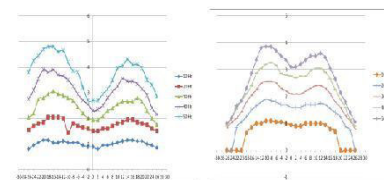
The prototype of a wind turbine tester was built and improved for suitable use. In addition, LabVIEW was programmed to control the input signals of the inverter. The characteristics of wind speed step, ramp, and harmonic signals were imposed.



Fig. 4 Prototype of wind turbine tester

3.2 Experimental results of the wind speed measurement

The result of the wind speed at the front of wind turbine for six different cases of prototype structure showed that. Case 1: installation of honeycomb caused the arrangement of air flow when the air flowed through the channels on honeycomb. Then the wind was distributed and the wind speed at the motor shaft was dropped (Fig.5a). Case 2: when the nozzle₁ was installed, the wind speed at the motor shaft dropped but caused less distribution. The wind speed in the tip region was zero (Fig.5b). Case 3: the installation of nozzle₂ caused better air distribution (Fig. 5c). Case 4: when honeycomb was established in front of the nozzle₂, the wind speed increased, but did not disperse (Fig. 5d). Case 5: the uninstallation of honeycomb and nozzle₂, the wind distribution and wind speed throughout the horizontal plane was uniform, however, wind speed slightly decreased at the motor shaft (Fig. 5e). Case 6: after the reinstallation of nozzle₂, the air layer was compressed, increasing the wind speed, while the wind speed at the motor shaft was dropped (Fig. 5f).



(a)

(b)

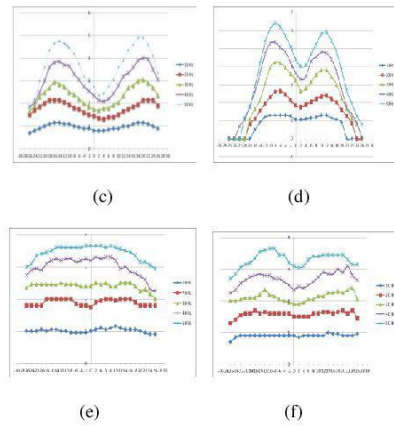
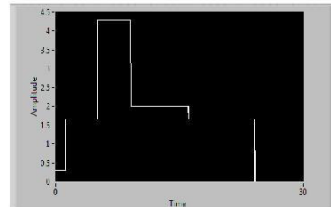


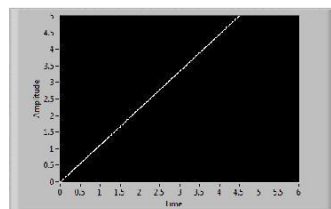
Fig 5. Result of the wind speed for six different cases (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4, (e) Case 5 and (f) Case 6

3.3 Programmable Controllers

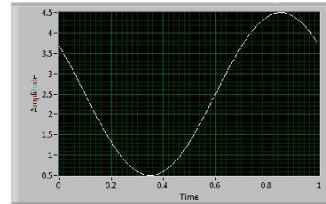
LabVIEW can be used to control input signal of the inverter for controlling the characteristics of wind speed of the motor as required. The output is shown in Fig 6.



(a)



(b)



(c)

Fig 6. (a) Step signal (b) Ramp signal (c) Harmonic signal

CONCLUSION

1. The prototype of a wind turbine tester can work and produce various characteristics of wind speed, including step, ramp, and harmonic patterns.
2. As the results from wind speed measurements, Case 5 provided the best wind distribution and wind speed throughout the horizontal plane. However, the wind speed slightly decreased at the motor shaft.
3. Programmable Controllers by LabVIEW can be used to control desired variable velocity patterns.

REFERENCES

1. Wikanda Sridech and Tawit Chitsomboon (2011). Optimal speed for stall-regulated wind turbines in Thailand, The 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, Krabi, Thailand.
2. Martin O. L. Hansen (2008). Aerodynamics of Wind Turbines, 2nd edition, Earthscan, London.



Parichart Prakatwutthichon received the B.E. (2010) degree in Aeronautical Engineering from Suranaree University of Technology .



Pichitra Uangpairoj received the B.S. (2007) degree in Food Technology, M.E. (2010) degree in Mechanical Engineering from Suranaree University of Technology, and Ph.D. (2013) degree in Functional Control Systems from Shibaura Institute of Technology

OS Number C1-05The 8th SEATUC Symposium | 4-5 March 2014**Kontorn Chamniprasart**

received the B.S. (1980) degree in Mechanical Engineering from (First Class Honors) from Royal Thai Air Force Academy, Thailand, M.Sc. (1987) degree in Mechanical Engineering from University of Pittsburgh, USA, and Ph.D. (1992) degree in Mechanical Engineering from University of Pittsburgh, USA

ประวัติผู้เขียน

นางสาวปาริชาติ ประภาสวุฒิชัย เกิดเมื่อวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2531 ที่อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ บิดาชื่อ นายสุวชัย ประภาสวุฒิชัย มารดาชื่อนางสาตี ประภาสวุฒิชัย

เริ่มศึกษาระดับชั้นประถมปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านนางรอง (พุทธทาสวิทยาคาร) ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอากาศยาน) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2553 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท ได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการรายวิชาระดับปริญญาตรีของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 8 รายวิชา ได้แก่

1. ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1
2. ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 2
3. ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3
4. ปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 4
5. ปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 2
6. ปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 2
7. การเขียนแบบวิศวกรรม 1
8. การเขียนแบบวิศวกรรม 2

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเรื่อง **“DESIGN AND PROTOTYPING WIND TURBINE TESTER WITH VARIABLE VELOCITY PATTERN”** ในการประชุมวิชาการ THE 8th SOUTH EAST ASIAN TECHNICAL UNIVERSITY CONSORTIUM (SEATUC) SYMPOSIUM ระหว่างวันที่ 4-5 มีนาคม พ.ศ. 2557 ณ เมืองยะโฮร์บาห์รู ประเทศมาเลเซีย รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ง.