

ระบบกังหันลมจำลอง
WIND TURBINE EMULATOR



ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WIND TURBINE EMULATOR



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2564

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบกังหันลมจำลอง
Wind Turbine Emulator

ผู้จัดทำ นายกรณต พึ่งเกษม รหัสนักศึกษา 58010020

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ระบบควบคุม)

ภาควิชา การวัดและควบคุม

ปีการศึกษา 2564

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สิริชัย ธรรมารักษ์วัฒน์



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. สิริชัย ธรรมารักษ์วัฒน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบกังหันลมจำลอง

โดย

นายภรณ์ต

พिंगเกษม

58010020

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. สิริชัย

ธรรมารักษ์วัฒนะ

ปีการศึกษา 2564

บทคัดย่อ

จากแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา พบว่ามีการใช้พลังงานทางเลือกที่สะอาดที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งการนำกังหันลมไฟฟ้ามาผลิตพลังงานไฟฟ้าเป็นหนึ่งในทางเลือกที่ได้รับ ความนิยมเป็นอย่างมาก แต่การติดตั้งในแต่ละพื้นที่นั้นให้ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของ กังหันลมไฟฟ้าไม่เท่ากัน โดยมีหลายปัจจัยเช่น ความเร็วลม ชนิดของใบกังหัน ชนิดของกังหันลม ดังนั้นการจำลองการทำงานของกังหันลมจะสามารถคำนวณประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ของกังหันลมไฟฟ้าโดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งจริง ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอระบบจำลองกังหัน ลมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และชิ้นส่วนทางกล มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพใน การทำงานของใบกังหันลมในช่วงความเร็วลมต่าง ๆ โดยระบบจำลองกังหันลมในส่วนการผลิตไฟฟ้า ได้นำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรขนาด 400 วัตต์ในกังหันลมมาเชื่อมต่อกับอิน ดักชั่นมอเตอร์ขนาด 400 วัตต์ที่ติดตั้งเอ็นโค้ดเดอร์ซึ่งควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ ซึ่งแรงบิดของมอเตอร์ นั้นมาจากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในโปรแกรม LabVIEW และข้อมูลใบ กังหันลมในระบบจำลองกังหันลมได้มาจากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wind Turbine Emulator

By

Mr. Koranot Phuengkasem 58010020

Advisor

Asst. Prof. Dr. Sirichai Tammaruckwattana

Academic Year 2021

ABSTRACT

The electricity produced by using alternative clean energy is increasing based on usage trends in the past year. The wind turbine is one of the popular methods to produce electricity. However, the installation in each area will have efficiency differences because of many factors such as wind speed, type of wind turbine blade, or type of wind turbine. The efficiency of the wind turbine can be calculated beforehand by using a wind turbine emulator without using a real wind turbine. This thesis purposes the wind turbine emulator created by using a program and mechanical parts. The goal of this emulator is to check the efficiency of wind turbine blades at different wind speeds. The emulator uses a 400-Watt synchronous generator from a wind turbine connected to a 400-Watt induction motor installed with an encoder controlled by an inverter. Motor torque is calculated by using mathematic equations from the LabVIEW program, and the data of the wind turbine blade is simulated by using the ANSYS program.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีอาจสำเร็จลุล่วงได้หากไม่ได้รับคำแนะนำ ความช่วยเหลือ และการสนับสนุนจากบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สิริชัย ธรรมรักษ์วัฒนะ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนะแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขปัญหาและข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ นายณัฐชนน ศุภอดิเรก ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับเนื้อหาสาระของงานวิจัยในอดีต รวมถึงความช่วยเหลือและการสนับสนุนในการปฏิบัติการและดำเนินงาน

ขอขอบคุณ นางสาวดารากรณ์ ทัพโพธิ์ และร้านฝ้ายการช่าง ที่ให้ความช่วยเหลือและการสนับสนุนในการทำโครงสร้างทางกลของอุปกรณ์และให้คำปรึกษาเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินงาน

ขอขอบคุณบิดามารดาและบุคคลในครอบครัวที่คอยสนับสนุนและเป็นแรงใจในระหว่างการทำดำเนินงานในตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ ต้องขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มีมอบโอกาสและจัดหาสถานที่ในการศึกษาวิจัยและเหล่าคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ตลอดจนบุคคลที่มีได้กล่าวมา ณ ที่นี้ที่ให้ความช่วยเหลือและการสนับสนุนเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

กรณต พึ่งเกษม

สารบัญ

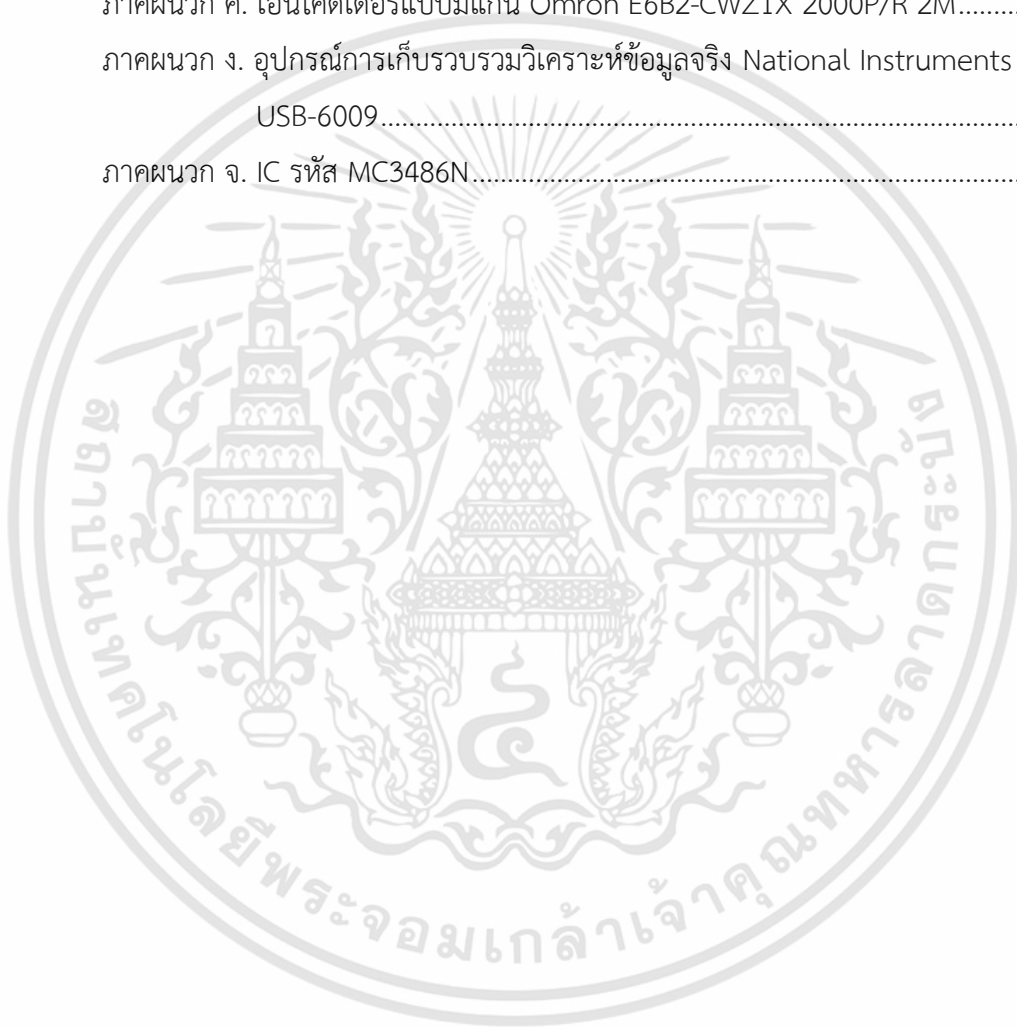
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ระบบกึ่งอัตโนมัติ.....	4
2.2 การจำลองกึ่งอัตโนมัติ.....	4
2.3 ทฤษฎีโมเมนตัมขององค์ประกอบของใบมีด.....	5
2.4 การใช้โปรแกรม LabVIEW.....	7
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.6 สรุป.....	9
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	10
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	10
3.1.1 เครื่องมือ.....	10

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.2 อุปกรณ์.....	10
3.2 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	10
3.3 สถานที่ในการทดสอบ	11
3.4 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างชุดทดสอบ.....	11
3.4.1 ขั้นตอนการออกแบบระบบ	11
3.4.2 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมและออกแบบหน้าอินเตอร์เฟซของระบบ.....	12
3.4.2.1 ส่วนข้อมูลความเร็วลม	13
3.4.2.2 ส่วนแบบจำลองกังหันลม	14
3.4.2.3 ส่วนแบบจำลองทางกล	16
3.4.3 ขั้นตอนการออกแบบวงจร.....	18
3.4.4 ขั้นตอนการประกอบระบบจำลอง	19
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ.....	20
3.5.1 การทดสอบอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง	20
3.5.2 การทดสอบเอ็นโค้ดเดอร์.....	21
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	22
4.1 ผลการทดสอบ	22
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	30
5.1 บทวิจารณ์และสรุปผลการดำเนินงาน	30
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน.....	30
5.3 แนวทางแก้ไข.....	30
5.4 ข้อเสนอแนะแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อ.....	30
เอกสารอ้างอิง	32

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	35
ภาคผนวก ก. อินดัคชั่นมอเตอร์ Mitsubishi SF-QR 2 Pole 1/2HP 220/380V.....	36
ภาคผนวก ข. อินเวอร์เตอร์ Mitsubishi FR-E820-0.4K-1	39
ภาคผนวก ค. เอ็นโค้ดเดอร์แบบมีแกน Omron E6B2-CWZ1X 2000P/R 2M.....	43
ภาคผนวก ง. อุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง National Instruments USB-6009.....	47
ภาคผนวก จ. IC รหัส MC3486N.....	54



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 รูปร่างของใบก้างหัน.....	15
4.1 ตารางพารามิเตอร์ควบคุม.....	23



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และที่ยังอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจำลองกังหันลมด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้า.....	5
2.2 อุโมงค์ลม.....	5
2.3 ภาพตัดใบกังหันลม.....	6
2.4 ลักษณะหน้าต่างอินเตอร์เฟซ (ซ้าย) และหน้าต่างส่วนคำสั่งการทำงาน (ขวา) ของโปรแกรม LabVIEW รุ่น 2020.....	8
2.5 โมดูลเสริม Control Design and Simulation สำหรับใช้ทำระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ในโปรแกรม LabVIEW.....	8
3.1 แผนผังระบบจำลองกังหันลม.....	11
3.2 ส่วนอินเตอร์เฟซ.....	12
3.3 ส่วนโปรแกรมจำลองระบบกังหันลม.....	13
3.4 กราฟแสดงความเร็วลม.....	13
3.5 แบบจำลองความเร็วลม.....	14
3.6 รูปร่างของใบกังหันลม.....	14
3.7 แบบจำลองกังหันลม.....	15
3.8 แบบจำลองทางกลของระบบกังหันลม.....	16
3.9 แบบจำลองทางกลของระบบมอเตอร์.....	17
3.10 แบบจำลองของการปรับค่าโมเมนต์ความเฉื่อย.....	18
3.11 แบบจำลองของระบบมอเตอร์.....	18
3.12 วงจรของ IC รหัส MC3486N.....	19
3.13 วงจรของเอ็นโค้ดเดอร์.....	19
3.14 การประกอบชุดทดสอบ.....	20
3.15 โปรแกรมทดสอบอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริงอย่างง่าย.....	20
3.16 โปรแกรมทดสอบเอ็นโค้ดเดอร์.....	21
4.1 แผนภาพระบบจำลองกังหันลม.....	22
4.2 ชุดทดสอบของระบบจำลองกังหันลม.....	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟความเร็วลม	24
4.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดของกึ่งหันลมจากการจำลองด้วยโปรแกรม กับค่าจากชุดทดสอบจริง	25
4.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดของกึ่งหันลมและค่าแรงบิดของอินดักชั่นมอเตอร์ จากการจำลองด้วยโปรแกรม	26
4.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดของกึ่งหันลมและค่าแรงบิดของอินดักชั่นมอเตอร์ จากชุดทดสอบจริง	27
4.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดของอินดักชั่นมอเตอร์จากการจำลองด้วยโปรแกรม กับค่าจากชุดทดสอบจริง	28
4.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วเชิงมุมจากการจำลองด้วยโปรแกรม กับค่าจากชุดทดสอบจริง	29

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในสภาวะปัจจุบันที่โลกมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก [1] ขณะที่แนวโน้มของโลกนั้นมีความพยายามที่จะเปลี่ยนการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีส่วนในการก่อให้เกิดปัญหามลพิษ และสภาวะโลกร้อน เป็นการใช้พลังงานสะอาด [2-5] ซึ่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากลมเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากลมมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา โดยวิธีที่นิยมใช้นั้นเป็นการใช้กังหันลมในการหมุนเครื่องให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่นิยมใช้ภายในกังหันลมนั้นเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet synchronous generator - PMSG) ซึ่งสามารถติดตั้งได้ในหลากหลายภูมิประเทศและไม่มีการใช้ระบบเกียร์ [6-7]

ย่านความเร็วลมในประเทศไทยนั้นมีความเหมาะสมกับการติดตั้งกังหันลม [8] แต่เนื่องจากเงื่อนไขต่าง ๆ ของกังหันลม เช่น ขนาดและประเภทของใบพัด ความเร็วลม และงบประมาณในการติดตั้ง จึงต้องมั่นใจว่าการติดตั้งกังหันลมจะก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งการทำแบบจำลองกังหันลมเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบกังหันลมจริงนั้น จะทำให้ทราบได้ว่าการติดตั้งกังหันลมในเงื่อนไขต่าง ๆ นั้นเหมาะสมหรือไม่ มีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้ามากน้อยเพียงใด

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบระบบจำลองกังหันลมที่มีความสามารถในการจำลองที่ความเร็วลมในช่วงต่าง ๆ เพื่อการทดสอบประสิทธิภาพของกังหันลมในเงื่อนไขต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

เพื่อออกแบบและสร้างระบบกังหันลมจำลองสำหรับทดสอบประสิทธิภาพของใบกังหันลมที่ได้ออกแบบไว้ในช่วงความเร็วลมต่าง ๆ ที่มีความแม่นยำและสามารถประเมินประสิทธิภาพของกังหันลมเพื่อนำไปสร้างจริงได้

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาการออกแบบและการสร้างระบบกังหันลมจำลอง
2. ศึกษาและเขียนโปรแกรม LabVIEW

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี งานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้องและวางแผนการดำเนินงาน
2. เขียนโปรแกรมและใส่อินเตอร์เฟสให้กับระบบกักหันลมจำลอง
3. ออกแบบโครงสร้างของชุดทดสอบจริงและวงจรที่ใช้
4. ทดสอบวงจรที่ใช้ในระบบกักหันลมจำลองด้วยโปรแกรม
5. สร้างแผงวงจรที่ควบคุมระบบกักหันลมจำลองทั้งหมดตามที่ได้ออกแบบไว้
6. ดำเนินการสั่งซื้ออุปกรณ์ สั่งทำชิ้นส่วนเฉพาะและคำนวณค่าใช้จ่าย
7. ประกอบและทดสอบระบบกักหันลมจำลอง
8. ปรับแก้ระบบกักหันลมจำลอง
9. สรุปผลและจัดทำเอกสารรายงานการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีทักษะในการวางแผนอย่างเป็นระบบ และสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำโครงการ
2. ฝึกทักษะในการเขียนโปรแกรมและออกแบบอินเตอร์เฟส
3. ประยุกต์ใช้และบูรณาการความรู้ที่ได้เรียนมาในการดำเนินการโครงการ
4. สามารถนำระบบกักหันลมจำลองที่สร้างขึ้นมาทดสอบประสิทธิภาพของใบกักหันลมที่ได้ออกแบบไว้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกักหันลมก่อนนำไปสร้างจริงได้

1.6 รายละเอียดของปฏิญานិพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหา 5 บท และภาคผนวกอีก 5 ภาค ซึ่งในแต่ละบทมีเนื้อหาและรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ส่วนสุดท้ายของปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงภาคผนวกที่ประกอบไปด้วยข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการดำเนินการโครงการ

ภาคผนวก ก. อินดักชั่นมอเตอร์ Mitsubishi SF-QR 2 Pole 1/2HP 220/380V

ภาคผนวก ข. อินเวอร์เตอร์ Mitsubishi FR-E820-0.4K-1

ภาคผนวก ค. เอ็นโค้ดเดอร์แบบมีแกน Omron E6B2-CWZ1X 2000P/R 2M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง. อุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง National Instruments USB-6009

ภาคผนวก จ. IC รหัส MC3486N



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบจำลองกังหันลม เป็นระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงานของกังหันลมด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้า ทางกลโดยไม่จำเป็นต้องใช้กังหันลมจริง ซึ่งในการออกแบบนั้นได้ใช้อุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ ข้อมูลจริง (Data Acquisition : DAQ) ซึ่งรับข้อมูลจากหน้าอินเตอร์เฟซที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW ส่งชุดข้อมูลให้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ทำการควบคุมความเร็วในการหมุนของอินดักชัน มอเตอร์ (Induction Motor) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร และทำการวัด ด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) เพื่อนำมาแสดงผลในหน้าอินเตอร์เฟซ

2.1 ระบบกังหันลม

ระบบกังหันลมนั้นสามารถจำแนกได้ตามชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลม ได้แก่

1. ระบบกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก เหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีความเร็วลมสม่ำเสมอ จำเป็นต้องมีตัวเก็บประจุในการใช้งาน
2. ระบบกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบขดลวดพัน เหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีความเร็วลมเปลี่ยนแปลง จำเป็นต้องเชื่อมต่อตัวต้านทานปรับค่าได้แบบอนุกรมจากภายนอกเข้ากับขดลวดด้านที่ติดกับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. ระบบกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบดับเบิ้ลเฟส เหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีความเร็วลมเปลี่ยนแปลง สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มาก เนื่องจากสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งในด้านโรเตอร์ (Rotor) และด้านสเตเตอร์ (Stator) จำเป็นต้องเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ (Converter) และอินเวอร์เตอร์กับขดลวดด้านที่ติดกับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
4. ระบบกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กถาวร เหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีความเร็วลมเปลี่ยนแปลง จำเป็นต้องมีแม่เหล็กไฟฟ้าถาวร และต้องเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์เข้าในระบบ

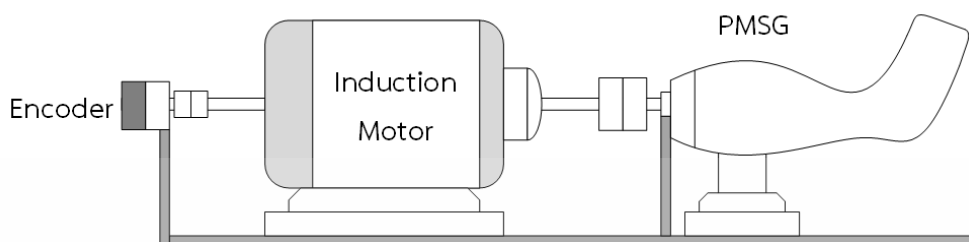
โดยในโครงการนี้ได้เลือกใช้ระบบกังหันลมชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กถาวร เนื่องจากเป็นระบบกังหันลมที่นิยมใช้ เพราะไม่มีการใช้เฟืองทด สามารถทำการบำรุงรักษาได้ง่าย

2.2 การจำลองกังหันลม

การจำลองกังหันลมโดยทั่วไปนั้น แบ่งเป็น 2 วิธี คือ การจำลองกังหันลมด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้า และการจำลองกังหันลมด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง [9-11] โดยในโครงการนี้ได้เลือกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

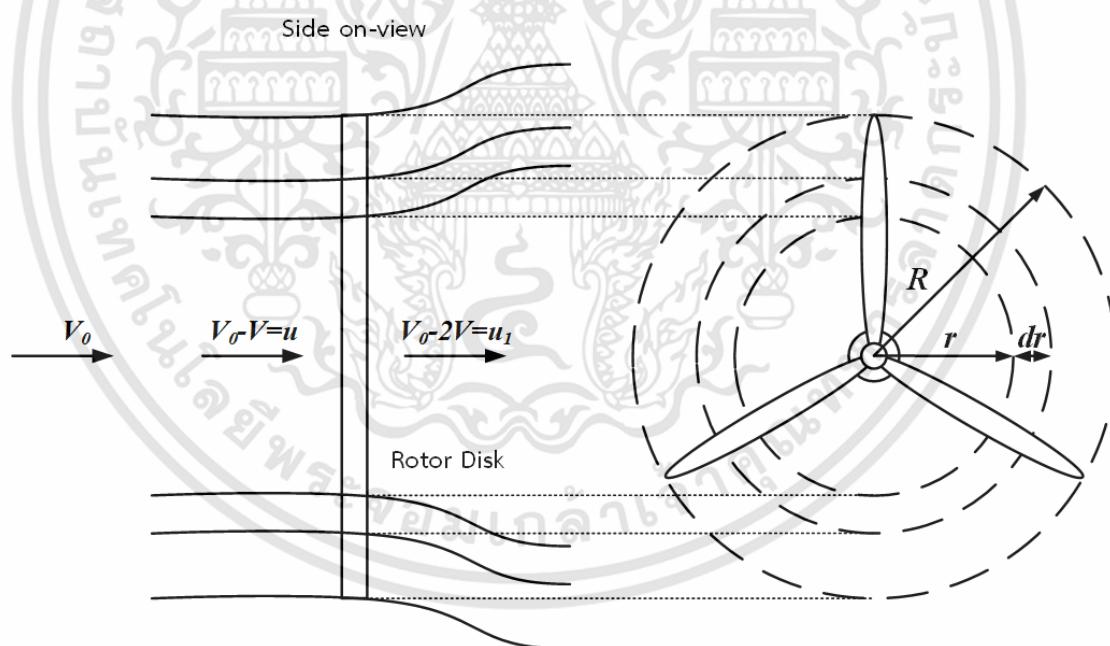
การจำลองกังหันลมด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าและควบคุมระบบด้วยคอมพิวเตอร์ เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมใช้ สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ได้หลากหลาย [12]



รูปที่ 2.1 การจำลองกังหันลมด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้า

2.3 ทฤษฎีโมเมนต์ขององค์ประกอบของใบมีด

ในการคำนวณประสิทธิภาพการทำงานของใบกังหันลมนั้น จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีโมเมนต์ขององค์ประกอบของใบมีด [8, 13] ตามรูปที่ 2.2

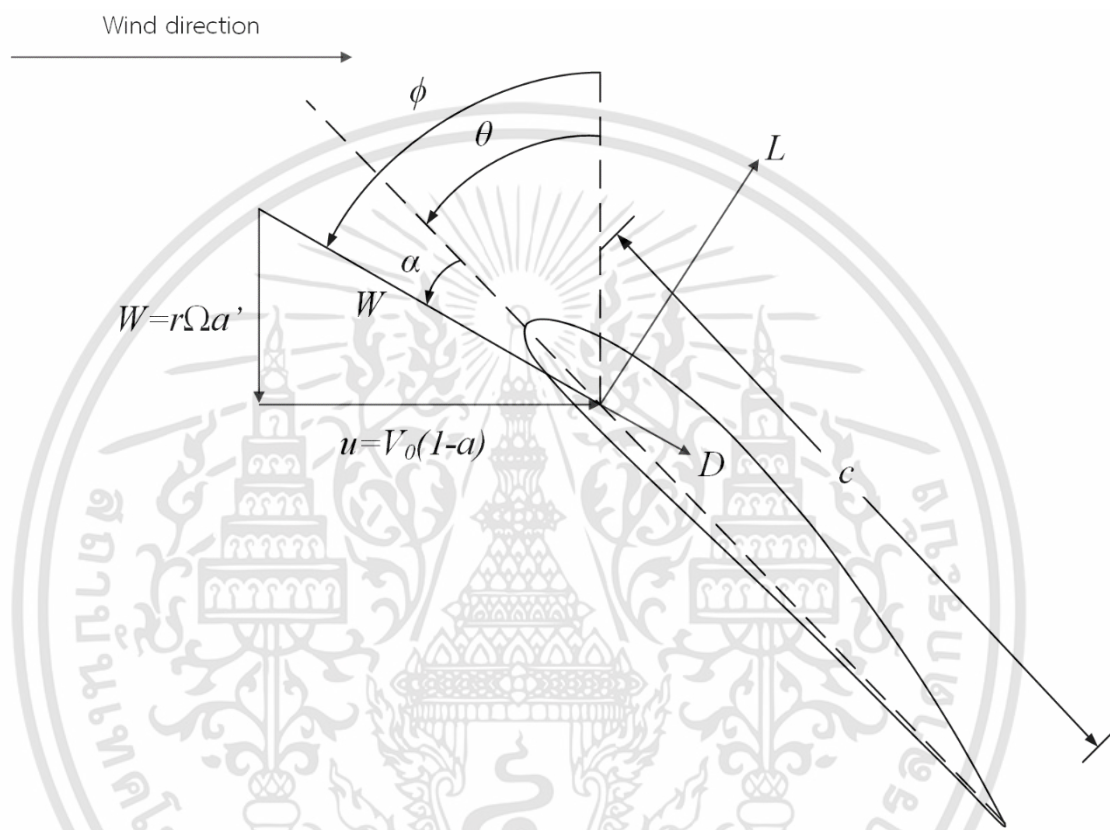


รูปที่ 2.2 อุโมงค์ลม

ความเร็วลมรอบข้างจะเท่ากับ $W = r\Omega a'$ และอัตราการชะลอตัวของความเร็วลมภายในมีค่าเป็น $V_0 a$ โดยที่แผนภาพความเร็วลมของใบกังหันจะอยู่ในตำแหน่ง r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงที่เกิดขึ้นบนใบกังหันซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของลมผ่านใบกังหันเรียกว่าแรงยกและแรงต้านตามรูปที่ 2.3 แรกยก dL และแรงต้าน dD ซึ่งเกิดขึ้นจากระยะที่สั้นที่สุด dr ในตำแหน่งของรัศมี r สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.1) และ (2.2) โดยใช้ค่าความหนาแน่นของอากาศ ρ , สัมประสิทธิ์แรงยก c_l และสัมประสิทธิ์แรงต้าน c_d



รูปที่ 2.3 ภาพตัดใบกังหันลม

$$dL = c_l \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (2.1)$$

$$dD = c_d \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (2.2)$$

สมการที่ (2.3) และ (2.4) สร้างขึ้นจากการนำค่าของ $a = \frac{V_0 - u}{V_0}$, $a' = \frac{w}{r\Omega}$ และ

$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r}$ โดย σ คืออัตราส่วนของลมที่ได้รับในส่วนของวงแหวนกับพื้นที่ใบกังหันในบริเวณนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{a}{1-a} = \frac{c_l \cos \phi + c_d \sin \phi}{4 \sin^2 \phi} \quad (2.3)$$

$$\frac{a'}{1-a'} = \frac{c_l \sin \phi + c_d \cos \phi}{4 \sin \phi \cos \phi} \sigma \quad (2.4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_P ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด C_Q และค่าสัมประสิทธิ์แรงผลัก C_T สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C_P = \frac{\Omega dQ}{0.5 p V_0^3 (2\pi r dr) r} = \frac{\Omega p u (2\pi r dr) 2wr}{0.5 p V_0^3 (2\pi r dr)} = 4a'(1-a)\lambda^2 \quad (2.5)$$

$$C_Q = \frac{dQ}{0.5 p V_0^2 (2\pi r dr) r} = \frac{p u (2\pi r dr) 2wr}{0.5 p V_0^2 (2\pi r dr) r} = 4a'(1-a)\lambda \quad (2.6)$$

$$C_T = \frac{dT}{0.5 p V_0^2 (2\pi r dr) r} = \frac{p u (2\pi r dr) 2(V_0 - u)}{0.5 p V_0^2 (2\pi r dr)} = 4a(1-a) \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.5) (2.6) และ (2.7) ค่ากำลังไฟฟ้า P ค่าแรงบิด Q และค่าแรงผลัก T สามารถคำนวณมาได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$P = 0.5 p V_0^3 \int_0^R C_P 2\pi r dr \quad (2.8)$$

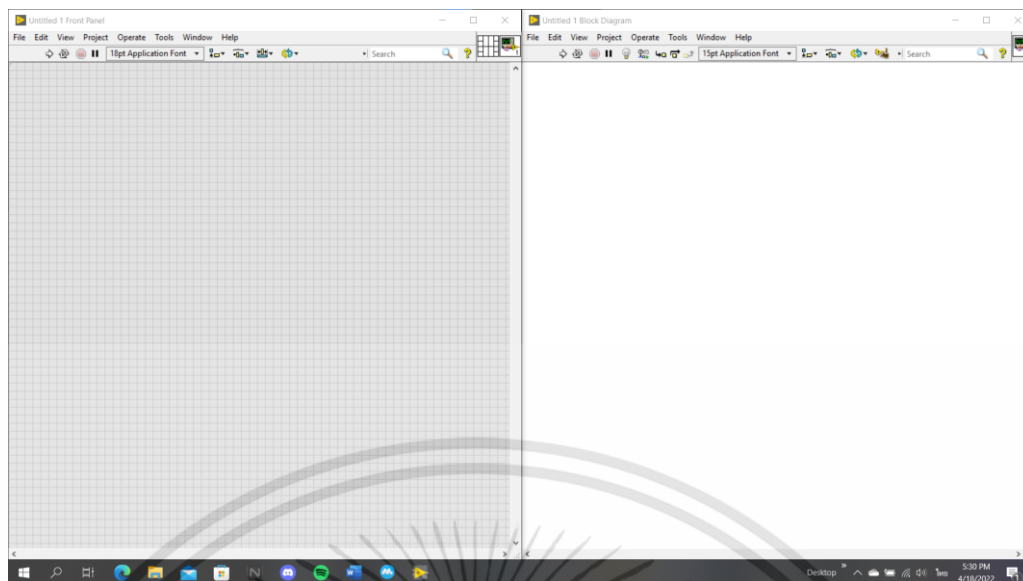
$$Q = 0.5 p V_0^2 \int_0^R C_Q 2\pi r^2 dr \quad (2.9)$$

$$T = 0.5 p V_0^2 \int_0^R C_T 2\pi r dr \quad (2.10)$$

2.4 การใช้โปรแกรม LabVIEW

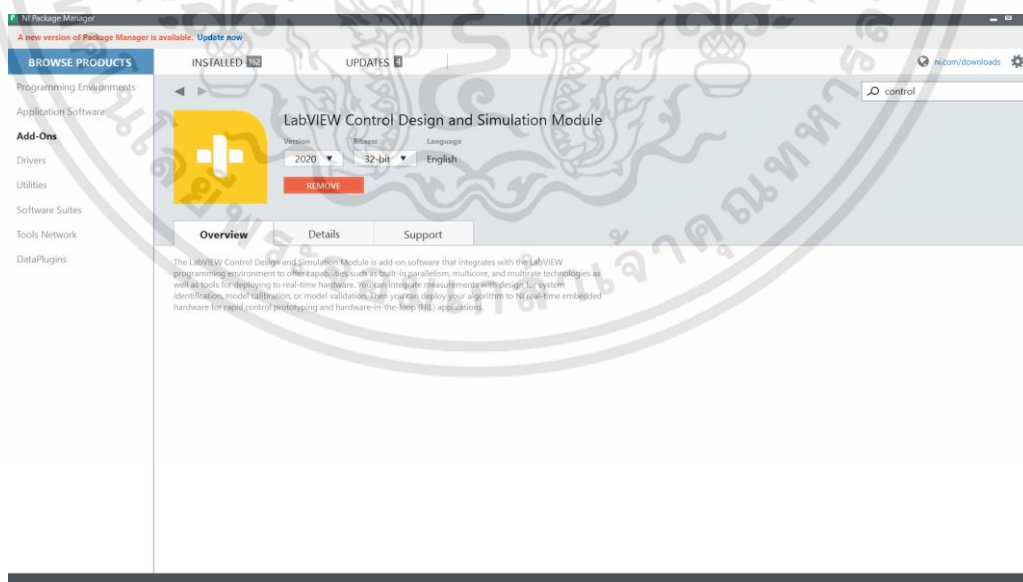
LabVIEW (คำย่อของ “Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench”) เป็นแพลตฟอร์มการออกแบบระบบและการเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษา G ซึ่งมีลักษณะเป็นภาษาแบบกราฟฟิก โปรแกรม LabVIEW และภาษา G นั้นพัฒนาโดยบริษัท National Instruments โดยออกแบบเพื่อใช้กับอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริงที่พัฒนาโดยทางบริษัท

LabVIEW นั้นนิยมใช้กับงานเกี่ยวกับการเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง การควบคุมการวัด และการควบคุมระบบอัตโนมัติ



รูปที่ 2.4 ลักษณะหน้าต่างอินเทอร์เน็ตเฟส (ซ้าย) และหน้าต่างส่วนคำสั่งการทำงาน (ขวา) ของโปรแกรม LabVIEW รุ่น 2020

LabVIEW สามารถติดตั้งส่วนเสริมและโมดูลเสริมเพิ่มเติมสำหรับการทำงานได้ผ่านโปรแกรม NI Package Manager ซึ่งโมดูลเสริมที่ใช้ในปริญญาโทฉบับนี้คือโมดูล Control Design and Simulation ที่สามารถสร้างระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) ได้ ดังที่แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โมดูลเสริม Control Design and Simulation สำหรับใช้ทำระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ในโปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2563 นายณัฐชนน ศุภอดิเรก และคณะผู้ดำเนินงาน ได้ทำการศึกษาการออกแบบใบก้านหั่นลมย่านความเร็วต่ำที่ใช้ในประเทศไทยโดยใช้โปรแกรม ANSYS ซึ่งจากผลการจำลองในงานวิจัยดังกล่าว สามารถนำข้อมูลใบก้านที่ได้นำมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนหนึ่งของการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบจำลองก้านหั่นลมในปริญญาโทฉบับนี้ [8]

ในปี พ.ศ. 2565 นายณัฐชนน ศุภอดิเรก และคณะผู้ดำเนินงาน ได้ทำการพัฒนาระบบจำลองก้านหั่นลมโดยใช้เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ที่ติดตั้งเอ็นโค้ดเดอร์ ผ่านการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยแพ็คเกจเพิ่มเติม Simulink ของโปรแกรม MATLAB และควบคุมด้วยโปรแกรม Arduino IDE ผ่านบอร์ด Arduino due และ Arduino mega ซึ่งจากผลการทดสอบแบบจำลองก้านหั่นลมดังกล่าวทำให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้บอร์ด Arduino ซึ่งส่งผลให้ผลลัพธ์และประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร [14]

2.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอระบบก้านหั่นลมที่ใช้งานในปัจจุบัน ทฤษฎีโมเมนตัมขององค์ประกอบของใบมีดที่ใช้ในการสร้างระบบจำลองก้านหั่นลม การใช้งานโปรแกรม LabVIEW และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งทฤษฎีและหลักการที่ได้กล่าวไปในบทนี้นั้นจะนำไปใช้ในการสร้างระบบจำลองก้านหั่นลมต่อไป

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องมือ

1. มัลติมิเตอร์ UNI-T UT33C +
2. คีมปอกสายไฟ
3. ชุดไขควงเปลี่ยนหัวได้ Tactix
4. หัวแร้งด้ามปืน

3.1.2 อุปกรณ์

1. อินดักชั่นมอเตอร์ Mitsubishi SF-QR 2 Pole 1/2HP 220/380V
2. อินเวอร์เตอร์ Mitsubishi FR-E820-0.4K-1
3. เอ็นโค้ดเดอร์แบบมีแกน Omron E6B2-CWZ1X 2000P/R 2M
4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชั่วคราว
5. อุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง National Instruments USB-6009
6. สาย USB-A to USB-B 2.0
7. แผงวงจร
8. อุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ECHO 24V / 3A
9. อุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้า Step-down LM2596 DC-DC
10. IC รหัส MC3486N
11. ซี็อกเกตไอซี 8 ขา ISS08T103
12. สายไฟและท่อหด
13. ทางปลาท่อสายไฟแบบท่อกลมและแบบแฉก
14. ขั้วต่อสายไฟแบบ 2 ขาและ 3 ขา
15. ตะกั่วบัดกรี

3.2 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและวางแผนการดำเนินงาน
2. ศึกษาค้นคว้าวิธีใช้งานโปรแกรมที่ใช้ในระบบจำลองกังหันลมและวางแผนการเขียนโปรแกรม
3. เขียนโปรแกรมและใส่อินเตอร์เฟสให้กับระบบจำลอง
4. ออกแบบโครงสร้างของชุดทดสอบจริงและวงจรที่ใช้
5. ทดสอบวงจรที่ใช้ในระบบด้วยโพรโทบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สร้างแผนวงจรที่ควบคุมระบบทั้งหมดตามที่ได้ออกแบบไว้
7. ดำเนินการสั่งซื้ออุปกรณ์ สั่งทำชิ้นส่วนเฉพาะและคำนวณค่าใช้จ่าย
8. ประกอบชิ้นงานทั้งหมดเข้าด้วยกันและทดสอบกึ่งหุ่นจำลอง
9. เขียนรายงานและข้อสรุปของโครงการ

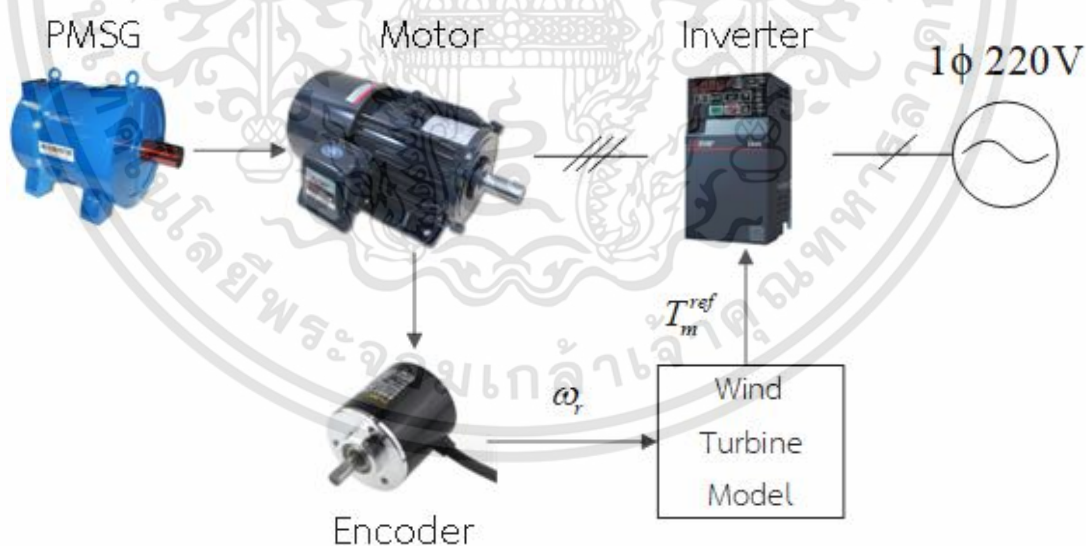
3.3 สถานที่ในการทดสอบ

โครงการนี้ได้ใช้สถานที่ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม อาคารปฏิบัติการรวมวิศวกรรมศาสตร์ 2 ห้อง 604 เป็นสถานที่ในการทดสอบ ทดลอง และเก็บข้อมูล

3.4 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างชุดทดสอบ

3.4.1 ขั้นตอนการออกแบบระบบ

โครงการนี้ต้องการทำระบบจำลองกึ่งหุ่นที่มีความละเอียดและแม่นยำ เพื่อสามารถทำการทดแทนการใช้กึ่งหุ่นจริง จึงได้ทำการออกแบบโดยเลือกใช้การจำลองกึ่งหุ่นโดยใช้อินดักชันมอเตอร์ที่สั่งการด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านอินเวอร์เตอร์ ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กถาวร และใช้เอ็นโค้ดเดอร์ในการรับค่ากลับเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและเปรียบเทียบกับค่าจำลอง



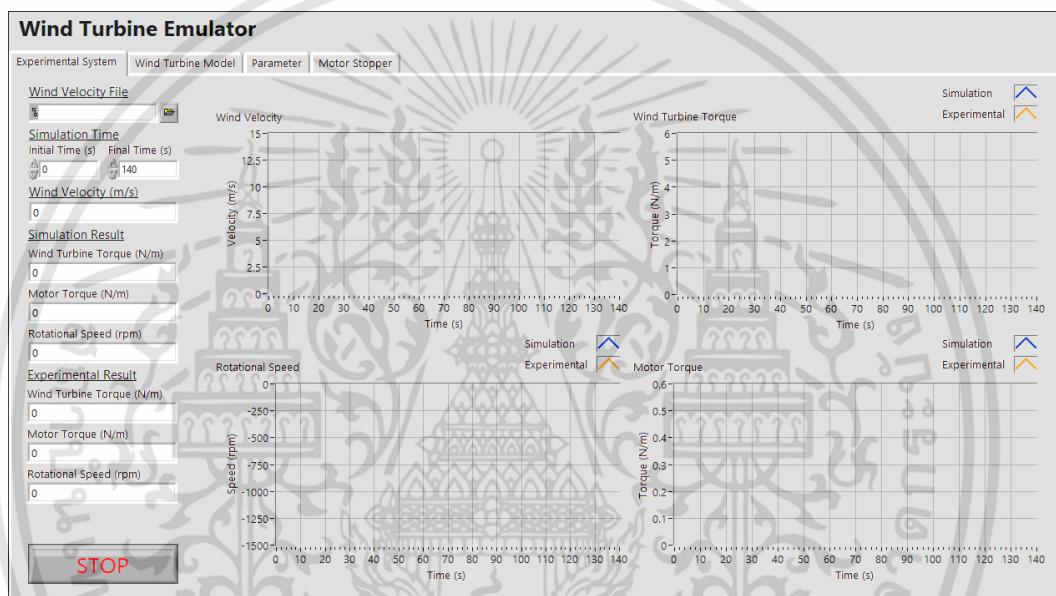
รูปที่ 3.1 แผนผังระบบจำลองกึ่งหุ่น

3.4.2 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมและออกแบบหน้าอินเตอร์เฟซของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากระบบจำลองกังหันลมที่ออกแบบไว้ จึงได้เลือกใช้โปรแกรม LabVIEW รุ่น 2020 ในการเขียนหน้าอินเตอร์เฟซ การประมวลผลระบบจำลองกังหันลม และการส่งค่าเพื่อควบคุมอินตักซ์มอเตอร์ผ่านอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง ซึ่งในโปรแกรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

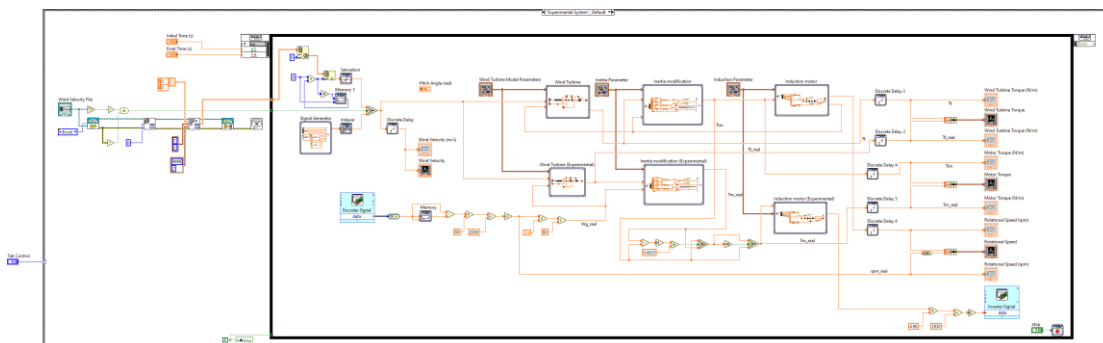
1. ส่วนอินเตอร์เฟซ เป็นส่วนที่ใช้สั่งการระบบ แสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ และค่าที่ผ่านการประมวลผลแล้วจากการจำลองด้วยโปรแกรมและจากการทดสอบกับเครื่องจักรกลในรูปแบบของกราฟและตัวเลข โดยจะแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.2 ส่วนอินเตอร์เฟซ

2. ส่วนโปรแกรมระบบจำลองกังหันลม เป็นส่วนที่ประกอบไปด้วยส่วนข้อมูลความเร็วลม ส่วนแบบจำลองกังหันลม และส่วนแบบจำลองทางกล โดยค่าที่ประมวลผลจะส่งออกมาที่อุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริงเพื่อทำการควบคุมส่วนระบบจำลองกังหันลมด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้า และนำค่าที่ได้จากการอ่านค่าของเอ็นโค้ดเดอร์ส่งกลับเข้าอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง เพื่อใช้ในการประมวลผลและแสดงผลเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการจำลองและค่าจากการทดสอบในส่วนอินเตอร์เฟซ

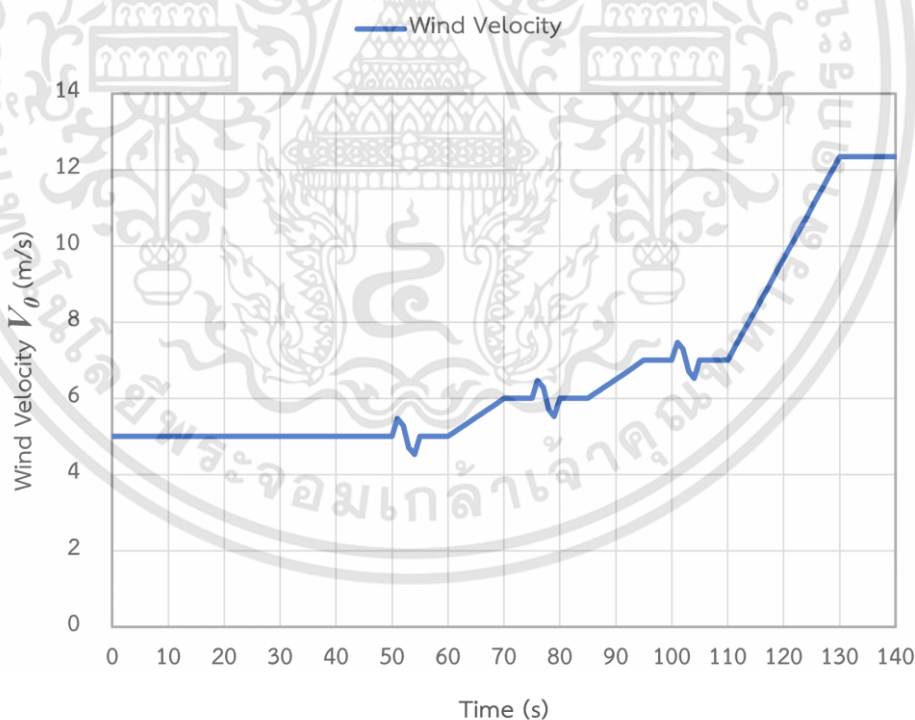
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ส่วนโปรแกรมจำลองระบบกังหันลม

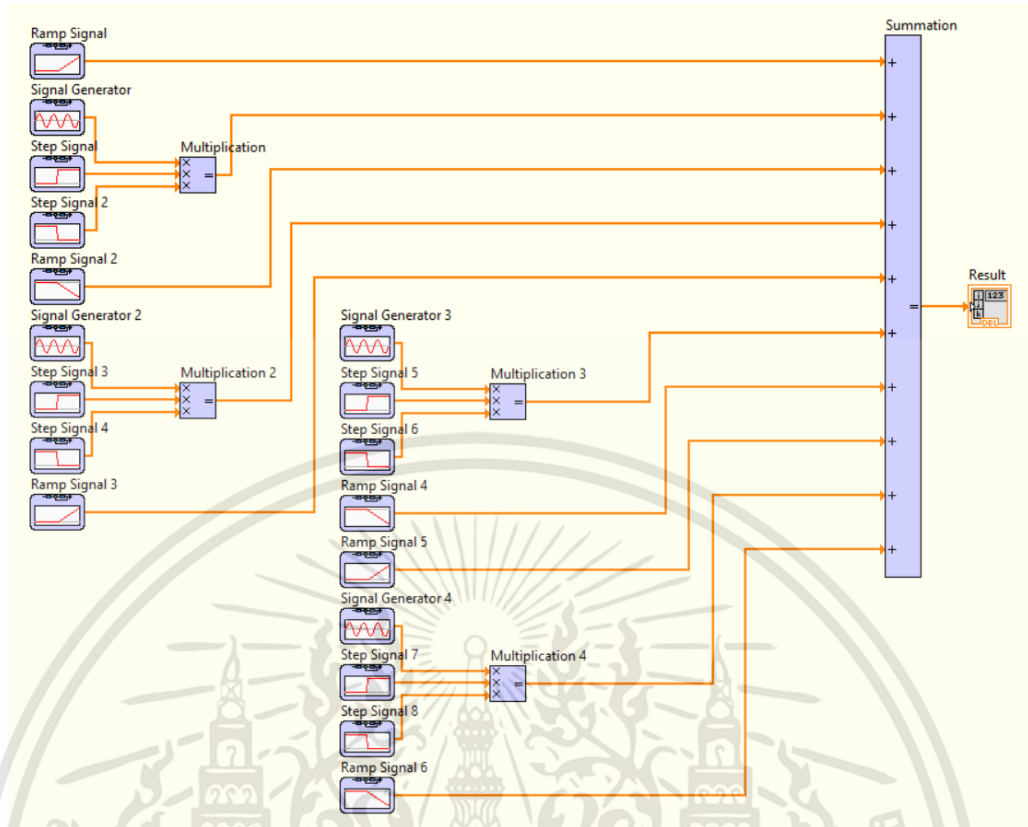
3.4.2.1 ส่วนข้อมูลความเร็วลม

ข้อมูลความเร็วลมจะถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้เป็นสัญญาณความเร็วที่จะส่งไประบบการคำนวณ โดยรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นข้อมูลความเร็วลมที่ใช้จากแบบจำลอง ซึ่งสร้างด้วยเครื่องมือ Signal Generation จากชุดเครื่องมือ Control & Simulation ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความเร็วลม

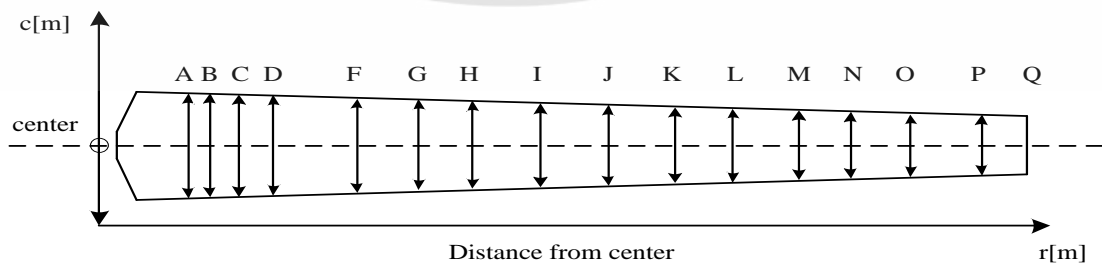
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แบบจำลองความเร็วลม

3.4.2.2 ส่วนแบบจำลองกังหันลม

แบบจำลองกังหันลมนั้นได้ใช้การประยุกต์มาจากงานวิจัยการศึกษาการออกแบบใบกังหันลมย่านความเร็วต่ำที่ใช้ในประเทศไทยกังหันลม รูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นรูปร่างของใบกังหันลมที่ใช้ในโครงการ ค่าในตารางที่ 3.1 คือค่าของใบกังหันที่นำมาใช้ในการคำนวณด้วยสมการที่กล่าวไปในบทที่ 2 จากนั้นนำใบกังหันลมดังกล่าวผ่านโปรแกรมจำลองและสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาเขียนแบบจำลองกังหันลมได้ดังรูป 3.7

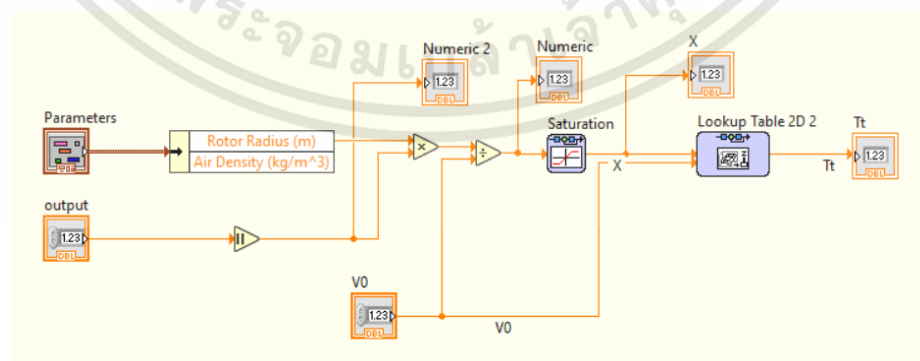


รูปที่ 3.6 รูปร่างของใบกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 รูปร่างของใบกังหัน

Code number	R[m] distance from center of rotor	C[m] width of code	B[deg] angle of twist
A	0.08	0.096	-
B	0.1	0.094	-
C	0.12	0.093	-
D	0.14	0.092	1.5
E	0.16	0.09	3.2
F	0.21	0.085	4.5
G	0.26	0.08	4.8
H	0.31	0.076	4.8
I	0.36	0.071	4.8
G	0.41	0.066	4.8
K	0.46	0.062	4.9
L	0.51	0.058	4.9
M	0.56	0.053	4.9
N	0.61	0.048	4.9
O	0.66	0.044	4.9
P	0.71	0.04	5
Q	0.76	0.035	5



รูปที่ 3.7 แบบจำลองกังหันลม

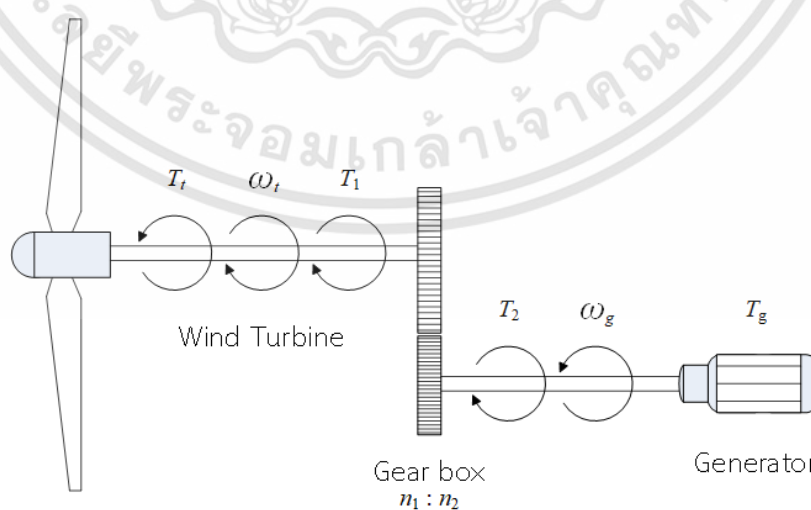
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.3 ส่วนแบบจำลองทางกล

ส่วนแบบจำลองทางกล คือแบบจำลองทางกลของระบบกังหันลมจริงซึ่งรวมถึงส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย [15-17] โดยแบบจำลองทางกลของระบบกังหันลมสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (3.1) ดังนี้

$$\left\{ J_g + J_t \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right\} \frac{d\omega_g}{dt} = T_g - T_t \frac{n_2}{n_1} - \left\{ B_g + B_t \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right\} \omega_g \quad (3.1)$$

เมื่อ	T_t	คือ แรงบิดของกังหันลม มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร
	T_g	คือ แรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร
	J_t	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลม มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสอง
	J_g	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสอง
	B_t	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของกังหันลม มีหน่วยเป็น นิวตันเมตรต่อรัศมีต่อวินาที
	B_g	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีหน่วยเป็นนิวตันเมตรต่อรัศมีต่อวินาที
	ω_g	คือ ความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เรเดียน
	$\frac{n_2}{n_1}$	คือ อัตราทดเฟือง



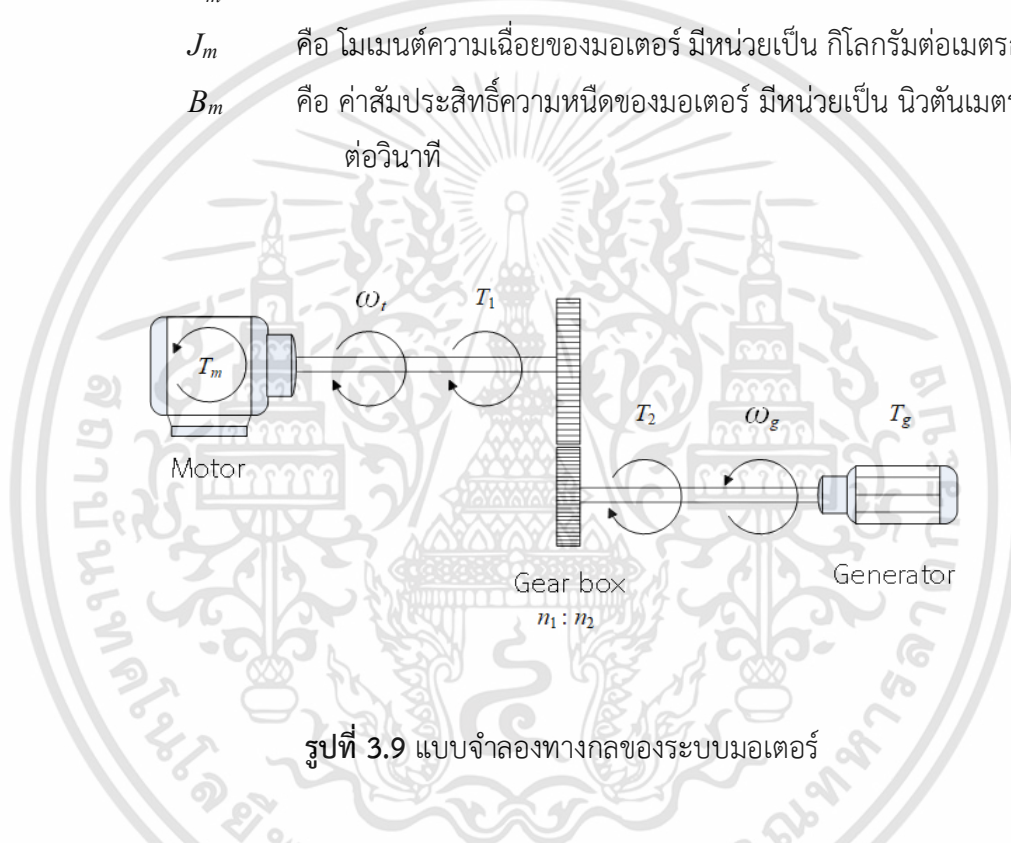
รูปที่ 3.8 แบบจำลองทางกลของระบบกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนที่กัมมันต์จริงในแบบจำลองทางกลของระบบกัมมันต์จริงด้วยมอเตอร์ดังรูปที่ 3.9 สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (3.2)

$$\left\{ J_g + J_m \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right\} \frac{d\omega_g}{dt} = T_g - T_m \frac{n_2}{n_1} - \left\{ B_g + B_m \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right\} \omega_g \quad (3.2)$$

เมื่อ T_m คือ แรงบิดของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร
 J_m คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสอง
 B_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น นิวตันเมตรต่อรัศมีต่อวินาที



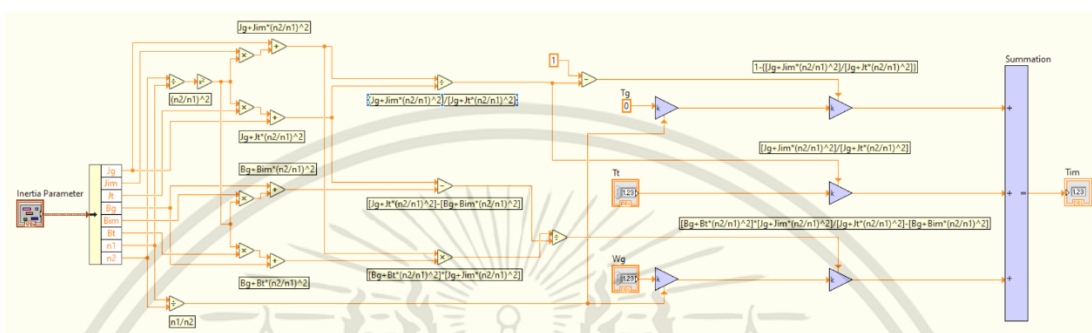
รูปที่ 3.9 แบบจำลองทางกลของระบบมอเตอร์

การปรับแต่งโมเมนต์ความเฉื่อย คือ การคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่แปลงค่าของระบบกัมมันต์จริงเป็นระบบกัมมันต์จำลองที่ใช้มอเตอร์เนื่องจากในการวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนที่กัมมันต์จริง [18] ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (3.3)

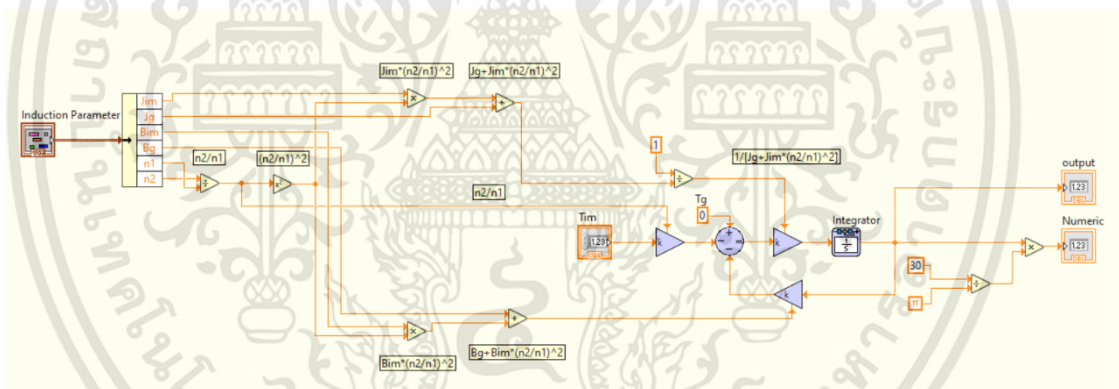
$$T_m^{ref} = \frac{J_m}{J_t} (T_t - B_t \omega_t) + B_m \omega_t \quad (3.3)$$

เมื่อ T_m^{ref} คือ แรงบิดอ้างอิงของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร
 ω_t คือ ความเร็วเชิงมุมของกังหันลม มีหน่วยเป็น เรเดียน

สมการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นของแบบจำลองทางกลสามารถนำมาเขียนเป็นแบบจำลองด้วยโปรแกรม LabVIEW ได้ดังรูปที่ 3.10 และ 3.11



รูปที่ 3.10 แบบจำลองของการปรับค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

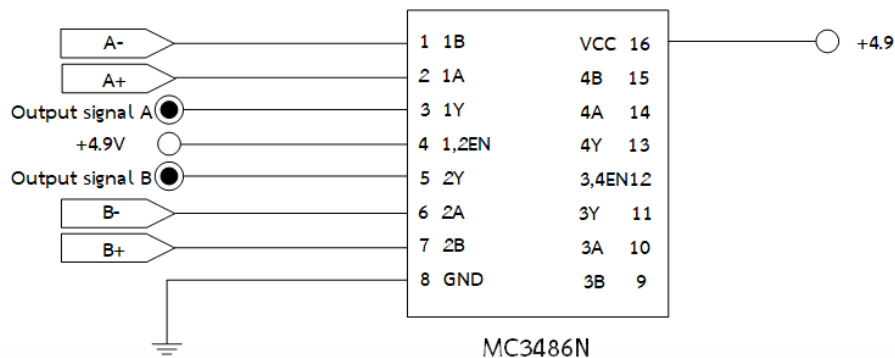


รูปที่ 3.11 แบบจำลองของระบบมอเตอร์

3.4.3 ขั้นตอนการออกแบบวงจร

จากระบบจำลองกังหันลมที่ออกแบบไว้ จำเป็นต้องมีวงจรที่ใช้ IC รหัส MC3486N ในการรับสัญญาณแบบ Line Driver จากเอ็นโค้ดเดอร์ และต้องมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 4.8V เข้า IC และ 5V เข้าเอ็นโค้ดเดอร์ในการทำงาน จึงจำเป็นต้องออกแบบวงจรให้สามารถติดตั้ง IC และรองรับการปรับแรงดันแบบ Step-down ได้ โดยการออกแบบวงจรได้ใช้โปรแกรม Proteus 8 Professional

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 วงจรของ IC รหัส MC3486N



รูปที่ 3.13 วงจรของเอ็นโค้ดเดอร์

3.4.4 ขั้นตอนการประกอบระบบจำลอง

ในการประกอบระบบจำลองกังหันลม ได้ใช้แผ่นเหล็กความหนา 0.9 เซนติเมตร เชื่อมประกอบกันเป็นฐานสำหรับยึดอินดักชันมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากกังหันลม และเอ็นโค้ดเดอร์ โดยแกนด้านหน้าของอินดักชันมอเตอร์กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และแกนด้านหลังของอินดักชันมอเตอร์กับเอ็นโค้ดเดอร์นั้นเชื่อมต่อกันด้วยอุปกรณ์ Coupling จากนั้นจึงดำเนินการเดินสายไฟเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับอินเวอร์เตอร์และแผงวงจรที่ออกแบบไว้ จากนั้นจึงนำอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริงเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB เพื่อทำการทดสอบระบบจำลองกังหันลมต่อไป

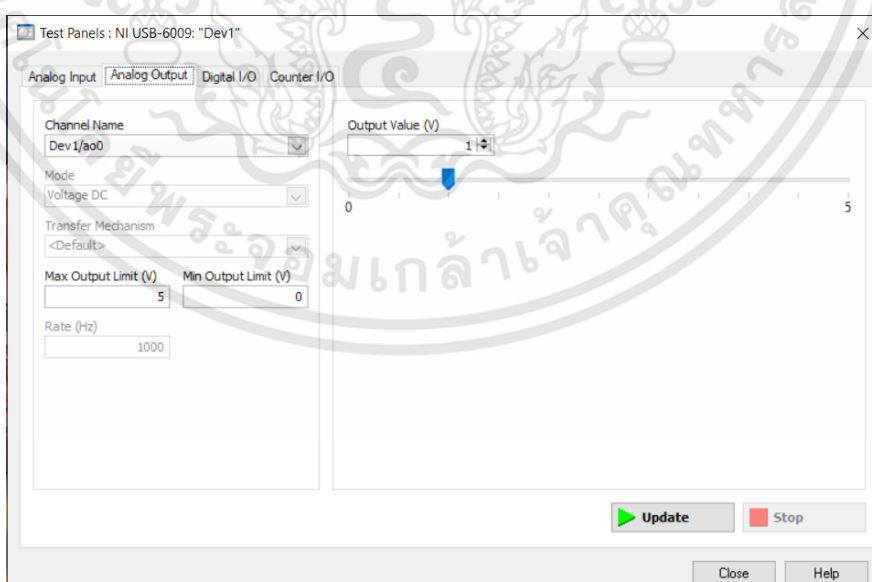


รูปที่ 3.14 การประกอบชุดทดสอบ

3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

3.5.1 การทดสอบอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง

ในการทดสอบอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริงนั้น ได้ทำการใช้โปรแกรมอย่างง่ายที่สามารถป้อนค่าโดยใช้แถบเลื่อนปรับค่าระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 0-5V เพื่อส่งค่าออกทางขานาฬิกา A00 ของอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง เพื่อใช้ในการควบคุมอินตักซ์นมอเตอร์ผ่านอินเวอร์เตอร์ พบว่าค่าที่อ่านได้ใกล้เคียงกับค่าที่ป้อนผ่านโปรแกรมและสามารถใช้ควบคุมอินตักซ์นมอเตอร์ผ่านอินเวอร์เตอร์ได้



รูปที่ 3.15 โปรแกรมทดสอบอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริงอย่างง่าย

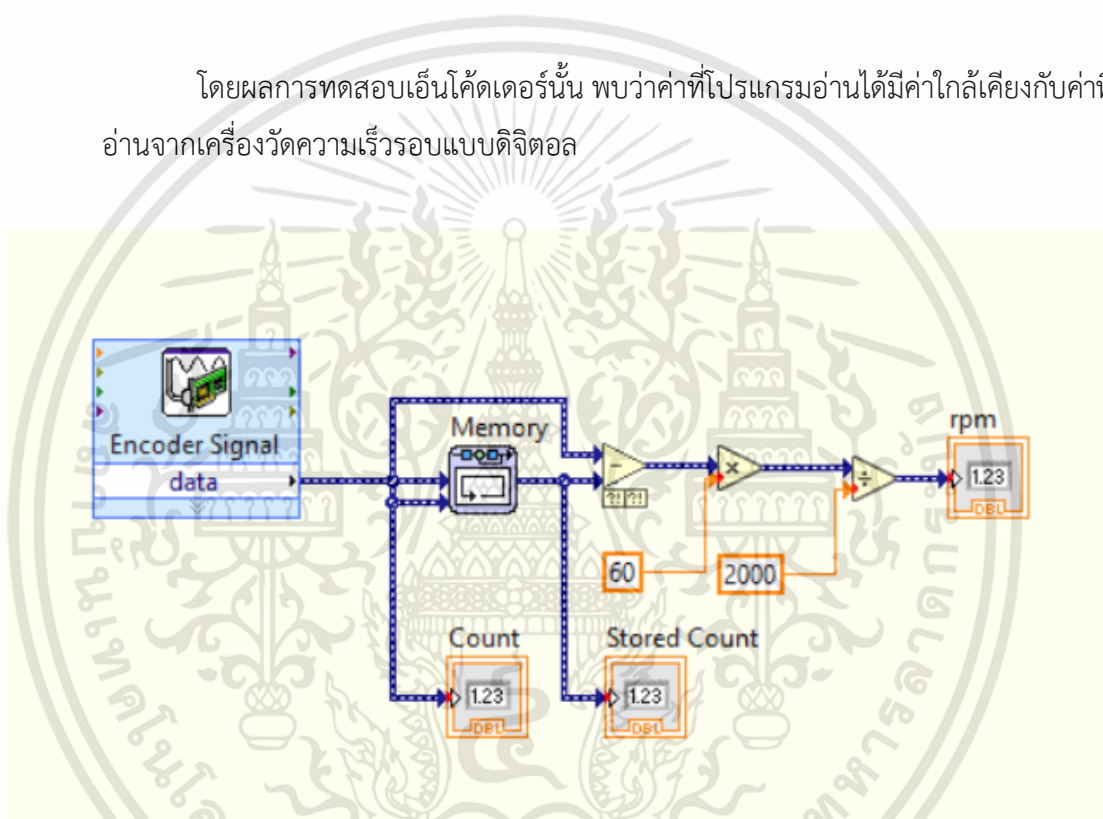
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การทดสอบเอ็นโค้ดเดอร์

ในการทดสอบเอ็นโค้ดเดอร์นั้น ได้ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อรับค่าสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์โดยต่อสายเข้ากับอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริงที่ขานับเข้า PFIO และทำการคำนวณด้วยสมการที่ (3.4) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบแบบดิจิทัล

$$encoder(rpm) = \frac{pulse \times 60}{resolution} \quad (3.4)$$

โดยผลการทดสอบเอ็นโค้ดเดอร์นั้น พบว่าค่าที่โปรแกรมอ่านได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่อ่านจากเครื่องวัดความเร็วรอบแบบดิจิทัล

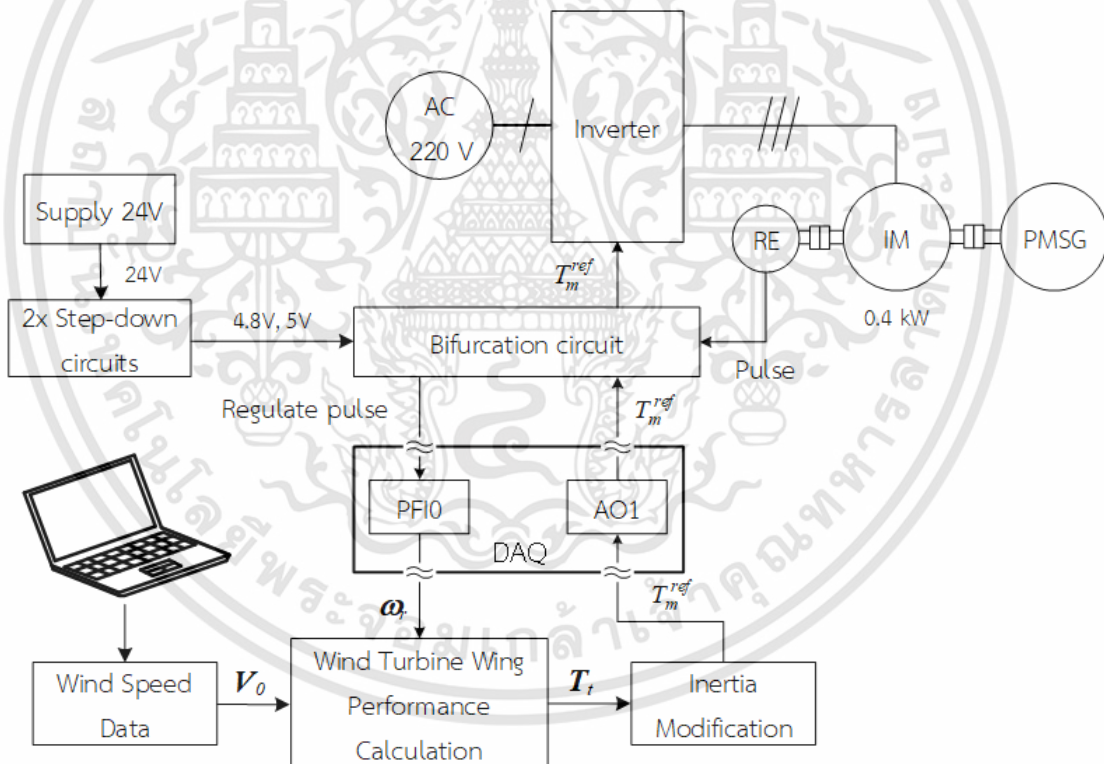


รูปที่ 3.16 โปรแกรมทดสอบเอ็นโค้ดเดอร์

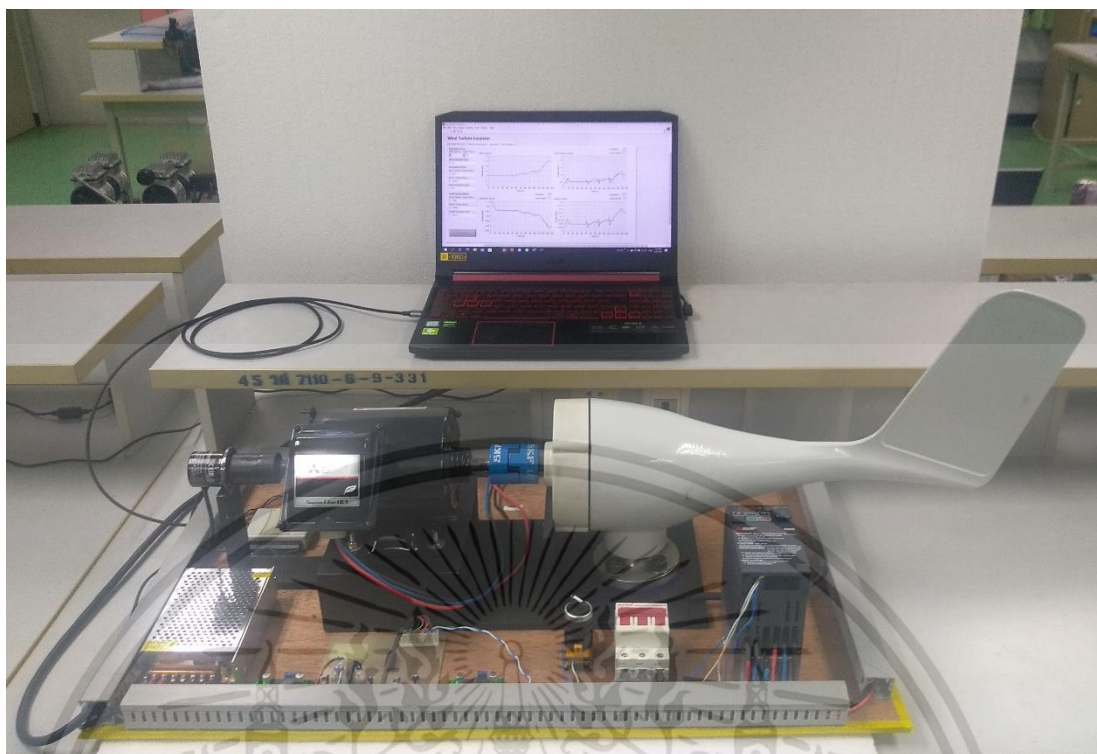
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการทดสอบ

รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นแผนผังของชุดทดสอบระบบจำลองกังหันลม และรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นชุดทดสอบเมื่อประกอบเสร็จสิ้น โดยอินดักชันมอเตอร์จะถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ที่รับคำสั่งควบคุมจากโปรแกรมระบบจำลองกังหันลมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW เป็นแรงดันไฟฟ้า 0-5V จากอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการควบคุมมาจากการคำนวณค่าจำลองที่สร้างขึ้นภายในโปรแกรม LabVIEW โดยค่าความเร็วรอบของอินดักชันมอเตอร์จะถูกนับด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ที่ติดตั้งและส่งกลับเข้าอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง เพื่อทำการคำนวณและเปรียบเทียบกับค่าจำลองที่สร้างขึ้นภายในโปรแกรม โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จะอยู่ในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพระบบจำลองกังหันลม



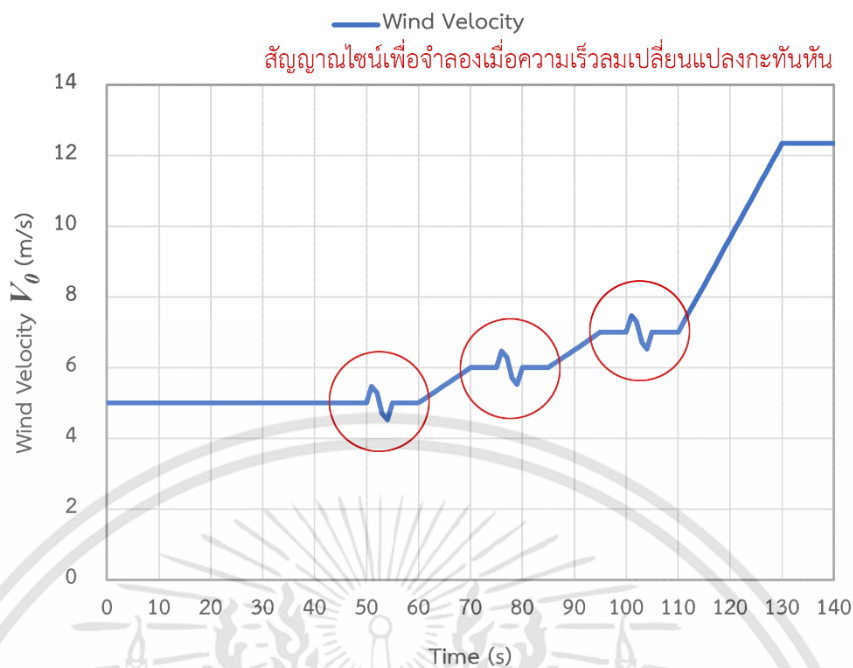
รูปที่ 4.2 ชุดทดสอบของระบบจำลองกึ่งหุ่นยนต์

ตาราง 4.1 ตารางพารามิเตอร์ควบคุม

Parameter	Value
coefficient of viscosity for motor B_{im} [Nm/(rad/s)]	0.00095101
coefficient of viscosity for wind turbine B_t [Nm/(rad/s)]	0
moment of inertia for motor J_{im} [kgm ²]	0.0085
moment of inertia for wind turbine J_t [kgm ²]	0.104303696
gear ratio n_1/n_2	1
pitch angle[degree]	10

ข้อมูลความเร็วลมนั้นเป็นส่วนที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณโดยสร้างจากชุดเครื่องมือภายในโปรแกรม LabVIEW โดยความเร็วลมที่ใช้นั้นสามารถแสดงเป็นกราฟได้ตามรูปที่ 4.3 ซึ่งจะมีส่วนที่มีการใส่สัญญาณค่าไซน์เพื่อจำลองการเปลี่ยนความเร็วของลมอย่างกะทันหัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



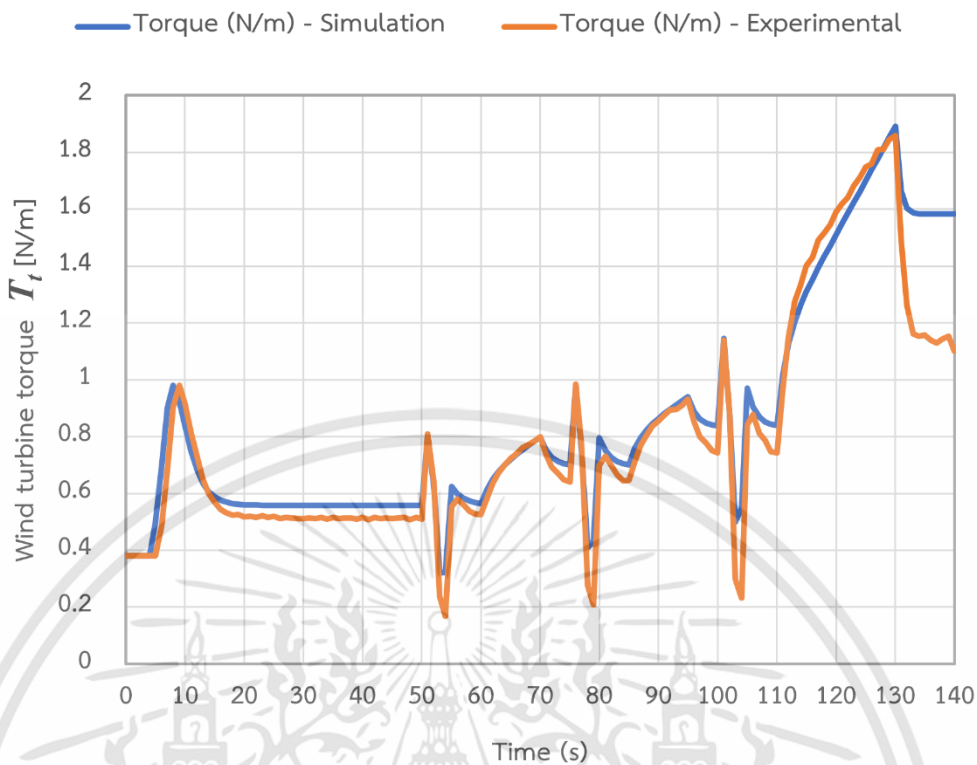
รูปที่ 4.3 กราฟความเร็วลม

เมื่อนำชุดทดสอบระบบจำลองกังหันลมที่ประกอบเสร็จสิ้นมาเริ่มการทดสอบ แล้วทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรมกับค่าจากชุดทดสอบจริง โดยใช้เวลาในการจำลอง 140 วินาที ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดของกังหันลมจากการจำลองด้วยโปรแกรมกับค่าจากชุดทดสอบจริง พบว่า

- ค่าแรงบิดของกังหันลมจากการจำลองด้วยโปรแกรมเริ่มเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 1 นิวตันเมตรที่เวลา 5 วินาที แล้วเริ่มลดลงถึงประมาณ 0.55 นิวตันเมตรที่เวลา 9 วินาที แต่ค่าจากชุดทดสอบจริงเริ่มเพิ่มขึ้นที่เวลา 6 วินาที และเริ่มลดลงถึงประมาณ 0.5 นิวตันเมตรที่เวลาประมาณ 10 วินาที
- ที่เวลา 50 วินาที 70 วินาที และ 95 วินาที ค่าความเร็วลมเป็นค่าไซน์ ค่าแรงบิดของกังหันลมจากการจำลองด้วยโปรแกรมและจากชุดทดสอบจริงเกิดความไม่เสถียรแต่ยังเข้าสู่อการควบคุม
- ที่เวลา 110 วินาที ค่าแรงบิดของกังหันลมจากการจำลองด้วยโปรแกรมเริ่มเพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.9 นิวตันเมตร จนถึงประมาณ 1.9 นิวตันเมตร แล้วเริ่มลดลงถึงประมาณ 1.6 นิวตันเมตรในเวลาต่อมา แต่ค่าจากชุดทดสอบจริงเริ่มเพิ่มขึ้นจาก 0.75 นิวตันเมตร จนถึงประมาณ 1.85 นิวตันเมตร แล้วเริ่มลดลงถึงประมาณ 1.15 นิวตันเมตรในเวลาต่อมา

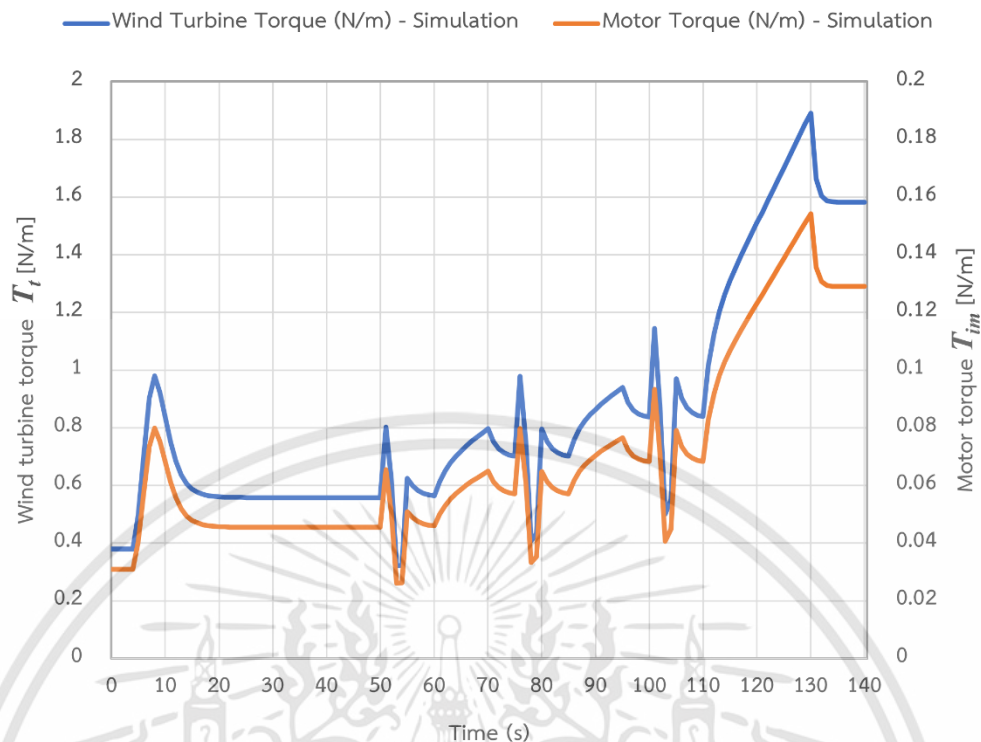
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดของกังหันลมจากการจำลองด้วยโปรแกรมกับค่าจากชุดทดสอบจริง

รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบระหว่างระหว่างค่าแรงบิดของกังหันลมและค่าแรงบิดของอินดักชันมอเตอร์จากการจำลองด้วยโปรแกรม พบว่า

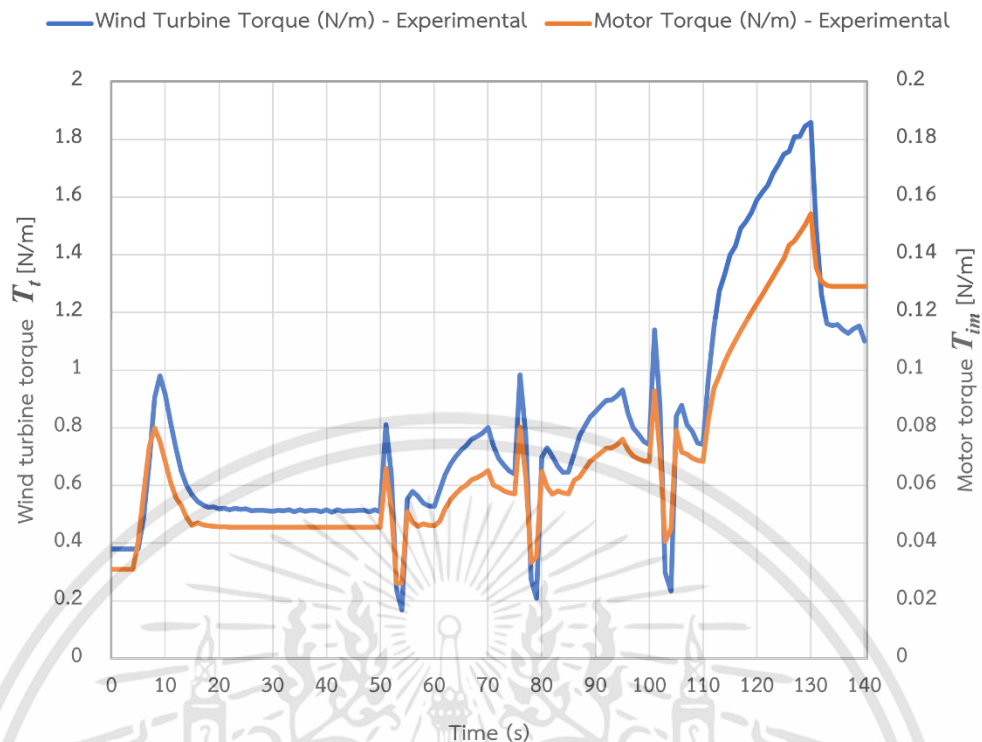
- ค่าแกน y ของทั้งสองค่านี้แตกต่างกันเนื่องจากการแปลงสัญญาณจากค่าแรงบิดของกังหันลมจากการจำลองไปเป็นค่าแรงบิดของอินดักชันมอเตอร์จากการจำลอง
- ค่าแรงบิดของอินดักชันมอเตอร์จากการจำลองเป็นค่าที่ใช้ในการควบคุมอินดักชันมอเตอร์ในชุดทดสอบจริง



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดของกังหันลมและค่าแรงบิดของอินดักชันมอเตอร์จากการจำลองด้วยโปรแกรม

รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดของกังหันลมและค่าแรงบิดของอินดักชันมอเตอร์จากชุดทดสอบจริง พบว่า

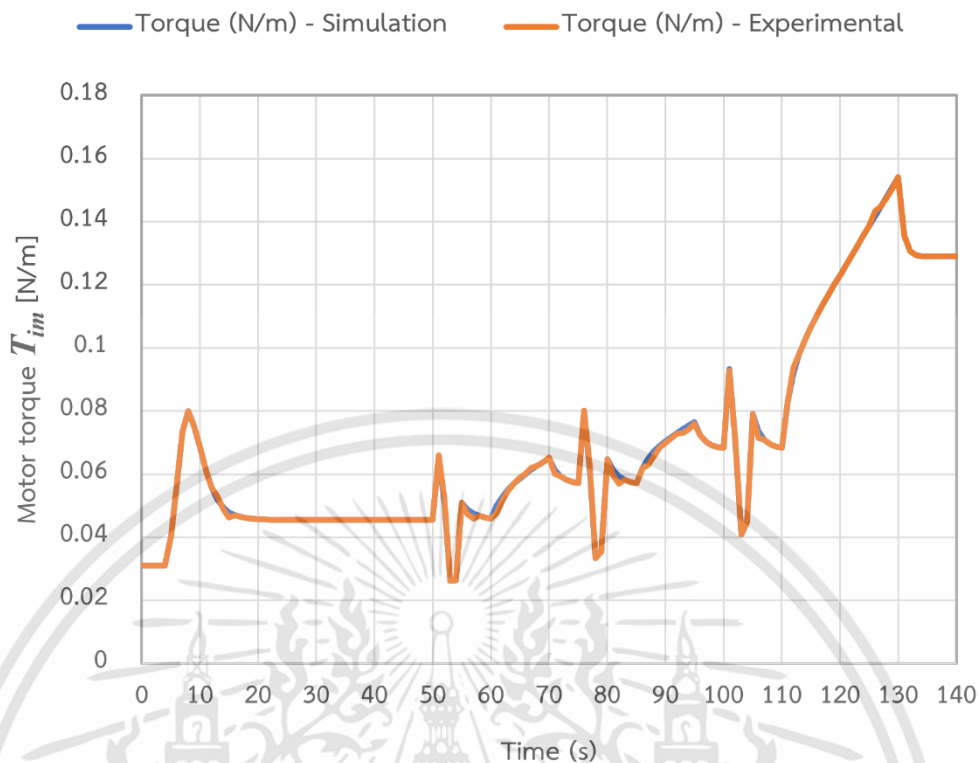
- ค่าแกน y ของทั้งสองค่านี้แตกต่างกัน โดยค่าแกน y ทั้งสองเหมือนกับค่าแกน y ในรูปที่ 4.5
- ค่าแรงบิดของกังหันลมและค่าแรงบิดของอินดักชันมอเตอร์จากชุดทดสอบจริงมีความคลาดเคลื่อนกันที่เวลา 110 วินาที ซึ่งเป็นช่วงความเร็วลมสูง



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดของกังหันลมและค่าแรงบิดของอินดักชันมอเตอร์จากชุดทดสอบจริง

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดของอินดักชันมอเตอร์จากการจำลองด้วยโปรแกรมกับค่าจากชุดทดสอบจริง พบว่า

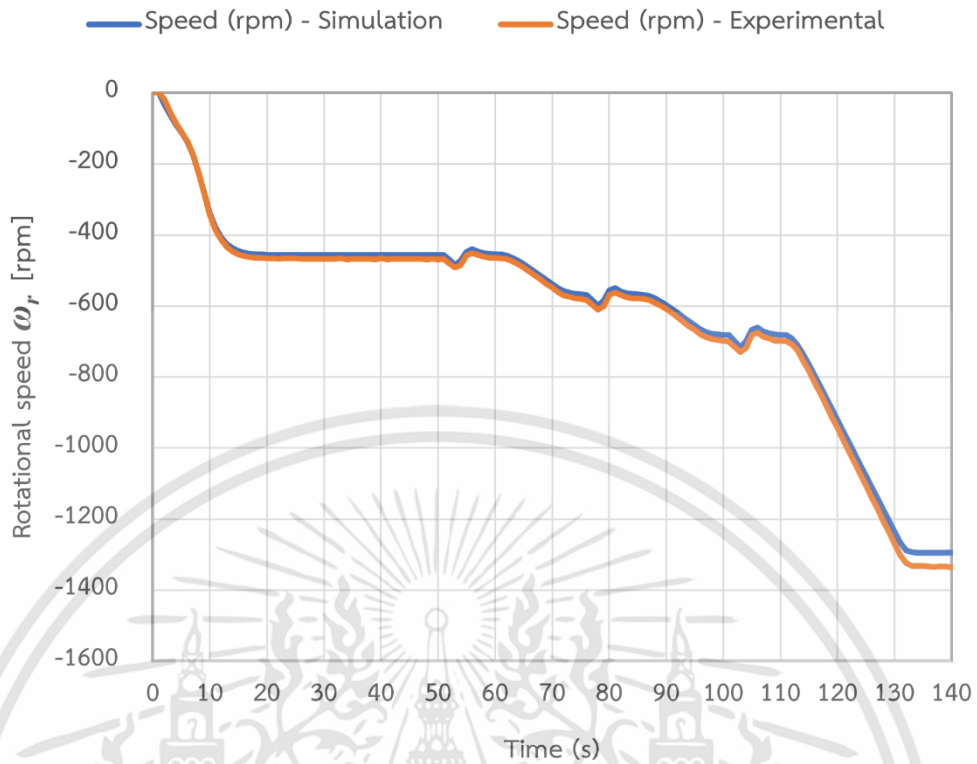
- ค่าแรงบิดของอินดักชันมอเตอร์จากการจำลองด้วยโปรแกรมกับค่าจากชุดทดสอบจริงมีความใกล้เคียงกันมากจนมีค่าทับซ้อนกันเกือบตลอดการทดสอบ
- ในบางช่วงค่าแรงบิดของอินดักชันมอเตอร์จากชุดทดสอบจริงมีความคลาดเคลื่อนกับค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรมเล็กน้อย



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดของอินดักชันมอเตอร์จากการจำลองด้วยโปรแกรมกับค่าจากชุดทดสอบจริง

รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วเชิงมุมจากการจำลองด้วยโปรแกรมกับค่าจากชุดทดสอบจริง พบว่า

- ค่าความเร็วเชิงมุมจากการจำลองด้วยโปรแกรมกับค่าจากชุดทดสอบจริงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน
- ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที ค่าความเร็วเชิงมุมจากชุดทดสอบจริงน้อยกว่าค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรม
- ที่เวลา 10 วินาที ค่าความเร็วเชิงมุมจากชุดทดสอบจริงเริ่มเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรมเล็กน้อย
- ที่เวลา 140 วินาที ค่าความเร็วเชิงมุมจากชุดทดสอบจริงเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรมจนเห็นได้ชัด แต่ยังอยู่ภายใต้การควบคุม



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วเชิงมุมจากการจำลองด้วยโปรแกรมกับค่าจากชุดทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทวิจารณ์และสรุปผลการดำเนินงาน

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบระบบจำลองกังหันลมที่ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าทางกล เพื่อให้ได้ค่าความเร็วเชิงมุมในการเปรียบเทียบกับค่าจำลองจากการคำนวณด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนอินเทอร์เฟซที่ผู้ใช้สามารถป้อนค่าพารามิเตอร์ ค่าเปรียบเทียบระหว่างค่าจำลองจากการคำนวณและค่าทดสอบจากชุดทดสอบจริง และนำค่าที่ได้ไปบันทึกและใช้งานต่อในโปรแกรมอื่น ๆ ได้ กับส่วนโปรแกรมระบบจำลองกังหันลมที่ใช้ในการคำนวณ และควบคุมชุดทดสอบจริง ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองกังหันลมที่มีข้อมูลการทำงานของใบกังหัน โดยใช้ทฤษฎีโมเมนต์ขององค์ประกอบของใบมีดในการคำนวณ แบบจำลองทางกลของระบบกังหันลมและระบบมอเตอร์สำหรับการคำนวณหาค่าแรงบิดของกังหันลมที่เกิดจากความเร็วมุมที่ป้อนเข้าระบบ และนำค่าดังกล่าวมาแปลงเป็นค่าแรงบิดของระบบมอเตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมชุดทดลองจริง โดยค่าแรงบิดของระบบมอเตอร์จะถูกส่งเข้าอุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริงเพื่อใช้ส่งการอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระบบและนำค่าที่ได้จากการอ่านของเอ็นโค้ดเดอร์มาคำนวณและแสดงผลเปรียบเทียบในส่วนของอินเทอร์เฟซ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ตรงตามจุดประสงค์ที่วางไว้และสามารถนำไปใช้งานได้จริง

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

1. การเลือกวิธีการเขียนโปรแกรมระบบจำลองกังหันลมในช่วงต้นไม่สามารถใช้งานได้
2. การประกอบชุดทดสอบจริงเกิดปัญหาที่ทำให้เอ็นโค้ดเดอร์เกิดการสั้นและการเหวี่ยง

5.3 แนวทางแก้ไข

1. เปลี่ยนวิธีการเขียนโปรแกรมระบบจำลองกังหันลม
2. แก้ไขชุดทดสอบเพื่อลดการสั้นและการเหวี่ยงของเอ็นโค้ดเดอร์

5.4 ข้อเสนอแนะแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อ

จากระบบจำลองกังหันลมที่นำเสนอในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ยังมีระบบการทำงานที่สามารถเพิ่มเติมและปรับปรุงได้ดังนี้

1. การปรับปรุงส่วนอินเทอร์เฟซให้สามารถแสดงผลกังหันลมเป็นโมเดลสามมิติที่ความเร็วการหมุนเปลี่ยนแปลงตามข้อมูลความเร็วลมที่ผู้ใช้งานป้อนเพื่อให้ผู้ใช้เข้าใจการทำงานได้โดยง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การปรับปรุงส่วนโปรแกรมระบบจำลองกังหันลม ให้สามารถหยุดมอเตอร์ได้หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้นโดยไม่จำเป็นต้องใช้หน้าต่างเสริม
3. การเชื่อมต่อกับตัวแปลงพลังงานเพื่อจำลองการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมได้อย่างสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Paul, T. Dey, P. Saha, S. Dey, and R. Sen, “Review on the development scenario of renewable energy in different country” **Innovations in Energy Management and Renewable Resource**, Feb. 2021.
- [2] A. Parizad and K. J. Hatziadoniu, “Multi-objective optimization of PV/wind/ESS hybrid microgrid system considering reliability and cost indices” **North American Power Symposium (NAPS)**, Oct. 2019, pp. 1–6
- [3] F. Chishti, S. Murshid, and B. Singh, “Robust normalized mixed-norm adaptive control scheme for PQ improvement at PCC of a remotely located wind–solar PV-BES microgrid,” **IEEE Trans. on Industrial Informatics**, Mar. 2020, vol. 16, no. 3, pp. 1708–1721.
- [4] X. Wu, H. Li, X. Wang, and W. Zhao, “Cooperative operation for wind turbines and hydrogen fueling stations with on-site hydrogen production,” **IEEE Trans. on Sustainable Energy**, , 2020, pp. 2775–2789
- [5] M. Hemmati, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Abapour, and A. Anvari-Moghaddam, “Optimal chance-constrained scheduling of reconfigurable microgrids considering islanding operation constraints,” **IEEE Systems Journal**, 2020, pp. 1-10.
- [6] D. Li, W. Yang, M. Cai and J. Wang, “Study of doubly fed induction generator wind turbines for primary frequency control,” **IEEE 4th Conf. on Energy Internet and Energy System Integration**, Oct. 2020.
- [7] M. Yousefzadeh, S. H. Kia and D. A. Khaburi, “Emulation of direct-drive wind energy conversion systems based on permanent magnet synchronous generators,” **12th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference**, Feb. 2021.

- [8] N. Suppaadirek, N. Saengsuwan, and S. Tammaruckwattana, “Low wind speed wind turbine blade design for Thailand,” **Multidisciplinary Technologies for Industrial Applications**, 2020, pp. 29-39.
- [9] A. J. Ferre and O. G. Bellmunt, “Wind turbine generation systems modeling for integration in power systems,” **Handbook of Renewable Energy Technology**, Jan 2011, pp. 53-68.
- [10] K. Ishibashi and H. Yamada, “Modular multilevel converter based single-phase grid-tied wind power generation system with multiple wind power generators under different wind speeds,” **23rd International Conf. on Electrical Machines and Systems**, Dec. 2020.
- [11] Y. Ando, N. Yamamura and M. Ishida, “Maximum power point tracking control method for the small wind power generation system corresponding to wind speed variation,” **23rd International Conf. on Electrical Machines and Systems**, Dec. 2021.
- [12] M. Balaji, S. K. Sarangi and M. Pattnaik. “Design of a DC motor-based wind turbine emulator using sliding mode control approach,” **IEEE 1st International Conf. on Energy, Systems and Information Processing**, July 2019.
- [13] J. Ledoux, S. Riffo and J. Salomon, “Analysis of the Blade Element Momentum Theory,” **HAL open science**, 2020.
- [14] N. Suppaadirek, S. Ruengkitrakarn, and S. Tammaruckwattana, “Wind Turbine Emulator for Wind Power Generation System,” **International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications**, Vol. 11, No.3, May 2022, pp. 226-233.
- [15] D. H. Wollz, S. A. O. da Silva and L. P. Sampaio, “Real-time monitoring of an electronic wind turbine emulator based on the dynamic PMSG model using a graphical interface,” **Renewable Energy**, vol. 155, Aug. 2020.
- [16] H. Guo, C. Rui, H. Zeng and Q. Guo. “Research on the accuracy of large inertia wind turbine emulator,” **22nd International Conference on Electrical Machines and Systems**, Aug. 2019.

- [17] Z. Dekali, L. Baghli and A. Boumediene, “Experimental emulation of a small wind turbine under operating modes using DC motor,” **4th International Conf. on Power Electronics and their Applications**, Sep. 2019.
- [18] R. Nair and G. Narayanan, “Emulation of Wind Turbine System Using Vector Controlled Induction Motor Drive,” **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 56, no. 4, July 2020.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

อินตักซ์มอเตอร์ Mitsubishi SF-QR 2 Pole 1/2HP

220/380V



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SF-JR 3HP 4P 100L

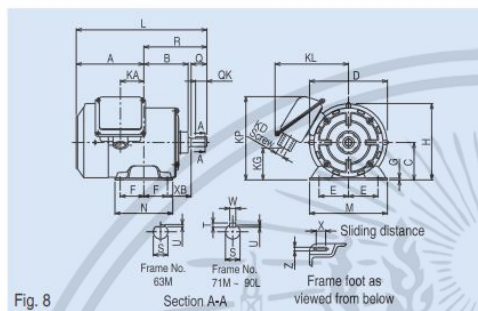


Fig. 8

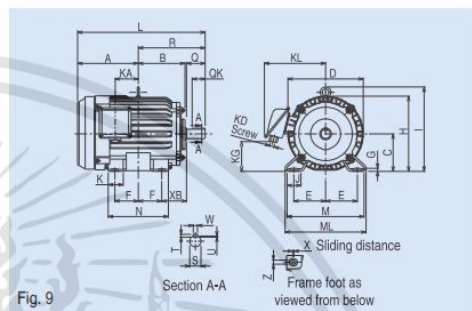


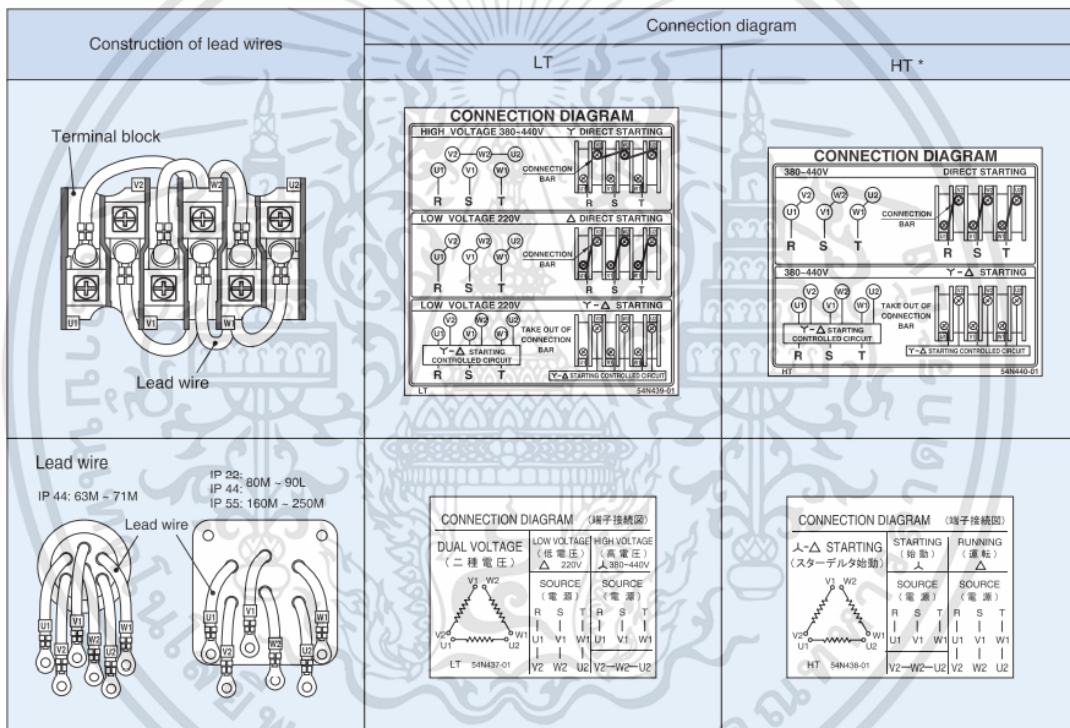
Fig. 9

Model	Frame No.	Output HP (kW)			Fig.	Motor																Terminal box						
		2-Pole	4-Pole	6-Pole		A	B	C*	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	ML	N	X	XB	Z	KA	KG	KD	KL	KP**
SF-JR	63M	1/4(0.2)	1/4(0.2)	-	8	121.4	73.6	63	126.6	50	40	2.3	126.3	-	-	224.4	135	-	100	12	40	7	38.4	75	PF1/2	130	162	
	71M	1/2(0.4)	1/2(0.4)	1/4(0.2)		128.5	83	71	148	56	45	3.2	145	-	-	248.5	148	-	110	18	45	7	44.5	67	PF1/2	140	161	
	80M	1(0.75)	1(0.75)	1/2(0.4)		122	98	80	161.6	62.5	50	3.2	162.8	-	-	262	160	-	125	15	50	9	39.5	38	PF3/4	145	-	
	90L	2(1.5), 3(2.2)	2(1.5)	1(0.75)	9	143	117	90	183.6	70	62.5	4	183.8	-	-	311.5	175	-	150	15	56	9	53	59	PF3/4	158	-	
	100L	-	3(2.2)	2(1.5)		173	131	100	207	80	70	6.5	201.5	230	40	45	366	200	212	180	4	63	12	65	64	PF3/4	170	-
	112M	5(3.7)	5(3.7)	3(2.2)		181	138	112	228	95	70	6.5	222.7	253	40	45	381	230	242	180	4	70	12	69	87	PF3/4	182	-
132S	7.5(5.5), 10(7.5)	7.5(5.5)	5(3.7)	211.5	155	132	266	108	70	6.5	262.7	288	40	45	450.5	256	268	180	4	89	12	75	96	PF1	210	-		
132M	-	10(7.5)	7.5(5.5)	230.5	174	132	266	108	89	6.5	262.7	288	40	45	488.5	256	268	218	4	89	12	94	96	PF1	210	-		

* The perpendicular variation of tolerance for the shaft center is ± 0.5
 ** This dimension is for model which KP > H only.

Model	Frame No.	Shaft end						Bearing No.		Approximate weight (kg)			Approximate packing dimensions (LxWxH)	Packing weight (kg)			
		Q	QK	R	S	T	U	W	Drive end	Opposite	2-Pole	4-Pole		6-Pole	2-Pole	4-Pole	6-Pole
SF-JR	63M	23	-	103	11 h6	-	1	-	6201ZZ	6201ZZ	5	5.5	-	245 x 221 x 193	5.5	6	-
	71M	30	25	120	14 j6	5	3	5	6202ZZ	6201ZZ	7	8	7.5	275 x 256 x 180	7.5	8.5	8
	80M	40	32	140	19 j6	6	3.5	6	6204ZZ	6203ZZ	10.5	11.5	11	315 x 270 x 206	11	12	11.5
	90L	50	40	168.5	24 j6	7	4	8	6205ZZ	6204ZZ	16.5, 20	19	19	368 x 280 x 226	17, 20.5	19.5	19.5
	100L	60	45	193	28 j6	7	4	8	6206ZZ	6205ZZ	-	23	25.5	430 x 355 x 300	-	24.5	27
	112M	60	45	200	28 j6	7	4	8	6207ZZ	6206ZZ	32	33.5	35.5	477 x 399 x 315	37.5	39	41
	132S	80	63	239	38 k6	8	5	10	6308ZZ	6207ZZ	44, 52	42	47.5	579 x 435 x 347	51.5, 59.5	49.5	55
132M	80	63	258	38 k6	8	5	10	6308ZZ	6207ZZ	-	55	59	579 x 435 x 347	-	62.5	66.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



* HT can be used only with motors 5HP and above.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข


อินเวอร์เตอร์ Mitsubishi FR-E820-0.4K-1




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better

for a greener tomorrow 

INVERTER
FR-E800

 **GOOD DESIGN AWARD 2020**

Addition of 11K to 22K Models for Three-Phase 200/400 V Class Inverters

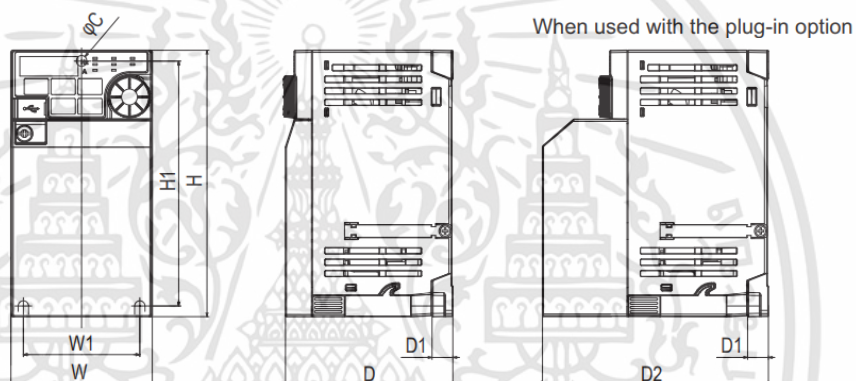
E800



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

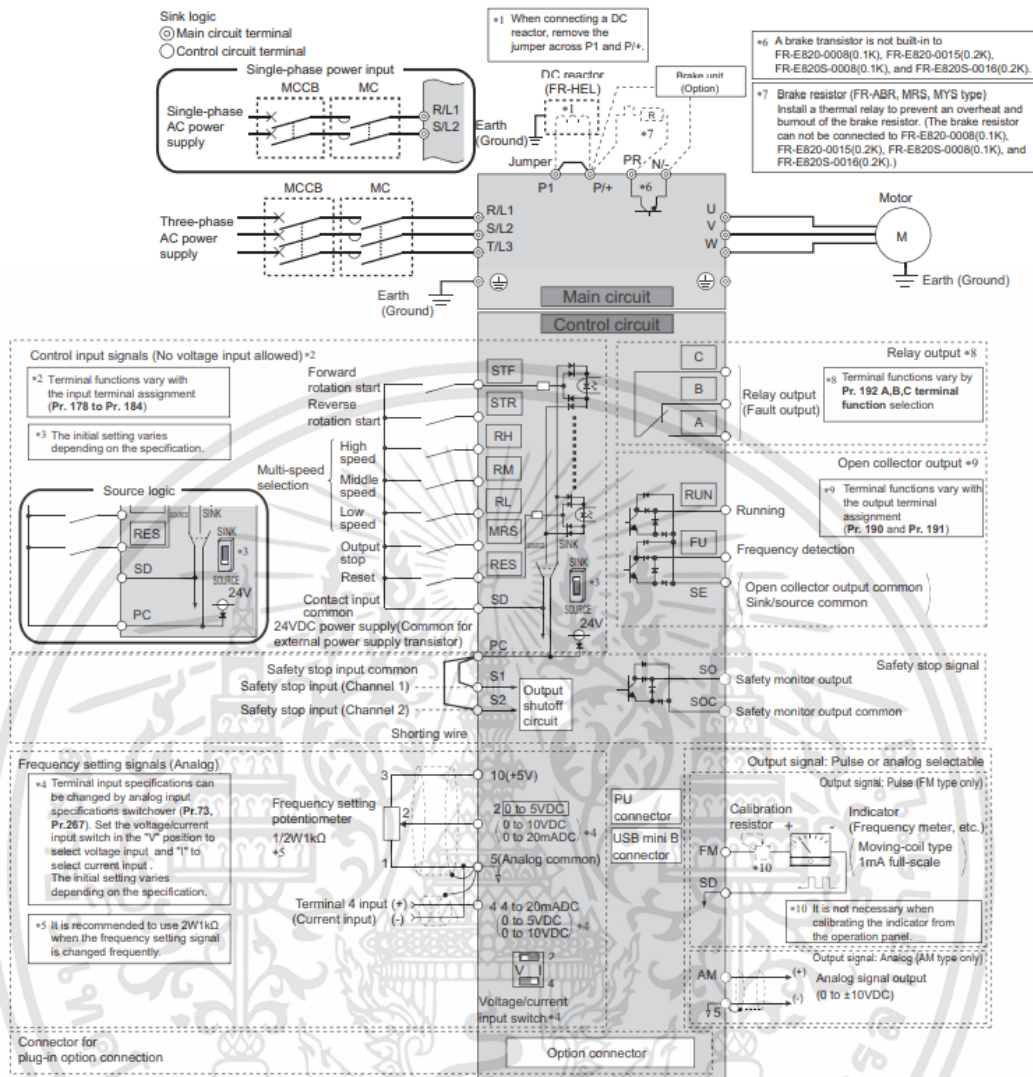
Model FR-E820S-□		Applicable motor capacity (kW) ⁺¹
		ND
0.1K	0008	0.1
0.2K	0015	0.2
0.4K	0030	0.4
0.75K	0050	0.75
1.5K	0080	1.5
2.2K	0110	2.2

- FR-E820-0.1K to 0.75K
- FR-E820S-0.1K to 0.4K



Inverter model	W	W1	H	H1	D	D1	D2	C
FR-E820S-0.1K	68	56	128	118	80.5	10	108.1	5
FR-E820S-0.2K					142.5	42	170.1	
FR-E820S-0.4K					135	45.5	162.6	
FR-E820S-0.75K	108	96			161	46	188.6	
FR-E820S-1.5K					142.5	52.5	170.1	
FR-E820S-2.2K	140	128						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เอ็นโค้ดเดอร์แบบมีแกน Omron E6B2-CWZ1X 2000P/R 2M



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rotary Encoder E6B2-C

New General-purpose Incremental Rotary Encoder

- A wide operating voltage range of 5 to 24 VDC (Open-collector Models).
- Resolution of 2,000 pulses/revolution in 40-mm housing.
- Phase Z can be adjusted with ease using the origin indicating function.
- A large load of 30 N in the radial direction and 20 N in the thrust direction is permitted.
- The load short-circuit and reversed connection protecting circuit assures highly reliable operation (except for line-driver outputs).



<READ AND UNDERSTAND THIS CATALOG>

Please read and understand this catalog before purchasing the products. Please consult your OMRON representative if you have any questions or comments.

Ordering Information

Power supply voltage	Output configuration	Resolution (P/R)	Model
5 to 24 VDC	NPN open-collector output	10/20/30/40/50/60/100/200/300/360/400/500/600/720/800/1,000/ 1,024/1,200/1,500/1,800/2,000	E6B2-CWZ6C
12 to 24 VDC	PNP open-collector output	100/200/360/500/600/1,000/2,000	E6B2-CWZ5B
5 to 12 VDC	Voltage output	10/20/30/40/50/60/100/200/300/360/400/500/600/1,000/1,200/ 1,500/1,800/2,000	E6B2-CWZ3E
5 VDC	Line driver output	10/20/30/40/50/60/100/200/300/360/400/500/600/1,000/1,024/ 1,200/1,500/1,800/2,000	E6B2-CWZ1X

Note: When ordering, specify the resolution in addition to the model number (example: E6B2-CWZ6C 100P/R).

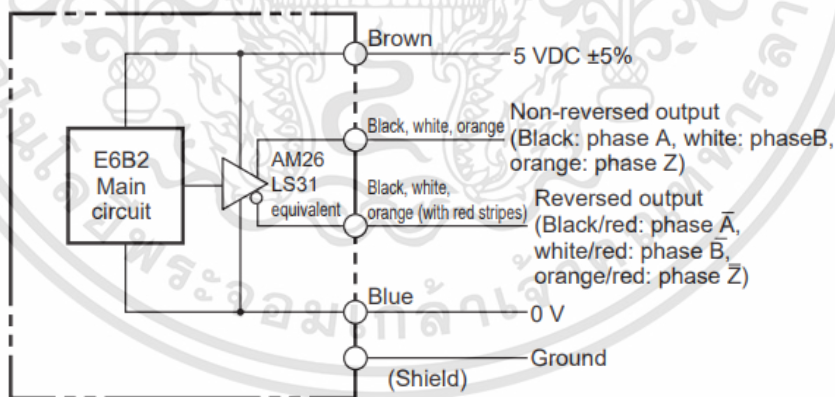
■ Accessories (Order Separately)

Name	Model	Remarks
Coupling	E69-C06B	Provided with the product.
	E69-C68B	Different end diameter
	E69-C610B	Different end diameter
	E69-C06M	Metal construction
Flange	E69-FBA	--
	E69-FBA02	E69-2 Servo Mounting Bracket provided.
Servo Mounting Bracket	E69-2	--

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Item	E6B2-CWZ6C	E6B2-CWZ5B	E6B2-CWZ3E	E6B2-CWZ1X
Power supply voltage	5 VDC -5% to 24 VDC +15%, Ripple (p-p): 5% max.	12 VDC -10% to 24 VDC +15%, Ripple (p-p): 5% max.	5 VDC -5% to 12 VDC +10%, Ripple (p-p): 5% max.	5 VDC ±5%, Ripple (p-p): 5% max.
Current consumption (See note 1.)	70 mA max.	80 mA max.		130 mA max.
Resolution (pulses/rotation)	10/20/30/40/50/60/100/200/300/360/400/500/600/720/800/1,000/1,024/1,200/1,500/1,800/2,000 P/R	100/200/360/500/600/1,000/2,000 P/R	10/20/30/40/50/60/100/200/300/360/400/500/600/1,000/1,200/1,500/1,800/2,000 P/R	10/20/30/40/50/60/100/200/300/360/400/500/600/1,000/1,024/1,200/1,500/1,800/2,000 P/R
Output phases	A, B, and Z			A, \bar{A} , B, \bar{B} , Z, \bar{Z}
Output configuration	NPN open-collector output	PNP open-collector output	Voltage output (NPN output)	Line driver output (See note 2.)
Output capacity	Applied voltage: 30 VDC max. Sink current: 35 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at sink current of 35 mA)	Applied voltage: 30 VDC max. Source current: 35 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at source current of 35 mA)	Output resistance: 2 kΩ Sink current: 20 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at sink current of 20 mA)	AM26LS31 equivalent Output current: High level = I_{OH} = -20 mA Low level = I_{OL} = 20 mA Output voltage: High level = V_{OH} = 2.5 V min. Low level = V_{OL} = 0.5 V max.
Max. response speed (See note 3.)	100 kHz	50 kHz	100 kHz	
Phase difference on output	90°±45° between A and B (1/4T±1/8T)			
Rise and fall times of output	1 μs max. (Control output voltage: 5 V; load resistance: 1 kΩ; cable length: 2 m)	1 μs max. (Cable length: 2 m; source current: 10 mA max.)	1 μs max. (Cable length: 2 m; sink current: 10 mA max.)	0.1 μs max. (Cable length: 2 m; I_{OL} : -20 mA; I_{OH} : 20 mA)
Starting torque	0.98 m N·m max.			
Moment of inertia	1 x 10 ⁻⁶ kg·m ² max.; 3 x 10 ⁻⁷ kg·m ² max. at 600 P/R max.			
Shaft loading	Radial	30 N		
	Thrust	20 N		
Max. permissible speed	6,000 r/min.			
Protection circuits	Power supply reverse polarity protection, Output load short-circuit protection			---
Ambient temperature	Operating: -10°C to 70°C (with no icing) Storage: -25°C to 85°C (with no icing)			
Ambient humidity	Operating/storage: 35% to 85% (with no condensation)			
Insulation resistance	20 MΩ min. (at 500 VDC) between current-carrying parts and case			
Dielectric strength	500 VAC, 50/60 Hz for 1 min between current-carrying parts and case			
Vibration resistance	10 to 500 Hz, 150 m/s ² or 2-mm double amplitude for 11 min 3 times each in X, Y, and Z directions			
Shock resistance	1,000 m/s ² 3 times each in X, Y, and Z directions			
Degree of protection	IEC 60529: IP50			
Connection method	Pre-wired Models (standard length: 0.5 m)			
Weight (packed state)	Approx. 100 g			
Accessories	Coupling, Hexagonal Wrench, Instruction Manual			

E6B2-CWZ1X



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E6B2-CWZ1X

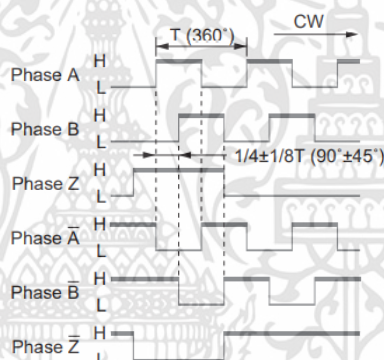
Color	Terminal
Brown	Power supply (+V _{CC})
Black	Output phase A
White	Output phase B
Orange	Output phase Z
Black/red stripes	Output phase \bar{A}
White/red stripes	Output phase \bar{B}
Orange/red stripes	Output phase \bar{Z}
Blue	0 V (common)

Line Driver Output

E6B2-CWZ1X

Direction or resolution: CW

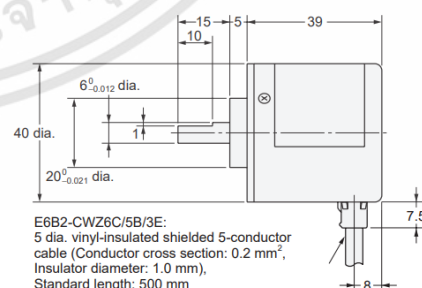
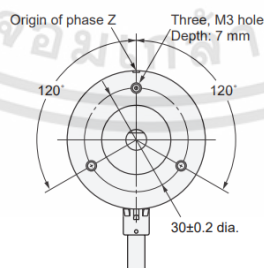
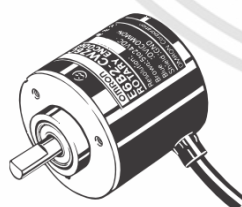
(As viewed from the end of the shaft)



Dimensions

Note: All units are in millimeters unless otherwise indicated.

E6B2-C



E6B2-CWZ6C/5B/3E:
5 dia. vinyl-insulated shielded 5-conductor
cable (Conductor cross section: 0.2 mm²,
Insulator diameter: 1.0 mm),
Standard length: 500 mm

E6B2-CWZ1X:
5 dia. vinyl-insulated shielded 8-conductor
cable (Conductor cross section: 0.2 mm²,
Insulator diameter: 1.0 mm),
Standard length: 500 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
อุปกรณ์การเก็บรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง National
Instruments USB-6009



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS

USB-6009

8 AI (14-Bit, 48 kS/s), 2 AO (150 Hz), 13 DIO USB Multifunction I/O Device

Definitions

Warranted specifications describe the performance of a model under stated operating conditions and are covered by the model warranty.

The following characteristic specifications describe values that are relevant to the use of the model under stated operating conditions but are not covered by the model warranty.

- *Typical* specifications describe the performance met by a majority of models.
- *Nominal* specifications describe an attribute that is based on design, conformance testing, or supplemental testing.

Specifications are *Typical* unless otherwise noted.

Conditions

Specifications are valid at 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input

Analog inputs	
Differential	4
Single-ended	8, software-selectable
Input resolution	
Differential	14 bits
Single-ended	13 bits
Maximum sample rate (aggregate)	48 kS/s, system dependent
Converter type	Successive approximation
AI FIFO	512 bytes
Timing resolution	41.67 ns (24 MHz timebase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Timing accuracy	100 ppm of actual sample rate
Input range	
Differential	$\pm 20\text{ V}^1$, $\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 4\text{ V}$, $\pm 2.5\text{ V}$, $\pm 2\text{ V}$, $\pm 1.25\text{ V}$, $\pm 1\text{ V}$
Single-ended	$\pm 10\text{ V}$
Working voltage	$\pm 10\text{ V}$
Input impedance	144 k Ω
Overvoltage protection	$\pm 35\text{ V}$
Trigger source	Software or external digital trigger
System noise ²	
Differential	
$\pm 20\text{ V}$ range	5 mV _{rms}
$\pm 1\text{ V}$ range	0.5 mV _{rms}
Single-ended, $\pm 10\text{ V}$ range	5 mV _{rms}

Table 1. Absolute Accuracy at Full Scale, Differential

Range (V)	Typical at 25 °C (mV)	Maximum over Temperature (mV)
± 20	14.7	138
± 10	7.73	84.8
± 5	4.28	58.4
± 4	3.59	53.1
± 2.5	2.56	45.1
± 2	2.21	42.5
± 1.25	1.70	38.9
± 1	1.53	37.5



Note Input voltages may not exceed the working voltage range.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2. Absolute Accuracy at Full Scale, Single-Ended

Range (V)	Typical at 25 °C (mV)	Maximum over Temperature (mV)
±10	14.7	138

Analog Output

Analog outputs	2
Output resolution	12 bits
Maximum update rate	150 Hz, software-timed
Output range	0 V to +5 V
Output impedance	50 Ω
Output current drive	5 mA
Power-on state	0 V
Slew rate	1 V/μs
Short circuit current	50 mA
Absolute accuracy (no load)	
Typical	7 mV
Maximum at full scale	36.4 mV

Digital I/O

Digital I/O lines	
P0.<0..7>	8 lines
P1.<0..3>	4 lines
Direction control	Each channel individually programmable as input or output
Output driver type ³	Each channel individually programmable as open collector or active drive
Compatibility	TTL, LVTTTL, CMOS
Absolute maximum voltage range	-0.5 V to 5.8 V with respect to GND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pull-up resistor	4.7 k Ω to 5 V
Power-on state	Input

Table 3. Digital Logic Levels

Level	Minimum	Maximum
Input low voltage	-0.3 V	0.8 V
Input high voltage	2.0 V	5.8 V
Input leakage current	—	50 μ A
Output low voltage (I = 8.5 mA)	—	0.8 V
Output high voltage, active drive (I = -8.5 mA)	2.0 V	3.5 V
Output high voltage, open collector (I = -0.6 mA, nominal)	2.0 V	5.0 V
Output high voltage, open collector (I = -8.5 mA, with external pull-up resistor)	2.0 V	—

External Voltage

+5 V output (200 mA maximum)

Minimum +4.85 V

Typical +5 V

+2.5 V output (1 mA maximum) +2.5 V

+2.5 V accuracy 0.25% maximum

Reference temperature drift 50 ppm/ $^{\circ}$ C maximum

Event Counter

Number of counters 1

Resolution 32 bits

Counter measurements Edge counting (falling-edge)

Counter direction Count up

Pull-up resistor 4.7 k Ω to 5 V

Maximum input frequency 5 MHz

Minimum high pulse width 100 ns

Minimum low pulse width 100 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Input high voltage	2.0 V
Input low voltage	0.8 V

Bus Interface

USB specification	USB 2.0 full-speed (12 Mb/s)
-------------------	------------------------------

Power Requirements

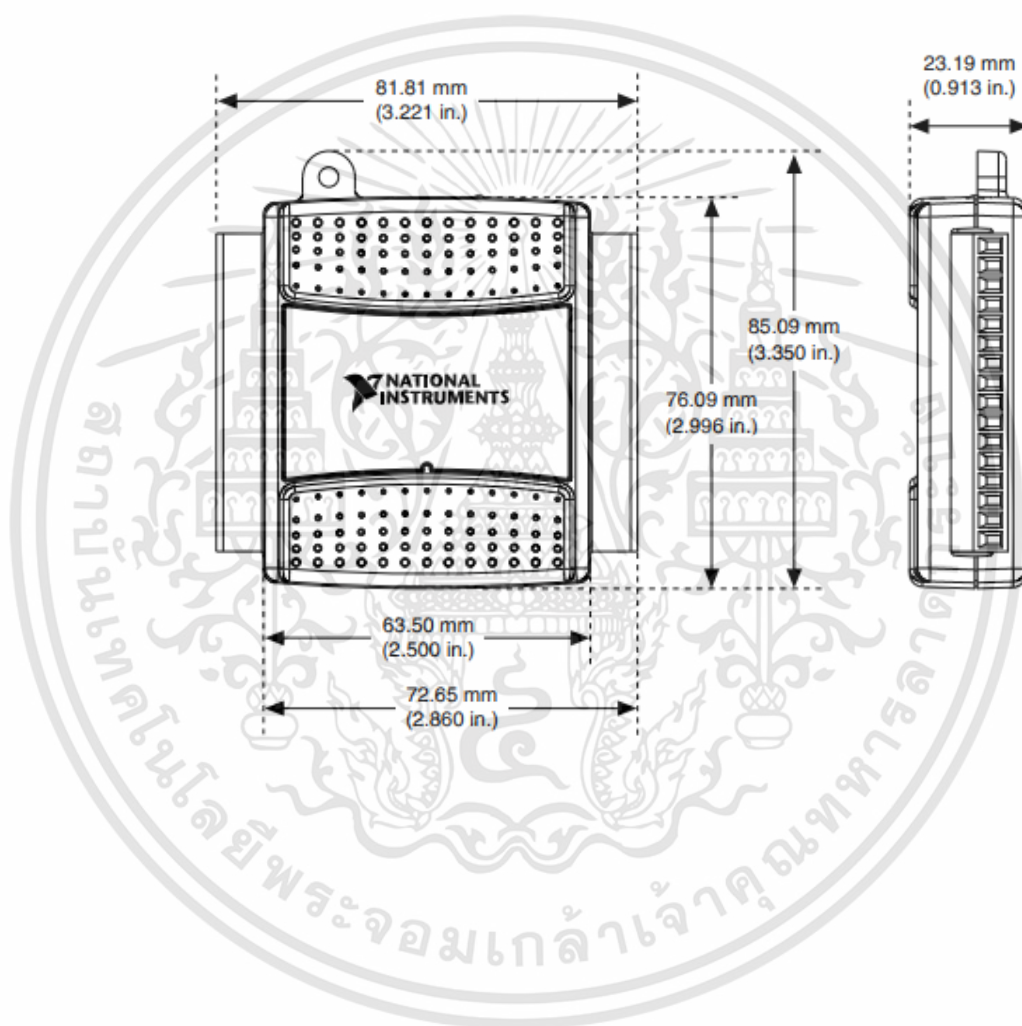
USB, 4.10 VDC to 5.25 VDC	
Typical	80 mA
Maximum	500 mA
USB suspend	
Typical	300 μ A
Maximum	500 μ A

Physical Characteristics

Dimensions	
Without connectors	63.5 mm \times 85.1 mm \times 23.2 mm (2.50 in. \times 3.35 in. \times 0.91 in.)
With connectors	81.8 mm \times 85.1 mm \times 23.2 mm (3.22 in. \times 3.35 in. \times 0.91 in.)
Weight	
Without connectors	54 g (1.9 oz)
With connectors	84 g (3 oz)
USB connector	USB series B receptacle (1)
I/O connectors	
Type	16-position screw terminal plugs (2)
Screw-terminal wiring	16 AWG to 28 AWG
Torque for screw terminals	0.22 N \cdot m to 0.25 N \cdot m (2.0 lb \cdot in. to 2.2 lb \cdot in.)

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
IC รหัส MC3486N



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

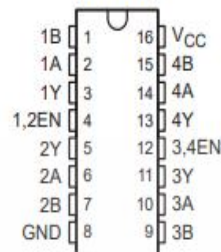
MC3486

QUADRUPLE DIFFERENTIAL LINE RECEIVER WITH 3-STATE OUTPUTS

SLLS097B - JUNE 1980 - REVISED MAY 1995

- Meets or Exceeds the Requirements of ANSI Standards EIA/TIA-422-B and EIA/TIA-423-B and ITU Recommendations V.10 and V.11
- 3-State, TTL-Compatible Outputs
- Fast Transition Times
- Operates From Single 5-V Supply
- Designed to Be Interchangeable With Motorola™ MC3486

D OR N PACKAGE
(TOP VIEW)



description

The MC3486 is a monolithic quadruple differential line receiver designed to meet the specifications of ANSI Standards EIA/TIA-422-B and EIA/TIA-423-B and ITU Recommendations V.10 and V.11. The MC3486 offers four independent differential-input line receivers that have TTL-compatible outputs. The outputs utilize 3-state circuitry to provide a high-impedance state at any output when the appropriate output enable is at a low logic level.

The MC3486 is designed for optimum performance when used with the MC3487 quadruple differential line driver. It is supplied in a 16-pin package and operates from a single 5-V supply.

The MC3486 is characterized for operation from 0°C to 70°C.

FUNCTION TABLE
(each receiver)

DIFFERENTIAL INPUTS A-B	ENABLE	OUTPUT Y
$V_{ID} \leq 0.2\text{ V}$	H	H
$-0.2\text{ V} < V_{ID} < 0.2\text{ V}$	H	?
$V_{ID} \leq -0.2\text{ V}$	H	L
Irrelevant	L	Z
Open	H	?

H = high level, L = low level, Z = high impedance (off),
? = indeterminate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MC3486
QUADRUPLE DIFFERENTIAL LINE RECEIVER
WITH 3-STATE OUTPUTS

SLLS097B – JUNE 1980 – REVISED MAY 1995

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

Supply voltage, V_{CC} (see Note 1)	8 V
Input voltage, V_I (A or B inputs)	± 15 V
Differential input voltage, V_{ID} (see Note 2)	± 25 V
Enable input voltage	8 V
Low-level output current, I_{OL}	50 mA
Continuous total power dissipation	See Dissipation Rating Table
Operating free-air temperature range, T_A	0°C to 70°C
Storage temperature range, T_{stg}	-65°C to 150°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES: 1. All voltage values, except differential-input voltage, are with respect to network ground terminal.
 2. Differential-input voltage is measured at the noninverting input with respect to the corresponding inverting input.

DISSIPATION RATING TABLE

PACKAGE	$T_A \leq 25^\circ\text{C}$ POWER RATING	DERATING FACTOR ABOVE $T_A = 25^\circ\text{C}$	$T_A = 70^\circ\text{C}$ POWER RATING
D	950 mW	7.6 mW/°C	608 mW
N	1150 mW	9.2 mW/°C	736 mW

recommended operating conditions

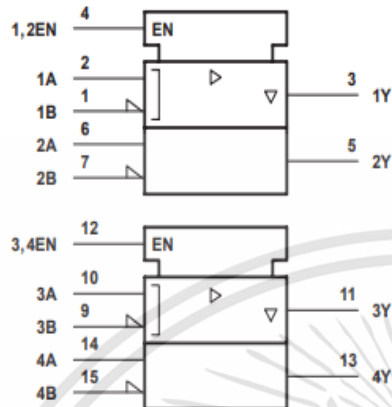
	MIN	NOM	MAX	UNIT
Supply voltage, V_{CC}	4.75	5	5.25	V
Common-mode input voltage, V_{IC}			± 7	V
Differential input voltage, V_{ID}			± 6	V
High-level enable input voltage, V_{IH}	2			V
Low-level enable input voltage, V_{IL}			0.8	V
Operating free-air temperature, T_A	0		70	°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

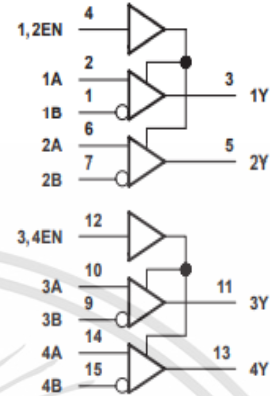
MC3486
QUADRUPLE DIFFERENTIAL LINE RECEIVER
WITH 3-STATE OUTPUTS

SLLS097B - JUNE 1980 - REVISED MAY 1995

logic symbol†

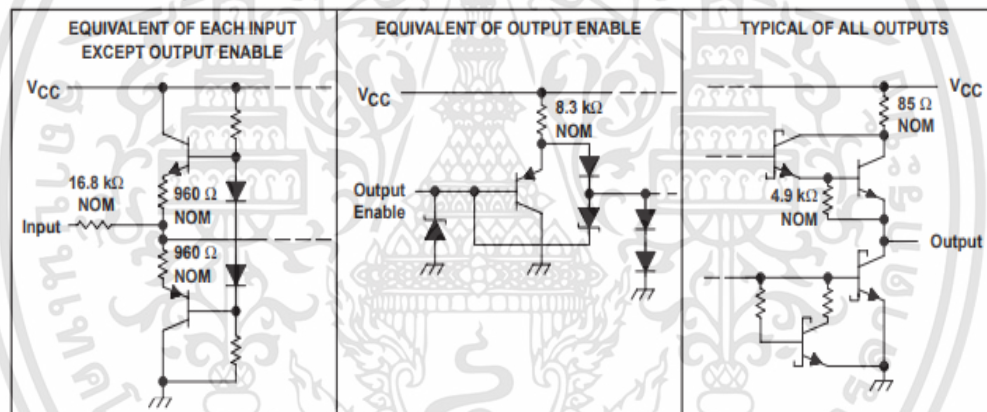


logic diagram (positive logic)



† This symbol is in accordance with ANSI/IEEE Std 91-1984 and IEC Publication 617-12.

schematics of inputs and outputs



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้