

การควบคุมปั้มน้ำโซล่าเซลล์กระแสดรงแบบไร้แปรงถ่านร่วมกับเทคนิคการดิ่งกำลังไฟฟ้า  
สูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์

SOLAR WATER PUMP CONTROL USING BRUSHLESS DC MOTOR WITH  
MAXIMUM POWER POINT TRACKING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

SOLAR WATER PUMP CONTROL USING BRUSHLESS DC MOTOR WITH MAXIMUM  
POWER POINT TRACKING



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIRMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปีการศึกษา 2563

การควบคุมปั๊มน้ำโซล่าเซลล์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านร่วมกับเทคนิคการดิ่งกำลังไฟฟ้า  
สูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์

SOLAR WATER PUMP CONTROL USING BRUSHLESS DC MOTOR WITH MAXIMUM  
POWER POINT TRACKING



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ภูมิ คงห้วยรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมป้อนน้ำโซล่าเซลล์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านร่วมกับเทคนิคการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์

ผู้จัดทำ



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร.ภูมิ คงห้วยรอบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การควบคุมปั้มน้ำโซล่าเซลล์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านร่วมกับเทคนิคการดึงกำลังไฟฟ้า  
สูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์

นายพีรพัชร ธัญกรชินวงศ์  
นางสาวรมิตา คิ้วเจริญ  
นายศรัณย์ ชูศรี  
ดร.ภูมิ คงห้วยรอบ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอการการออกแบบระบบปั้มน้ำโซล่าเซลล์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านแบบปราศตัวจับตำแหน่งโรเตอร์ ควบคู่กับเทคนิคการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo-H743ZI2 ในการประมวลผลการทำงานของวงจรควบคุม เนื่องจากมอเตอร์ปั้มน้ำกระแสตรงไม่มีตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ จึงใช้วิธีการขับปั้มน้ำข้างต้นด้วยการตัดผ่านศูนย์ (Zero Crossing) และยังใช้เทคนิคการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Maximum Power Point Tracking: MPPT) เพื่อให้ปั้มน้ำสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากที่สุด รวมถึงใช้การควบคุม PID เพื่อให้ระบบตั้งกลาวคงสภาพการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในทุกช่วงแสง อีกทั้งยังประยุกต์ใช้ระบบ Internet of things (IOT) เพื่อเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์การทำงานไว้บนระบบรายงานผ่านแอปพลิเคชัน และสามารถนำไปต่อยอดในอนาคตทางการควบคุมทางไกลต่อไป ซึ่งผลลัพธ์ของการปฏิบัติงานครั้งนี้คือ สามารถควบคุมให้ปั้มน้ำขึ้นสูงได้ถึง 10 เมตรและเวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดใช้ระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงเพียงไม่กี่วินาทีตามเป้าหมาย พร้อมทั้งรายงานค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการผ่านระบบ Internet of things บนฐานข้อมูลที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SOLAR WATER PUMP CONTROL USING BRUSHLESS DC MOTOR WITH MAXIMUM POWER POINT TRACKING

MR. PEEPHAT                      THANKORNCHINAPHONG  
MISS RAMITA                      KHIOCHAROEN  
MR. SARAN                        CHUSRI  
DR. POOM                         KONGHUAYROB ADVISOR  
YEAR 2020

## ABSTRACT

This project proposes sensorless brushless DC (BLDC) water pump control with maximum power point tracking technique (MPPT) for solar energy system also applied PID control to improve the efficiency of the MPPT. The control of the power flow is implemented on a digital signal microcontroller NUCLEO-H743ZI2. Since, there are no hall sensor to detect position of the rotor, therefore the utilization of zero crossing to detect to position of the rotor is applied. Moreover, PID tuning is used to maintain the MPPT efficiency in every ranges of solar irradiance Also, internet of things (IOT) is applied to this project. The results show that the water pump could smoothly operate at vertical head of 10 meters also the simulated results show that the utilization of PID control helps to improve the efficiency of the MPPT with less time and more stability. Moreover, internet of things (IOT) is applied in this project to back up the data.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

II

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับเล่มนี้ จะสำเร็จไม่ได้เลยหากปราศจากความช่วยเหลือจากทางสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และจากทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้ทำการสนับสนุนทางด้านสถานที่ และงบประมาณให้กับทางคณะผู้จัดทำ

ขอขอบภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่บรรจุวิชาโครงงานนี้ลงในหลักสูตรภาคบังคับของนักศึกษา ในระดับปริญญาตรีเพื่อเป็นการนำความรู้ที่ได้สั่งสมมาตลอดการศึกษามาประยุกต์ใช้กับงานจริง และ จัดหาอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการใช้งาน รวมถึงอนุญาตให้ทางคณะผู้จัดทำได้เข้าไปใช้ห้องในทำการทดลองจนโครงงานนี้สามารถปรากฏออกมาในรูปของฮาร์ดแวร์ได้สำเร็จลุล่วง

นอกจากนี้ยังมีรุ่นพี่ที่ศึกษาอยู่ในระดับปริญญาโท ปริญญาเอก และที่จบการศึกษาแล้ว เข้ามาช่วยเหลืออยู่เป็นประจำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพี่ณัฐภาสน์ คุ่มกลาง ที่ทำสอนการเขียนโปรแกรม ไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo-H743ZI2 ที่ปริญญา ไสยโยธา ที่คอยควบคุม และสอนเทคนิคในการสร้างระบบปั้มน้ำโซลาร์เซลล์

พี่โรจนพล สันติขวลิต ที่คอยให้คำแนะนำต่างๆเกี่ยวกับการออกแบบวงจรลดสัญญาณรบกวน และสอนเทคนิคการเขียนโปรแกรม และให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อผิดพลาดจากโปรแกรม

พี่ ดร.ปยุตวิริ ฉายศิริ และพี่ฝ่ายสนับสนุนวิชาการคนอื่นๆ ที่คอยอนุญาตให้ยืมอุปกรณ์ต่างๆในการทำโครงงานในครั้งนี้ รวมไปถึงเพื่อนๆ ใน ห้องปฏิบัติการ AIMS ที่คอยให้การสนับสนุนคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ภูมิ คงห้วยรอบ ผู้เป็นที่ปรึกษาโครงงานนี้เป็นอย่างสูง เพราะหากขาดท่านไปโครงงานนี้ก็ไม้อาจจะเกิดขึ้นได้ และด้วยความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่มอบโอกาสให้คณะผู้จัดทำได้มาจัดทำโครงงานนี้เพื่อเสริมสร้างทักษะในการทำงาน ความคิด วิเคราะห์ และการประยุกต์ใช้ความรู้ที่ได้สั่งสมมาตลอดระยะเวลาในการศึกษา ทางคณะผู้จัดทำจึงอยากกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

คุณค่าและประโยชน์ อันพึงได้จากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายพีรพัชร ธิญกรชินพงค์

นางสาวรมิตา คิ้วเจริญ

นายศรัณย์ ชูศรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	IX
สารบัญตาราง	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	2
1.4 วิธีดำเนินงาน	3
1.5 แผนการดำเนินงาน	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีทางไฟฟ้า	6
2.1.1 มอเตอร์	6
2.1.2 โครงสร้างของมอเตอร์	6
2.2 ทฤษฎีขึงโครน์สสามเฟสเบื้องต้น	7
2.2.1 ทฤษฎีขึงโครน์สสามเฟสในเครื่องจักรรุ่นเก่า	7
2.2.2 ทฤษฎีขึงโครน์สสามเฟสในเครื่องจักรรุ่นใหม่	7
2.3 การเปรียบเทียบมอเตอร์กระแสตรงธรรมดาและไร้แปรงถ่าน	9
2.4 ทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	10
2.5 โครงสร้างและหลักการของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	13
2.6 วิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	14
2.6.1 การควบคุมความเร็วแบบตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	14
2.6.2 การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	14
2.7 กลไกการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	16
2.9 ลำดับการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา	16
2.10 เซลล์แสงอาทิตย์	20
2.10.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์	20
2.10.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	22
2.10.3 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	23
2.10.4 กราฟคุณลักษณะ I-V Curve และ P-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	25
2.10.5 กราฟคุณลักษณะ I-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง	26
2.10.6 กราฟคุณลักษณะ I-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	27
2.11 ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking : MPPT)	28
2.12 ทฤษฎีระบบควบคุม	29
2.12.1 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลลบอนุพันธ์ (Proportional Plus Integral plus Derivative Control)	31
2.13 พลศาสตร์ของไหลและสมการแบร์นูลลี	32
2.14 เฮด (Head)	36
2.14.1 เฮดความดัน (Pressure Head, $H_p$ )	36
2.14.2 เฮดความเร็ว (Velocity Head, $H_v$ )	37
2.14.3 เฮดสถิตย์ (Potential Head, $Z$ )	37
2.14.4 เฮดการสูญเสียรวม (Total Head Loss, $H_L$ )	37
2.14.5 การเสียเฮดความฝืดหรือการสูญเสียหลัก	38
2.14.6 การเสียเฮดเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์หรือการสูญเสียรอง	39
2.15 การวิเคราะห์การใช้พลังงานระบบปั๊มน้ำ	42
2.15.1 กำลังไฮดรอลิก (Hydraulic Power, $P_H$ )	42
2.16 อีเธอร์เน็ต	43
2.16.1 สถาปัตยกรรม IEEE 802.3 อีเธอร์เน็ต	44
2.16.2 ดาต้าลิงค์เลเยอร์	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.16.3 Logical Link Control	45
2.16.4 Media Access Control	46
2.16.5 ฟอรัมเฟรมข้อมูล	46
2.16.6 โพรโทคอล CSMA/CD	48
2.16.7 ค่าดีเลย์ (Round-Trip Delay)	48
2.16.8 คอลลิชันโดเมน (Collision Domain)	49
2.16.9 บรอดคาสต์โดเมน (Broadcast Domain)	50
2.16.10 การเรียกชื่ออีเธอร์เน็ต	51
<b>บทที่ 3 การดำเนินงาน</b>	<b>53</b>
3.1 การออกแบบการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง	53
3.2 การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo-H743ZI2	55
3.3 วงจรขับมอเตอร์ BLDC-SHIELD_1EX007T	56
3.4 การออกแบบอัลกอริทึมในการควบคุมมอเตอร์	57
3.5 แนวทางการเลือกขนาดมอเตอร์ปั้มน้ำ	58
3.6 การควบคุมปั้มน้ำกระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	64
3.7 การออกแบบวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันและและเซนเซอร์วัดกระแสเพื่อติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด	65
3.8 การวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่แผงโซลาร์เซลล์ผลิตได้	66
3.9 การใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK ในการทำ PV simulation	69
3.10 การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วย PID tuning	71
3.11 การจำลองเหตุการณ์เพื่อทดสอบผลการทดลองระบบติดตามกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรมMATLAB/SIMULINK	74
3.11.1 การทดสอบพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรงเมื่อภาระทางไฟฟ้าคงที่	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.11.2 การทดสอบพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรง เมื่อภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ	74
3.11.3 การทดสอบพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อต่อแผงโซลาร์เซลล์ เมื่อภาระ ทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ	76
3.12 Internet of things (IOT)	76
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	78
4.1 ผลการออกแบบการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับ ตำแหน่ง	78
4.1.1 ผลจากการจำลองจาก MATLAB/SIMULINK และการทดลอง	79
4.1.2 อัลกอริทึมในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัว ตรวจจับตำแหน่ง	82
4.2 ผลการออกแบบวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันและและเซนเซอร์วัดกระแสเพื่อติดตามค่า กำลังสูงสุด	84
4.3 การปรับปรุงความเสถียรของการสตาร์ทมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	86
4.3.1 การปรับปรุงความเสถียรของการสตาร์ทมอเตอร์	86
4.3.2 ผลการปรับปรุงความเสถียรของการสตาร์ทมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรง ถ่าน	87
4.4 ผลการจำลองการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	88
4.4.1 ผลการจำลองแผงโซลาร์เซลล์โดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	88
4.4.2 ผลทดสอบพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรง เมื่อภาระ ทางไฟฟ้าคงที่	89
4.4.3 ผลทดสอบพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรง เมื่อภาระ ทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ	91
4.4.4 ผลทดสอบพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อต่อแผงโซลาร์เซลล์ เมื่อภาระทาง ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการสร้างระบบ IOT	99
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา	101
5.1 สรุปผลการทดลอง	101
5.2 ข้อเสนอแนะ	102
5.3 แนวทางการพัฒนา	102
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	103
<b>ภาคผนวก</b>	105
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	106
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	112
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	135



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
2.1 มุมมองการถอดชิ้นส่วนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	10
2.2 ภาพตัดขวางของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	13
2.3 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	15
2.4 มอเตอร์กระแสตรงและมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	16
2.5 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอเตอร์ (Q1, Q6) ทำงาน	17
2.6 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอเตอร์ (Q1, Q2) ทำงาน	17
2.7 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอเตอร์ (Q3, Q2) ทำงาน	18
2.8 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอเตอร์ (Q3, Q4) ทำงาน	18
2.9 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอเตอร์ (Q5, Q4) ทำงาน	19
2.10 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอเตอร์ (Q5, Q6) ทำงาน	19
2.11 วงจรสมมูลของแผงโซลาร์เซลล์	21
2.12 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์	21
2.13 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	22
2.14 รูปแบบการนำเซลล์ในแต่ละเซลล์มาต่อรวมกัน	23
2.15 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แสงแบบโมโนคริสตัลไลน์ แบบโพลีคริสตัลไลน์ และแบบอะมอร์ฟัสซิลิกอน ตามลำดับ	25
2.16 กราฟคุณลักษณะ I-V Curve และ P-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	25
2.17 กราฟคุณลักษณะ I-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง	26
2.18 กราฟคุณลักษณะ I-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	27
2.19 การนำ MPPT มาควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้า	29
2.20 พื้นฐานของระบบควบคุม	30
2.21 ระบบควบคุมแบบวงปิด	30
2.22 การควบคุมแบบพีไอดี (PID Control)	31
2.23 แผนภาพวัตถุอิสระ (free-body diagram) ของอนุภาคของไหล	33
2.24 ลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (บน) และแบบปั่นป่วน (ล่าง)	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
2.25 แผนภาพมูดี (Moody Diagram)	39
2.26 ลักษณะโครงสร้างของโกลบวาล์ว	40
2.27 ลักษณะโครงสร้างของเกตวาล์ว	40
2.28 Swing Check Valve	40
2.29 Ball Check Valve	40
2.30 ข้อต่อตัว T และข้องอ 90 และ 45 องศา	40
2.31 เครื่องช่วยอีเธอร์เน็ต	43
2.32 เปรียบเทียบระหว่าง IEEE Ethernet และแบบอ้างอิง OSI	45
2.33 พอร์แมตของอีเธอร์เน็ตเฟรม	47
2.34 คอลลิชันโดเมน	49
2.35 แสดงการเชื่อมต่อบรอดแคสต์โดเมนด้วยเราท์เตอร์	50
2.36 การเรียกชื่ออีเธอร์เน็ต	51
3.1 ไดอะแกรมวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง	53
3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo-H743ZI2	55
3.3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo-H743ZI2	55
3.4 วงจรขับมอเตอร์ BLDC-SHIELD-IFX007T	56
3.5 การออกแบบอัลกอริทึมในการควบคุมมอเตอร์	57
3.6 แผนภาพการจำลองสถานการณ์ขณะปั้มน้ำทำงาน	58
3.7 ความสัมพันธ์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานจากการอ่านใน Moody diagram	61
3.8 รุ่นปั้มน้ำ สกุต QB	63
3.9 ไดอะแกรมการขับมอเตอร์ปั้มน้ำกระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	64
3.10 Schematic ของวงจรแบ่งแรงดันในโปรแกรม Altium Designer	65
3.11 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ	67
3.12 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ	68
3.13 วงจรระบบปั้มน้ำโซลาร์เซลล์ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
3.14 ค่าพารามิเตอร์ของแผงโซลาร์เซลล์ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	70
3.15 Flow chart แสดงการทำงานระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด	71
3.16 Flow chart แสดงการควบคุมแบบ PID	72
3.17 ไดอะแกรมระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	73
3.18 ไดอะแกรมระบบ PID ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	73
3.19 แบบจำลองเหตุการณ์เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรง เมื่อภาระทางไฟฟ้าคงที่	74
3.20 แบบจำลองเหตุการณ์เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรง เมื่อภาระทางไฟฟ้าคงที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ	75
3.21 กราฟความเข้มแสงตามเหตุการณ์จำลอง	76
3.22 ไดอะแกรมการส่งข้อมูลไปยังฐานข้อมูล	77
3.23 ไดอะแกรมการรับข้อมูลจากฐานข้อมูล	77
4.1 ไดอะแกรมวงจรตรวจจับจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ	78
4.2 สัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์(BEMF) ทั้ง 3 เฟส บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	79
4.3 สัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์(BEMF) ทั้ง 3 เฟส วัดจากออสซิลโลสโคป	79
4.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส ทั้ง 3 เฟส บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	80
4.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส วัดจากออสซิลโลสโคป	80
4.6 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับขาคัด High-Low ทั้ง 3 เฟส บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	81
4.7 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับขาคัด High ทั้ง 3 เฟส วัดจากออสซิลโลสโคป	81
4.8 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับขาคัด LOW ทั้ง 3 เฟส วัดจากออสซิลโลสโคป	82
4.9 Flow chart อัลกอริทึมในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง	83
4.10 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันและเซนเซอร์วัดกระแส	84
4.11 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันและเซนเซอร์วัดกระแสผ่านการออกแบบบนโปรแกรม Altium	85
4.12 กราฟแนวโน้มการสตาร์ทจากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับ duty cycle เริ่มต้น	86
4.13 (ก) ผลจากการปั้มน้ำเมื่อมีค่าพารามิเตอร์ต่ำกว่าแนวโน้ม (ข) ผลจากการปั้มน้ำเมื่อมีค่าพารามิเตอร์สูงกว่าแนวโน้ม	87
4.14 I-V curve และ P-V curve จาก MATLAB/SIMULINK	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.15 ผลการตอบสนองทางกำลังไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK	89
4.16 ผลการตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK	90
4.17 ผลการตอบสนองทางกระแสไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK	90
4.18 ผลการตอบสนองทางความเร็วรอบจาก MATLAB/SIMULINK	91
4.19 ผลการตอบสนองทางกำลังไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK	92
4.20 ผลการตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK	92
4.21 ผลการตอบสนองทางกระแสไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK	93
4.22 ผลการตอบสนองทางความเร็วรอบจาก MATLAB/SIMULINK	94
4.23 ผลการตอบสนองทางกำลังไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK	95
4.24 ผลการตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK	95
4.25 ผลการตอบสนองทางกระแสไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK	96
4.26 ผลการตอบสนองทางความเร็วรอบจาก MATLAB/SIMULINK	97
4.27 ผลการตอบสนองทางตัวสัญญาณ PWM ของมอเตอร์จาก MATLAB/SIMULINK	97
4.28 ผลการตอบสนองของระบบหลังจาก PID จาก MATLAB/SIMULINK	98
4.29 ไดอะแกรมการรับ-ส่งข้อมูลผ่านระบบ Ethernet	99
4.30 ภาพหน้าจอการแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน	100
4.31 ภาพหน้าจอการแสดงผลบนฐานข้อมูล	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	4
2.1 เปรียบเทียบมอเตอร์กระแสตรงกับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	9
2.2 แสดงค่า Loss coefficients ( $K_L$ ) ของวาล์วและข้อต่อต่างๆ	41
3.1 ค่าพารามิเตอร์และข้อมูลโครงสร้างของมอเตอร์	54
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC-SHIELD_IFX007T	56
3.3 ค่าพารามิเตอร์ของแผงโซลาร์เซลล์	66
3.4 แรงดันไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละช่วงเวลา	67
3.5 กระแสของแผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละช่วงเวลา	68
3.6 ค่าพารามิเตอร์ของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	69
4.1 การเปรียบเทียบหาค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์วัดแรงดัน	85
4.2 แนวโน้มการสตาร์ทจากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับduty cycle เริ่มต้นของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นประเทศในแถบภูมิภาคเอเชียที่เป็นผู้ส่งออกพืชผลทางการเกษตรกรรม รายใหญ่อันดับต้น ๆ การเข้าถึงทางการเกษตรกรรมเป็นเอกลักษณ์ของประเทศไทยมาอย่างช้านาน สืบเนื่องจากลักษณะของภูมิประเทศเป็นเขตร้อนชื้น โดยมีสภาพพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันมีทั้งเขตภูเขา และหุบเขา, ที่ราบลุ่มแม่น้ำ, ที่ราบลุ่มตอนกลาง, ที่ราบสูง และเทือกเขา ทำให้มีความอุดมสมบูรณ์ความ หลากหลายของทรัพยากรทางธรรมชาติสูงประกอบกับลักษณะภูมิอากาศเป็นแบบมรสุมเขตร้อน จึงเป็น ประเทศที่มีความเหมาะสมต่อการทำเกษตรกรรม ถึงแม้การพัฒนาในภาคเกษตรกรรมเป็นสิ่งสำคัญต่อ อุตสาหกรรมในบ้านเราเป็นอย่างมากแต่ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาประเทศไทยประสบกับปัญหาภัยแล้งทาง ธรรมชาติอย่างรุนแรง ทำให้เกษตรกรต้องเจอกับปัญหาน้ำไม่พอใช้ในการเกษตร ซึ่งทางแก้ไขปัญหาที่ เกิดขึ้นต้องพึ่งสภาพทางการเงินเป็นอย่างมากโดยเฉพาะชาวนาที่ต้องระดมเงินขุดเจาะบ่อบนน้ำ ตลอดจนต้องซื้อมอเตอร์มาขุดน้ำเพื่อกักเก็บน้ำเพื่อเอาไว้ใช้ในยามฉุกเฉิน ในปัจจุบันบ่อบน้ำจัดเป็น อุปกรณ์เครื่องมืออีกชนิดหนึ่งที่มีความเกี่ยวข้องกับชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์อย่างมาก เป็นอุปกรณ์ ที่ช่วยจัดส่งน้ำเพื่อการอุปโภค บริโภค การเกษตร คมนาคม อุตสาหกรรม ตลอดจนการบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้การทำการเกษตรยังมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก ในอดีตการทำการเกษตร ต้องอาศัยน้ำใช้การตก จากแหล่งน้ำ แล้วน้ำไปรดพืชผลทางการเกษตร เพราะฉะนั้นแหล่งน้ำต้องอยู่ใกล้ที่เพาะปลูก พื้น ใเอ้อำนวยกับการเพาะปลูก ถ้าแหล่งน้ำอยู่ไกลก็จะต้องเดินทางไกลเพื่อรดพืชผลทางการเกษตร แล้วก็ พัฒนาการส่งน้ำมาเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง ใช้บ่อบน้ำเข้ายังสายส่งเพื่อส่งน้ำในระยะไกลทำให้อำนวยความ สะดวกกับการเพาะปลูก ซึ่งในระบบที่กล่าวมานั้นต้องรองรับกับแหล่งพลังงานที่สามารถเข้าถึงได้นั้นคือ กำลังไฟฟ้า ในความเป็นจริง ถ้าชาวเกษตรกรรมพื้นที่ภาคเกษตรกรรมขนาดใหญ่จนแหล่งพลังงานเข้าไป รองรับได้ไม่ทั่วถึง ทางเลือกต่อไปคือต้องมีแหล่งพลังงานย่อยเพื่อใช้งาน เช่น แบตเตอรี่ แผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งระบบโซลาร์เซลล์เป็นอีกเทคโนโลยีที่เริ่มมีการประยุกต์ใช้อย่างจริงจังในภาคครัวเรือนและภาค การเกษตร เนื่องจากต้นทุนต่ำรวมถึงมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นั่นคือช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายทาง ไฟฟ้า เหมาะพื้นที่ที่ระบบไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึง ง่ายต่อการใช้งานและการติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทางคณะผู้จัดทำจึงเล็งเห็นว่าปัญหาที่เกิดขึ้นต่อชาวเกษตรกรมีความสำคัญมาก เราจึงศึกษาระบบการทำงานของมอเตอร์ปั้มน้ำภายในมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่ให้กำลังสูงเมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน โดยต่อเข้าแผงโซล่าเซลล์เพื่อแก้ปัญหาไฟฟ้าไม่พอใช้ พร้อมทั้งติดตั้งระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในช่วงเวลาที่โซล่าเซลล์ทำงาน โดยการควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลบวกอนุพันธ์ (Proportional plus Integral plus Derivative Control) ผ่านระบบ IOT (Internet of Things) เพื่อนำข้อมูลค่าพารามิเตอร์มาแสดงผลผ่าน

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. เพื่อศึกษาการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบปรับจกตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์
3. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์และความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจากแรงดันระหว่างขั้วของมอเตอร์
4. เพื่อศึกษาการใช้งานตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo-H743ZI2
5. เพื่อศึกษาการทำงานของปั้มน้ำผ่านการควบคุมบนระบบไร้สาย

### 1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

1. เข้าใจหลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านและรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการทำงานวิจัย
2. เข้าใจหลักการตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่ตัดผ่านศูนย์ นำมาใช้เป็นสัญญาณที่จ่ายให้ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์แทนตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์
3. เข้าใจหลักการดึงพลังงานสูงสุดมาใช้ให้เกิดประโยชน์
4. เพื่อพัฒนาชุดคำสั่งที่ใช้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
5. เข้าใจหลักการปรับปรุง MPPT ผ่านการควบคุม PID
6. เข้าใจหลักการทำงานของ IOT เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้กับโครงการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 1.4 วิธีการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาการทำงานและโครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์
2. ศึกษาการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์
3. ศึกษาการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซีเพื่อใช้ในการขับมอเตอร์
4. ทดสอบพฤติกรรมของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวจับตำแหน่งโรเตอร์ที่ความเร็วต่าง ๆ เช่น แรงบิด แรงดัน กระแส พร้อมทั้งทดสอบประสิทธิภาพ
5. สร้างวงจรเพิ่มแรงดันแบบปรับค่าได้ใช้งานร่วมกับระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด และเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลบวกอนุพันธ์
6. ประยุกต์ใช้ระบบ-IOT เพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์รายงานผลผ่านแอปพลิเคชัน
7. สรุปผลการทำงานและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

หัวข้อดำเนินการ	ระยะเวลาดำเนินงาน									
	ภาคเรียนที่1					ภาคเรียนที่2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์ และขอบเขตของโครงการ	→									
2. ศึกษาบทความและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	→									
3. เขียนโปรแกรมควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC แบบปราศจากฮอลล์เซ็นเซอร์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo-H743ZI2					→					
4. สร้างระบบท่อสำหรับปั้มน้ำ และขับเคลื่อนปั้มน้ำ						→				
5. สร้างวงจรสดแรงดันพร้อมปรับปรุงแก้ไข							→			
6. นำระบบ IOT และ PID tuning สำหรับ MPPT มาปรับใช้ในโครงการ									→	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. โครงการนี้ทำให้ผู้จัดทำได้รับความรู้ ความสามารถ ทักษะ สำหรับเทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์
2. ทำให้ผู้จัดทำสามารถควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์และจัดทำวงจรควบคุมมอเตอร์ได้
3. สามารถสร้างชุดต้นแบบที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยนำความรู้ด้าน Power Electronics และ Control Systems มาประยุกต์ใช้ในโครงการ
4. เพิ่มทักษะการเขียนแอฟพลิเคชั่นบนระบบแอนดรอยด์
5. ทำให้มีการวิจัยพลังงานทางเลือกเพิ่มมากขึ้น และเป็นประโยชน์ต่อผู้ศึกษาและพัฒนาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีทางไฟฟ้า

2.1.1 มอเตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ในโหมตการทำงานปกติมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ทำงานผ่านการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กในตัวมอเตอร์และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดลวดทำให้เกิดแรงดูดและแรงผลักของสนามแม่เหล็กทั้งสองในการใช้งานบางอย่าง เช่น ในอุตสาหกรรมการขนส่งที่ใช้มอเตอร์ฉุดลาก มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถทำงานได้ทั้งการสร้างพลังงานกลและการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยที่ในขณะที่เบรก มอเตอร์ไฟฟ้ายังผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานกล

มอเตอร์ไฟฟ้าถูกนำไปใช้งานที่หลากหลาย เช่น พัดลมอุตสาหกรรม, เครื่องเป่า, บิ๊ม, เครื่องมือ, เครื่องใช้ในครัวเรือนและดิสก์ไดรฟ์มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถขับเคลื่อนโดยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC) เช่น จากแบตเตอรี่ยานยนต์ เป็นต้น วงจรเรียงกระแสหรือจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (AC) เช่น จากบ้าน, อินเวอร์เตอร์หรือเครื่องปั่นไฟ มอเตอร์ขนาดเล็กอาจพบในนาฬิกาไฟฟ้า มอเตอร์ทั่วไปที่มีขนาดและคุณลักษณะมาตรฐานสูงจะให้พลังงานกลที่สะดวกสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใหญ่ที่สุดใช้สำหรับการใช้งานลากจูงเรือ และการบีบอัดท่อส่งน้ำมันและปั๊มสูบน้ำซึ่งมีกำลังถึง 100 เมกะวัตต์ มอเตอร์ไฟฟ้าอาจจำแนกตามประเภทของแหล่งที่มาของพลังงานไฟฟ้าหรือตามโครงสร้างภายในหรือตามการใช้งานหรือตามการเคลื่อนไหวของเอาต์พุตและอื่น ๆ

อุปกรณ์เช่น ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าและลำโพงที่แปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นการเคลื่อนไหวแต่ไม่ได้สร้างพลังงานกลที่ใช้งานได้ จะเรียกกันว่า Actuator และ Transducer ตามลำดับ มอเตอร์ไฟฟ้าใช้สร้างแรงเชิงเส้นหรือแรงบิด หรือ Rotary

2.1.2 โครงสร้างของมอเตอร์ โรเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนที่เคลื่อนที่คือ โรเตอร์ ซึ่งจะหมุนเพลาเพื่อจ่ายพลังงานกล โรเตอร์มักจะมีขดลวดตัวนำพันอยู่โดยรอบ ซึ่งเมื่อมีกระแสไหลผ่านจะเกิดอำนาจแม่เหล็กที่จะไปทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กถาวรของสเตเตอร์ขั้วเพลาให้หมุนได้ อย่งไรก็ตามโรเตอร์บางตัวจะเป็นแม่เหล็กถาวรและสเตเตอร์จะมีขดลวดตัวนำสลับที่กัน

ช่องว่างอากาศ ระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์จะเป็นช่องว่างอากาศ ซึ่งจะต้องมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ช่องว่างขนาดใหญ่จะมีผลกระทบทางลบอย่างมากต่อประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า

ขดลวด ขดลวดจะพันโดยรอบเป็นคอยล์ ปกติจะพันรอบแกนแม่เหล็กอ่อนที่เคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้หน่วยงานใดเผยแพร่ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ได้แก่ แบบขั้วที่เห็นได้ชัดเจนและแบบขั้วที่เห็นได้ไม่ชัดเจน ในขั้วที่ชัดเจนสนามแม่เหล็กของขั้วจะถูกผลิตโดยขดลวดพันรอบแกนด้านล่าง ในขั้วที่ไม่ชัดเจนหรือเรียกว่า แบบสนามแม่เหล็กกระจาย หรือแบบรอบ ๆ โรเตอร์ ขดลวดจะกระจายอยู่ในช่องบนแกนรอบโรเตอร์ มอเตอร์แบบขั้วแฝงมีขดลวดรอบส่วนหนึ่งของขั้วเพื่อหน่วงเฟสของสนามแม่เหล็กของขั้วนั้นให้ช้าลง

มอเตอร์บางตัวขดลวดเป็นโลหะหนากว่า เช่น แท่งหรือแผ่นโลหะที่มักจะเป็นทองแดง บางทีก็เป็นอะลูมิเนียม มอเตอร์เหล่านี้โดยปกติจะถูกขับเคลื่อนโดยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า

ตัวสับเปลี่ยน ตัวสับเปลี่ยนเป็นกลไกที่ใช้ในการสลับอินพุตของมอเตอร์กระแสสลับและกระแสตรง เพื่อให้กระแสที่ไหลในขดลวดในโรเตอร์ไหลทางเดียวตลอดเวลาในระหว่างการหมุน ประกอบด้วยวงแหวนลื่น (Slip-rings) ชิ้นเล็ก ๆ แยกจากกันด้วยฉนวน วงแหวนนี้ยังแยกจากเพลลาของมอเตอร์ด้วยฉนวนอีกด้วย วงแหวนแต่ละคู่ที่อยู่ตรงข้ามกันจะเป็นขดลวดหนึ่งชุด กระแสที่จ่ายให้มัดขั้วขั้วหรือที่เรียกว่า อาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ จะถูกส่งผ่านแปรงถ่าน (Brush) สองตัวที่แตะอยู่กับตัวสับเปลี่ยนแต่ละด้านที่กำลังหมุนอยู่ ซึ่งจะทำให้กระแสจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับที่ไหลกลับทางไหลในขดลวดทิศทางเดียว ในขณะที่โรเตอร์หมุนจากขั้วหนึ่งไปอีกขั้วหนึ่ง ในกรณีที่ไม่มีกระแสแหล่งจ่ายไม่กลับทาง มอเตอร์จะเบรกหยุดอยู่กับที่ ในแง่ของความก้าวหน้าที่สำคัญในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีที่ดีขึ้นในการควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมโดยไม่ใช้เซ็นเซอร์ และมอเตอร์ที่มีสนามแม่เหล็กถาวร มอเตอร์ที่มีตัวสับเปลี่ยนแบบกลไกไฟฟ้า กำลังถูกแทนที่เพิ่มขึ้นด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ตัวสับเปลี่ยนภายนอกและมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

## 2.2 ทฤษฎีชิงโครนีสสามเฟสเบื้องต้น

เครื่องจักรกลชิงโครนีสเกือบทั้งหมดมีขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่บนสเตเตอร์และขดลวดสนามอยู่บนโรเตอร์ กระแสอาร์มาเจอร์เป็นกระแสสลับ กระแสสนามเป็นกระแสตรง ระบบป้อนกระแสสนาม (Excitation) มีสองระบบ คือ

2.2.1 ในเครื่องจักรกลรุ่นเก่า ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งโรเตอร์จะต่อรวมเพลลาเดียวกันกับโรเตอร์ของเครื่องจักรกลชิงโครนีส ป้อนกระแสเข้าขดลวดสนามโดยผ่านวงแหวนสลลิป (Slip rings) และแปรงถ่าน (Carbon brush) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่นี้เรียกว่า Exciter จึงเป็นระบบป้อนกระแสสนามที่ใช้แปรงถ่าน

2.2.2 ในเครื่องจักรกลรุ่นใหม่ ใช้เอ็กไซเตอร์กระแสสลับและเร็กติไฟเออร์โซลิดสเตท

ป้อนกระแสเข้าขดลวด โดยที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเอ็กไซเตอร์กระแสสลับกับเร็กติไฟเออร์โซลิดสเตท ติดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งอยู่บนเพลาดียวกันกับโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส จึงเป็นระบบป้อนกระแสสนามที่ไม่มีแปรงถ่าน (Brushless Excitation)

สมการแรงดันสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

$$E_{rms} = \sqrt{2} \pi f_{me} K_w N_{ph} \phi_p \quad (2.1)$$

$E_{rms}$	คือ แรงดันกำเนิดประสิทธิผล (rms) ต่อหนึ่งเฟส
$f_{me}$	คือ ความเร็วเชิงไฟฟ้าของโรเตอร์ในหน่วย Hz
$K_w$	คือ ตัวประกอบขดลวดของขดลวดอาร์มาเจอร์ (Winding factor)
$\phi_p$	คือ ฟลักซ์แม่เหล็กถาวรต่อหนึ่งขั้วของขดลวดสนาม

สมการแรงบิดสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัส

$$T = \frac{\pi}{2} \left( \frac{P}{2} \right)^2 \phi_R F_f \cos \delta_{RF} \quad (2.2)$$

$\phi_R$	คือ ฟลักซ์ช่องอากาศลัฟต์ต่อหนึ่งขั้ว
$F_f$	คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งขั้วของขดลวดสนาม
$P$	คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก
$\delta_{RF}$	คือ มุมสเปซเฟสในหน่วยองศาไฟฟ้า

ซึ่งในมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน มุมสเปซเฟสจะมีค่า 90 องศา ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.3 การเปรียบเทียบมอเตอร์กระแสตรงธรรมดาและไร้แปรงถ่าน

ถึงแม้ว่า Brushless DC Motor และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะคล้ายกันในคุณลักษณะที่อยู่กับที่ ในความเป็นจริงจะมีความแตกต่างกันบางอย่างทางรูปร่างของโครงสร้าง ตารางที่ 2.1 จะเปรียบเทียบจุดเด่นและข้อเสียของมอเตอร์ทั้งสองชนิด เมื่อก้าวถึงฟังก์ชันของมอเตอร์ไฟฟ้าไม่ควรลืมความสำคัญของการพันขดลวดและการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า (Commutation) จะอ้างอิงถึงกระบวนการเปลี่ยนการเข้าไปของกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และจะต้องมีความเหมาะสมการกระจายในการพันขดลวดแต่ละขดในอาร์มาเจอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าด้วยแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ แต่ใน Brushless DC Motor จะใช้อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ เช่น ทรานซิสเตอร์

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบมอเตอร์กระแสตรงกับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เปรียบเทียบ	Brushed DC Motor	Brushless DC Motor
โครงสร้างทางกล	สนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์	สนามแม่เหล็กบนโรเตอร์
วิธีการคอมมิวเตชัน	ใช้หน้าสัมผัสทางกลระหว่างแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์	ใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซิง
วิธีการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์	ตรวจจับอัตโนมัติด้วยแปรงถ่าน	ใช้ Hall Element หรือ Optical Encoder จัดเรียงซีเควนซ์ของคอมมิวเตชันใหม่
วิธีการกลับทางหมุน	สลับสายแรงดันที่ Terminal	Rearranging Logic Sequencer

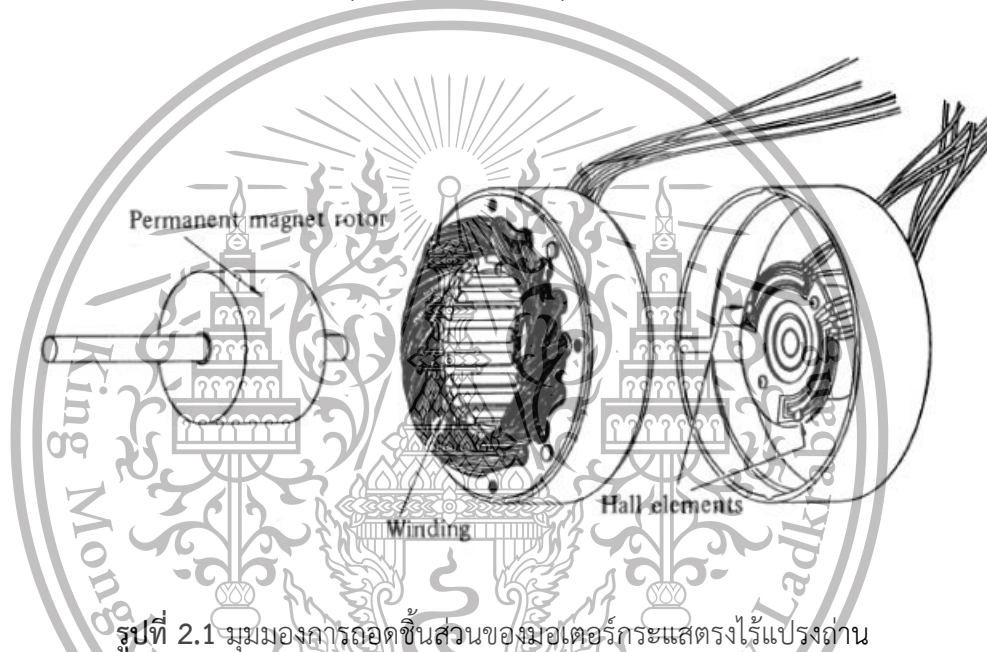
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.4 ทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ความหมายของ Brushless ไม่ว่าจะ เป็น Brushless DC Motor หรือ Permanent Magnet synchronous Motor นั้น จะใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) ในส่วนหมุนโรเตอร์ ดังนั้นจึงไม่ต้องการแปรงถ่านหรือสลิปริง เพื่อรับกระแสไฟฟ้าไปจ่ายให้มอเตอร์ เพราะถูกแทนด้วยแม่เหล็กถาวร ทำให้มอเตอร์ชนิดนี้มีข้อดีกว่ามอเตอร์ทั่วไป (DC Motor, Synchronous Motor, Asynchronous Motor) ตรงที่ไม่ต้องการพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกจ่ายเข้าที่โรเตอร์ จึงไม่มีส่วนสูญเสียในโรเตอร์ ไม่มีส่วนสูญเสียจากการดรอปรองของแปรงถ่าน การเสียดสี และลดการบำรุงรักษา ไม่มีประกายไฟ สามารถนำไปใช้ในสถานที่อันตราย (น้ำมัน เคมี เป็นต้น)



รูปที่ 2.1 มุมมองการถอดชิ้นส่วนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC หรือ BLDC) มีหลักการทำงานเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (Synchronous) สามเฟส หรือ Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) ซึ่งใช้ไฟ AC สามเฟสในการขับ ในอดีตจะเห็นการใช้งานมอเตอร์ซิงโครนัสในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีแหล่งจ่ายไฟสามเฟส มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วที่เป็นจำนวนเท่า ของความถี่ของไฟสามเฟสที่จ่าย (เช่น 50 Hz) ข้อจำกัดในการปรับความเร็วรอบจึงทำให้มอเตอร์ประเภทนี้ไม่ถูกใช้งานมากนักในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่ว ๆ ไปในครัวเรือน ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน เราสามารถควบคุมความเร็วรอบที่ค่าต่าง ๆ โดยไม่ต้องซิงค์ กับ 50 Hz ได้ไม่ยาก ด้วยอุปกรณ์การขับที่เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งทำงานโดยการรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาสร้างเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสจ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์กระแสตรงใช้วิธีสลับทิศทางการจ่าย

เอกสารนี้เป็นกระแส (Commutate) จากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายให้ชุดลวดผ่าน คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้แปรงถ่านในการทำหน้าทีนี้ แต่ในกรณีของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจะออกแบบให้ขดลวดอยู่นิ่ง (Stator) และมีแม่เหล็กถาวรหมุนได้แล้วใช้วิธีการสลับทิศทางกระแสจ่ายให้ขดลวดด้วยวงจรไฟฟ้า แทนการใช้แปรงถ่านจึงกลายเป็นที่มาของชื่อ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีประสิทธิภาพสูงในแง่ของการใช้พลังงานแน่นอนว่าสูงกว่า มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้แปรงถ่าน หรือพูดง่าย ๆ ว่าให้พลังเชิงกลเยอะกว่าเมื่อใช้พลังงานไฟฟ้าเท่า ๆ กัน และยังให้แรงบิดสูงในความเร็วรอบที่สูงเช่นกัน รวมทั้งมีความเฉื่อยหรือการต้านการหมุนที่ต่ำ BLDCเหมาะในการนำมาใช้งานแทนมอเตอร์กระแสตรงแบบเก่า รวมทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ (AC Induction Motor) โดยเฉพาะอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงๆ เช่นพวกที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ หรือจะเป็นอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป เช่น Hard Disk Drive, เครื่องเล่น CD/DVD, บั๊ม พัดลม เครื่องดูดฝุ่น เครื่องชงกาแฟ เครื่องบินบังคับด้วยวิทยุ เครื่องมือทางการแพทย์ และพวกเครื่องมือช่างที่ใช้แบตเตอรี่ แต่ข้อด้อยที่สำคัญของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ก็คือความยุ่งยากในการขับและการควบคุมความเร็ว

1. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC Supply)
2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสสลับสามเฟสให้กับมอเตอร์ (ส่วนใหญ่เป็น MOSFET)
3. ชุดควบคุมในการสร้างไฟกระแสสลับสามเฟสและควบคุมความเร็ว

จากองค์ประกอบหลักข้างต้น ชุดควบคุมในการสร้างไฟกระแสสลับสามเฟสน่าจะเป็นส่วนที่ยากที่สุด ที่ทำให้การใช้งานมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ไม่ได้รับความนิยมในการใช้งานทั่วไปที่ไม่ได้ต้องการประสิทธิภาพสูงนัก ในการสร้างไฟกระแสสลับสามเฟสดังกล่าว จะต้องมีเฟสที่เข้าจังหวะกับแกนหมุนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่เป็นแม่เหล็ก ที่จะหมุนตามสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหมุนที่สร้างจากขดลวด คล้ายๆ กับหลักการจุดระเบิดหัวเทียนในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ที่จะต้องจุดระเบิดให้ตรงจังหวะของตำแหน่งของลูกสูบในกระบอกสูบ

หลักการในการหาเฟสที่พอดีในการสร้างไฟกระแสสลับสามเฟสนั้น เริ่มต้นจากการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดตำแหน่งเชิงมุมของแกนหมุน (Rotor) (จะอยู่ภายในหรือภายนอก ขึ้นกับโครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน) เทียบกับส่วนที่อยู่นิ่ง (Stator) โดยทั่วไปจะใช้เซ็นเซอร์ที่ใช้หลักการ Hall Effect เมื่อได้จังหวะหรือองศาทางไฟฟ้าแล้ว ก็จะทำให้การจ่ายกระแสให้ขดลวดแต่ละเฟส และสามารถควบคุมความเร็วโดยการควบคุมปริมาณกระแสในขดลวด ซึ่งจะสัมพันธ์กับแรงบิด วิธีการที่นิยมใช้กันคือวิธีการของ Pulse Width Modulation (PWM) เมื่อกระแสเพิ่มแรงบิดจะเพิ่มทำให้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น จังหวะการสร้างสัญญาณกระแสสลับสามเฟสก็จะถี่ขึ้น เป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ความเร็วรอบที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ต่อมา ได้มีการพัฒนาวิธีการใหม่ ที่ไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์ในการหาตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ โดยใช้วิธีการวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) ซึ่งเป็นแรงดันที่เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์หมุนแล้ว อันเป็นหลักการเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Faraday ด้วยเหตุที่ไม่จำเป็นต้องมีเซ็นเซอร์ในการวัดตำแหน่งเชิงมุมนี้ วิธีการดังกล่าวนี้จึงได้ชื่อว่า Sensorless สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับนี้จะป็นสัญญาณกระแสสลับ ซึ่งสามารถนำมาหาจังหวะในการสลับการจ่ายไฟในแต่ละเฟสได้ โดยสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ นี้สามารถวัดได้จากแรงดันและกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในแต่ละเฟส ตามความเป็นจริงแล้วหลักการดังกล่าวก็ไม่ใช่ว่าจะไม่มีเซ็นเซอร์ เพราะใช้เซ็นเซอร์ในการวัดแรงดันและกระแสในแต่ละเฟส เพียงแต่เซ็นเซอร์ดังกล่าวเป็นสิ่งที่ใช้ในวงจรขับ จึงเสมือนไม่ต้องมีเซ็นเซอร์

ปัจจุบันมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) เป็นที่นิยมมากในปัจจุบันเนื่องจากมีข้อดีกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบธรรมดาทั่วไป เช่น ความเร็วและแรงบิดสูง, อายุการใช้งานยืนยาวกว่า เป็นต้น โครงการนี้จะนำเสนอการทำงานของมอเตอร์ชนิดนี้และจะออกแบบการสร้างวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ในมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน บางส่วนของปัญหาของมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้แปรงถ่านจะถูกตัดทิ้งไป แทนที่ "สวิตช์หมุน" หรือตัวสับเปลี่ยนแบบกลไกไปเป็นแบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ภายนอกที่จะซิงโครไนซ์กับตำแหน่งของโรเตอร์ มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านมักจะมีประสิทธิภาพประมาณ 85-90% และสูงได้ถึง 96.5% ในขณะที่มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้แปรงถ่านมักจะมีประสิทธิภาพเพียง 75-80% เท่านั้น

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ซึ่งเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะได้บางส่วนมาจากขดลวดของสเตเตอร์ และบางส่วนได้จากการจัดตำแหน่งของแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์ Hall sensor จะถูกติดตั้งอยู่บนขดลวดของสเตเตอร์เพื่อการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เพื่อให้วงจรควบคุมจ่ายกระแสให้ขดเฟสของขดลวดชุดใดชุดหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งชุดเพื่อให้โรเตอร์หมุนตามความเร็วที่ต้องการมอเตอร์กระแสตรงที่มีตัวสับเปลี่ยนแบบอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นเหมือนมอเตอร์กระแสตรงที่เอาข้างในออกข้างนอก

มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ถูกใช้กันโดยทั่วไปในที่ซึ่งการควบคุมความเร็วอย่างแม่นยำเป็นสิ่งจำเป็น อย่างเช่น ในดิสก์ไดรฟ์ของเครื่องคอมพิวเตอร์หรือเครื่องบันทึกวีดีโอเทป, ไดรฟ์ภายใน CD, CD-ROM และกลไกภายในผลิตภัณฑ์สำนักงาน เช่น พัดลม เครื่องพิมพ์เลเซอร์และเครื่องถ่ายเอกสาร พวกมันมีข้อดีหลายอย่างมากกว่ามอเตอร์ธรรมดา เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

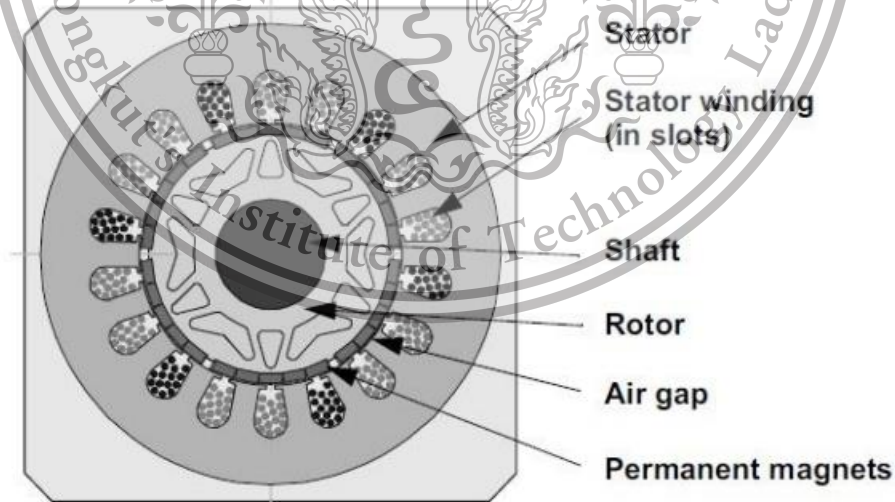
1. เมื่อเทียบกับพัดลม โดยใช้มอเตอร์กระแสสลับทั่วไป มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านมีขนาดวางอยู่บนสเตเตอร์ที่ติดอยู่กับโครงสร้างของมอเตอร์ ทำให้การระบายอากาศทำได้จากภายนอก การทำงานในอากาศที่เย็นจึงทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่า ตัวมอเตอร์สามารถทำเป็นโครงสร้างปิด ทำให้ไม่มีฝุ่นละอองผ่านเข้าไปได้ ทำให้สามารถควบคุมการทำงานได้แม่นยำตลอดอายุการใช้งาน

2. เนื่องจากไม่มีตัวสับเปลี่ยนที่สึกหรอได้ อายุการใช้งานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจึงยาวนานกว่ามอเตอร์ที่ใช้แปรงถ่านและตัวสับเปลี่ยนอย่างมีนัยสำคัญ ตัวสับเปลี่ยนยังสร้างคลื่นรบกวน และเมื่อไม่มีตัวสับเปลี่ยนและแปรงถ่าน มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านอาจถูกใช้ในอุปกรณ์ที่ไวต่อสัญญาณไฟฟ้า เช่น เครื่องเสียงและคอมพิวเตอร์

3. Hall sensor ยังสามารถใช้ส่งสัญญาณของเครื่องวัดความเร็วสำหรับการควบคุมแบบวงรอบปิด รวมทั้งให้สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับของความเร็วที่มอเตอร์กำลังหมุนอยู่

## 2.5 โครงสร้างและหลักการของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์กระแสตรงแบบทั่วไปหรือแบบธรรมดาที่มีประสิทธิภาพสูง และคุณลักษณะดูเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเซอร์โวมอเตอร์ อย่างไรก็ตามมอเตอร์กระแสตรง ยังมีจุดบกพร่องตรงที่ต้องใช้คอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน ทำให้ดูแลรักษาและซ่อมบำรุงบ่อยครั้ง เมื่อหน้าที่ของคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านถูกแทนด้วย Solid-State Switch ก็คือ ทราานซิสเตอร์ 3 ชุด ทำให้เราไม่จำเป็นต้องบำรุงรักษา มอเตอร์เหล่านี้ก็คือมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 2.2 ภาพตัดขวางของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในมอเตอร์กระแสตรงอาร์มาเจอร์ คือ โรเตอร์ และสนามแม่เหล็กจะอยู่ที่สเตเตอร์ โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจะออกแบบยาก การสร้างมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านสมัยใหม่จะเหมือนกับมอเตอร์กระแสตรง ที่รู้จักกันคือ Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) ขดลวดอาร์มาเจอร์จะอยู่ที่สเตเตอร์ และโรเตอร์ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวร 1 คู่ขั้ว หรือหลายคู่ขั้วก็ได้การพันในขดลวดมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน จะเหมือนกันในมอเตอร์กระแสสลับหลายเฟส แต่โดยมากจะพันขดลวด 3 ชุด (ชุดละเฟส) หรือ 3 เฟสนั่นเอง และจะทำการกระตุ้นทีละคู่ มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน จะมีการตรวจสอบตำแหน่งส่วนที่หมุนของโรเตอร์ (หรือขั้วแม่เหล็ก) โดยการกำหนดสัญญาณเพื่อควบคุมสวิทช์ อิเล็กทรอนิกส์ โดยส่วนมากจะติดตั้ง 1 ตำแหน่งต่อขั้ว ในการตรวจจับอุปกรณ์ที่ใช้ คือ Hall Sensor แต่มอเตอร์บางตัวอาจใช้ Optical Sensor คือ โฟโตทรานซิสเตอร์ เป็นตัวตรวจจับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

## 2.6 วิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ลักษณะการต่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ปกติแล้วจะมีอุปกรณ์ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์แบบปรากฏการณ์Hall ลักษณะการนำไปใช้งานประเภทนี้จะต้องประกอบไปด้วยวงจรควบคุมสำหรับขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์สามเฟส แต่ยังมีอีกวิธีสำหรับขับเคลื่อนโดยไม่ต้องอาศัยการตรวจจับตำแหน่ง โดยใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมาควบคุม ดังจะกล่าวต่อไปนี้

2.6.1 การควบคุมความเร็วแบบตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ การควบคุมความเร็วรอบโดยอาศัยตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบปรากฏการณ์ Hall (Hall Sensor) เป็นโคอะแกรมของลักษณะการต่อควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ อาศัยตัวตรวจจับปรากฏการณ์Hall เพื่อเป็นตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์

2.6.2 การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ ในการควบคุมความเร็วรอบที่ผ่านมาเป็นแบบอาศัยตัวตรวจจับตำแหน่ง ส่วนการควบคุมความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับสำหรับการคำนวณตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วรอบ

## 2.7 กลไกการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

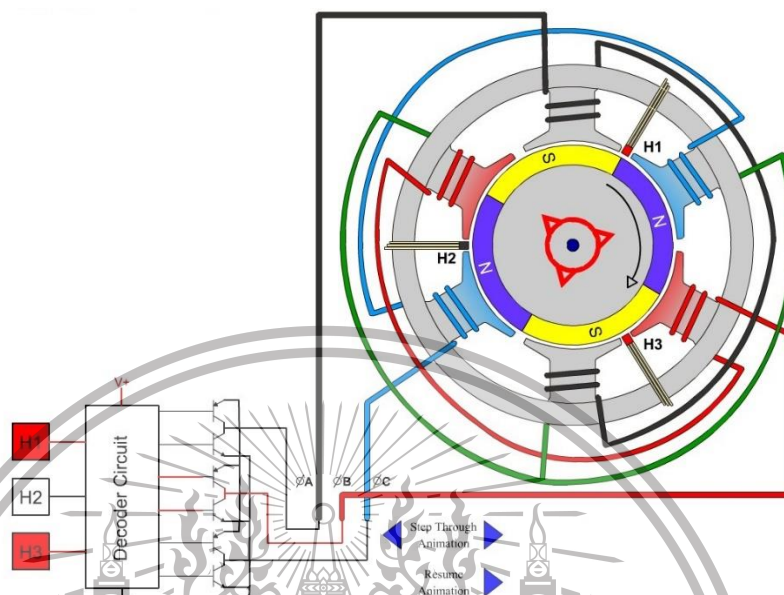
โดยทฤษฎีแล้วในเครื่องจักรกลกระแสตรง ตำแหน่งของขดลวดสนามและของขดลวดอาร์มาเจอร์จะกลับกันได้ กล่าวคือ ขดลวดสนามอยู่บนโรเตอร์ และขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่บนสเตเตอร์ก็ได้ อย่างไรก็ตามมอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่านจะใช้ตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์ (Hall sensor) และอินเวอร์เตอร์ในการควบคุมกระแสในขดลวดสเตเตอร์ ดังนั้นตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์และสวิทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โซลิตสแตต (Solid State) กำลังในอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เหมือนกับแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ทางกลของมอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ 2.3 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน  
(ที่มา : <https://www.electrical4u.com>)

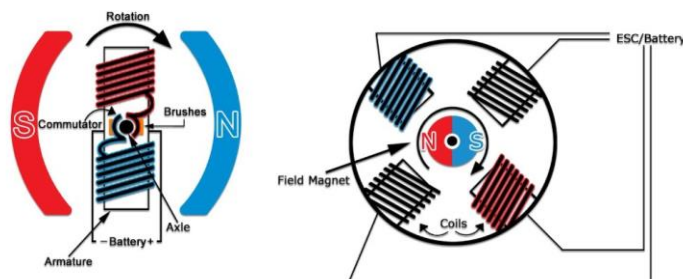
มาตรฐานความเร็วของสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์จะเท่ากับความเร็วของโรเตอร์ตลอดเวลา (Synchronism) เนื่องจากความถี่ของการตัดต่อของสวิตซ์โซลิตสแตตกำลังถูกควบคุมให้เท่ากับความเร็วของโรเตอร์โดยอัตโนมัติ เพราะวาร์บสัญญาณจากตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์

มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน เป็นวิวัฒนาการของมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้แปรงถ่านที่มีข้อจำกัดทางด้านการใช้วิธีการคอมมิวเตชันทางกล (Mechanical Commutation) ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการทำให้เกิดประกายไฟและเกิดการสึกหรอจากการคอมมิวเตชัน ซึ่งไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานที่ต้องหลีกเลี่ยงประกายไฟและต้องมีเวลาในการซ่อมบำรุงที่แน่นอนด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ได้เปลี่ยนวิธีการคอมมิวเตชันทางกลเป็นการคอมมิวเตชันโดยใช้เทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Commutation) ซึ่งไม่มีส่วนของการสัมผัสทางกลและนี่ก็คือที่มาของคำว่า "ไร้แปรงถ่าน" ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดดังรูปข้างล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.4 มอเตอร์กระแสตรงและมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

(ที่มา : <https://www.electrical4u.com>)

จากรูปเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นได้อย่างชัดเจนระหว่างมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้แปรงถ่าน (Brush DC Motor) กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

## 2.8 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

ระบบขับเคลื่อนความเร็วรอบแบบปราศจากตัวตรวจจับประกอบด้วย 4 ภาคส่วน ส่วนที่หนึ่งอินเวอร์เตอร์กำลังไฟฟ้า 3 เฟสที่ใช้อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งมอสเฟตกำลังในการเรียงกระแสไฟฟ้าในแต่ละคู่เฟสทำงานแบบอินเวอร์เตอร์ขึ้นบันไดหกระดับ ส่วนที่สองวงจรตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ อาศัยความสัมพันธ์ของคาบเวลาการเกิดจุดตัดผ่านศูนย์โดยอุปกรณ์ออปแอมป์เปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง ส่วนที่สามวงจรตรวจจับกระแสป้องกันแรงดันเกินสำหรับการควบคุมการทำงานแบบวงรอบปิดให้มีประสิทธิภาพและส่วนที่สี่วงจรควบคุมประมวลผลระบบดิจิทัล ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ควบคุมสัญญาณในการขับเคลื่อนมอเตอร์

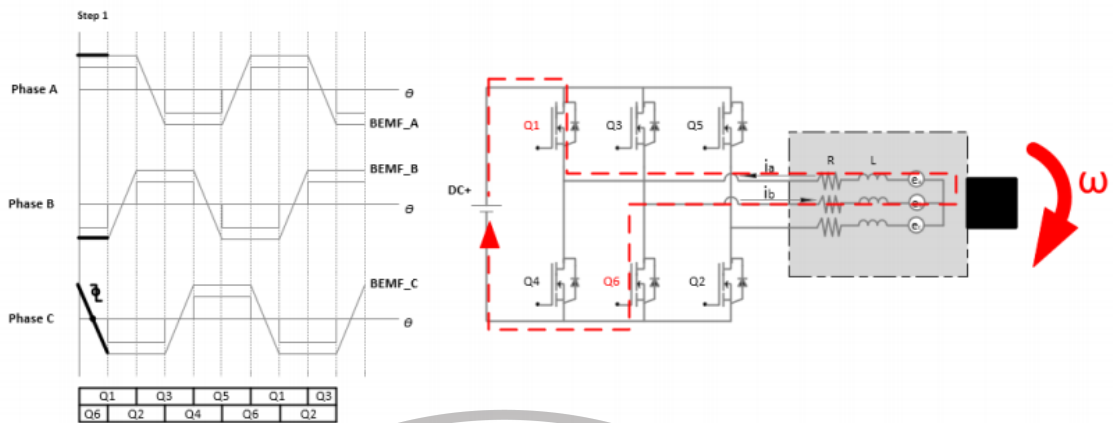
## 2.9 ลำดับการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา

ทิศทางการสับเปลี่ยนสวิตซ์ทางเดินของกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบการขับเคลื่อนแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม 120 องศา แต่ละขั้นการสับเปลี่ยนสวิตซ์จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับและกระแสไฟฟ้าแต่ละคู่เฟส โดนจะกล่าวถึงลำดับการทำงานทั้ง 6 ลำดับการสวิตซ์แสดงในรูปที่ 2.5-2.10 ตามลำดับการสับเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ ที่จะทำให้เกิด แรงเคลื่อนไฟฟ้า

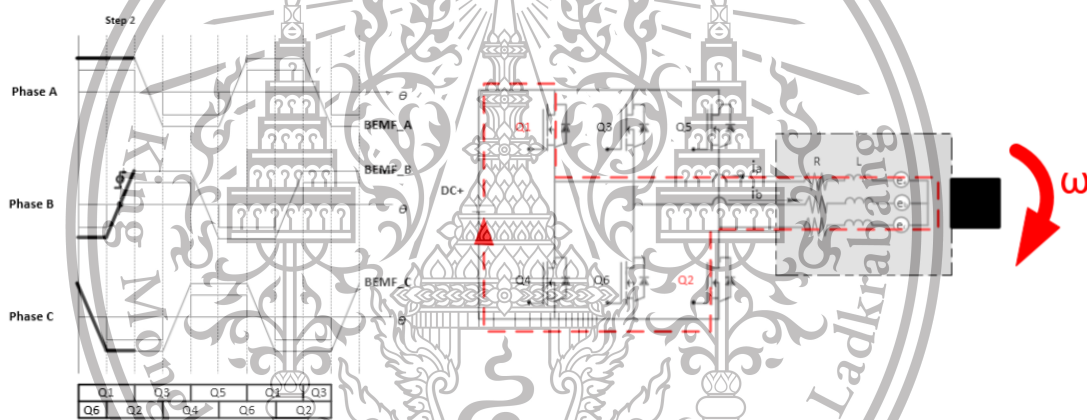
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.5 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q1, Q6) ทำงาน

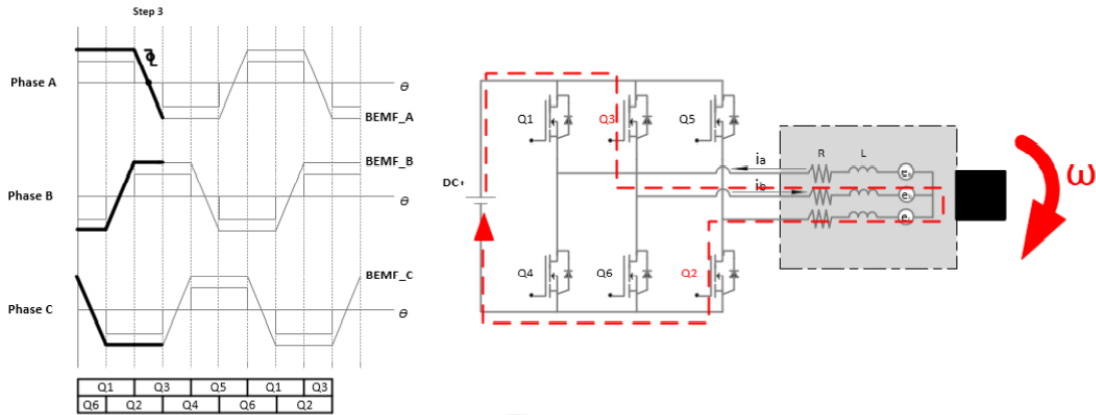


รูปที่ 2.6 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q1, Q2) ทำงาน

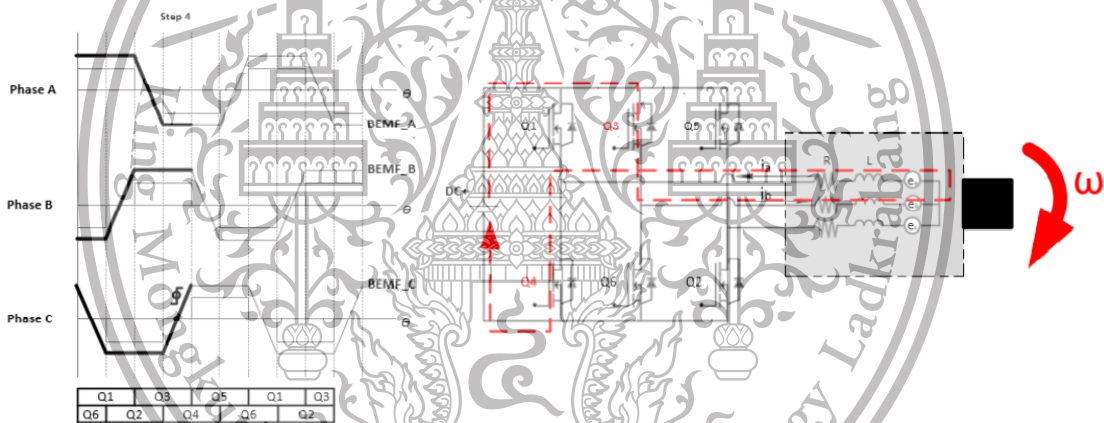
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.7 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q3, Q2) ทำงาน

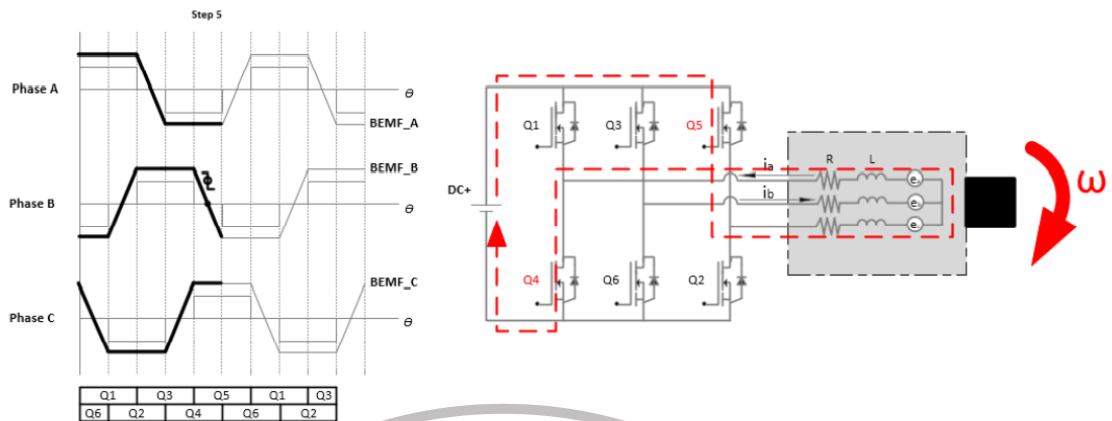


รูปที่ 2.8 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q3, Q4) ทำงาน

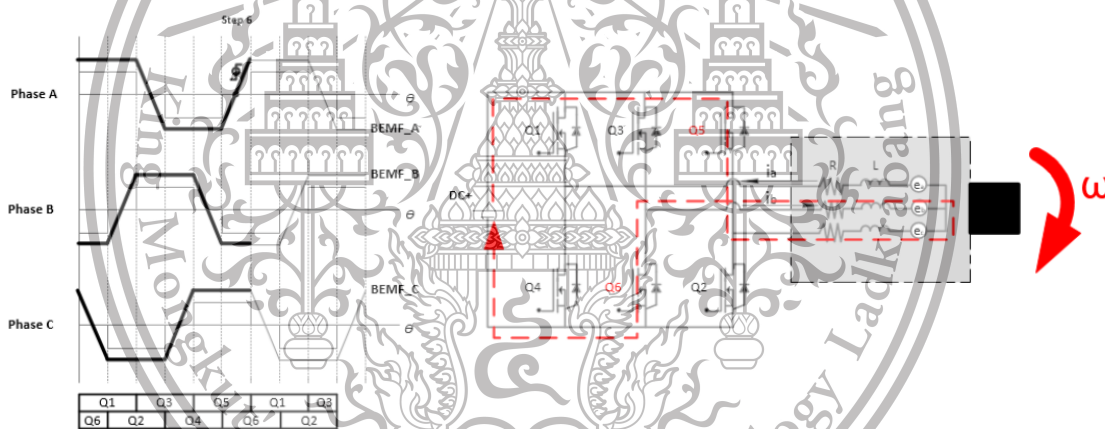
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.9 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q5, Q4) ทำงาน



รูปที่ 2.10 กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเมื่อมอสเฟต (Q5, Q6) ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.10 เซลล์แสงอาทิตย์

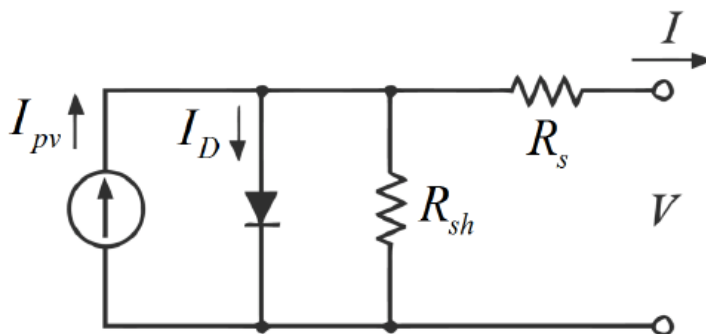
โฟโตโวลต์ทาคิก (Photovoltaic; PV) หรืออีกชื่อหนึ่งที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) เป็นอุปกรณ์ทรานสดิวซ์เซอร์ทางแสง (Photoelectric Transducers) ที่ทำการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้วัสดุไวแสง โดยจะพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วงเวลากลางวัน

2.10.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนโลก คือ ซิลิคอน จึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิคอนมาถู และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปน เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮลซึ่งมีประจุบวก) ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน อาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 มม.) ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีการนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าทีรับแสงจะมีลักษณะคล้ายกางปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเติมพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของแผงโซลาร์เซลล์

จากวงจรสมมูลของแผงโซลาร์เซลล์ประกอบไปด้วยไดโอด, ตัวต้านทาน(Load), ค่าความต้านทานภายในแผงโซลาร์เซลล์ และกระแสไฟฟ้าคงที่ ผลลัพธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์เซลล์ เกิดมาจากแหล่งพลังงานแสงที่กลบด้วยกระแสที่ไหลผ่าน ไดโอดและผ่านความต้านทาน shunt ขณะ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละจุดขึ้น



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

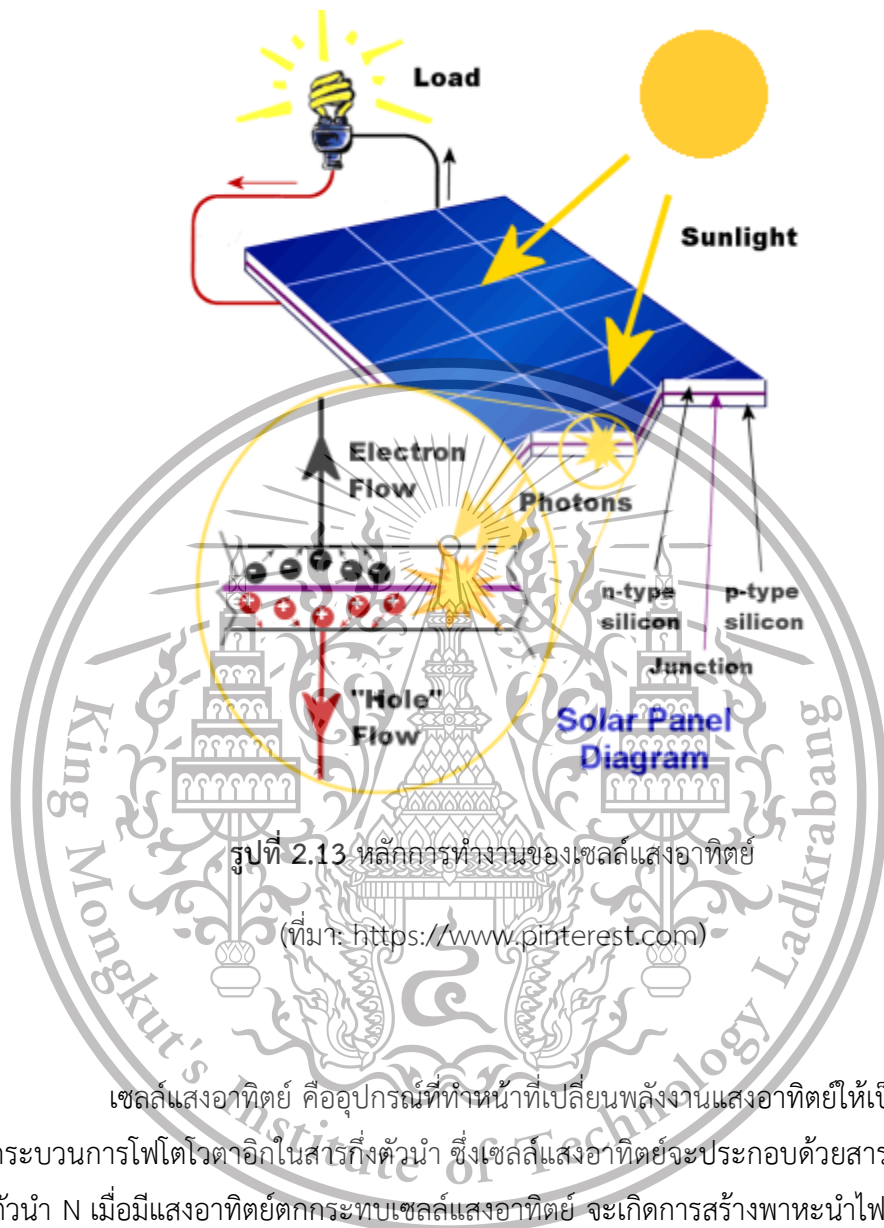
(ที่มา: <http://amministrazionelibera.org>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.10.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

(ที่มา: <https://www.pinterest.com>)

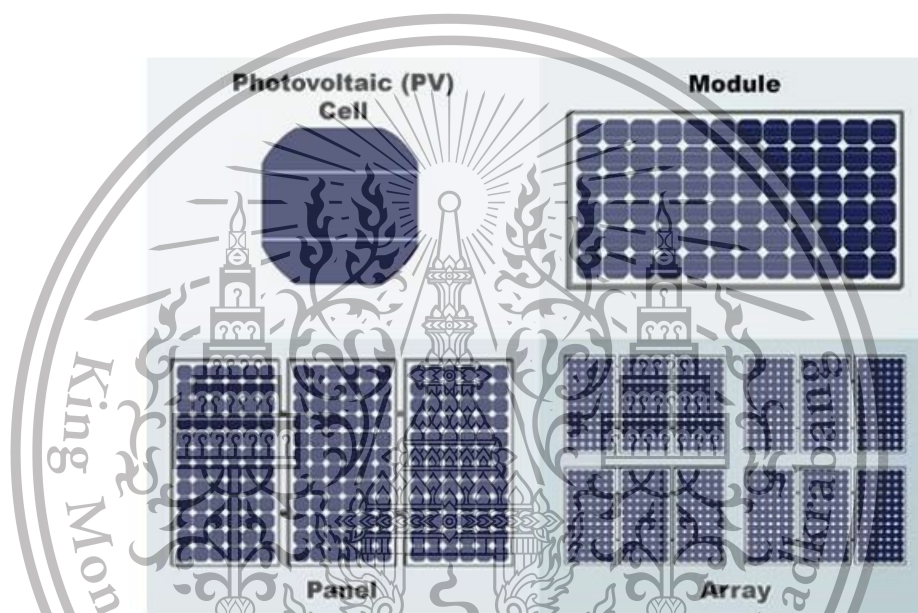
เซลล์แสงอาทิตย์ คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้กระบวนการโฟโตโวลตาอิกในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ P และสารกึ่งตัวนำ N เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและบวกขึ้น ได้แก่อิเล็กตรอนและโฮล โดยโครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก (โดยปกติที่ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วไฟฟ้านด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองเมื่อต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น

โดยปกติแล้วในเซลล์แสงอาทิตย์จะมีเซลล์ (Cell) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งรูปแบบในการต่อแต่ละเซลล์ของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น มี 2 รูปแบบ คือ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การต่ออนุกรมและการต่อขนาน ซึ่งการต่อเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์หนึ่งเซลล์จะมีค่าที่ต่ำมาก (ประมาณ 0.6-0.7 V) ทำให้การนำไปใช้จริงนั้น จะต้องทำการต่ออนุกรมเซลล์หลายๆตัวเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะทำให้แรงดันไฟฟ้ามีปริมาณที่สูงขึ้น หรือในกรณีที่ต้องการปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น ก็สามารถทำได้โดยการต่อขนานกัน ดังนั้นการต่ออนุกรมและการต่อขนานนั้นเป็นการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนนำไปใช้งาน ดังรูปภาพที่ 2.3 ซึ่งการต่อเซลล์หลายๆตัวรวมกันในแผงนั้นจะเรียกว่า Photovoltaic Module (PV) โดยหน่วยที่ใช้เรียกจำนวนแผงโซลาเซลล์นั้นคือ แผงหรือโมดูล (Module)



รูปที่ 2.14 รูปแบบการนำเซลล์ในแต่ละเซลล์มาต่อรวมกัน

(ที่มา: <https://www.quora.com/>)

2.10.3 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่วางจำหน่ายในตลาดของประเทศไทย สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ Crystalline และ Thin-Film ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแบบคริสตัลไลน์ (Crystalline Solar Cells) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากผลึกสารกึ่งตัวนำอาทิเช่น ซิลิกอน (S) เป็นต้น ซึ่งให้กำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่สูงกว่าแบบฟิล์มบาง (Thin Film) แต่ประสิทธิภาพลดลงอย่างมากเมื่อทำงานอุณหภูมิสูงและไม่ตอบสนองความถี่ทุกย่านของแสงอาทิตย์ ทำให้พลังงานที่ผลิตได้ต่อปีน้อยกว่าแบบฟิล์มบาง โดยแผงโซล่าเซลล์แบบคริสตัลไลน์นั้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิดดังนี้

1. แบบโมโนคริสตัลไลน์ (Mono Crystalline) หรือซิงเกิ้ลคริสตัลไลน์ (Single

Crystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นชนิดผลึกเดี่ยว โดยการนำซิลิกอน (S) ไปหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงถึง 1500 องศาเซลเซียส เพื่อสร้างแท่งผลึกขนาดใหญ่ก่อนไปตัดเป็นแผ่นเวเฟอร์ (Wafer) โดยแผงแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลึกเดี่ยวนั้นจะมีราคาแพงกว่าแบบโพลีคริสตัลไลน์แต่จะให้พลังงานไฟฟ้าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นที่ที่ติดตั้งโดยจะมีประสิทธิภาพประมาณ 15-20% เนื่องจากการเรียงตัวในแต่ละเซลล์ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพการทำงานลดลงอย่างมาก เมื่อทำงานในสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิสูง โดยการติดตั้งทั่วไปนั้นจะใช้พื้นที่ประมาณ 7-9 ตารางเมตรต่อกิโลวัตต์

2. แบบโพลีคริสตัลไลน์ (Poly Crystalline) หรือมัลติคริสตัลไลน์ (Multi Crystalline) หรือ แบบผลึกผสม ได้ถูกพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของแบบผลึกเดี่ยว โดยนำซิลิกอนมาหลอมให้เป็นเบาให้เป็นแท่งแล้วปล่อยให้เย็นตัวช้า ๆ ก่อนไปตัดเป็นแผ่นเวเฟอร์ (Wafer) เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกผสมมีประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่าแบบโมโนคริสตัลเล็กน้อยเพราะการเรียงตัวของผลึกในเซลล์ที่แตกต่างกันโดยแบบผลึกผสมนั้นจะประกอบไปด้วยผลึกเล็ก ๆ (Grain) เป็นจำนวนมากแต่แบบโมโนคริสตัลจะไม่มี Grain ซึ่งเซลล์แบบโพลีคริสตัลไลน์โดยปกติจะมีประสิทธิภาพประมาณ 13-16% ในปี พ.ศ. 2558 เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกผสมนั้นจะมีสัดส่วนบนทั้งตลาดมากที่สุดเพราะมีราคาถูกและกำลังไฟฟ้าสูง เมื่อเทียบกับพื้นที่ในการติดตั้งโดยการติดตั้งนั้นใช้พื้นที่ประมาณ 7.5-10 ตารางเมตรต่อกิโลวัตต์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทแบบฟิล์มบาง (Thin Film) จะมีความไวต่อแสงมากที่สุด ทำให้สามารถรับแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำ ๆ ได้ดี สามารถรับแสงในพื้นที่ที่มีเมฆหมอกฝุ่นละออง ท้องฟ้าครึ้มๆ มีฝนตกชุก หรือแสงจากหลอดไฟฟ้าได้และสามารถทำงานภายใต้อุณหภูมิสูงได้ดี จึงนิยมนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกา หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็ก เป็นต้น แต่มีข้อเสียคือให้กำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ในการติดตั้งไม่สูงมากจึงทำให้ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก แต่เทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปีสูงกว่าแบบคริสตัลไลน์เนื่องจากคุณสมบัติไวต่อแสง และตอบรับความถี่ทุกย่านของแสงอาทิตย์ โดยแบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

1. อะมอร์ฟัสซิลิกอน (Amorphous Silicon) มีประสิทธิภาพประมาณ 9-11% ใช้พื้นที่ในการติดตั้งประมาณ 14-20 ตารางเมตรต่อกิโลวัตต์
2. แคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride: CdTe) มีประสิทธิภาพประมาณ 9-11% ใช้พื้นที่ในการติดตั้งประมาณ 12-17 ตารางเมตรต่อกิโลวัตต์
3. คอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (Copper indium Diselenide: CIS) มีประสิทธิภาพประมาณ 10-12% ใช้พื้นที่ติดตั้งประมาณ 9-11 ตารางเมตรต่อกิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

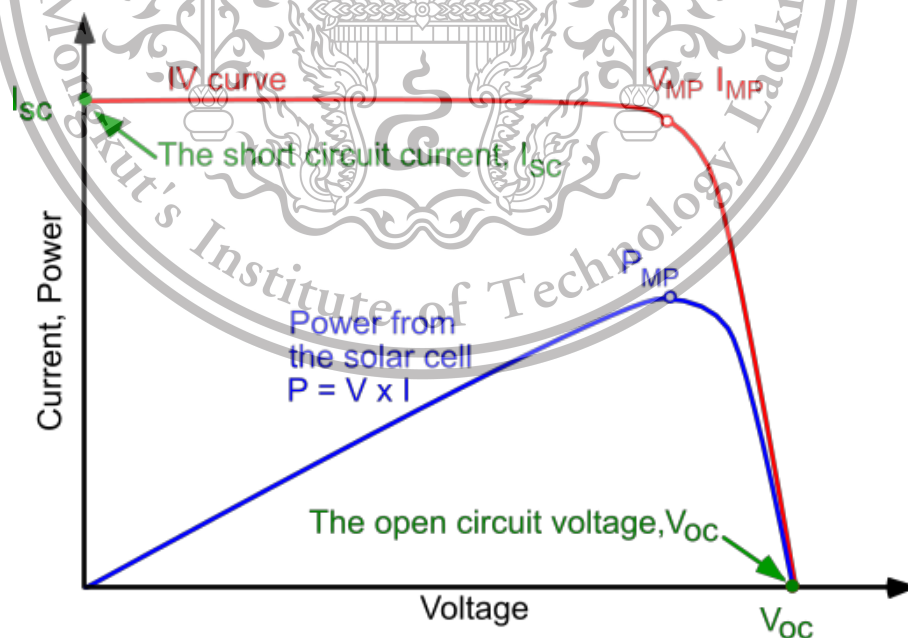
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.15 แผงเซลล์แสงอาทิตย์แสงแบบโมโนคริสตัลไลน์ แบบโพลีคริสตัลไลน์ และแบบอะมอร์ฟัสซิลิกอน ตามลำดับ  
(ที่มา: <https://www.solarreviews.com>)

#### 2.10.4 กราฟคุณลักษณะ I-V Curve และ P-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



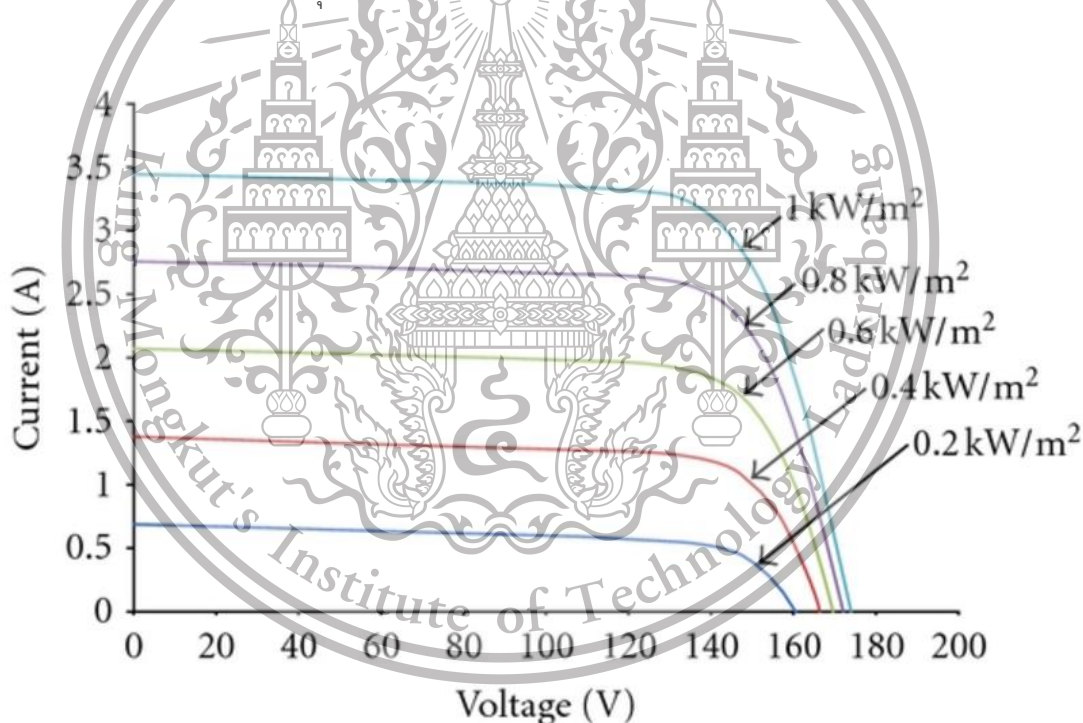
รูปที่ 2.16 กราฟคุณลักษณะ I-V Curve และ P-V Curve ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จาก I-V Curve ที่ ณ แรงดันเป็นศูนย์จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะลัดวงจรอยู่ค่าหนึ่ง (Short Circuit Current :  $I_{sc}$ ) และที่ ณ กระแสเป็นศูนย์จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะเปิดวงจรรค่าหนึ่ง (Open Circuit Voltage :  $V_{oc}$  หากอุณหภูมิและปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ จะสามารถสร้าง I-V Curve ได้ดังภาพที่ 2.10 และจะมีจุดสำคัญที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ Maximum Power Point ( $P_{mpp}$ ) โดยที่จุดนี้จะทำให้ทราบถึงค่ากระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด Current at Maximum Power Point ( $I_{mpp}$ ) กับแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด Voltage at Maximum Power Point ( $V_{mpp}$ ) สรุปก็คือ จาก P-V Curve จะทำให้ทราบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{mpp}$ ) ซึ่งเกิดจาก I-V Curve โดยการนำค่ากระแส ( $I_{mpp}$ ) กับค่าแรงดัน ( $V_{mpp}$ ) มาคูณกันเพื่อที่จะทราบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

2.10.5 กราฟคุณลักษณะ I-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง



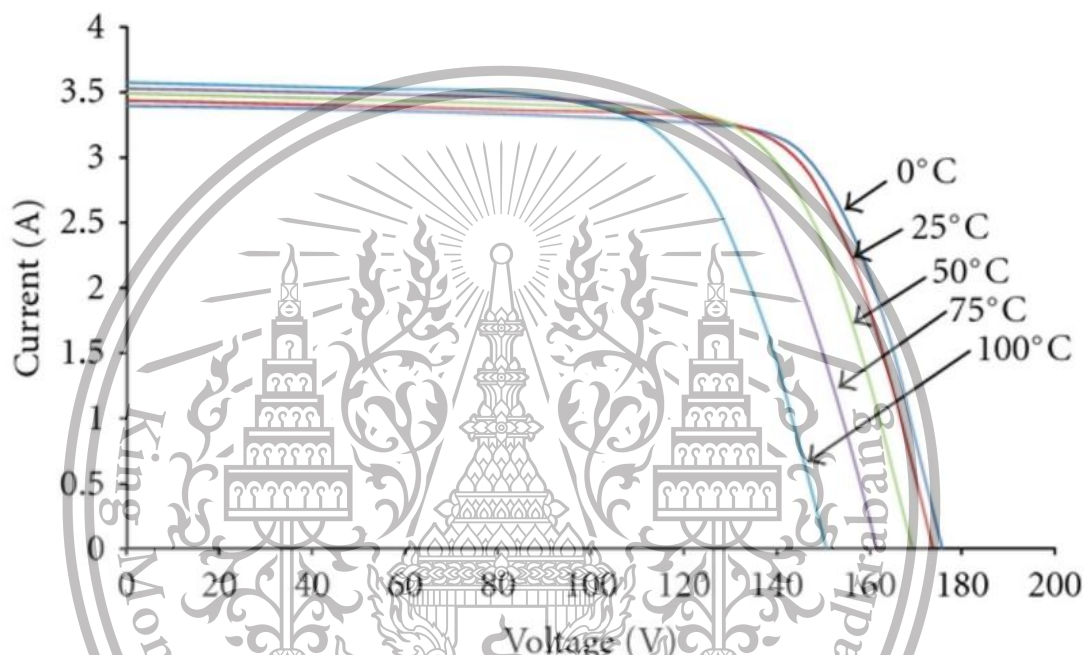
รูปที่ 2.17 กราฟคุณลักษณะ I-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

จากรูปที่ 2.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงกราฟคุณลักษณะ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยที่ค่าความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะสังเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

ค่ากระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ ณ ภายใต้สภาวะการควบคุมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มแสงที่ฉายลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มต่าง ๆ กันมีผลไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อปริมาณกระแสที่ผลิตได้ โดยพบว่าค่ากระแสแปรผันตรงกับค่าความเข้มแสงแสดงว่าเมื่อปริมาณค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ปริมาณกระแสก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับค่าแรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

### 2.10.6 กราฟคุณลักษณะ I-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 2.18 กราฟคุณลักษณะ I-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากรูปที่ 2.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงกราฟคุณลักษณะ I-V Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิ ซึ่งจะสังเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ ณ ภายใต้สภาวะการควบคุมที่ให้ปริมาณความเข้มแสงที่ฉายลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าคงที่  $1000 \text{ W/m}^2$  แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิต่างๆ สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิมีผลต่อแรงดันที่ผลิตได้ จะพบว่าค่าแรงดันแปรผกผันกับค่าของอุณหภูมิ แสดงว่าค่าแรงดันที่วัดได้จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนค่ากระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จะเห็นได้ว่า ค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิ มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ นั้นแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันแปรตามสภาพแวดล้อม ซึ่งจะส่งผลต่อผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในอนาคต ดังนั้นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด จึงมีการนำความรู้ทางเทคโนโลยีและระบบควบคุมมาประยุกต์ใช้ โดยมีจุดประสงค์ที่จะนำมาช่วยควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือก็คือ Maximum Power Point Tracking (MPPT)

## 2.11 ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking : MPPT)

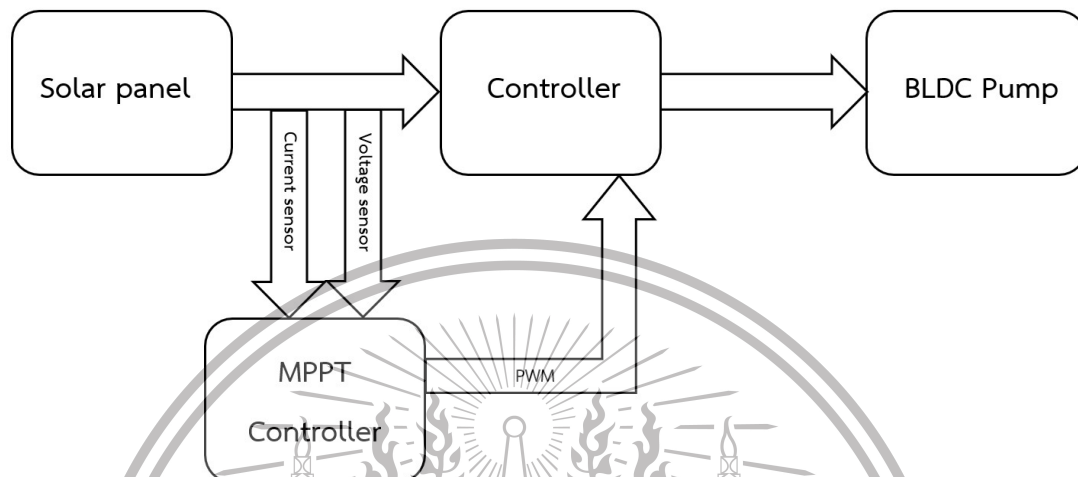
Maximum Power Point Tracking หรือ MPPT คือ ขั้นตอนวิธีหรืออัลกอริทึม (Algorithm) ที่ถูกรวมเข้าไว้ในอุปกรณ์ควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งใช้ในการทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงสุด (Maximum Power) ทั้งนี้ กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความเข้มของแสงอาทิตย์ (Solar Radiation), อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (Ambient Temperature) และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell Temperature) ซึ่งระบบ MPPT ได้รับการออกแบบให้ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์สำหรับการตรวจสอบคำสั่งไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดเวลา เพื่อให้ได้ค่ากำลังผลิตสูงสุดในแต่ละเวลาตามค่าความเข้มแสงในแต่ละช่วงเวลาในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ด้วยขั้นตอนวิธีของ MPPT ที่จะทำให้ได้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น หากตรวจสอบพบว่า กลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกสูงกว่า จะย้ายจุดควบคุมไปยังแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น

หลักการสำคัญของระบบ MPPT คือ ดึงกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุดโดยการทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุด กล่าวคือ MPPT ทำงานโดยการตรวจสอบที่เอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในระบบ จากนั้นกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายออกเพื่อทำการประจุลงในแบตเตอรี่ และทำการแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการประจุแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Load) ที่ต่อโดยตรงกับแบตเตอรี่ได้อีกด้วยระบบ MPPT จะมีประสิทธิภาพที่สูง ภายใต้สภาวะเหล่านี้

1. สภาวะอากาศเย็นหรือฤดูหนาว โดยปกติ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำถึงแม้ในช่วงฤดูหนาวที่มีอากาศเย็น จะมีช่วงเวลาการตกกระทบของแสงอาทิตย์ (Sun hours) น้อย หากมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยระบบ MPPT จะทำให้เกิดการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดมาก

เอกสารนี้เป็นยิ่งขึ้นไปอีก แต่จะมีการสูญเสียพลังงานน้อยมาก ศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สภาวะที่มีการประจุแบตเตอรี่ต่ำ เนื่องจากยังมีอัตราการประจุแบตเตอรี่ต่ำ จะทำให้กระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ MPPT มากขึ้น



รูปที่ 2.19 การนำ MPPT มาควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้า

## 2.12 ทฤษฎีระบบควบคุม

พื้นฐานของระบบควบคุม ระบบการควบคุม คือรูปแบบของระบบใด ๆ ที่มีการจัดองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในระบบเพื่อให้มีผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่ต้องการ โดยเราจะนำแนวคิดพื้นฐานของระบบมาช่วยในการวิเคราะห์นั่นก็คือ หลักการของเหตุและผล โดยคำนึงผลจากปัจจัยทั้งสาม

1. วัตถุประสงค์ของการควบคุม (Input)
2. กระบวนการ ขั้นตอน หลักที่ใช้ในการควบคุม (Process)
3. ค่าที่ได้จริง (Output)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

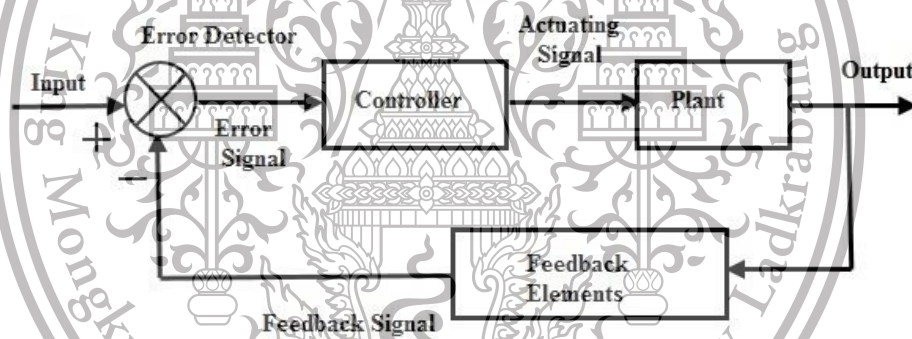
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.20 พื้นฐานของระบบควบคุม

โดยที่ประเภทของการควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การควบคุมแบบวงเปิด
2. การควบคุมแบบวงปิด



รูปที่ 2.21 ระบบควบคุมแบบวงปิด

ประเภทของการควบคุมแบบป้อนกลับสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

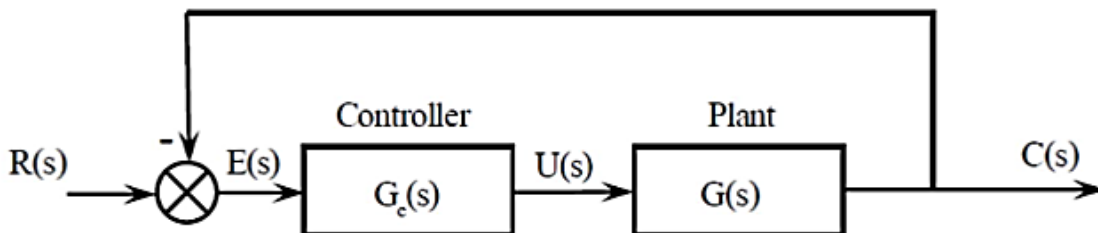
1. การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)
2. การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)
3. การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)
4. การควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัล (Proportional Plus Integral Control)
5. การควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลบวกอนุพันธ์ (Proportional Plus Integral plus Derivative Control)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.12.1 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลบวกอนุพันธ์ (Proportional Plus Integral plus Derivative Control)



รูปที่ 2.22 การควบคุมแบบพีไอดี (PID Control)

การควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลบวกอนุพันธ์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การควบคุมแบบพีไอดี จะเป็นการนำการควบคุมพื้นฐานทั้ง 3 อย่าง คือ การควบคุมแบบสัดส่วน, การควบคุมแบบอินทิกรัล และ การควบคุมแบบอนุพันธ์มารวมกัน ซึ่งเป็นการนำข้อดีทั้งสามอย่างมารวมกันเพื่อมาแก้จุดด้อยของแต่ละตัว ซึ่งทำให้ระบบมีความเสถียรมากกว่าการควบคุมอื่นๆ โดยมี สมการพื้นฐาน คือ

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_I}{T_I} \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3)$$

โดย  $u(t)$  คือ ผลการตอบสนองของระบบควบคุม

$e(t)$  คือ ค่าความผิดพลาด = SP-PV

$K_p$  คือ อัตราขยายค่าสัดส่วน

$K_I$  คือ อัตราขยายค่าปริพันธ์

$K_D$  คือ อัตราขยายค่าอนุพันธ์

$t$  คือ เวลา

$T_I$  คือ เวลาในการอินทิกรัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

วิธีคำนวณของ PID จะขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัวแปรคือ ค่าสัดส่วน (Proportional : P), ค่าปริพันธ์ (Integral : I) และอนุพันธ์ (Derivative : D) ค่าสัดส่วนจะกำหนดจากผลของค่าความผิดพลาดในปัจจุบัน ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ผ่านมา และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามตัวแปรนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการบนระบบควบคุมโดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับกระบวนการที่ต้องการ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาดคือ ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และ ค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) ข้อดีของตัวควบคุมนี้คือทำให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วขึ้นที่อยู่ในค่าที่ยอมรับได้ แต่วิธี PID ไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุด หรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรที่แน่นอน

### 2.13 พลศาสตร์ของไหลและสมการแบร์นูลลี

เมื่อมีอนุภาคของไหลเคลื่อนที่แรงลัพธ์ที่กระทำต่อของไหลเป็นไปตามกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) คือ แรงลัพธ์ที่กระทำต่อของไหลเท่ากับมวลคูณด้วยความเร่งของอนุภาค ดังสมการ

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

(2.4)

เนื่องจากการไหลไม่มีความหนืดดังนั้นแรงลัพธ์ที่กระทำต่ออนุภาคของไหลประกอบด้วยแรงลัพธ์จากความดันและแรงลัพธ์จากแรงโน้มถ่วง (น้ำหนักอนุภาค)

โดยพิจารณาการไหลใน 2 มิติ ในพิกัด  $(x, y)$  หากการไหลเป็นการไหลในสภาวะคงตัว (Steady flow) นั่นคือ การไหลในแต่ละตำแหน่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา เราจะพบว่าอนุภาคของไหลแต่ละอนุภาคจะเคลื่อนที่ต่อเนื่องกันผ่านแนวการไหลแต่ละเส้นทาง เช่น หากอนุภาคทุกอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านจุดที่ 1 ย่อมเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 2 หากให้อนุภาคเคลื่อนที่ด้วยเวกเตอร์ความเร็ว  $V$  แนวการไหลแต่ละเส้นทาง คือ เส้นสัมผัสกับเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ต่อ ๆ กัน ซึ่งเรียกว่า สตรีมไลน์ (Streamline) ถ้ากำหนดพิกัดตามสตรีมไลน์เป็น  $s$  และพิกัดที่ตั้งฉากกับสตรีมไลน์เป็น  $n$  อนุภาค การเคลื่อนที่ของอนุภาคกำหนดได้จากระยะการเคลื่อนที่ได้  $s = s(t)$  ตามแนวสตรีมไลน์แต่ละแนว

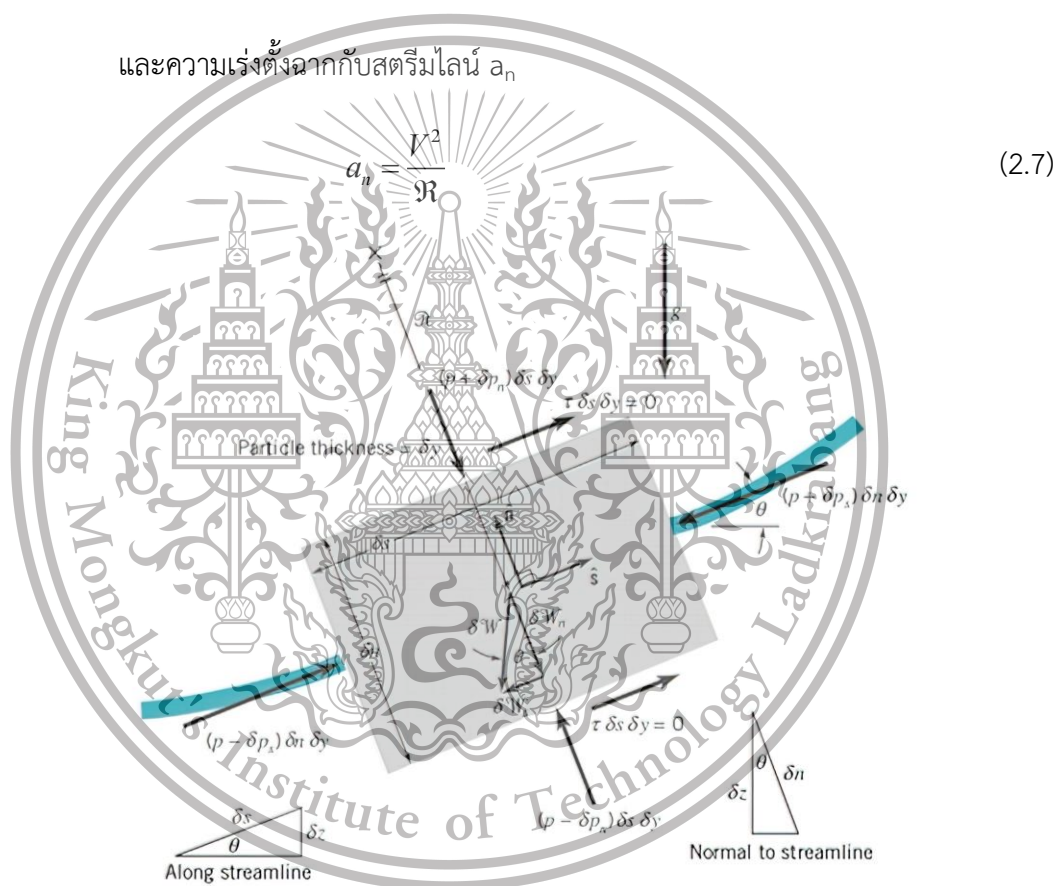
และรัศมีความโค้งของสตรีมไลน์  $R=R(s)$  ดังนั้นความเร็วของอนุภาค  $V = ds/dt$  ความเร่งของอนุภาคมีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ ความเร่งตามแนวสตรีมไลน์  $a_s = dV/dt$  จากกฎลูกโซ่ (Chain rule)

$$a_s = \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial s} \frac{ds}{dt} \quad (2.5)$$

ดังนั้น

$$a_s = V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.6)$$

และความเร่งตั้งฉากกับสตรีมไลน์  $a_n$



รูปที่ 2.23 แผนภาพวัตถุอิสระ (free-body diagram) ของอนุภาคของไหล

(ที่มา: <http://www2.dede.go.th>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

พิจารณาอนุภาคขนาด  $\delta_x \delta_y$  ในแนวระนาบ และหนา  $\delta y$  ในแนวตั้งฉากกับระนาบ ดังรูป อนุภาคมีมวล  $\delta m$  กำหนดให้เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแนวสตริมไลน์ คือ  $s$  ตั้งฉากกับแนวสตริมไลน์คือ  $n$  สำหรับการไหลในสภาวะคงตัว ใช้กฎข้อที่สองของนิวตันตามแนวสตริมไลน์เมื่อ

$$\sum \delta F_s = \delta m a_s \quad (2.8)$$

$\sum \delta F_s$  คือ ผลรวมของแรงในแนวสตริมไลน์ เนื่องจาก  $\delta m = \rho \delta V$  และ  $a_n = \frac{v^2}{R}$

ดังนั้น

$$\sum \delta F_s = \rho \delta V \frac{v^2}{R} \quad (2.9)$$

โดยที่  $\delta W_n$  คือ แรงจากน้ำหนักในทิศตั้งฉากกับแนวสตริมไลน์

$$\delta W_n = -\delta W \cos \theta = -\gamma \delta V \cos \theta \quad (2.10)$$

$\delta F_{pn}$  คือ แรงจากความดันในทิศตั้งฉากกับแนวสตริมไลน์

ความดันที่กระทำต่อด้านของอนุภาคที่แต่ละด้านในทิศ  $n$  คือ  $p + \delta P_n$

ดังนั้น

$$\delta F_{pn} = (p - \delta P_n) \delta s \delta y - (p + \delta P_n) \delta s \delta y = -2\delta P_n \delta s \delta y \quad (2.11)$$

ประมาณค่า  $\delta P_n$  ได้จากอนุกรมเทเลอร์อันดับหนึ่ง

$$\delta P_n \approx \frac{\partial p}{\partial n} \frac{\delta n}{2} \quad (2.12)$$

ดังนั้น

$$\delta F_{pn} \approx \frac{\partial p}{\partial n} \delta n \delta s \delta y = -\frac{\partial p}{\partial n} \delta V \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นสรุปได้ว่าที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\sum \delta F_n = \left(-\gamma \cos \theta - \frac{\partial p}{\partial n}\right) \delta V \quad (2.14)$$

ได้สมการตามกฎข้อที่สองของนิวตันตามทิศ  $n$

$$-\gamma \cos \theta - \frac{\partial p}{\partial n} = \rho \frac{v^2}{\mathcal{R}} \quad (2.15)$$

เนื่องจาก  $\cos \theta = \frac{dz}{dn}$  ดังนั้น

$$-\gamma \frac{dz}{dn} - \frac{\partial p}{\partial n} = \rho \frac{v^2}{\mathcal{R}} \quad (2.16)$$

พิจารณาสมการข้างต้นเมื่อ  $s$  คงที่  $p(s, n) = p(n)$  และ  $\frac{\partial p}{\partial n} = \frac{dp}{dn}$

$$-\gamma \frac{dz}{dn} - \frac{dp}{dn} = \rho \frac{v^2}{\mathcal{R}} \quad (\text{constant across the streamline}) \quad (2.17)$$

เนื่องจาก  $\gamma = \rho g$  และความเร่งจากแรงโน้มถ่วง  $g$  เป็นค่าคงที่

$$\int \frac{dp}{\rho} + \int \frac{v^2}{\mathcal{R}} dn + gz = C \quad (\text{constant across the streamline}) \quad (2.18)$$

กรณีเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้และมีข้อกำหนดเช่นเดียวกับสมการแบร์นูลลีแต่เพียงใช้กับทิศตั้งฉากกับแนวสตรีมไลน์

$$p + \rho \int \frac{v^2}{\mathcal{R}} dn + \gamma z = \text{constant across the streamline} \quad (2.19)$$

ในสมการแบร์นูลลีทั้ง 3 พจน์และค่าคงที่ในสมการมีมิติเป็นความดันหรือแรงต่อหนึ่งหน่วยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ( $F/L^2$ ) จึงเรียกแต่ละพจน์ ดังนี้

$P$  เรียกว่า ความดันสถิต (static pressure)

$V^2$  เรียกว่า ความดันไดนามิก (dynamic pressure)

$\gamma z$  เรียกว่า ความดันไฮโดรสแตติก (hydrostatic pressure)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนและเรียกค่าคงที่ว่า ความดันรวม (total pressure) ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 + \gamma z + P_T \quad (\text{constant along a streamline}) \quad (2.20)$$

## 2.14 เฮด (Head)

การเข้าใจถึงพลังงานของของไหลเป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์การทำงานและการกำหนดขนาดของ ปั๊ม พลังงานของของไหลประกอบด้วยพลังงานสามส่วนคือ พลังงานเนื่องจากความดันของของไหล พลังงาน จลน์เนื่องจากความเร็วของของไหล และพลังงานศักย์เนื่องจากความสูง พลังงานทั้งสามส่วนนี้จะมีหน่วยในการ คำนวณเป็นหน่วยจูล (J) เมื่อนำพลังงานของไหลมาคำนวณเทียบกับน้ำหนักของของไหล จะมีหน่วยเป็นความสูงของของไหล และเรียกว่า เฮด มีหน่วยเป็นเมตร (m) ในระบบ SI หรือนิ้ว (in) ในระบบอังกฤษ เฮดทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในระบบปั๊มน้ำหรือ Total Dynamic Head (TDH) ประกอบด้วย พลังงานสามส่วนของของไหลของไหลที่กล่าว มาข้างต้นและพลังงานที่สูญเสียไปในระหว่างการไหล กล่าวคือ เฮดความดัน เฮดความเร็ว เฮดความสูง และเฮด การสูญเสียรวม

2.14.1 เฮดความดัน (Pressure Head,  $H_p$ ) ค่าความดันนอกจากจะบอกเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เช่น นิวตันต่อตารางเมตร (N/m<sup>2</sup>) หรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) แล้ว ถ้าป็นความดันของเหลวก็มักจะนิยมบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่จะก่อให้เกิดความดันที่กำหนดบนผิวหน้าซึ่งรองรับแท่งของเหลวนั้น ความดันซึ่งบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวนี้เรียกว่า เฮดความดัน (Pressure Head) โดยความสัมพันธ์ระหว่างความดัน  $P$  และเฮดความดัน  $H_p$  คือ

$$H_p = \frac{P}{\gamma} = \frac{P}{\rho g} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ น้ำหนักจำเพาะ (N/m<sup>3</sup>)

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของไหล (kg/m<sup>3</sup>)

เมื่อ  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s<sup>2</sup>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.14.2 เสดความเร็ว (Velocity Head,  $H_v$ ) ของเหลวที่ไหลในท่อหรือทางน้ำปิดด้วย ความเร็วใดๆ นั้นมีพลังงานจลน์อยู่ พลังงานส่วนนี้เมื่อบอกในรูปของเสดความเร็ว คือ

$$H_v = \frac{V^2}{2g} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $V$  คือ น้ำหนักจำเพาะ ( $N/m^3$ )

เสดความเร็วอาจให้คำจำกัดความอีกอย่างหนึ่งว่า เป็นความสูงที่ของเหลวตกลงมาด้วย แรงดึงดูดของโลกจนได้ความเร็วเท่ากับความเร็วในการไหลของของเหลวนั้น

2.14.3 เสดสถิตย์ (Potential Head,  $Z$ ) เสดสถิตย์ คือระยะทางตามแนวตั้งของ ของเหลวที่ไหลผ่านท่อหรือทางน้ำเปิดซึ่งมีพลังงานศักย์อยู่ ภายใน พลังงานศักย์ส่วนนี้สามารถเขียนในรูป เสดความสูง ( $Z$ )

2.14.4 เสดการสูญเสียรวม (Total Head Loss,  $H_L$ ) Osborne Reynolds วิศวกรชาว ฝรั่งเศสได้ทำการทดลองเพื่อแบ่งรูปแบบการไหลของของไหล โดย กำหนดตามอัตราส่วนของแรงเฉื่อย ต่อแรงหนืด (หรือแรงที่เกิดเนื่องจากความฝืดของของไหล) และเรียก อัตราส่วนของแรงเฉื่อยกับแรงหนืด นี้ว่า ค่าเรย์โนลด์ ( $Re$ ) คำนวณหาได้จากสมการ

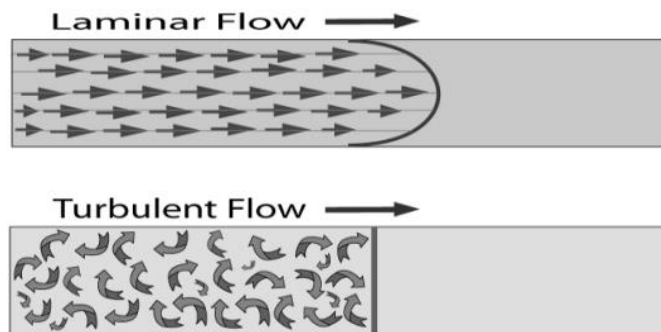
$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $V$  คือ ความเร็วของการไหล ( $m/s$ )  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $m$ )  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของไหล ( $kg/m^3$ )  $\mu$  คือ ความหนืดสัมบูรณ์ ( $Ns/m^2$ ) และ  $\nu$  คือ ความหนืดจลน์ ( $m^2/s$ ) โดยถ้าค่า  $Re \leq 2000$  ถือว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ  $Re \geq 4000$  ถือว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน และ  $2000 \leq Re \leq 4000$  ถือว่าเป็นการไหลที่อยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.24 ลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (บน) และแบบปั่นป่วน (ล่าง)

(ที่มา: <http://www2.dede.go.th>)

ในขณะที่ของไหลไหลผ่านระบบท่อทั้งทางด้านจุดและด้านจ่าย พลังงานหรือเฮดในการไหลส่วนหนึ่ง จะสูญเสียไปเนื่องจากความฝืดระหว่างของไหลกับผนังภายในของท่อ และพลังงานหรือเฮดในการไหลอีกส่วน หนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากการสูญเสียพลังงานจลน์เมื่อไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ผลรวมของการสูญเสียพลังงาน หรือเฮดทั้งสองส่วนนี้รวมเรียกว่าเฮดการสูญเสียรวม

2.14.5 การเสียเฮดความฝืดหรือการสูญเสียหลัก เมื่อของไหลภายในท่อจะเกิดแรงเสียดทานระหว่างผนังท่อกับของไหล ซึ่งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดความดันสูญเสียของของไหลภายในท่อ การสูญเสียพลังงานในลักษณะนี้เรียกว่าการเสียเฮดความฝืดหรือการสูญเสียหลัก (Major Losses) โดยสามารถคำนวณได้จากวิธีคำนวณของ Darcy - Weisbach

$$H_{L_f} = f \frac{LV^2}{D 2g} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $H_{L_f}$  คือ เฮดของการสูญเสียเนื่องจากความฝืด หรือเฮดสูญเสียหลัก (m)  $f$  คือ ตัวประกอบความเสียดทาน  $L$  คือ ความยาวท่อ (m)  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m) และ  $V$  คือ ความเร็วของการไหล (m/s)

ค่าตัวประกอบความเสียดทาน  $f$  ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของท่อ ลักษณะการไหลว่าเป็นแบบราบเรียบหรือ แบบปั่นป่วนและความขรุขระของผนังท่อ ( $\epsilon$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

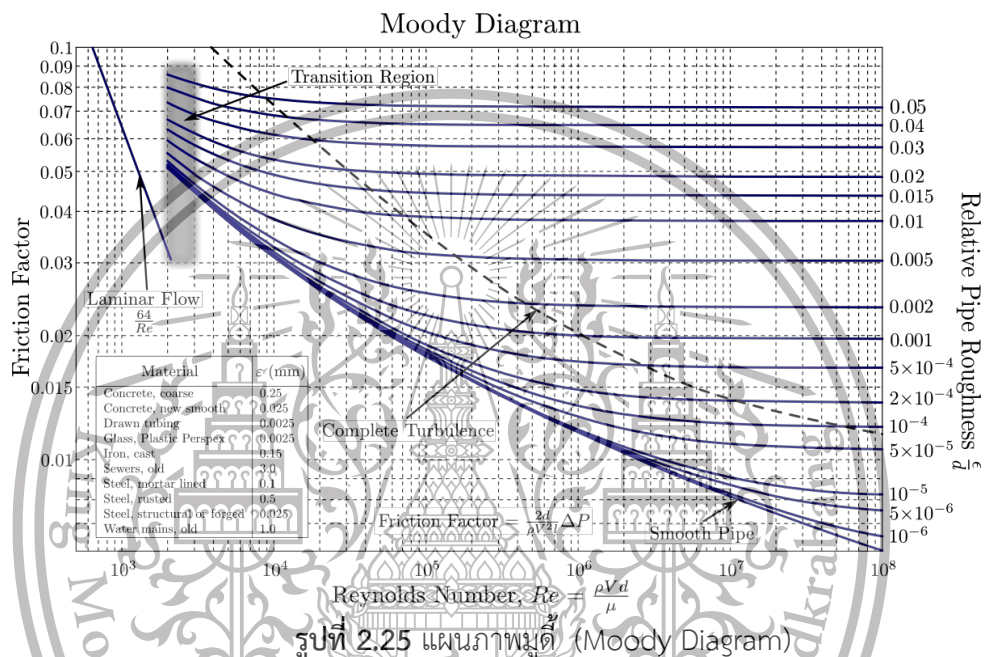
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Laminar Flow } Re \leq 2000 \quad (2.25)$$

สำหรับการไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่มีค่าเรย์โนลด์มีค่ามากกว่าประมาณ 4,000 นั้น ค่าตัวประกอบความเสียดทาน  $f$  ก็จะขึ้นอยู่กับทั้ง  $Re$  และอัตราส่วนระหว่างความขรุขระของผนังท่อต่อความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ( $D$ ) ค่าความขรุขระของผนังท่อ ( $\varepsilon$ ) ขึ้นอยู่กับชนิดของท่อ และการหาค่าตัวประกอบความเสียดทาน  $f$  นั้นสามารถทำได้จากแผนภาพมูดี (Moody Diagram) ดังแสดงในรูป

2.19



รูปที่ 2.25 แผนภาพมูดี (Moody Diagram)

(ที่มา: <http://www2.dede.go.th>)

2.14.6 การเสียดเนื่องจาก การไหลผ่านอุปกรณ์หรือการสูญเสียรอง ในระบบท่อ จำเป็นต้องมีส่วนประกอบจำพวก ข้อต่อ ข้อลด ข้อขยาย และวาล์วชนิดต่างๆ การไหลของของเหลวผ่านอุปกรณ์ดังกล่าว จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์การไหล การสูญเสียเนื่องจาก การไหลผ่านอุปกรณ์ในระบบทูดังกล่าวเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า การสูญเสียรอง (Minor Losses) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$H_{Le} = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อ  $H_{Le}$  คือ เฮดของการสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์ หรือเฮดสูญเสียรอง (m) K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล ขึ้นอยู่กับชนิดและอุปกรณ์และ  $V$  คือ ความเร็วของการไหล (m/s)

ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง K สามารถหาได้จากตารางหรือจากกราฟของอุปกรณ์ประกอบท่อแต่ละ ชนิดเช่นวาล์ว ข้อต่อ และข้องอต่างๆ ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองของอุปกรณ์แต่ละชนิด รูป 2.19 ถึงรูป 2.23 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ประกอบท่อ



รูปที่ 2.26 ลักษณะโครงสร้างของโกลบวาล์ว

รูปที่ 2.27 ลักษณะโครงสร้างของเกตวาล์ว



รูปที่ 2.28 Swing Check Valve

รูปที่ 2.29 Ball Check Valve



รูปที่ 2.30 ข้อต่อตัว T และข้องอ 90 และ 45 องศา

(ที่มา: <http://www2.dede.go.th>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า Loss coefficients ( $K_L$ ) ของวาล์วและข้อต่อต่างๆ

Valve or Fitting	Loss coefficients ( $K_L$ )
1. Globe Valve	
Fully open	10.0
$\frac{3}{4}$ Open	12.5
2. Gate Valve	
Fully Open	0.19
$\frac{3}{4}$ Open	0.90
$\frac{1}{2}$ Open	4.5
$\frac{1}{4}$ Open	24.0
3. Swing check valve	
Through flow	2.0
Blocked flow	$\infty$
4. Tee	
Line flow	0.40
Branch flow	1.5
5. Elbow	
$45^\circ$	0.40
$90^\circ$	0.75
6. Return bend	2.2

การสูญเสียพลังงานทั้งหมดในการไหลของไหลประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากการเสียดสีหรือการสูญเสียหลักและการสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์หรือการสูญเสียรองดังแสดงในสมการ

$$H_L = H_{L_f} + H_{L_e} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.15 การวิเคราะห์การใช้พลังงานระบบปั๊มน้ำ

การวิเคราะห์การใช้พลังงานในระบบปั๊มน้ำนั้น เป็นขั้นตอนสำคัญในการหาประสิทธิภาพของปั๊มน้ำ เพื่อประเมินแนวทางในการเดินเครื่องจักรอุปกรณ์รวมถึงการอนุรักษ์พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพได้

2.15.1 กำลังไฮดรอลิก กำลังไฮดรอลิก (Hydraulic Power,  $P_H$ ) หมายถึงกำลังที่ปั๊มจ่ายให้ของเหลวโดยผ่านใบพัดที่หมุน มี หน่วยเป็น kW ในหน่วยเมตริก สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่าง

$$P_H = \frac{\gamma \times Q \times TDH}{1000} \quad (2.28)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ น้ำหนักจำเพาะของไหล ( $N/m^3$ )  $Q$  คือ อัตราการสูบของปั๊มน้ำ ( $m^3/s$ ) และ  $TDH$  คือ เหนรวมของปั๊ม Total Dynamic Head (m)

เนื่องจากกำลังขนาด 1 แรงม้า มีค่าเทียบเท่ากับ 0.746 kW กำลังม้าไฮดรอลิก (Hydraulic Horsepower) ในหน่วยแรงม้า (HHP) จึงสามารถคำนวณได้จาก

$$HHP = \frac{P_H}{0.746} \quad (2.29)$$

ในหน่วยอังกฤษ กำลังม้าไฮดรอลิกสามารถคำนวณได้จาก

$$HHP = \frac{\gamma \times Q \times TDH}{1000} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ น้ำหนักจำเพาะของไหล ( $lb/ft^3$ )  $Q$  คือ อัตราการสูบของปั๊มน้ำ ( $ft^3/s$ ) และ  $TDH$  คือ เหนรวมของปั๊ม Total Dynamic Head (ft)

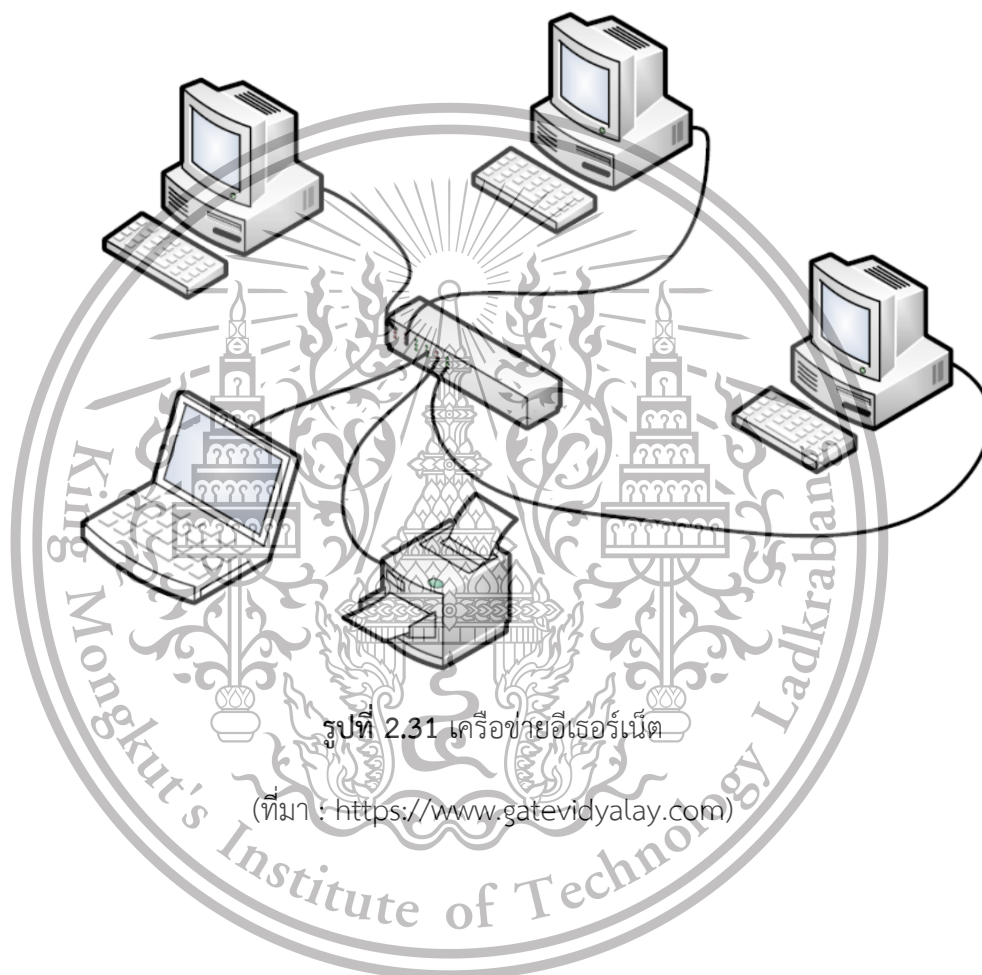
ในกรณีที่อัตราการสูมมีหน่วยเป็นอเมริกันแกลลอนต่อนาที (gpm) และ TDH มีหน่วยเป็นฟุต กำลังม้าไฮดรอลิกสามารถคำนวณได้จาก

$$HP = \frac{gpm \times TDH}{3960} \quad (2.31)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.16 อีเธอร์เน็ต

อีเธอร์เน็ต (Ethernet) คือเทคโนโลยีเครือข่ายที่เป็นฐานหลักของเทคโนโลยีสารสนเทศทั้งหมด เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีเครือข่ายแบบท้องถิ่นซึ่งเป็นที่นิยมมากที่สุด มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการยากที่จะพัฒนาเทคโนโลยีใหม่มาแทนที่ได้ เทคโนโลยีนี้ได้ถูกพัฒนาและปรับปรุงภายใต้ความดูแลและรับผิดชอบของสถาบัน IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineer)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.16.1 สถาปัตยกรรม IEEE 802.3 อีเธอร์เน็ต อีเธอร์เน็ตกับ CSMA/CD หมายถึงระบบเครือข่ายชนิดเดียวกันเนื่องจากอีเธอร์เน็ตจะใช้โปรโตคอล CSMA/CD ในการเข้าถึงสื่อกลางในการรับส่งข้อมูล แต่ปัจจุบันความหมายของอีเธอร์เน็ตได้เปลี่ยนไป เพราะได้มีการปรับปรุงเทคโนโลยี เช่น อีเธอร์เน็ตความเร็วสูง (Fast Ethernet) ได้พัฒนาโปรโตคอลในชั้นกายภาพใหม่ และมีการปรับเปลี่ยนกลไกในการเข้าใช้สื่อกลางเล็กน้อย สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ การเพิ่มการรับส่งข้อมูลแบบฟูลดูเพล็กซ์ (Full-Duplex) หรือการสื่อสารข้อมูลที่สามารถรับส่ง ข้อมูลในเวลาเดียวกัน ซึ่งการรับส่งข้อมูลแบบนี้จะใช้สายคู่เกลียวบิดหนึ่งคู่ในการส่งข้อมูลและอีกหนึ่งคู่ในการรับข้อมูล เมื่อใช้เทคโนโลยีสวิตชิง (Switching) ทำให้กำจัดปัญหาในการเข้าใช้สื่อกลางได้ เนื่องจากไม่ จำเป็นต้องแชร์สื่อสัญญาณร่วมกัน อุปกรณ์เครือข่ายสามารถรับส่งข้อมูลได้ในอัตราที่สูงขึ้น ซึ่ง ประสิทธิภาพของเครือข่ายจะถูกจำกัดโดยสายสัญญาณที่ใช้มากกว่า ดังนั้นคำที่ว่า “CDMA/CD” ก็จะใช้ แทนคำว่าอีเธอร์เน็ตไม่ได้อีกต่อไป

บรอดแบนด์ (Broadband) กับเบสแบนด์ (Baseband) อีเธอร์เน็ตเกือบทุกประเภทจะเป็นแบบเบสแบนด์ มีบางประเภทที่เป็นบรอดแบนด์ เช่น 10Broad36 แต่มีการใช้เครือข่ายประเภทนี้จริงน้อยมาก และช่วงหลังๆ แทบจะไม่มีมาตรฐานอีเธอร์เน็ตที่เป็นแบบบรอดแบนด์เลยเพราะฉะนั้นเมื่อกล่าวถึงอีเธอร์เน็ตมักจะหมายถึง การส่งข้อมูลแบบเบสแบนด์

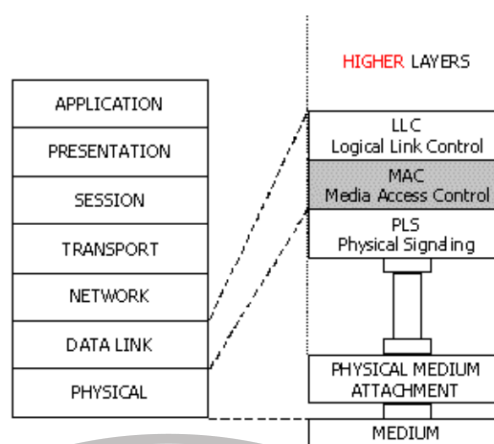
เพื่อไม่เป็นการสับสนกับชื่อต่างๆ เมื่อกล่าวถึงอีเธอร์เน็ตจะหมายถึงอีเธอร์เน็ตแบบดั้งเดิมที่มีความเร็วที่ 10 Mbps ส่วนคำว่า อีเธอร์เน็ตความเร็วสูง หรือฟาสต์อีเธอร์เน็ต (Fast Ethernet) จะหมายถึง อีเธอร์เน็ตที่ ความเร็ว 100 Mbps ส่วนกิกะบิตอีเธอร์เน็ต (Gigabit Ethernet) จะหมายถึง อีเธอร์เน็ตที่มีความเร็วที่ 1000 Mbps หรือ 1 Gbps และสุดท้าย เทนกิกะบิตอีเธอร์เน็ตนั้นจะหมายถึง อีเธอร์เน็ตที่มีความเร็ว 10 Gbps หรือบางก็เรียกว่า 10 GbE ก็ได้เช่นกัน

คณะชุดทำงานของสถาบัน IEEE ได้ออกแบบอีเธอร์เน็ตโดยการแบ่งแยกหน้าที่หรือฟังก์ชันของ LAN (Local Area Network) ออกเป็นส่วยย่อย ๆ หรือเลเยอร์ (Layer) ตามลำดับ(นายสุมินท์ พลพิทักษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.32 เปรียบเทียบระหว่าง IEEE Ethernet และแบบอ้างอิง OSI

(ที่มา : <https://www.gatevidyalay.com>)

2.16.2 ดาต้าลิงค์เลเยอร์ IEEE ได้แบ่งชั้นเชื่อมโยงข้อมูลหรือดาต้าลิงค์เลเยอร์ (Data Link Layer) ออกเป็น 2 เลเยอร์ย่อยคือ LLC (Logical Link Control) และ MAC (Media Access Control) ทั้งสองเลเยอร์ย่อยนี้ถือได้ว่าเป็นหัวใจ ของอีเธอร์เน็ต เนื่องจากเป็นเลเยอร์ที่สร้างเฟรมข้อมูลที่อยู่ (Addressing) และเป็นชั้นที่ทำให้ข้อมูลส่งถึง ปลายทางอย่างถูกต้อง และในสองเลเยอร์นี้รับผิดชอบเกี่ยวกับกลไกการตรวจสอบข้อผิดพลาดที่อาจ เกิดขึ้นระหว่างการรับส่งข้อมูล และถ้ามีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นก็จะเตรียมการส่งข้อมูลใหม่ โดยสรุปก็คือ เป็นเลเยอร์ที่ควบคุมการรับส่งข้อมูล ถึงแม้ว่าจะไม่ใช่เลเยอร์ที่ส่งข้อมูลจริงๆ ก็ตามเลเยอร์ที่รับส่งข้อมูล จริงๆ ก็คือ ฟิสิคอลลเยอร์ (Physical Layer) นั่นเอง

2.16.3 Logical Link Control (LLC) เป็นเลเยอร์ย่อยที่อยู่ด้านบนของดาต้าลิงค์เลเยอร์ ซึ่งจะให้บริการกับ โพรโตคอลของเลเยอร์บน ในการเข้าใช้สื่อกลางหรือสายสัญญาณในการรับส่งข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802 แล้วจะอนุญาตให้สถาปัตยกรรมของ LAN ที่ต่างกันสามารถทำงานร่วมกันได้กล่าวคือโพรโตคอลเลเยอร์บนไม่จำเป็นต้องทราบว่าฟิสิคอลลเยอร์ใช้สายสัญญาณประเภทใดในการรับส่งข้อมูลเพราะ LLC จะ รับผิดชอบแทนการปรับเฟรมข้อมูลให้สามารถส่งไปได้ในสายสัญญาณประเภทนั้นๆ LLC เป็นเลเยอร์ที่ แยกชั้นเครือข่าย (Network Layer) ออกจากการเปลี่ยนแปลงบ่อยๆ ของสถาปัตยกรรมของ LAN โดยโพรโตคอลของเลเยอร์สูงกว่าไม่จำเป็นต้องสนใจว่าแพ็กเก็ตจะส่งผ่านเครือข่ายแบบอีเธอร์เน็ต โทเคนริงหรือ ATM และไม่ต้องรู้ว่าการส่งผ่านข้อมูล

เอกสารนี้เป็นในชั้นกายภาพจะใช้การรับส่งข้อมูลแบบใด โดยชั้น LLC จะจัดการเรื่องเหล่านี้ให้ทั้งหมด ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.16.4 Media Access Control (MAC) เป็นเลเยอร์ย่อยที่อาศัยด้านล่างสุดของดาต้าลิงค์เลเยอร์ซึ่งจะทำหน้าที่เชื่อมต่อกับฟิสิคอลลเยอร์ และรับผิดชอบในการรับส่งข้อมูลให้สำเร็จและถูกต้องโดยจะแบ่งหน้าที่ ออกเป็นสองส่วนคือ การส่งข้อมูลและการรับข้อมูล

MAC จะทำหน้าที่ห่อหุ้มข้อมูลที่ส่งผ่านจากชั้น LC และทำให้อยู่ในรูปของเฟรมข้อมูลซึ่งเฟรมข้อมูลนี้ จะประกอบด้วยที่อยู่ (Addresses) และข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการส่งข้อมูลให้ถึงปลายทาง ชั้น MAC ยังรับผิดชอบในการสร้างกลไกสำหรับตรวจสอบข้อผิดพลาดของข้อมูลในเฟรมนั้นๆ ในระหว่างการรับส่ง เฟรมด้วย นอกจากนี้ MAC ยังต้องตรวจสอบชั้นกายภาพว่าช่องสัญญาณพร้อมสำหรับการส่งข้อมูลหรือไม่ ถ้าพร้อมเฟรมก็จะถูกส่งต่อไปยังชั้นกายภาพ เพื่อส่งไปตามสายสัญญาณต่อไป แต่ถ้ายังไม่พร้อมชั้น MAC ก็จะรอจนกว่าจะว่างแล้วค่อยส่งข้อมูล

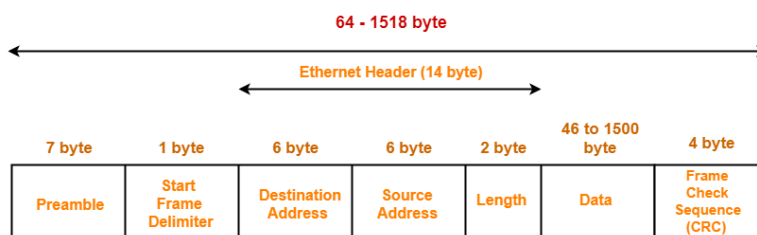
หน้าที่สุดท้ายของชั้น MAC คือ การตรวจสอบสถานะภาพของเฟรมที่กำลังส่งว่ามีการชนกันของข้อมูล เกิดขึ้นหรือไม่ ถ้าหากมีการชนกันเกิดขึ้นก็หยุดการส่งข้อมูล และเข้าสู่กลไกการรอด้วยช่วงเวลาที่เป็นเลข สุ่ม เพื่อส่งข้อมูลใหม่อีกครั้ง ซึ่งจะทำให้เช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะส่งข้อมูลได้สำเร็จ กระบวนการส่งข้อมูลที่ว่า นี้เป็นทั้งข้อดีและข้อเสียของอีเธอร์เน็ต ข้อดีคือ เป็นการรับรองให้โปรโตคอลชั้นที่อยู่เหนือกว่ามั่นใจว่า ข้อมูลจะถูกส่งไปถึงปลายทางอย่างแน่นอน แต่ในขณะเดียวกันข้อเสียก็คือ การส่งข้อมูลอาจใช้เวลานาน มากถ้ามีการใช้เครือข่าย

2.16.5 ฟอรัมเฟรมข้อมูล ข้อมูลที่อยู่ในเลเยอร์ที่สองนั้นจะจัดในรูปแบบของเฟรม ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE 802.3 แล้วฟอรัมเฟรม ของเฟรมแสดงในรูปที่ 6.3 โดยรูปดังกล่าวตัวเลขที่แสดงข้างบนเป็นจำนวนไบนารีของฟิลด์นั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



IEEE 802.3 Ethernet Frame Format

### รูปที่ 2.33 พอร์มัตของอีเธอร์เน็ตเฟรม

(ที่มา : <https://www.gatevidyalay.com>)

รายละเอียดของฟิลด์ต่างๆ ของเฟรมอีเธอร์เน็ตที่แสดงในรูปด้านบน มีดังนี้

**Preamble :** เป็นฟิลด์ที่มีบิตสลับกันระหว่าง 1 กับ 0 ซึ่งเป็นสัญญาณบอกสถานีฝ่ายรับว่ากำลังมี ข้อมูลส่งมา ฟิลด์นี้มีความยาว 8 ไบต์ โดยรวมเอาไบต์ของ SOF เข้าด้วย

**SOF (Start-of-Frame) :** เป็นไบต์สุดท้ายของพรีแอมเบิล ซึ่งไบต์นี้จะแตกต่างจากไบต์อื่นๆ คือ 2 บิตสุดท้ายจะเป็นเลข 1ทั้งคู่ เพื่อเป็นสัญญาณสำหรับบอกจุดเริ่มต้นของเฟรมจริงๆ

**Destination/Source Address :** หมายเลขหรือที่อยู่ของสถานีปลายทางและต้นทางซึ่งมีความยาว 48 บิตส่วนใหญ่จะเรียกว่า “แมคแอดเดรส (MAC Address)” การกำหนดหมายเลขนี้ควบคุมโดย IEEE ซึ่งมีเกณฑ์คือ 24 บิตแรกเป็นหมายเลขที่กำหนดให้กับบริษัทผู้ผลิต NIC (Network Interface Card) และบริษัทนั้นจะเป็นคนกำหนดอีก 24 บิตที่เหลือ การทำงานเช่นนี้เพื่อให้แน่ใจว่าในเครือข่ายหนึ่งๆ จะไม่มีหมายเลขนี้ซ้ำกัน

**Type/Length :** เป็นฟิลด์ที่บอกประเภทของโปรโตคอลของเลเยอร์ที่อยู่เหนือกว่า เช่น IP, IPX, IPv6, ARP, AppleTalk เป็นต้น

**Data :** ส่วนนี้จะเป็นฟิลด์ที่เก็บข้อมูล ซึ่งความยาวอย่างน้อยต้องไม่ต่ำกว่า 46 ไบต์ ถ้าต่ำกว่านี้ จะต้องมีฟิลด์เสริม (Padding) เพื่อให้ข้อมูลมีขนาดอย่างน้อย 46 ไบต์ เหตุที่ต้องกำหนดความยาวขั้นต่ำนี้ก็เพื่อใช้สำหรับการตรวจเช็คการชนกันของข้อมูล (Collision) ในระหว่างการรับส่งข้อมูลส่วนความยาวสูงสุดคือ 1,500 ไบต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

FCS(Frame Check Sequence) : พิลด์นี้มีความยาว 4 ไบต์ ซึ่งเป็นโค้ดสำหรับตรวจสอบข้อผิดพลาดแบบ CRC (Cyclic Redundancy Check) ของข้อมูลในเฟรม

2.16.6 โพรโทคอล CSMA/CD อีเธอร์เน็ตตั้งอยู่บนมาตรฐานการส่งข้อมูลหรือโพรโทคอล CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) ซึ่งเป็นโพรโทคอลที่รับส่งข้อมูลแบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์ (Half-Duplex) โพรโทคอลนี้ใช้สำหรับการเข้าใช้สื่อกลางที่แชร์กันในการส่งสัญญาณระหว่างโหนดในเครือข่าย ซึ่งมี ขั้นตอนดังนี้ เมื่อโหนดใดๆ ต้องการที่จะส่งข้อมูลจะต้องคอยฟังก่อน (Carrier Sense) ว่ามีโหนดอื่นกำลัง ส่งข้อมูลอยู่หรือไม่ ถ้ามีให้รอจนกว่าโหนดนั้นส่งข้อมูลเสร็จก่อน แล้วค่อยเริ่มส่งข้อมูลและในขณะที่กำลัง ส่งข้อมูลอยู่นั้นต้องตรวจสอบว่ามีการชนกันของข้อมูลเกิดขึ้นหรือไม่ (Collision Detection) ถ้ามีการชนกัน ของข้อมูลเกิดขึ้นให้หยุดส่งข้อมูลทันที แล้วค่อยเริ่มกระบวนการส่งข้อมูลใหม่อีกครั้ง

เนื่องจากแต่ละโหนดใช้สื่อกลางร่วมกัน ซึ่งเรียกว่า “บัส (Bus)” ฉะนั้นจึงมีโหนดที่ส่งข้อมูลได้แค่โหนด เดียวในขณะใดขณะหนึ่ง การชนกันของข้อมูลก็มีโอกาสเกิดขึ้น เนื่องจากการที่มีโหนดมากกว่าหนึ่งโหนดที่ ส่งข้อมูลไปบนสื่อกลางในเวลาเดียวกัน ผลที่ได้คือข้อมูลก็จะกลายเป็นขยะหรืออ่านไม่ได้ทันที เมื่อมี จำนวนโหนดเพิ่มมากขึ้นความน่าจะเป็นที่ข้อมูลจะชนกันก็เพิ่มขึ้นตามลำดับ

การชนกันของข้อมูลเป็นเรื่องธรรมดาของเครือข่ายอีเธอร์เน็ต แต่ถ้าเกิดขึ้นบ่อยเกินไป อาจทำให้ เครือข่ายช้าหรือใช้การไม่ได้เลย เมื่อแบนด์วิธหรืออัตราการส่งข้อมูลของเครือข่ายถูกใช้มากกว่า 50% การ ชนกันของข้อมูลก็เริ่มที่จะก่อให้เกิดความคับคั่ง (Congestion) ในเครือข่าย ผลก็คือการพิมพ์เอกสารอาจ ใช้เวลามากขึ้น หรือการถ่ายโอนไฟล์จะช้าลง ถ้ามีการใช้มากกว่า 60% เครือข่ายจะช้าลงอย่างเห็นได้ชัด หรืออาจทำให้เครือข่ายใช้การไม่ได้เลย

2.16.7 ค่าดีเลย์ (Round-Trip Delay) การชนกันของข้อมูล (Collision)ในเครือข่ายอีเธอร์เน็ตนั้นเป็นเรื่องธรรมดา แต่ระบบ MAC มีกลไกใน การตรวจสอบเช็คว่ามี การชนกันของข้อมูล (Collision Detection) เกิดขึ้นหรือไม่เพื่อให้การตรวจเช็คว่ามี การชนกันของข้อมูลเป็นไปได้ แต่ละสถานีต้องสามารถโต้ตอบกันได้ภายในเวลาที่จำกัด ค่าดีเลย์ (Delay Time) คือเวลาในการเดินทางไปกลับของสัญญาณ (Round-TripTime) ระหว่างสถานีส่งและสถานีรับมาตรฐานอีเธอร์เน็ตกำหนดให้มีค่าความล่าช้าของสัญญาณ หรือดีเลย์ได้ไม่เกิน 51.2 us (106วินาที) สำหรับอีเธอร์เน็ตที่ความเร็ว 10 Mbps และ

51.2 us สำหรับอีเธอร์เน็ตที่ความเร็ว 100 Mbps อุปกรณ์เครือข่ายอีเธอร์เน็ตทุกชนิด รวมทั้งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระหว่างเรียน ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สายสัญญาณจะมีค่าดีเลย์ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนวณค่าดีเลย์ของเครือข่ายก่อนที่จะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

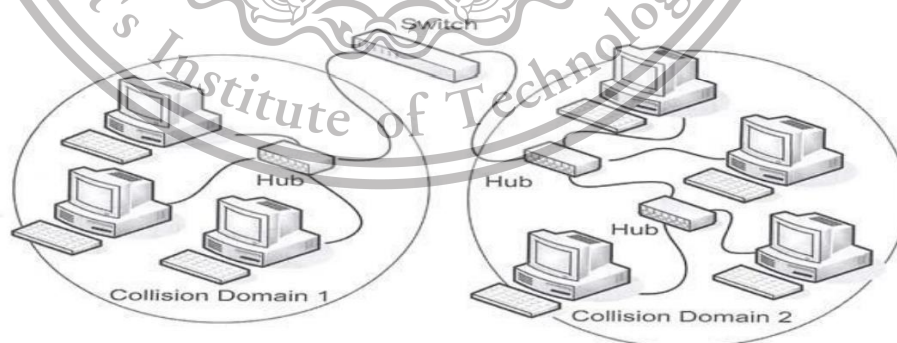
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ติดตั้ง ไม่เช่นนั้นถ้าหากค่าดีเลย์ของเครือข่ายมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ก็อาจทำให้การส่งข้อมูลล้มเหลวหรือเกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้

2.16.8 คอลลิชันโดเมน (Collision Domain) หลักการที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการออกแบบเครือข่ายอีเธอร์เน็ต คือ คอลลิชันโดเมน (Collision Domain) ซึ่งหมายถึง ส่วนของเครือข่ายที่แชร์ช่องสัญญาณ ในการรับส่งข้อมูลเดียวกันส่วนของเครือข่ายนี้ อาจประกอบด้วยคอมพิวเตอร์สายสัญญาณ และรีพีตเตอร์ เป็นต้น ในคอลลิชันโดเมนเดียวกันถ้ามีอย่างน้อยสองโหนดส่งสัญญาณในเวลาเดียวกันก็จะเกิดการชนกันของข้อมูลขึ้นส่วนคำว่า “เซ็กเมนต์ (Segment)” จะหมายถึงส่วนของเครือข่ายที่เชื่อมต่อกันโดยใช้สายสัญญาณเดียวกัน เช่น กลุ่มของ คอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกันด้วยสายโคแอกซ์ ซึ่งเซ็กเมนต์นั้นจะไม่รวมเอารีพีตเตอร์ เข้าไปด้วย ในคอลลิชัน โดเมนหนึ่งๆ อาจประกอบด้วยหลายเซ็กเมนต์ที่เชื่อมต่อกันด้วยรีพีตเตอร์หรือฮับ

รีพีตเตอร์หรือฮับเป็นอุปกรณ์อีเธอร์เน็ตที่ทำงานในระดับฟิสิคอลลเยอร์ ซึ่งหน้าที่หลักก็คือ ทวน สัญญาณที่ได้รับจากพอร์ตหนึ่งไปยังพอร์ตที่เหลือ ส่วนสวิตช์นั้นจะทำงานในดาต้าลิงก์เลเยอร์ ซึ่งจะ ตรวจสอบหมายเลข MAC หรือที่อยู่ในเลเยอร์ที่ 2 ก่อนจะส่งต่อสัญญาณไปยังพอร์ตปลายทางเท่านั้น

ตามรูปแสดงการแยกคอลลิชันโดเมนโดยใช้สวิตช์ เครือข่ายจะถูกแบ่งออกเป็น 2 คอลลิชันโดเมน เนื่องจากสวิตช์จะไม่ส่งต่อสัญญาณจากเซ็กเมนต์หนึ่งไปยังอีกเซ็กเมนต์หนึ่งสวิตช์อาจมีหลายพอร์ต โดย เมื่อสวิตช์ได้รับเฟรมข้อมูลจากพอร์ตหนึ่งก็จะส่งเฟรมออกไปยังพอร์ตหนึ่งเท่านั้น



รูปที่ 2.34 คอลลิชันโดเมน

(ที่มา : <https://www.gatevidyalay.com>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อใช้สวิตชิงซ์ับในการเชื่อมต่อแต่ละส่วนของเครือข่าย แต่ละส่วนของเครือข่ายที่เชื่อมต่อเข้ากับพอร์ต ของสวิตซ์ก็จะมีส่วนคอลลิชันโดเมนของตัวเอง ดังนั้น เมื่อใดก็ตามที่มีการใช้สวิตซ์ก็ จะไม่มีการชนกันของ ข้อมูลเกิดขึ้น ส่วนใหญ่สวิตซ์จะมีราคาแพงมากกว่าฮับ แต่ปัจจุบันนิยมใช้สวิตซ์มาก เพราะราคาถูกลง และ ข้อดีของสวิตซ์อีกอย่างหนึ่งคือ ไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับการชนกันของข้อมูล ทำให้ ประสิทธิภาพในการรับส่ง ข้อมูลดีขึ้นด้วย

2.16.9 บรอดคาสต์โดเมน (Broadcast Domain) มัลติคาสต์โดเมน (Multicast Domain) หมายถึง กลุ่มของหมายเลข MAC ซึ่งแต่ละโหนดสามารถ โปรแกรมให้อยู่ในกลุ่มนี้ได้ ส่วน บรอดคาสต์โดเมน (Broadcast Domain) นั้นเป็นกรณีพิเศษของมัลติ คาสต์โดเมนกล่าวคือ บรอดคาสต์ โดเมน หมายถึง ทุกโหนดที่อยู่ในวง LAN เดียวกันดังนั้น เฟรมข้อมูลที่ ส่งไปยังบรอดคาสต์โดเมนทุกๆ โหนดที่เชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายก็จะได้รับเฟรมนั้น สวิตซ์ถูกออกแบบมา สำหรับเชื่อมต่อหลายๆ คอลลิ ชันโดเมนเป็นวง LAN เดียวกันดังนั้น สวิตซ์จะฟlood (Flood) หรือส่งเฟรม ข้อมูลแบบบรอดคาสต์ไปยังทุกๆ พอร์ตของสวิตซ์ ยกเว้นพอร์ตที่รับเฟรมข้อมูล นั้นมา ด้วยวิธีนี้เฟรมแบบ บรอดคาสต์สามารถส่งไปยังทุกๆ โหนดในเครือข่าย ดังนั้น บางทีสวิตซ์ก็ทำหน้าที่เป็นรีพีตเตอร์เหมือนกัน



รูปที่ 2.35 แสดงการเชื่อมต่อบรอดคาสต์โดเมนด้วยเราท์เตอร์

(ที่มา : <https://www.gatevidyalay.com>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การส่งเฟรมข้อมูลแบบมัลติคาสต์หรือบรอดคาสต์นั้น ข้อดีอยู่หลายประการบางโปรโตคอลในเลเยอร์ เหนือว่าใช้การส่งข้อมูลแบบบรอดคาสต์ เพื่อสำหรับการค้นหาที่อยู่ในเลเยอร์นั้น เช่น โปรโตคอล DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) จะใช้การส่งข้อมูลแบบบรอดคาสต์เมื่อคอมพิวเตอร์ ถูกเปิดเพื่อใช้งานครั้งแรก เพื่อค้นหาเซิร์ฟเวอร์ที่แจกจ่ายหลายเลขไอพีและค่าคอนฟิกอื่นๆ ส่วนมัลติคาสต์นั้นอาจถูก ใช้โดยบางโปรแกรมมัลติมีเดียเพื่อส่งวิดีโอและเสียงไปยังกลุ่มของโหนดที่รองรับเฟรมนี้ที่อยู่ หรือเกมที่เล่น ผ่านเครือข่ายก็ใช้การสื่อสารระหว่างผู้เล่นโดยการส่งเฟรมแบบมัลติคาสต์

ทุกๆ เครือข่ายก็จะมี การส่งข้อมูลแบบบรอดคาสต์โดยทั่วไปแล้วสวิตช์ส่งต่อเฟรมแบบบรอดคาสต์ไปยัง ทุกๆ โหนดในเครือข่าย ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องจำกัดจำนวนสวิตช์ที่ใช้ในเครือข่าย เพราะถ้ามี การบรอดคาสต์ข้อมูลมากเกิดไป อาจทำให้เครือข่ายช้าเกินไป เลเยอร์ 3 สวิตช์หรือเราเตอร์นั้น จะช่วยลด การบรอดคาสต์ในเครือข่ายได้ เนื่องจากเราเตอร์นั้นจะไม่ส่งต่อเฟรมข้อมูลแบบบรอดคาสต์

2.16.10 การเรียกชื่ออีเธอร์เน็ต-สถาบัน IEEE ได้กำหนดการเรียกชื่ออีเธอร์เน็ตประเภทต่างๆ ไว้ เพื่อให้ง่ายต่อการอ้างอิงถึง มาตรฐาน โดยมีหลักการในการเรียกชื่อมาตรฐาน



รูปที่ 2.36 การเรียกชื่ออีเธอร์เน็ต

(ที่มา : <https://www.gatevidyalay.com>)

จากรูปมีส่วนที่บ่งบอกลักษณะของมาตรฐาน ส่วนแรกจะเป็นตัวเลขที่บอกแบนด์วิธของเครือข่าย ซึ่งเลขที่เป็นไปได้คือ 10,100,1000 และ 10 G ซึ่งหมายถึง แบนด์วิธ 10 Mbps, 100 Mbps, 1,000 Mbps และ 10 Gbps ตามลำดับ อีเธอร์เน็ตที่มีแบนด์วิธที่ 100 Mbps จะมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อีเธอร์เน็ต ความเร็วสูง หรือฟาสต์อีเธอร์เน็ต (Fast Ethernet) ส่วนอีเธอร์เน็ตที่ความเร็ว 1,000 Mbps จะเรียกอีก อย่างหนึ่งว่า “กิกะบิตอีเธอร์เน็ต (Gigabit Ethernet) “ คำว่า “กิกะ (Giga)” เอกสารนี้เป็นแปลว่า พันล้าน ส่วน 10 GbE จะอ่านว่า “เทนกิกะบิตอีเธอร์เน็ต” นั่นเอง ตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ส่วนที่สองคือ ส่วนที่บอกลักษณะของช่องสัญญาณ เช่น Base เป็นชื่อย่อของ Baseband หมายถึง ช่องสัญญาณที่รับส่งข้อมูลแบบเต็มช่อง หรือสัญญาณที่ใช้จะเป็นสัญญาณดิจิทัลตรงข้ามคือบรอดแบนด์ (Broadband) ซึ่งช่องสัญญาณที่ใช้จะกว้างกว่าแบบเบสแบนด์ และเป็นการส่งข้อมูลแบบแบ่ง ช่องสัญญาณออกเป็นช่องสัญญาณย่อย แล้วส่งข้อมูลแต่ละช่องได้ การส่งข้อมูลแบบบรอดแบนด์จะส่ง ข้อมูลได้มากกว่า แต่เครื่องที่รับส่งจะซับซ้อนและยากต่อการผลิตมากกว่าเครื่องที่ใช้กับเบสแบนด์ ดังนั้น มาตรฐานอีเธอร์เน็ตโดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบเบสแบนด์

ส่วนสุดท้ายจะเป็นส่วนที่บอกถึงประเภทของสายสัญญาณที่ใช้ เช่น TX เป็นตัวย่อ Twisted Pairs, FX เป็นตัวย่อของ Fiber Optics ในส่วนสุดท้ายนี้จะมีกรณีพิเศษอยู่ 2 ข้อ คือ ถ้าเป็นตัวเลข เช่น 5 จะเป็น อีเธอร์เน็ตที่ใช้สายโคแอกซ์แบบหนา (Thick Coaxial Cable) ซึ่งเลข 5 นี้มาจากความยาวสายสัญญาณ ประเภทนี้ สามารถรับส่งข้อมูลได้ไกลสุด 500 เมตร ส่วนเลข 2 จะหมายถึงอีเธอร์เน็ตที่ใช้สายโคแอกซ์ ประเภทเล็กกว่า หรือแบบบาง (Thin Coaxial Cable) ซึ่งเลข 2 มาจากการที่ว่าสายสัญญาณประเภทนี้ สามารถรับส่งข้อมูลได้ไกลสุด 185 เมตร แต่เพื่อความสะดวกในการเรียกชื่อ จึงมีการปัดตัวเลขนี้ขึ้นเป็น 200 เมตร แต่เป็นที่เข้าใจกันว่าระยะทางสูงสุดคือ 185 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

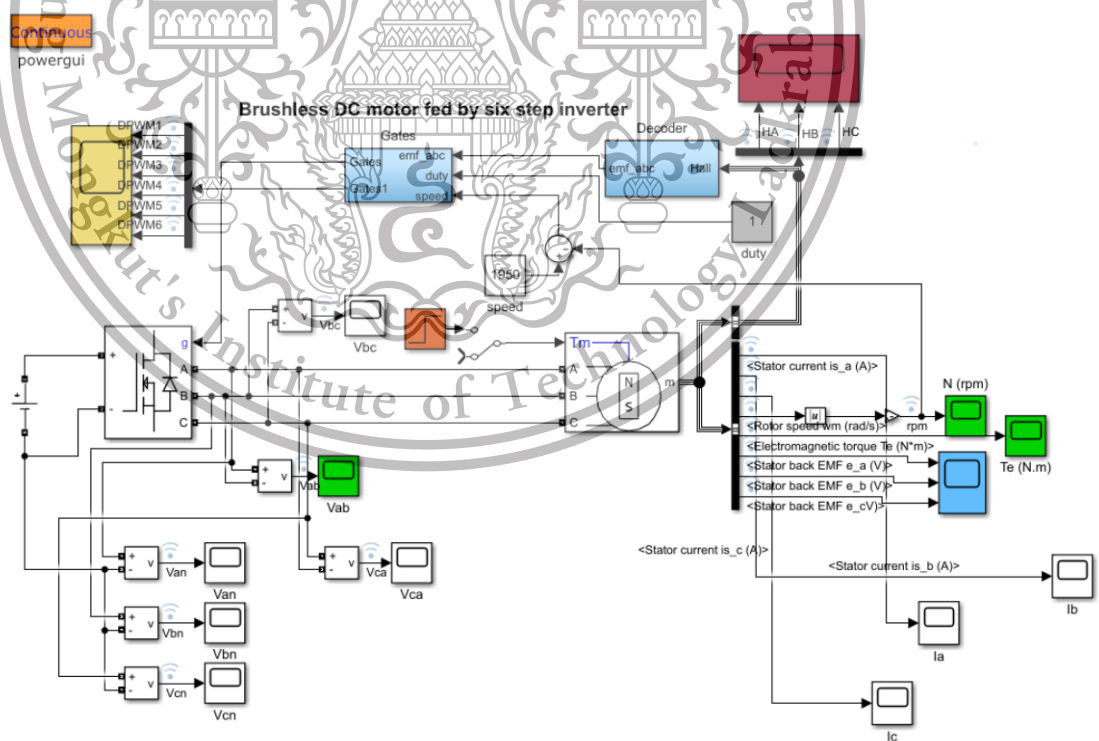
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### บทที่ 3

#### การดำเนินงาน

#### 3.1 การออกแบบการไต่รพีมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

งานวิจัยนี้จะอธิบายถึงการจำลองลักษณะการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน แบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการทำงานของมอเตอร์และทราบถึงคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ ก่อนจะนำมอเตอร์ไปใช้งานจริง เพื่อลดข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในพื้นที่ใช้งานจริง โดยจะจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กำหนดค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเพื่อให้ได้ผลของกราฟแรงดัน กระแส ความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน เพื่อนำไปออกแบบอัลกอริทึมในการควบคุมมอเตอร์ รวมถึงการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาประยุกต์เข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมวงจรไต่รพีมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 3.1 เป็นไดอะแกรมวงจรที่ใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโดยมีหลักการที่ใช้เป็นหลักการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ด้วยวิธีผลต่างแรงดันระหว่างขั้ว โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่ใช้ในการทดลองมีค่าดังตารางนี้

**ตารางที่ 3.1** ค่าพารามิเตอร์และข้อมูลโครงสร้างของมอเตอร์

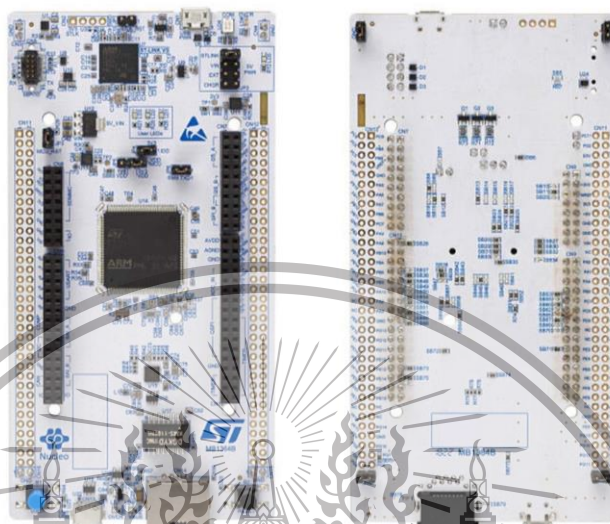
รายการ	ขนาด	หน่วย
1.แรงดัน	24	โวลต์
2.พิกัดกำลัง	375	วัตต์
3.ความเร็วรอบสูงสุด	2850	รอบต่อนาที
4.จำนวนขั้วแม่เหล็ก	12	โพล
5.น้ำหนัก	2	กิโลกรัม
6.ความยาว	310	มิลลิเมตร
7.เส้นผ่านศูนย์กลาง	100	มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

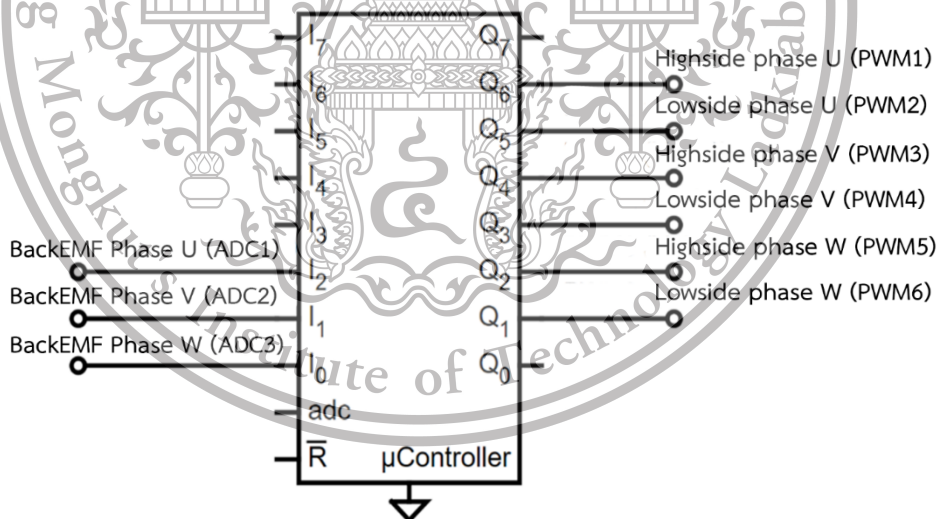
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.2 การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo-H743ZI2



รูปที่ 3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo-H743ZI2



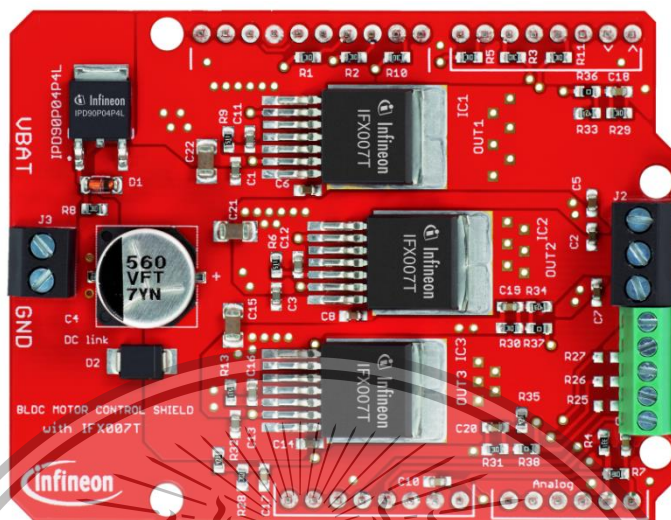
รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo-H743ZI2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.3 วงจรขับมอเตอร์ BLDC-SHIELD\_IFX007T



รูปที่ 3.4 วงจรขับมอเตอร์ BLDC-SHIELD\_IFX007T

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรขับมอเตอร์ BLDC-SHIELD\_IFX007T

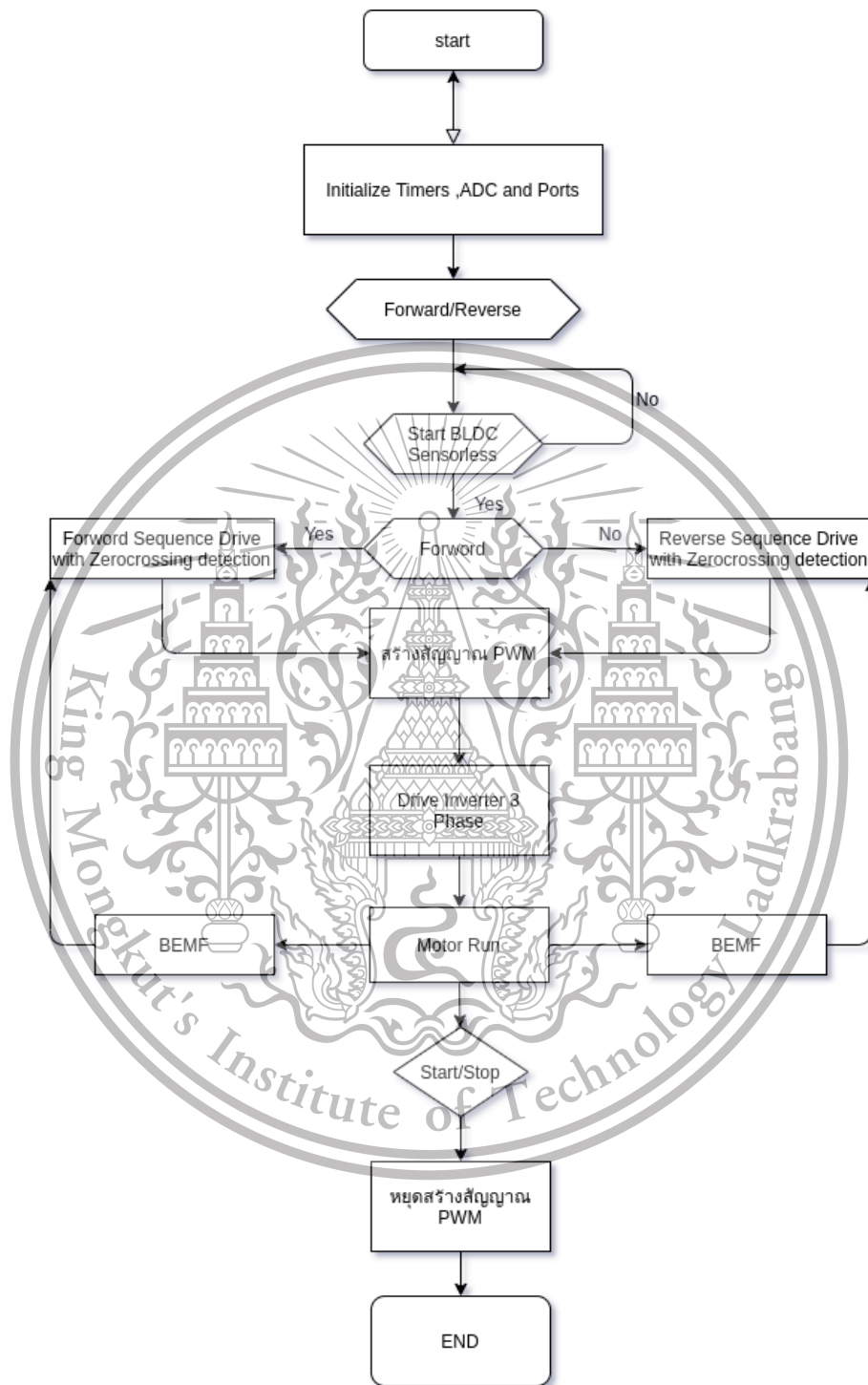
รายการ	ขนาด	หน่วย
1.แรงดัน	6-40	โวลต์
2.กระแสสูงสุด	30	แอมแปร์
3.รูปแบบมอเตอร์ที่รองรับ	มีตัวตรวจจับตำแหน่ง/ไม่มีตัวตรวจจับตำแหน่ง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.4 การออกแบบอัลกอริทึมในการควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 3.5 การออกแบบอัลกอริทึมในการควบคุมมอเตอร์

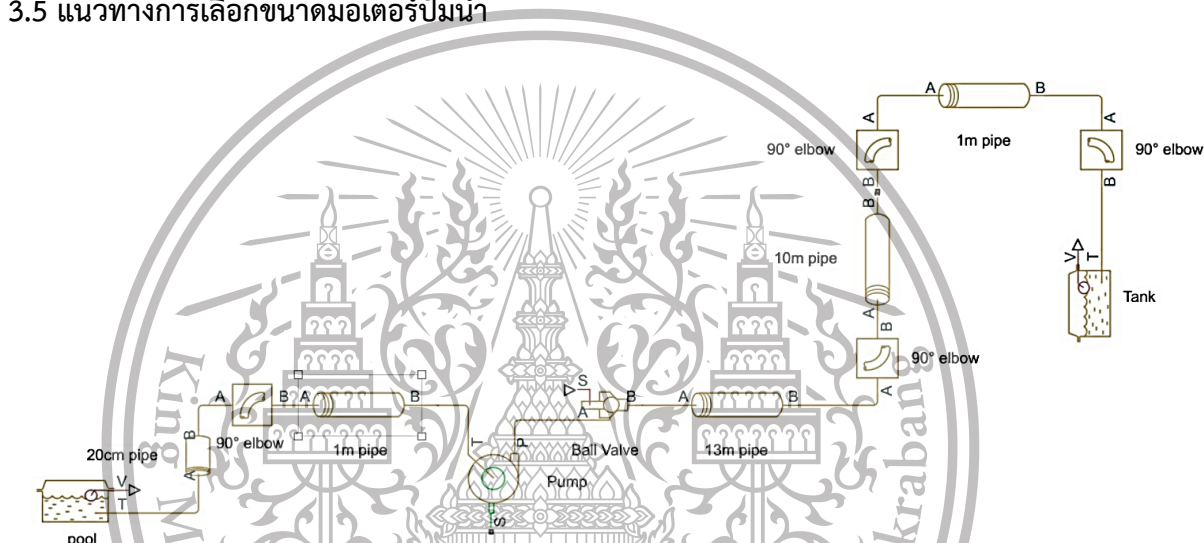
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเป็นตัวบอกตำแหน่งของโรเตอร์ แต่ในช่วงเริ่มต้นนั้นแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับมีขนาดไม่เพียงพอสำหรับการตรวจจับ จึงต้องกระตุ้นในช่วงแรกเพื่อให้มอเตอร์มีความเร็วเพียงพอที่จะทำให้แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับมีขนาดเพียงพอต่อการตรวจจับ โดยทำการกระตุ้นคู่เฟสใดคู่เฟสหนึ่งของสเตเตอร์ จากนั้นก็กระตุ้นคู่เฟสลำดับถัดไป โดยระยะเวลาในการเปลี่ยนลำดับจะน้อยลงเรื่อย ๆ

### 3.5 แนวทางการเลือกขนาดมอเตอร์ปั้มน้ำ



รูปที่ 3.6 แผนภาพการจำลองสถานการณ์ขณะปั้มน้ำทำงาน

หลังจากการศึกษางานระบบไฟฟ้าบนแผงโซลาร์เซลล์ที่จะนำมาใช้งานในระบบวงจรการควบคุมของปั้มน้ำ ได้ทำการจำลองเหตุการณ์ขณะปั้มน้ำทำงานที่ประสิทธิภาพ 0.8 โดยติดตั้งระบบให้ติดต่อกับแท่งน้ำบรรจุขนาด 1500 ลิตรในระดับความสูง 10 เมตร สำหรับปั้มน้ำที่นิยมใช้ในการเกษตรคือ ปั้มน้ำแบบปั้มหอยโข่ง เนื่องจากเป็นปั้มชนิดแรงเหวี่ยง ทำให้การใช้งานคล่องตัวและดูแลรักษาง่าย ระบบการทำงานคือจะมีใบพัดอยู่ภายในเมื่อใบพัดหมุนจะเกิดแรงเหวี่ยงส่งน้ำจากส่วนปลายของใบพัดเข้าไปในโพรงหอยโข่ง เหมาะกับงานสูบน้ำที่ต้องการปริมาณปานกลางถึงมากและสูบน้ำได้สูง น้ำที่ต้องการสูบน้ำไม่จำเป็นต้องสะอาดเพราะสิ่งปะปนที่มีอยู่ไม่ค่อยมีผลเสียต่อปั้มน้ำชนิดนี้ ด้วยเหตุนี้จึงนำเหตุการณ์จำลองมาคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อหาขนาดปั้มน้ำที่จะใช้งานในระบบแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 375 วัตต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\text{จากสมการแบร์นูลี} \quad \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + (TDH-H_L) = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.20)$$

โดย TDH คือ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของของไหลที่ปั้มน้ำต้องให้กับของเหลว มีหน่วยเป็นเมตร

กำหนดให้ ค่าความหนาแน่นของของไหล(น้ำ) ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส กับ  $997 \text{ kg/m}^3$

ความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  $0.89 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$

ค่าความโน้มถ่วง  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

ท่อเมนมีความยาว 15 m

ท่อส่งมีความยาว 10.2 m

ที่จุดอ้างอิงที่ 1 มีค่า

เฮดแรงดัน  $P_1$  มีค่าประมาณเท่ากับ 0 เมตร (ท่อจุดอยู่บริเวณผิวน้ำและน้ำในสระลดลงน้อยมาก)

เฮดสถิต  $Z_1$  มีค่าเท่ากับ 0 เมตร (เป็นจุดอ้างอิง)

ความเร็วของของไหล ณ ท่อจุด มีค่าประมาณเท่ากับ 0 เมตรต่อวินาที

ที่จุดอ้างอิงที่ 2 มีค่า

เฮดแรงดัน  $P_2$  มีค่าประมาณเท่ากับ 0 เมตร (ท่อจุดปล่อยน้ำอย่างอิสระ)

เฮดสถิต  $Z_2$  มีค่าเท่ากับ 10.2 เมตร(เป็นจุดอ้างอิง)

หาความเร็วของของไหล ณ ท่อจุด

จากสูตร  $Q = VA$  โดย  $Q$  คืออัตราการไหลของน้ำ มีหน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

$V$  คือความเร็วการไหลของน้ำ มีหน่วย เมตรต่อวินาที

$A$  คือพื้นที่หน้าตัดของท่อน้ำ ตารางเมตร

โดยกำหนดให้มีการทำงานของปั้มน้ำเพื่อปั้มน้ำเต็มถังเก็บ 1500 ลิตร ในเวลา 1 ชั่วโมง

คิดเป็นอัตราการไหล  $\left(\frac{1500 \text{ dm}^3}{1 \text{ hr}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ dm}^3}\right) \left(\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}}\right) = 4.167 \times 10^{-4}$  ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

ใช้ท่อน้ำขนาด 1 นิ้ว  $= \left(\frac{1 \text{ inch}}{1}\right) \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ inch}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}\right) = 0.0254$  เมตร

ได้ค่าความเร็วของของไหล เท่ากับ  $v = \frac{4.167 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{3.14 \times \frac{0.0254^2}{4} \text{ m}^2} = 0.823$  เมตรต่อวินาที

และ  $H_L = H_{\text{major}} + H_{\text{minor}}$

โดย  $H_L$  คือ ค่าการสูญเสียรวมทั้งหมด (m)

$H_{\text{major}}$  คือ ค่าการสูญเสียรวมจากแรงเสียดทานของผนังท่อที่กระทำต่อของไหลต่อหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (m) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$H_{\text{minor}}$  คือ ค่าการสูญเสียรวมจากพลังงานจลน์ในการไหลผ่านอุปกรณ์ต่อหน่วยน้ำหนัก (m)

$$\text{ซึ่ง} \quad H_{\text{major}} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad \text{และ} \quad H_{\text{minor}} = K_L \frac{V^2}{2g}$$

โดย  $f$  คือ ตัวประกอบเสียดทานขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของท่อ ลักษณะการไหล (Re) และความขรุขระของผนังท่อ ( $\epsilon$ ) (ถ้าเป็นการไหลแบบราบเรียบสามารถประมาณค่าได้เท่ากับ  $f=64/\text{Re}$ ;  $\text{Re} \leq 2000$  ถ้าเป็นการไหลแบบปั่นป่วนต้องประมาณค่าจากแผนภาพมูดี ;  $\text{Re} \geq 4000$  )

$L$  คือ ความยาวของท่อ (m)

$D$  คือ ขนาดวัดผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

$V$  คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

$K_L$  คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดอุปกรณ์

$g$  คือ ค่าความโน้มถ่วง =  $9.81 \text{ m/s}^2$

การหาค่า  $H_{\text{major}}$  กำหนดให้ท่อที่ใช้งานคือท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้วตลอด มีค่า  $L = 10.2$ (แนวตั้ง) +  $15$ (แนวระดับ) =  $25.2 \text{ m}$

จากสูตร  $\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu}$  โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล(น้ำ) ( $\text{kg/m}^3$ )

$D$  คือ ขนาดวัดผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

$V$  คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

$\mu$  คือ ความหนืดสัมบูรณ์ ( $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ )

$$\text{แทนค่า Re} = \frac{(997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(0.823 \frac{\text{m}}{\text{s}})(0.0254 \text{ m})}{0.89 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\frac{\text{s}}{\text{m}^2}}$$

$$\approx 23417 \quad (\text{เป็นการไหลแบบปั่นป่วน})$$

ท่อ PVC มีค่าความขรุขระของผนังท่อ  $\epsilon \approx 7 \times 10^{-6} \text{ m}$  และมีค่า  $D = 0.0254 \text{ m}$

คำนวณค่า relative roughness จาก  $r = \epsilon/D$  ได้ค่าเท่ากับ 0.00276

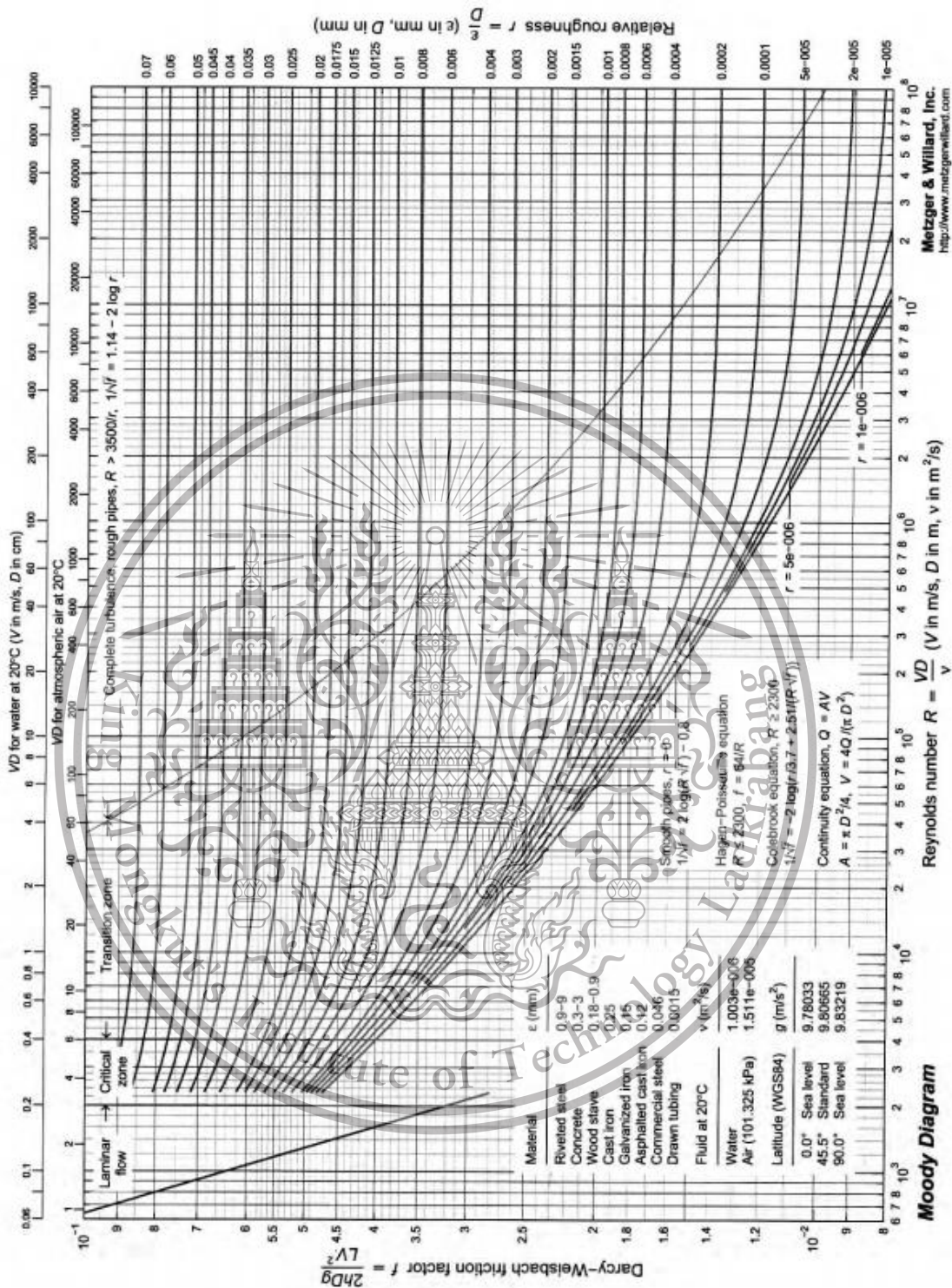
ได้ค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานจากการอ่านค่าบน moody diagram ได้เท่ากับ  $3 \times 10^{-2}$

หรือคำนวณจากสูตร  $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right)$  ได้ค่าสัมประสิทธิ์เสียดทาน  $3.04 \times 10^{-2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานจากการอ่านใน Moody diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ (ที่มา: <http://www2.dede.go.th>) กรุณาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากสูตรการหาค่าการสูญเสียรวมจากแรงเสียดทานของผนังท่อที่กระทำต่อของไหล

$$\text{เมื่อแทนค่าแล้วได้ค่า } H_{\text{major}} = (3.04 \times 10^{-2}) \frac{25.2 \text{ m} \left( \frac{0.823 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2}{0.0254 \text{ m} \cdot 2 \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} = 1.041 \text{ m}$$

การหาค่า  $H_{\text{minor}}$  ออกแบบให้มีการต่อกับอุปกรณ์ 3 ชิ้น คือ ต่อกับข้อต่อ elbow  $90^\circ$  และ ball valve ซึ่ง Elbow  $90^\circ$  มีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล  $K_L = 1.5$  (หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทาน, 2554) ball valve มีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล  $K_{L,30^\circ} = 5.47$  (หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทาน, 2554)

จากสูตรการหาค่าการสูญเสียรวมจากพลังงานจลน์ในการไหลผ่านอุปกรณ์ข้อต่อ elbow  $90^\circ$  4 ชิ้น และ ball valve 1 ชิ้น

$$\text{ได้ค่า } H_{\text{minor}} = 4 \left( (1.5) \left( \frac{\left( \frac{0.823 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2}{2 \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} \right) \right) + (5.47) \frac{\left( \frac{0.823 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2}{2 \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} = 0.396 \text{ m}$$

ทำให้ได้ค่าการสูญเสียรวม  $H_f = 1.041 + 0.396$  ได้ค่าประมาณ 1.44 m

แทนค่าในสมการแบร์นูลลี

$$0 + 0 + 0 + (TDH - 1.44) = 0 + 10.2 + \frac{\left( \frac{0.549 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2}{2 \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)}$$

$$TDH = 1.44 + 10.2 + \frac{\left( \frac{0.823 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2}{2 \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)}$$

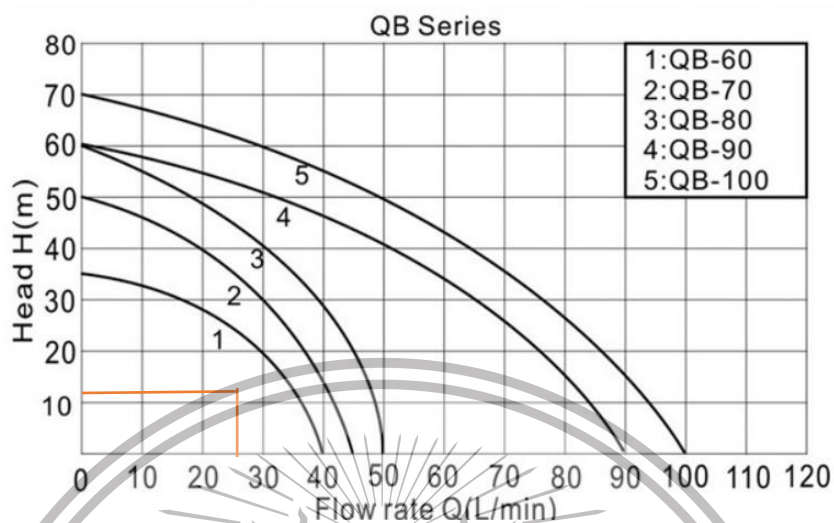
$$TDH \approx 11.7 \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

นำเฮดที่ได้ไปหารุ่นของปั้มน้ำ



รูปที่ 3.8 รุ่นปั้มน้ำ สกลุ่ QB

จากรูปที่ สามารถเลือกรุ่นของปั้มน้ำได้เป็น รุ่น QB-60

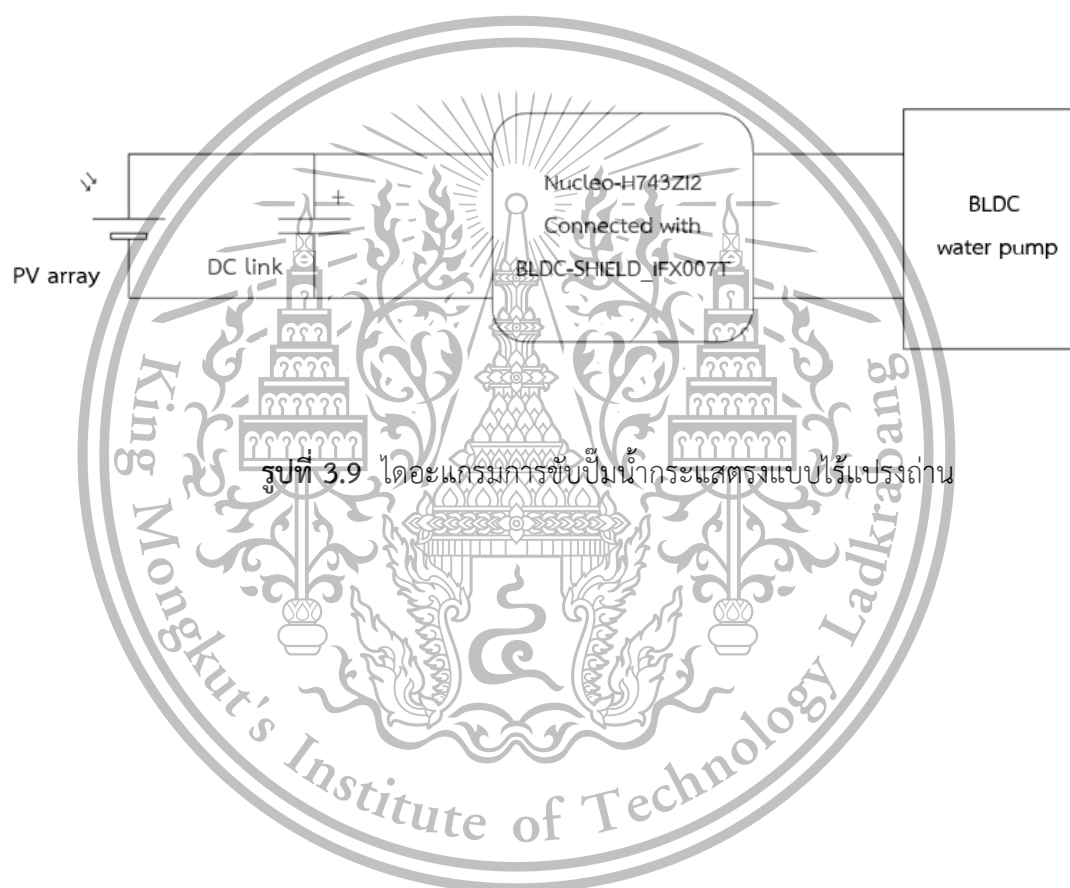
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.6 การควบคุมปั๊มน้ำกระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

เนื่องจากต้องการปั๊มน้ำจากแหล่งน้ำที่มีเฮดอยู่ที่ 10 เมตรโดยใช้มอเตอร์ปั๊มน้ำกระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านขนาด 350 W ขับเคลื่อนโดย BLDC-SHIELD\_IFX007T และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo-H743ZI2 ในการควบคุม จึงใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC supply) ในการจ่ายกำลังให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ละมอเตอร์ปั๊มน้ำ ดังรูปที่ 3.9



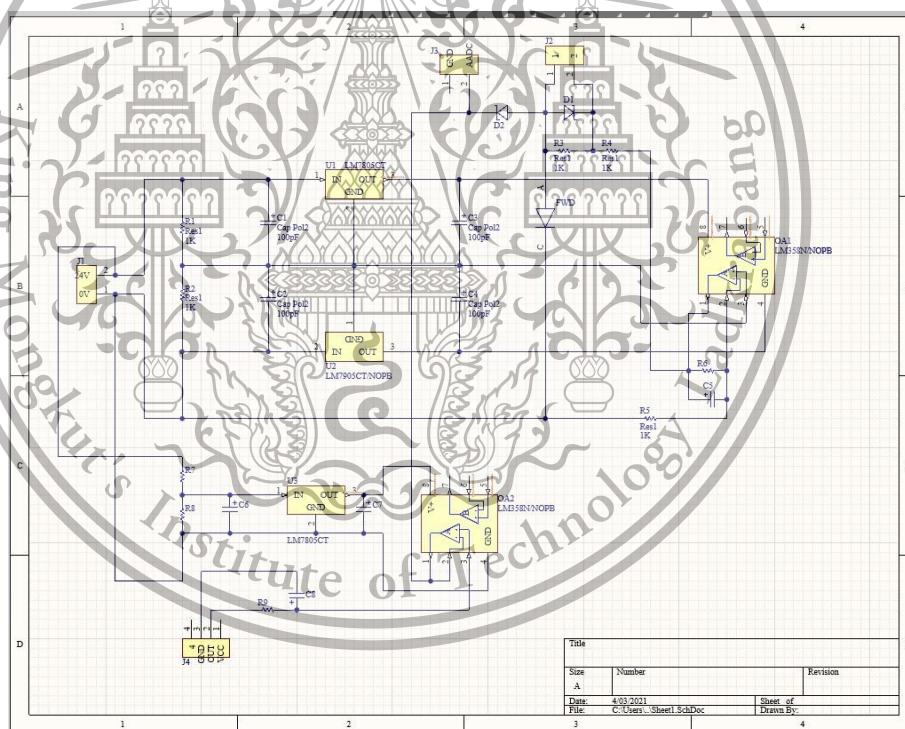
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.7 การออกแบบวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันและและเซนเซอร์วัดกระแสเพื่อติดตามค่ากำลังสูงสุด

เนื่องจากใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 125 W จำนวน 2 แผงในการจ่ายกำลังให้กับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแผงโซลาร์เซลล์มี  $V_{mp}$  อยู่ที่ 18.0 V เนื่องจากทั้งเซนเซอร์วัดแรงดันและเซนเซอร์วัดกระแส ต้องการไฟเลี้ยงในการทำงานอยู่ที่ 5 V จึงจำเป็นต้องมีวงจรแบ่งแรงดันเพื่อทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ นั้น สามารถทำงานได้ และต้องการให้แนวโน้มเซนเซอร์วัดกระแสและวัดแรงดันคลาดเคลื่อนน้อยรวมถึงต้องการลดสัญญาณรบกวน ดังนั้นจึงออกแบบวงจรโดยใช้ออปแอมป์เพื่อลดสัญญาณรบกวนและปัญหาการวัดลูป อีกทั้งยังปรับระดับแรงดันไฟเลี้ยงของออปแอมป์จากย่านการทำงานของมอเตอร์ผ่าน linear regulation เบอร์ LM7805 และ LM7905 จึงออกแบบวงจรแบ่งแรงดันได้โดยใช้โปรแกรม Altium Designer ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 Schematic ของวงจรแบ่งแรงดันในโปรแกรม Altium Designer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.8 การวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่แผงโซลาร์เซลล์ผลิตได้

แผงโซลาร์เซลล์ ชนิด 120 W Poly Crystalline มีค่าพารามิเตอร์ดังตารางข้างล่าง

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของแผงโซลาร์เซลล์

พารามิเตอร์	ขนาด
Maximum Power	120 W
Power Tolerance	0 ถึง +3%
Open Circuit Voltage (Voc)	21.24 V
Short Circuit Current (Isc)	7.33 A
Maximum Power Voltage (Vmp)	18.0 V
Maximum Power Current (Imp)	6.67 A
Maximum System Voltage: DC	1000 V

ที่ระยะมุม 15 องศา ผลที่ได้ปรากฏว่าแผงโซลาร์เซลล์ ชนิด Poly Crystalline มีค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกับข้อมูลทางผู้ผลิตให้มาอาศัยอุปกรณ์การวัดทางไฟฟ้าคือ มัลติมิเตอร์และวัตต์มิเตอร์ ซึ่งออกแบบการทดลองในการวัดคือ ตั้งแต่เวลา 05.00-19.00น. โดยเก็บข้อมูลทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 3 วันแล้วนำค่ามาหาค่าเฉลี่ย จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ โดยจะมีค่าน้อยในช่วงเช้าและในช่วงเย็นเท่านั้น ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะแสงในช่วงเวลาดังกล่าวมีความเข้มข้นน้อย แต่ในช่วงเวลากลางวันมีค่าค่อนข้างสูง และสังเกตได้ว่าในแต่ละวันที่ทำการทดลองมีค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงทุกช่วงเวลา ซึ่งค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศในแต่ละวันด้วย

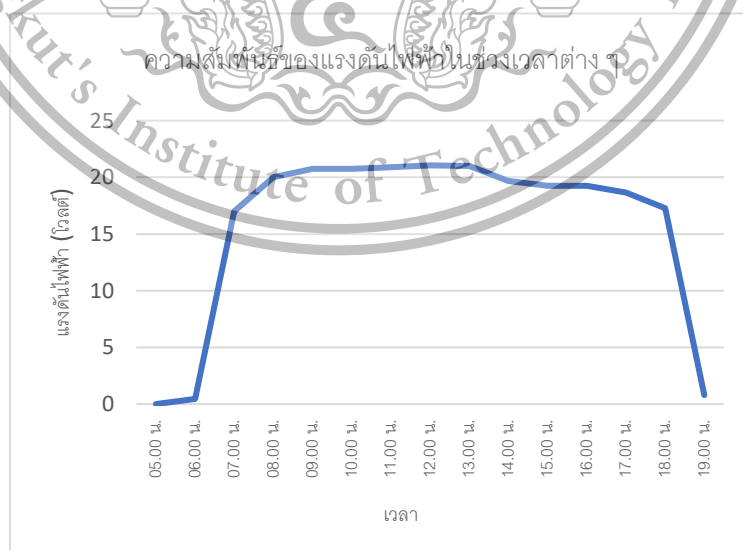
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.4 แรงดันไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละช่วงเวลา

ช่วงเวลา	แรงดัน (V)
05.00 น.	0
06.00 น.	0.458
07.00 น.	16.99
08.00 น.	20.00
09.00 น.	20.74
10.00 น.	20.75
11.00 น.	20.89
12.00 น.	21.05
13.00 น.	21.01
14.00 น.	19.68
15.00 น.	19.24
16.00 น.	19.24
17.00 น.	18.65
18.00 น.	17.27
19.00 น.	0.786



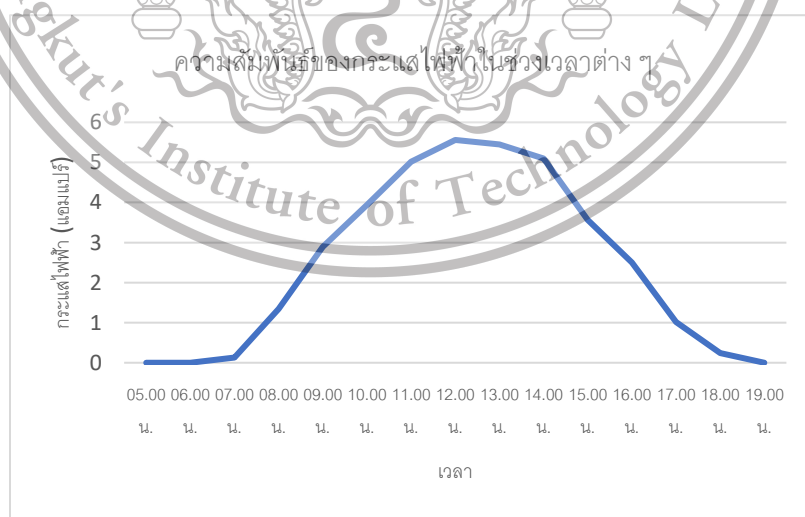
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าในชั่วโมงต่างๆ**  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.5 กระแสของแผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละช่วงเวลา

ช่วงเวลา	กระแสไฟฟ้า (A)
05.00 น.	0
06.00 น.	0
07.00 น.	0.13
08.00 น.	1.20
09.00 น.	2.45
10.00 น.	3.75
11.00 น.	5.02
12.00 น.	5.56
13.00 น.	4.99
14.00 น.	4.26
15.00 น.	3.17
16.00 น.	2.50
17.00 น.	1.93
18.00 น.	0.24
19.00 น.	0



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าในชั่วโมงต่าง ๆ

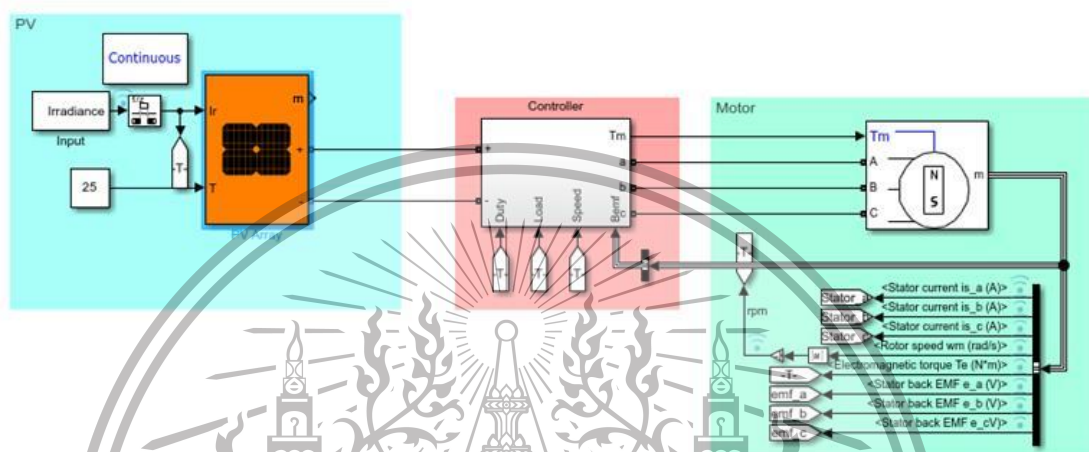
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.9 .ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการทำ PV simulation

เนื่องจาก DC supply ไม่สามารถประพุดิตัวได้เหมือนแผงโซลาร์เซลล์ได้ จึงจำเป็นต้องใช้ PV simulation ในการทดสอบระบบปั้มน้ำ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการจำลอง ดังรูปที่ 3.13 และตั้งค่า Parameter ต่างๆตามแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ดังตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.13 วงจรระบบปั้มน้ำโซลาร์เซลล์ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

โดยแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 125W จำนวน 2 แผง ซึ่งต่อขนานกันมีค่าพารามเตอร์ต่างๆดังนี้

ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

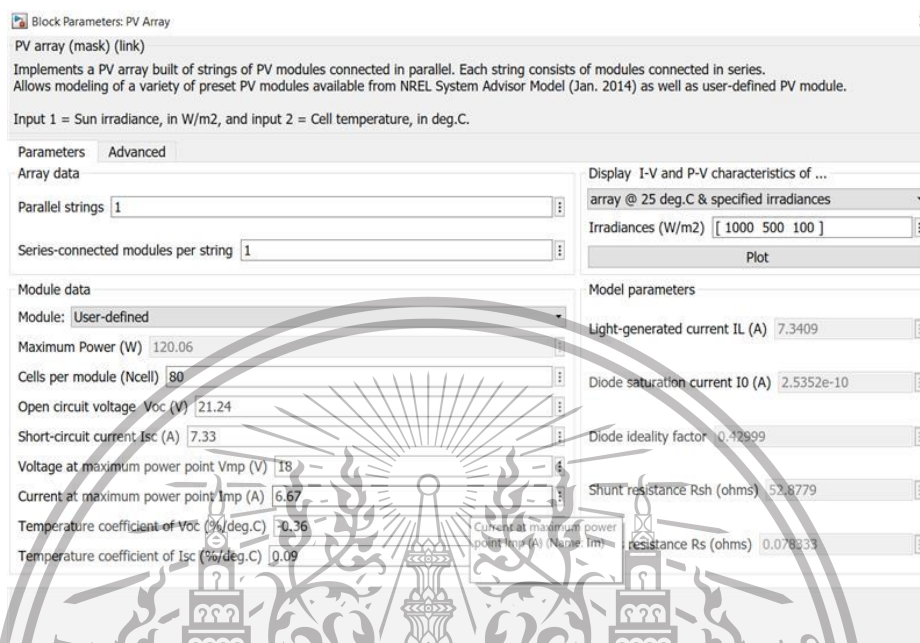
พารามิเตอร์	ขนาด(V,A)
1. $V_{mp}$	18.0 V
2. $I_{mp}$	6.67 A
3. $V_{oc}$	21.24 V
4. $I_{sc}$	7.33 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

นำค่าพารามิเตอร์ของแผงโซลาร์เซลล์ไปใส่ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อจำลอง curve ของแผงโซลาร์เซลล์ที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ค่าพารามิเตอร์ของแผงโซลาร์เซลล์ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

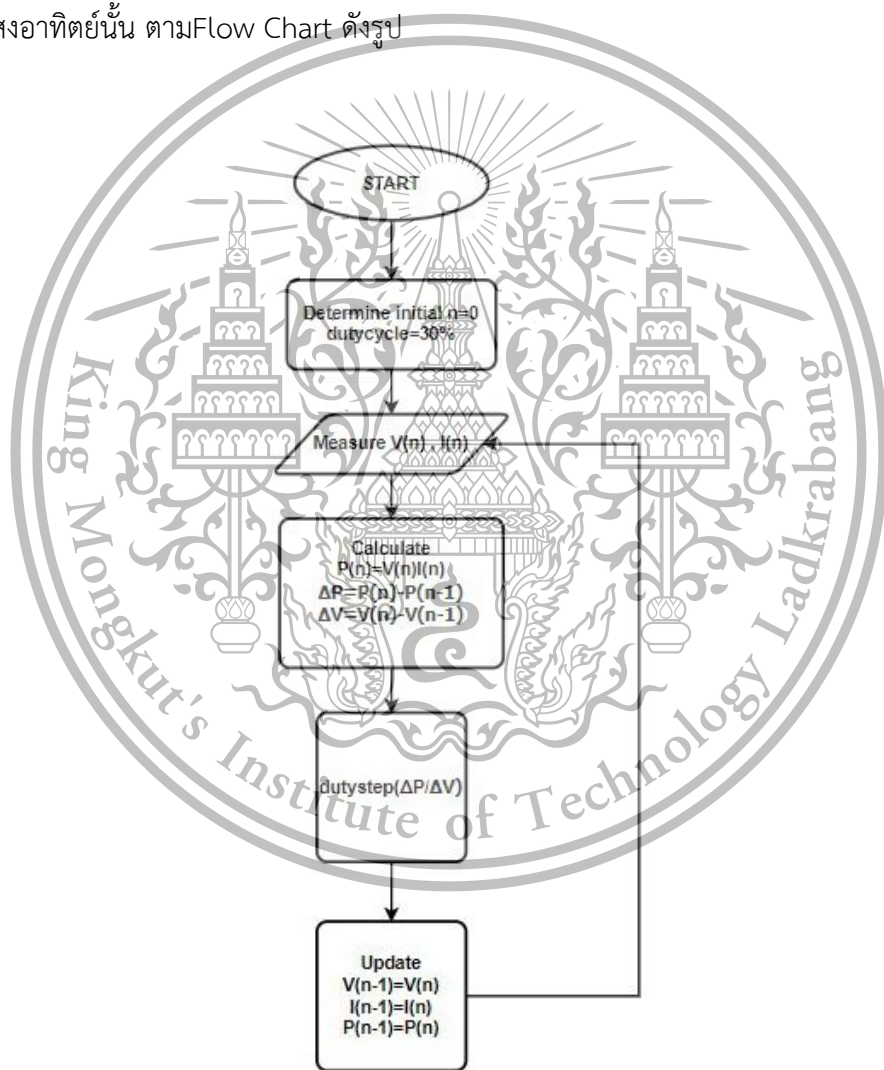
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.10 การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วย PID tuning

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความเข้มของแสงอาทิตย์ (Solar Radiation), อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (Ambient Temperature) และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell Temperature) ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้รับการออกแบบให้ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์สำหรับการตรวจสอบคำสั่งไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดเวลา หากตรวจสอบพบว่า กลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกสูงกว่า จะย้ายจุดควบคุมไปยังแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ตาม Flow Chart ดังรูป



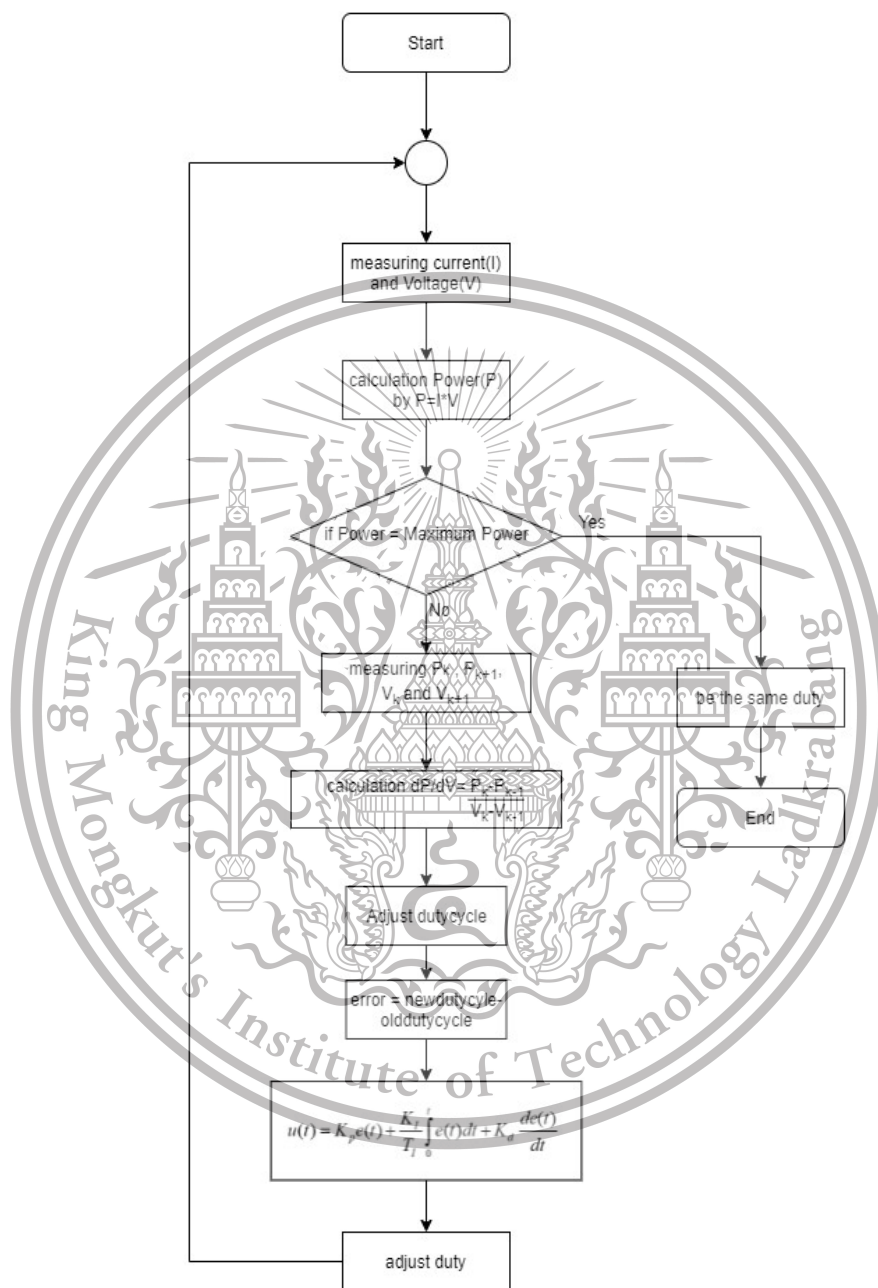
รูปที่ 3.15 Flow chart แสดงการทำงานของระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำให้ทราบว่าระบบนี้มีผลตอบสนองในรูป duty cycle ของสัญญาณ PWM

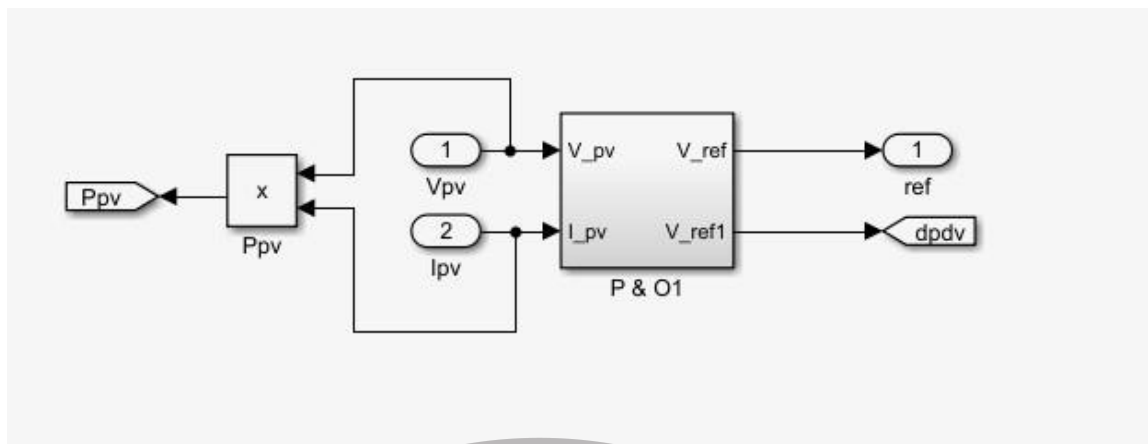


รูปที่ 3.16 Flow chart แสดงการทำงานการควบคุมแบบ PID

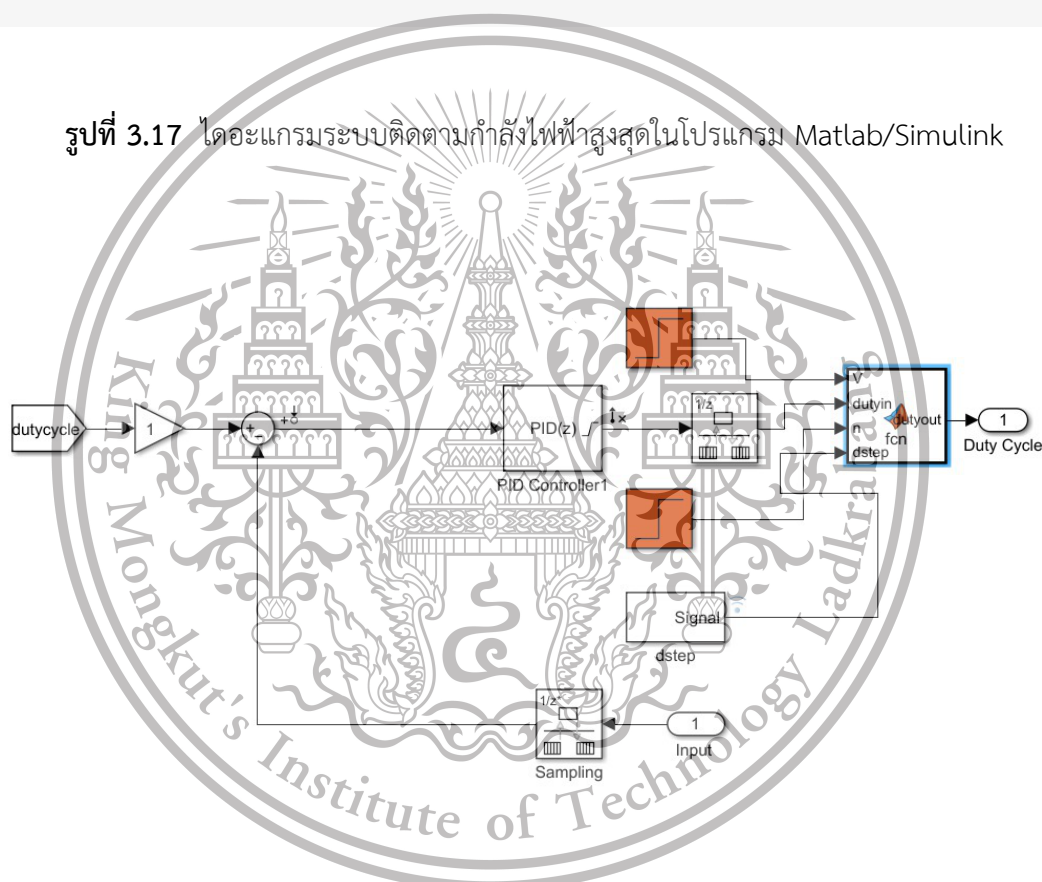
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.17 ไดอะแกรมระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในโปรแกรม Matlab/Simulink



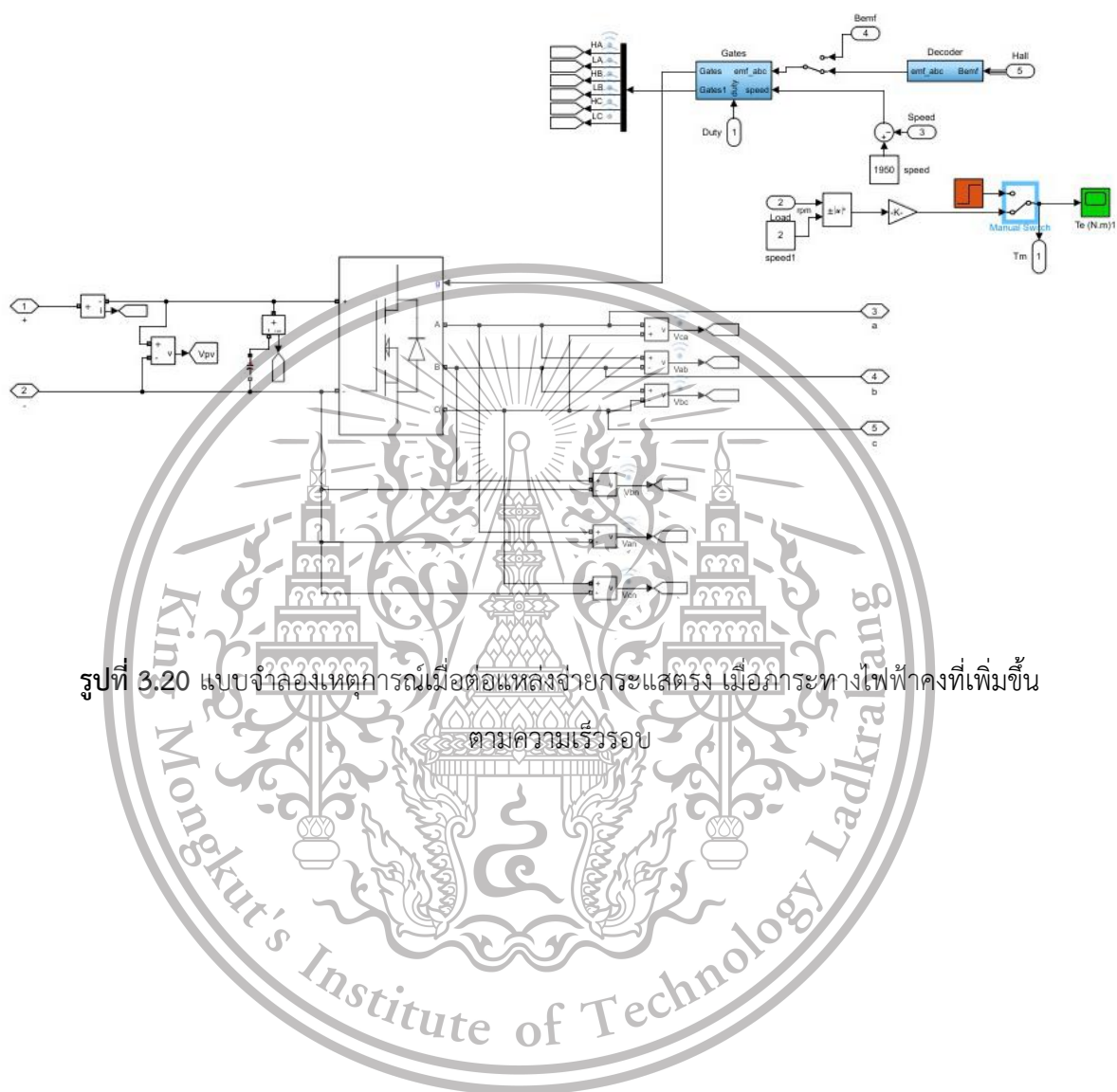
รูปที่ 3.18 ไดอะแกรมระบบ PID ในโปรแกรม Matlab/Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.





รูปที่ 3.20 แบบจำลองเหตุการณ์เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรง เมื่อภาระทางไฟฟ้าคงที่เพิ่มขึ้น ตามความเร็วรอบ

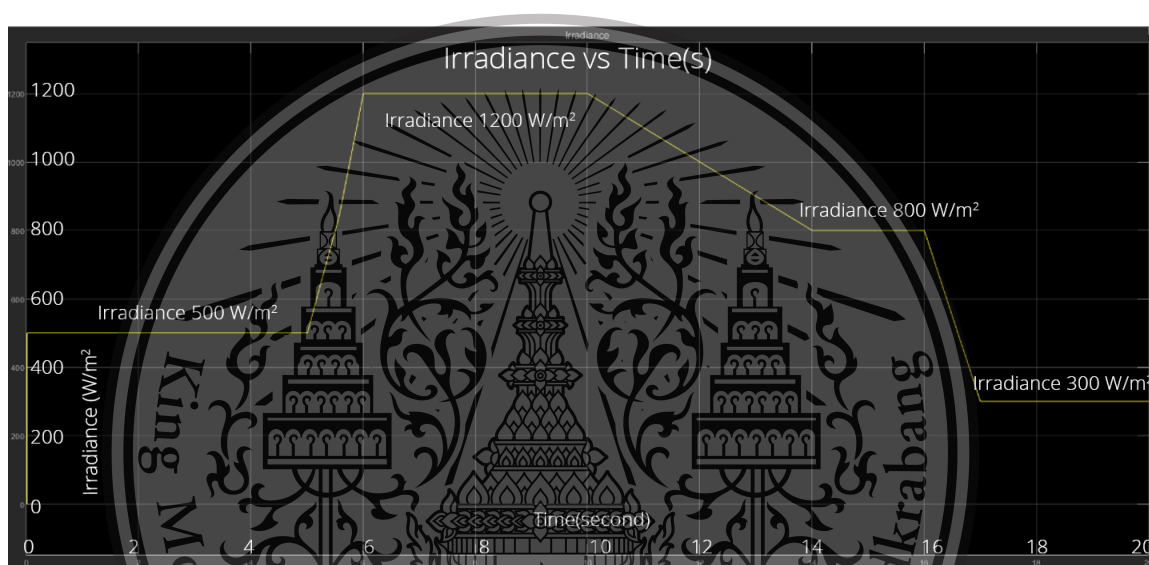
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.12.3 การทดสอบพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อต่อแผงโซลาร์เซลล์ เมื่อภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ

กำหนดให้แหล่งจ่ายเป็นแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผงขนาดแผงละ 120 วัตต์และภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เกิดขึ้น โดยทดลองที่ค่าความเข้มแสง  $500 \text{ W/m}^2$  แล้วปรับค่าความเข้มแสงไปที่  $1200 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  และ  $300 \text{ W/m}^2$  ตามลำดับ เพื่อหาผลตอบสนองของเหตุการณ์ณ์จำลองดังกล่าวว่าส่งผลอย่างไรกับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 กราฟความเข้มแสงตามเหตุการณ์ณ์จำลอง

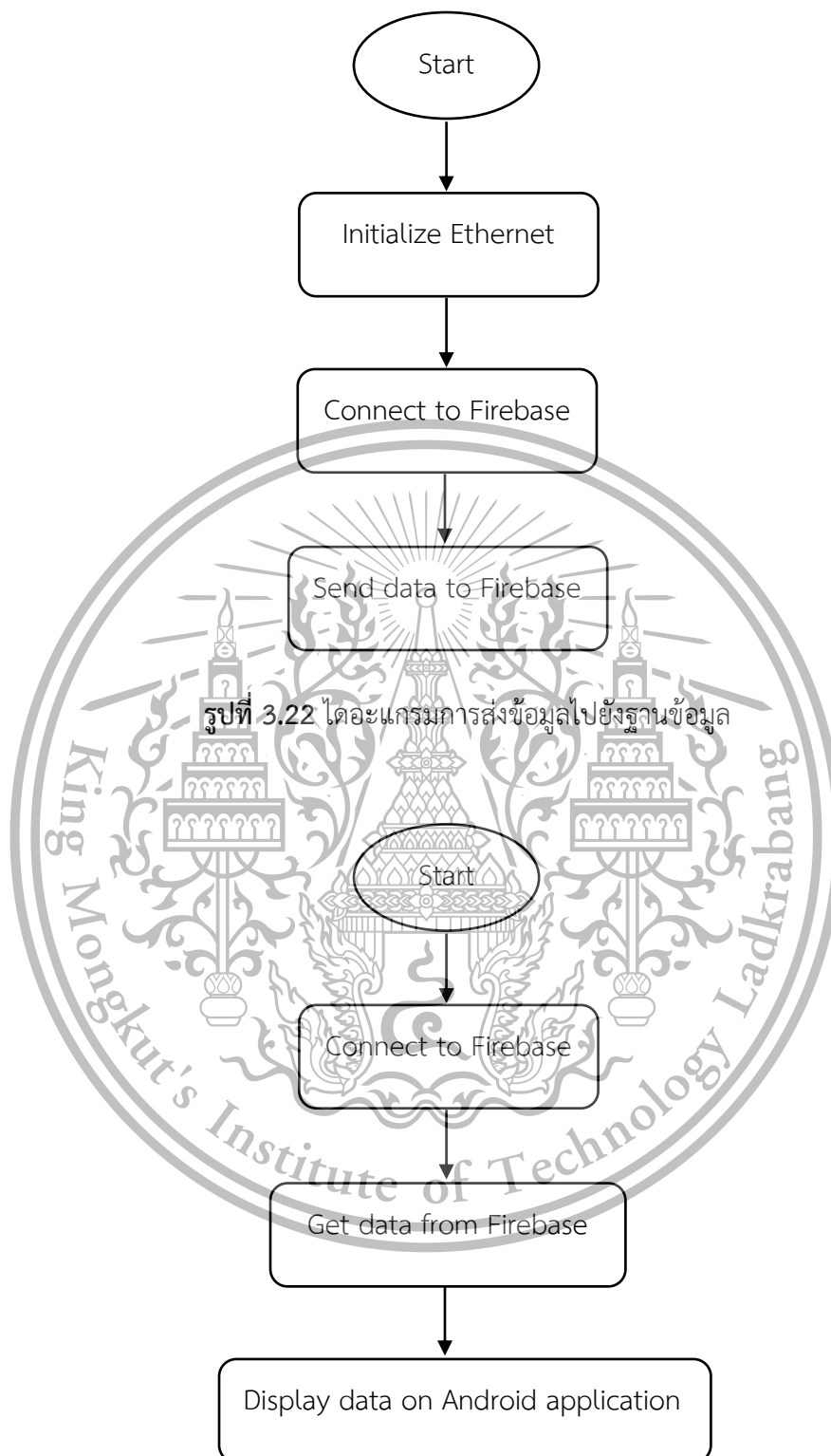
### 3.12 Internet of things (IOT)

ใช้การส่งข้อมูลจากบอร์ด Nucleo-H743ZI2 ไปเก็บไว้ในฐานข้อมูลผ่านระบบ Ethernet ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ฝั่งส่งข้อมูล และฝั่งรับข้อมูล โดยทำการเชื่อมต่อบอร์ด Nucleo-H743ZI2 กับฐานข้อมูล และส่งข้อมูล 2 แบบ คือ ข้อมูลที่จะเขียนทับทุกครั้งและส่ง และข้อมูลที่จะเขียนทับทุกสัปดาห์ โดยข้อมูลที่เขียนทับทุกครั้งจะส่งทุก ๆ 1 วินาที แต่ข้อมูลที่เขียนทับทุกสัปดาห์จะส่งทุก ๆ 30 นาที ส่วนฝั่งรับจะทำการรับข้อมูลจากฐานข้อมูลมาแสดงผล โดยจะรับข้อมูลมาแสดงผลใหม่ทุกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.22 ไตอะแกรมการส่งข้อมูลไปยังฐานข้อมูล

รูปที่ 3.23 ไตอะแกรมการรับข้อมูลจากฐานข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

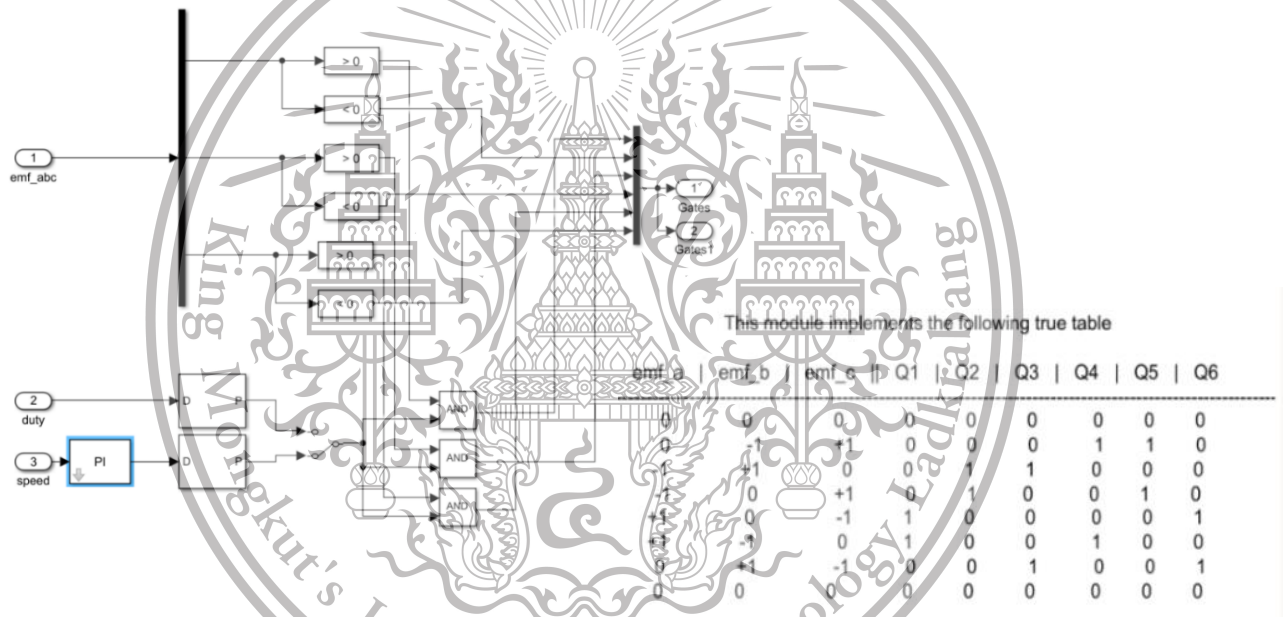
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการออกแบบการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

การออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านนี้เป็นการออกแบบที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมข้างต้น และใช้พื้นฐานทางวิชาพีเอชเอวีอิเล็กทรอนิกส์ช่วยในการออกแบบ ระบบควบคุมนี้โดยมีส่วนที่ออกแบบ แสดงดังต่อไปนี้



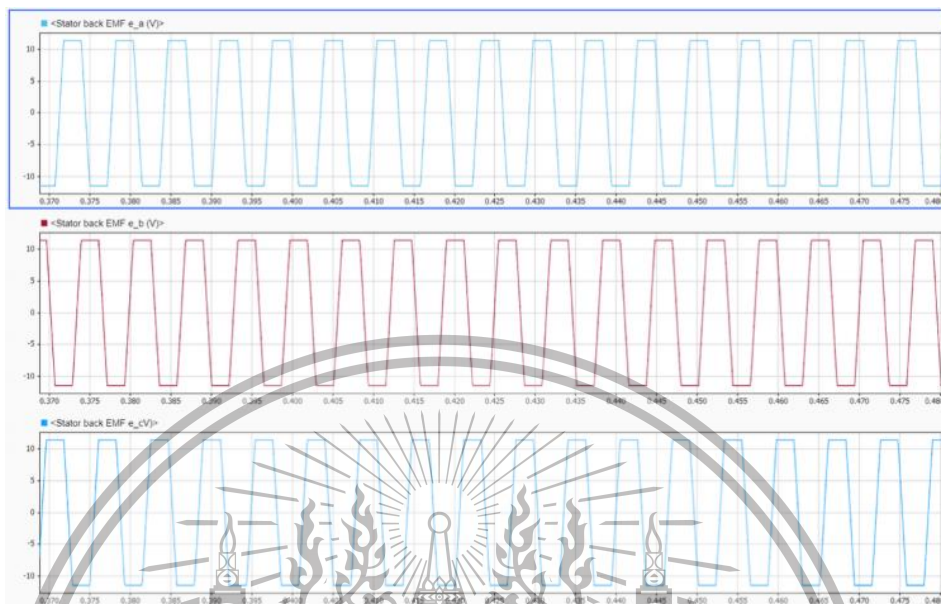
รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมวงจรตรวจจับจุดตัดผ่านศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

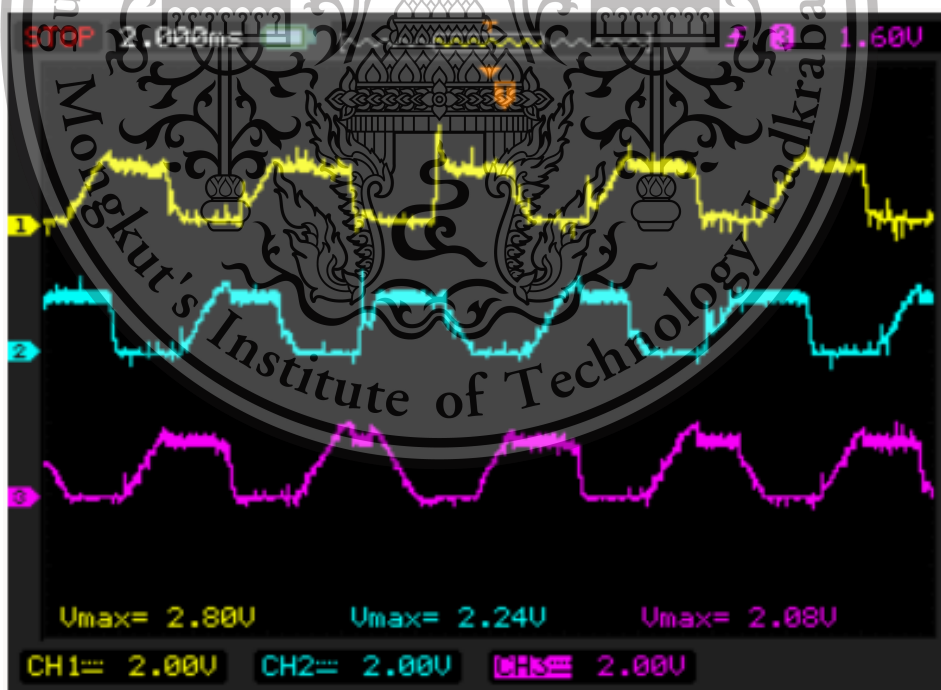
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 4.1.1 ผลการจำลองจาก MATLAB/SIMULINK และการทดลอง



รูปที่ 4.2 สัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์(BEMF) ทั้ง 3 เฟส บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

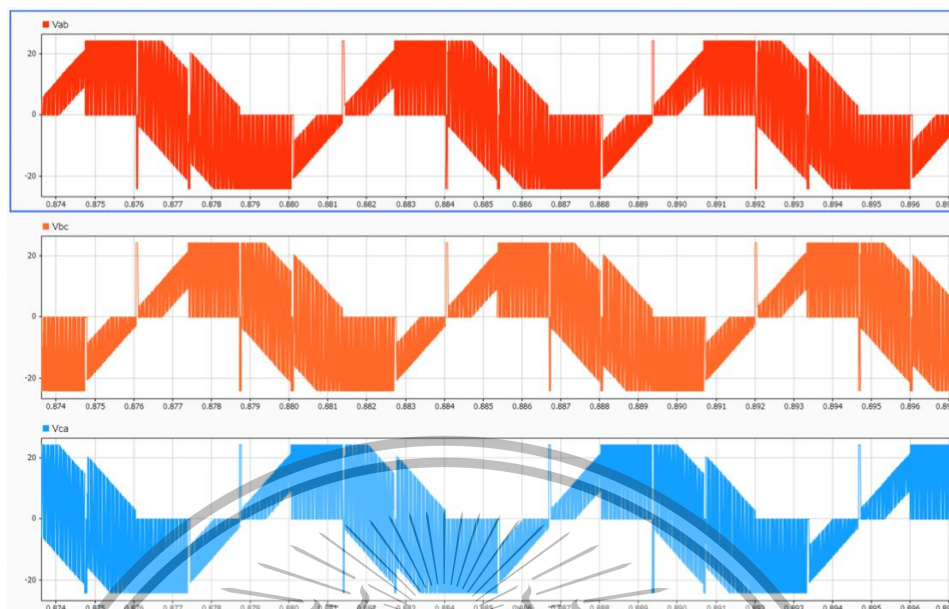


รูปที่ 4.3 สัญญาณตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์(BEMF) ทั้ง 3 เฟส วัดจากออสซิลโลสโคป

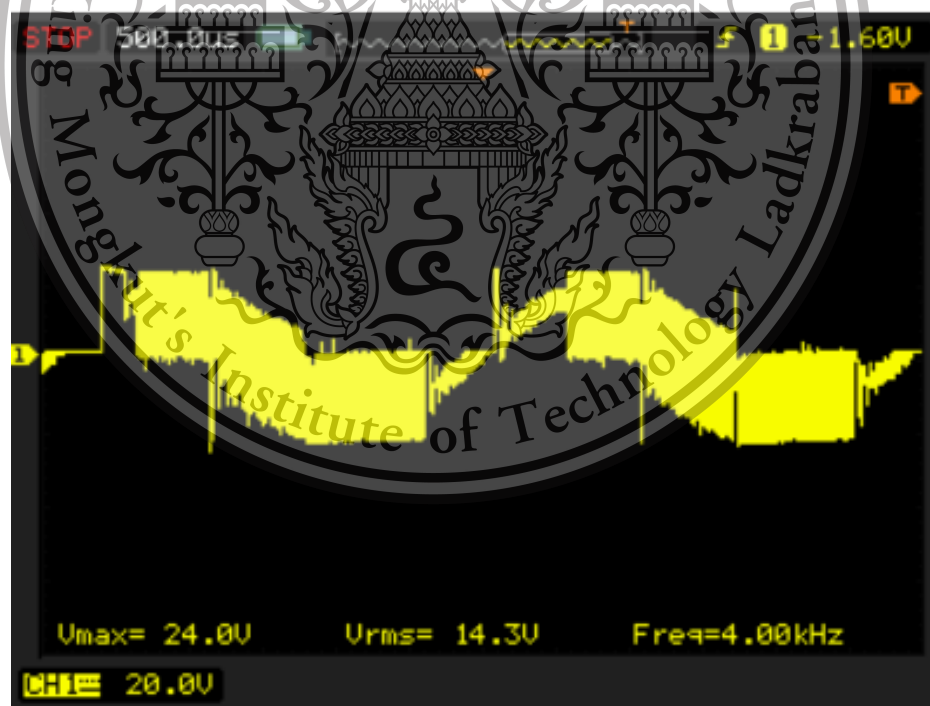
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์หรือสื่อสังคมออนไลน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส ทั้ง 3 เฟส บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

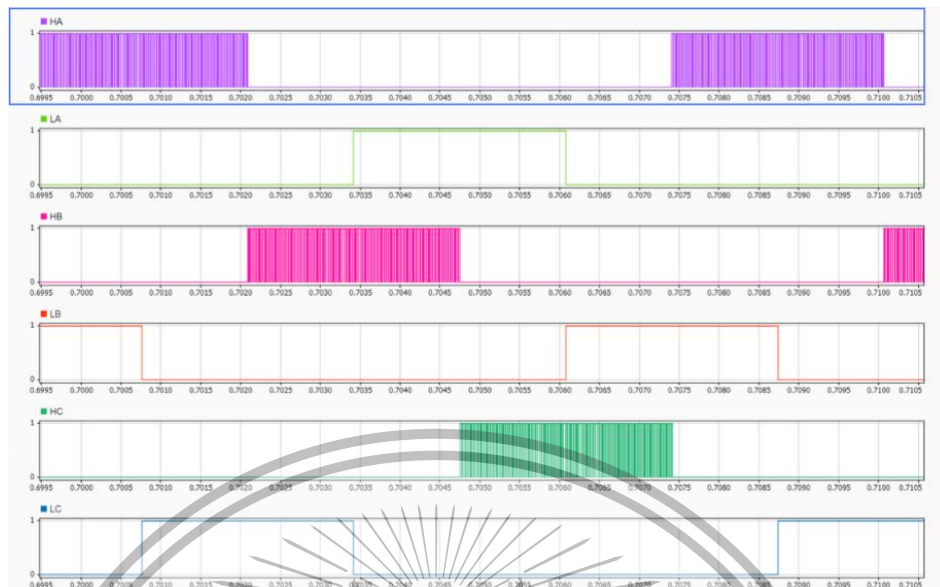


รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส วัดจากออสซิลโลสโคป

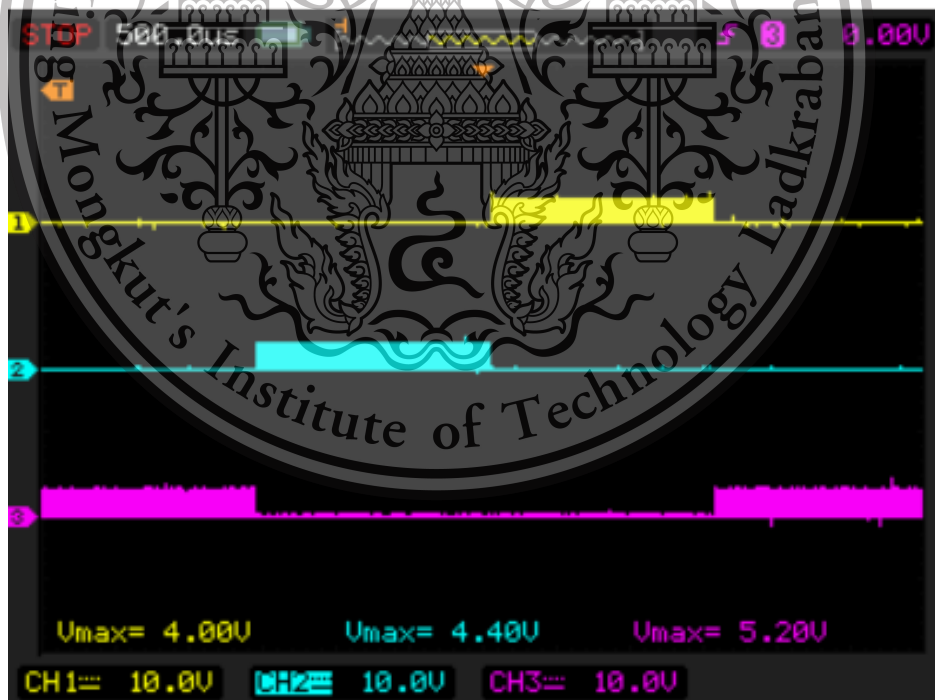
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.6 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับเคลื่อน High-Low ทั้ง 3 เฟส บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

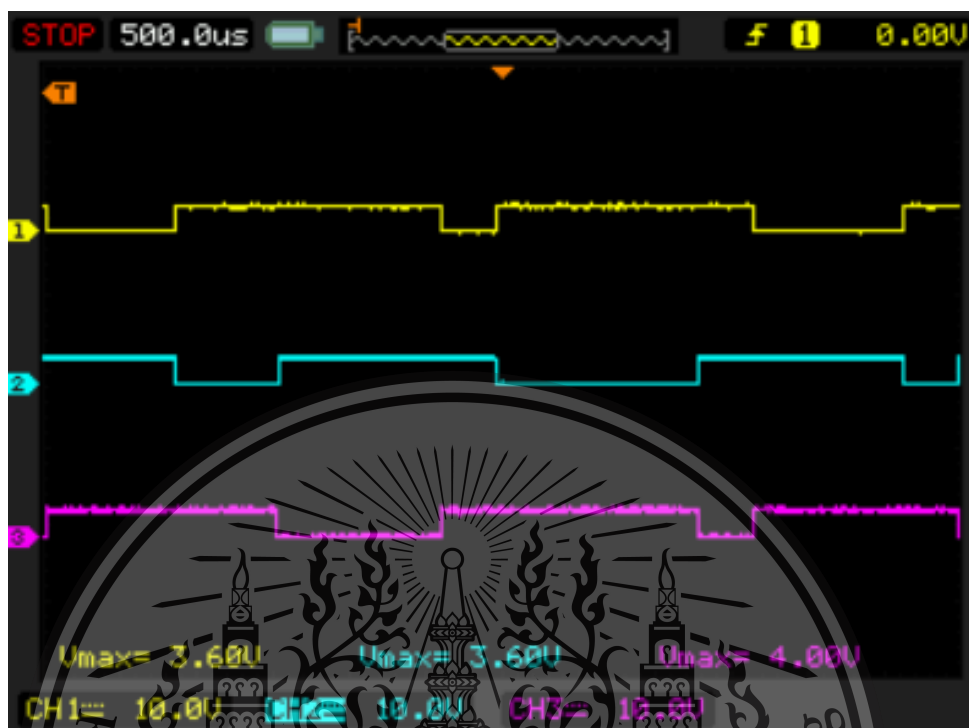


รูปที่ 4.7 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับเคลื่อน High ทั้ง 3 เฟส วัดจากออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.8 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับขาคณะ LOW ทั้ง 3 เฟส วัดจากออสซิลโลสโคป

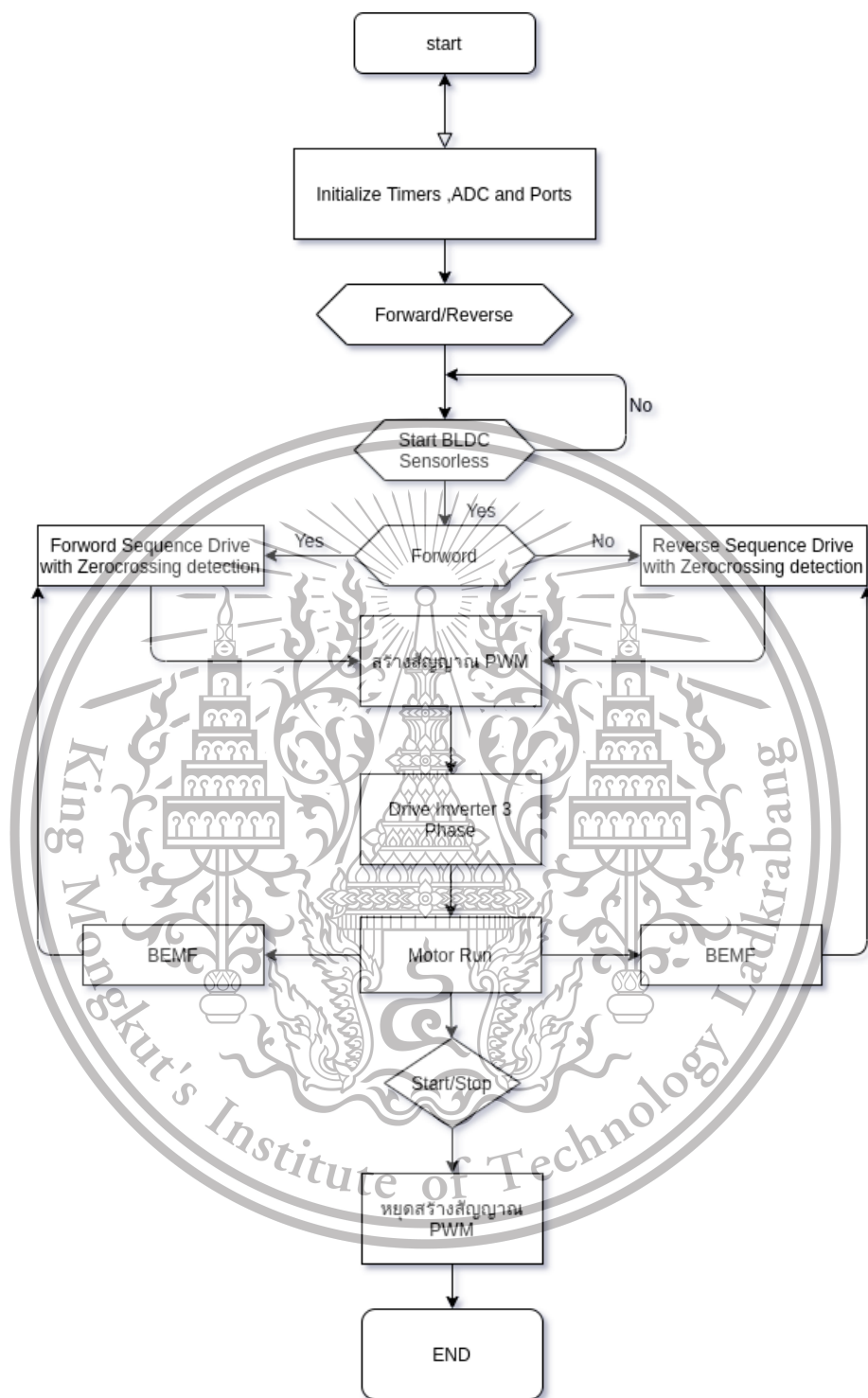
#### 4.1.2 อัลกอริทึมในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเป็นตัวบอกตำแหน่งของโรเตอร์ แต่ในช่วงเริ่มต้นนั้นแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับมีขนาดไม่เพียงพอสำหรับการตรวจจับ จึงต้องกระตุ้นในช่วงแรกเพื่อให้มอเตอร์มีความเร็วเพียงพอที่จะทำให้แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับมีขนาดเพียงพอต่อการตรวจจับ โดยทำการกระตุ้นคู่เฟสใดคู่เฟสหนึ่งของสเตเตอร์ จากนั้นก็กระตุ้นคู่เฟสลำดับถัดไป โดยระยะเวลาในการเปลี่ยนลำดับจะน้อยลงเรื่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.9 Flow chart อัลกอริทึมในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับ

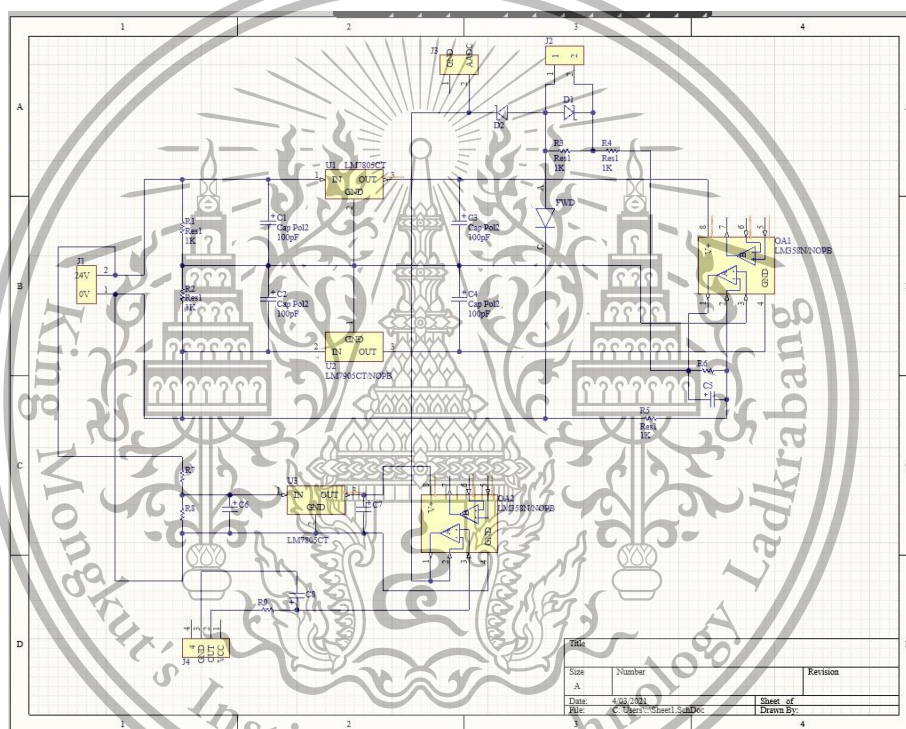
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.2 ผลการออกแบบวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันและและเซนเซอร์วัดกระแสเพื่อติดตามค่ากำลังสูงสุด

ทำการออกแบบวงจรเซนเซอร์วัดแรงดันและและเซนเซอร์วัดกระแสให้มีแนวโน้มตามทิศทางของค่าแรงดันและกระแสที่คลาดเคลื่อนน้อย เนื่องจากในช่วงย่านแรงดันที่ใช้ขับมอเตอร์มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่งอาจจะมีสัญญาณรบกวนบ้าง ดังนั้นจึงออกแบบวงจรโดยใช้อปแอมป์เพื่อลดสัญญาณรบกวนและปัญหาการวัดลูป อีกทั้งยังปรับระดับแรงดันไฟเลี้ยงของอปแอมป์จากย่านการทำงานของมอเตอร์ผ่าน linear regulation เบอร์ LM7805 ผ่านการเขียนแบบเส้นวงจรผ่านโปรแกรม Altium

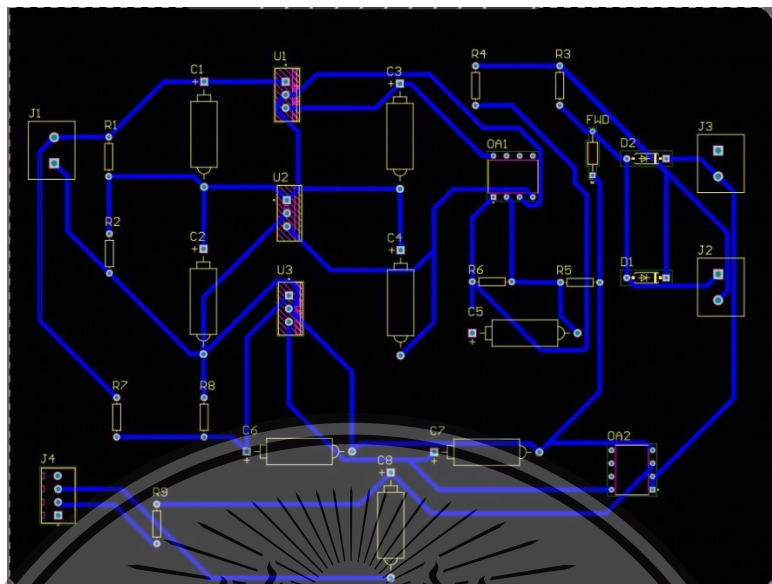


รูปที่ 4.10 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันและเซนเซอร์วัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.11 วงจรเซนเซอร์วัดแรงดันและเซนเซอร์วัดกระแสผ่านการออกแบบบนโปรแกรม Altium

เมื่อทำการกัดบอร์ดทองแดงแล้วนำมาบัดกรีดังรูปที่ 4.12 นำตัววงจรวัดแรงดันมาทำต่อเข้ากับวงจรขับปั้มน้ำกระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านเพื่อเปรียบเทียบหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดว่าสามารถเชื่อถือได้หรือไม่ นั่นคือ ทำการทดลองวัดแรงดันไฟฟ้าที่ค่าแรงดันต่าง ๆ แล้วนำมาหาความคลาดเคลื่อน จากตารางที่ 4.1 ได้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.143 โวลต์

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบหาค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์วัดแรงดัน

แรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ (โวลต์)
16	15.8
17	16.9
18	17.9
19	18.8
20	19.9
21	20.9
22	21.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

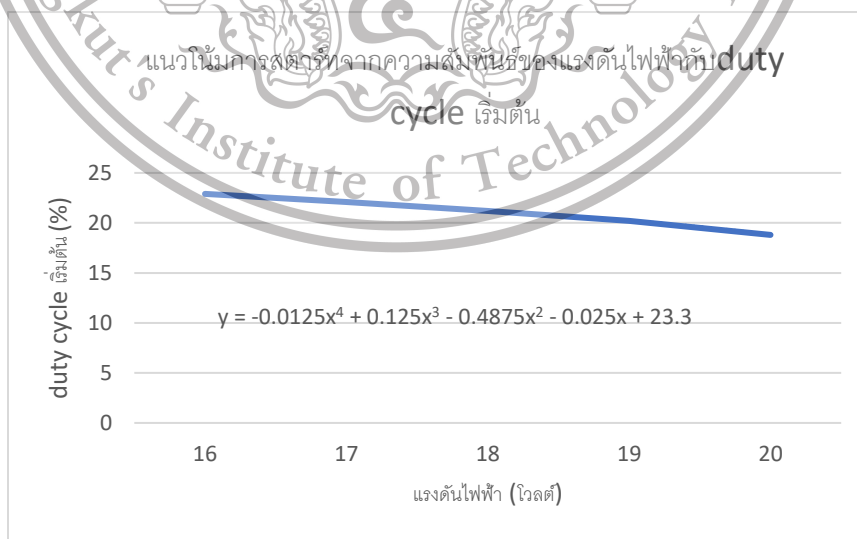
### 4.3 การปรับปรุงความเสถียรของการสตาร์ทมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

#### 4.3.1 การปรับปรุงความเสถียรของการสตาร์ทมอเตอร์

จากการสังเกตช่วงเวลาที่เสถียรที่มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ได้เกิดเงื่อนไขบางประการที่จำเป็นขึ้น นั่นคือ การสตาร์ทมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านไม่สามารถสตาร์ทที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 15 โวลต์ได้ และถ้าสตาร์ทที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ ต้องมีค่า duty cycle เริ่มต้นไม่ต่ำกว่าเท่าไร เพราะถ้าค่าพารามิเตอร์ที่ทำการสตาร์ทมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าจะทำให้มอเตอร์เริ่มสตาร์ทแล้วค้างทางคณะผู้จัดทำจึงหาแนวโน้มการสตาร์ทของมอเตอร์โดยใช้ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับ duty cycle เริ่มต้นของมอเตอร์

ตารางที่ 4.2 แนวโน้มการสตาร์ทจากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับ duty cycle เริ่มต้นของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	duty cycle เริ่มต้น (%)
16	22.9
17	22.1
18	21.2
19	20.2
20	18.8



รูปที่ 4.12 แนวโน้มการสตาร์ทจากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับ duty cycle เริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.3.2 ผลการปรับปรุงความเสถียรของการสตาร์ทมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

จากการศึกษาแนวโน้มการสตาร์ทจากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับ duty cycle เริ่มต้นของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ทางคณะผู้จัดทำจึงหาแนวโน้มการสตาร์ทของมอเตอร์โดยใช้ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับ duty cycle เริ่มต้นของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเป็นสมการโพลิโนเมียล แล้วสมการที่ได้มาออกแบบชุดคำสั่งเพื่อควบคุมมอเตอร์ช่วงสตาร์ทให้สามารถสตาร์ทขึ้นและสามารถออกจากชุดคำสั่งสตาร์ทเพื่อทำงานในชุดคำสั่งต่อไปได้



รูปที่ 4.13 (ก) ผลจากการปั้มน้ำเมื่อมีค่าพารามิเตอร์ต่ำกว่าแนวโน้ม

(ข) ผลจากการปั้มน้ำเมื่อมีค่าพารามิเตอร์ต่ำกว่าแนวโน้ม

จากรูปที่ 4.13 (ก) จะเห็นได้ว่าน้ำไม่ไหลออกมาจากสายยางเนื่องจากในขณะที่ทำการทดลอง ไม่สามารถขับมอเตอร์ปั้มน้ำได้และมอเตอร์หยุดการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

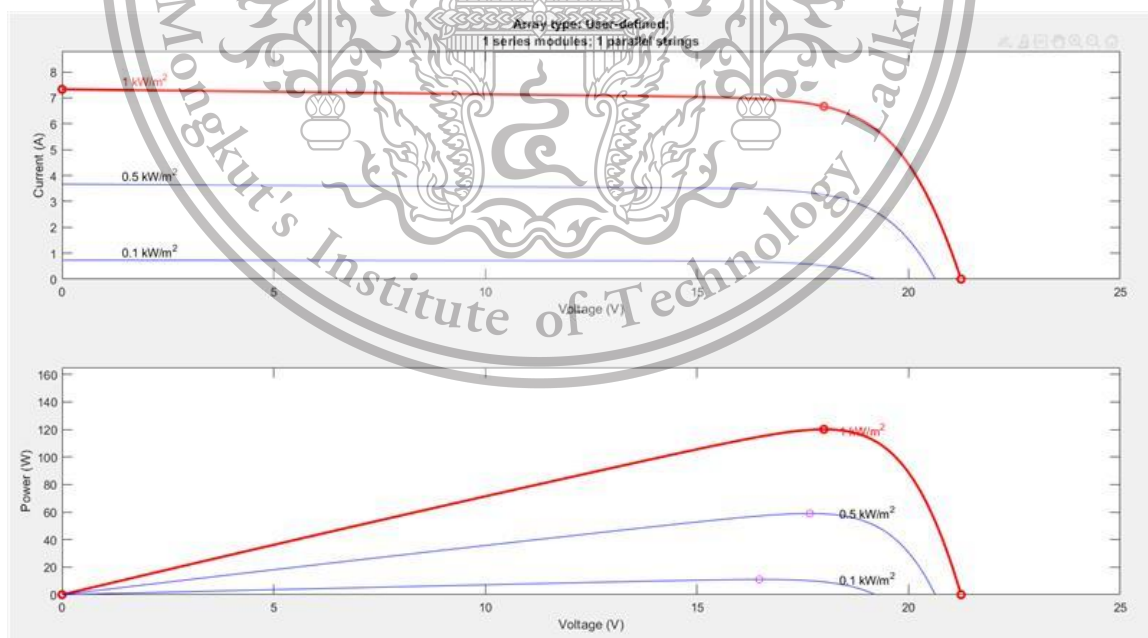
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากผลการปรับปรุงความเสถียรของการสตาร์ทมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจากรูปที่ 4.13 (ข) การสตาร์ทมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านไม่สามารถสตาร์ทที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 15 โวลต์ได้ และถ้าสตาร์ทที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ ต้องมี duty cycle เริ่มต้นค่าไม่ต่ำกว่าเท่าไร นั่นคือจากรูปที่ 4.13 (ก) มอเตอร์ไม่สามารถสตาร์ทให้ผ่านได้ ลักษณะของการทำงานมีเสียงไม่พึงประสงค์ และโรเตอร์มีอาการคล้ายถูกล็อกและค้างไป ถ้ามีการสตาร์ทที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมและเป็นไปตามแนวโน้มการสตาร์ทจากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับ duty cycle เริ่มต้น จะสามารถสตาร์ทผ่านลูปและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพดังรูปที่ 4.13 (ข)

#### 4.4 ผลการจำลองการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

4.4.1 ผลการจำลองแผงโซลาร์เซลล์โดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK จากการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแผงโซลาร์เซลล์ไปจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อหาความสัมพันธ์ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ากับค่าความเข้มแสงที่แผงโซลาร์เซลล์ได้รับ โดยวัดความเข้มแสงที่ 1000, 500 และ 100 วัตต์ต่อตารางเมตร ได้กราฟความสัมพันธ์ I-V curve และ P-V curve ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 I-V curve และ P-V curve จาก MATLAB/SIMULINK

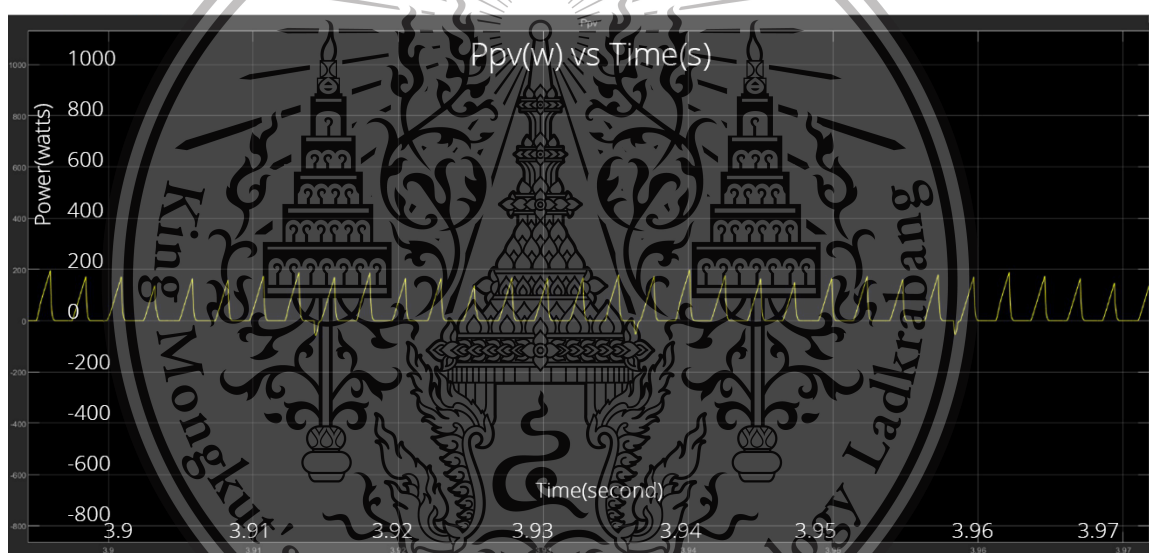
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เพื่อนำความสัมพันธ์ของความเข้มแสงที่ส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ามาทำการทดสอบผลตอบสนองของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 หัวข้อหลักๆ คือ พฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรง เมื่อภาระทางไฟฟ้าคงที่, เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรง เมื่อภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ และเมื่อต่อแผงโซลาร์เซลล์ เมื่อภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ

4.4.2 ผลทดสอบพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรง เมื่อภาระทางไฟฟ้าคงที่ จากรูปที่ 3.21 ออกแบบแบบจำลองเหตุการณ์เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรง เมื่อภาระทางไฟฟ้าคงที่ โดยกำหนดแหล่งจ่ายกระแสตรงที่ 24 โวลต์ จ่ายให้ภาระทางไฟฟ้า 1.5 นิวตัน-เมตร จะได้ผลการตอบสนองของค่ากำลังไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ดังนี้

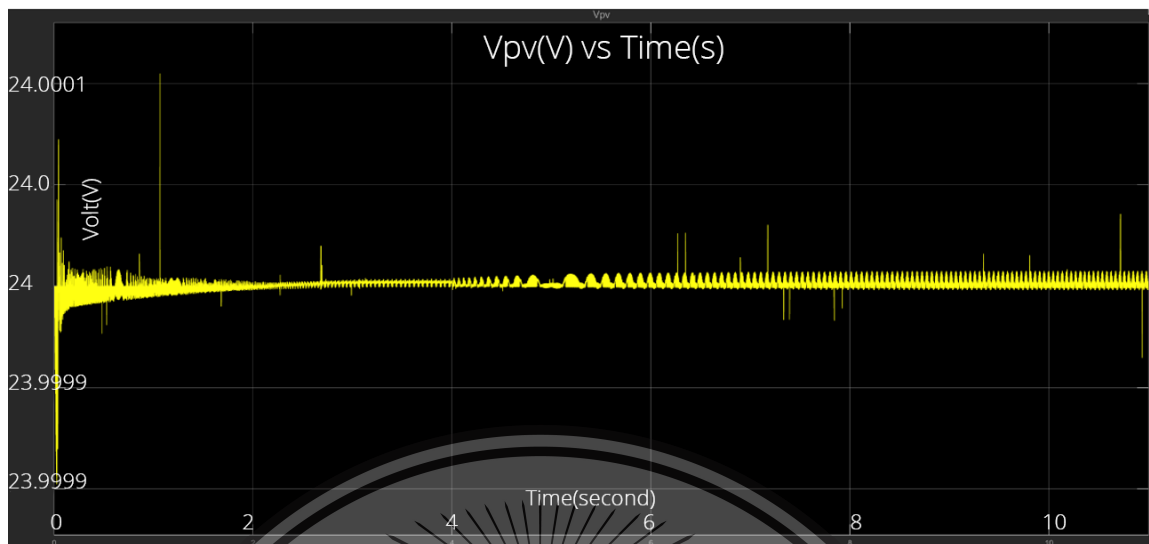


รูปที่ 4.15 ผลการตอบสนองทางกำลังไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK

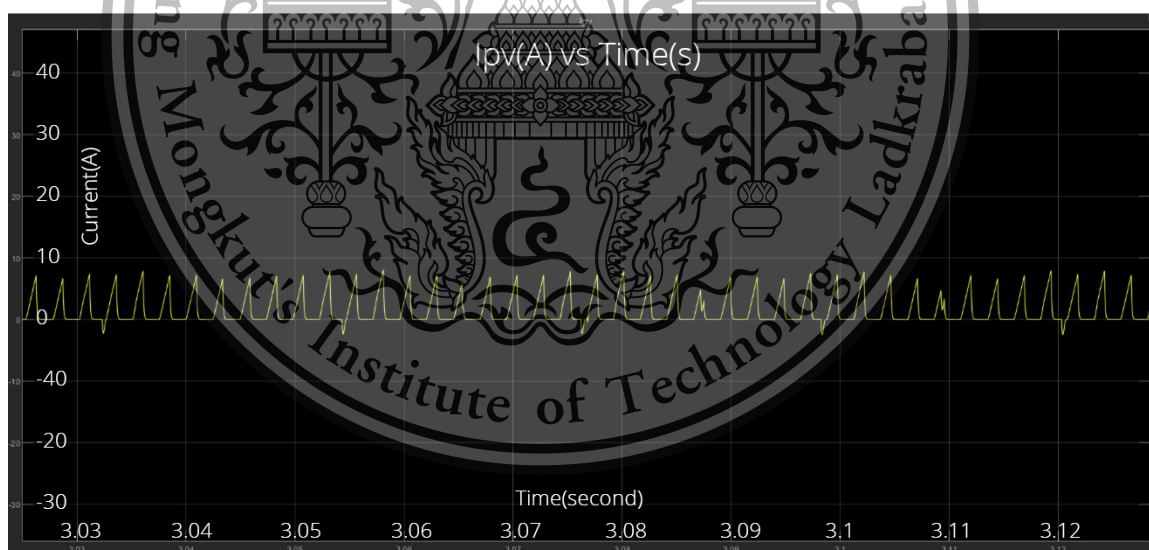
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.16 ผลการตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK



รูปที่ 4.17 ผลการตอบสนองทางกระแสไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK

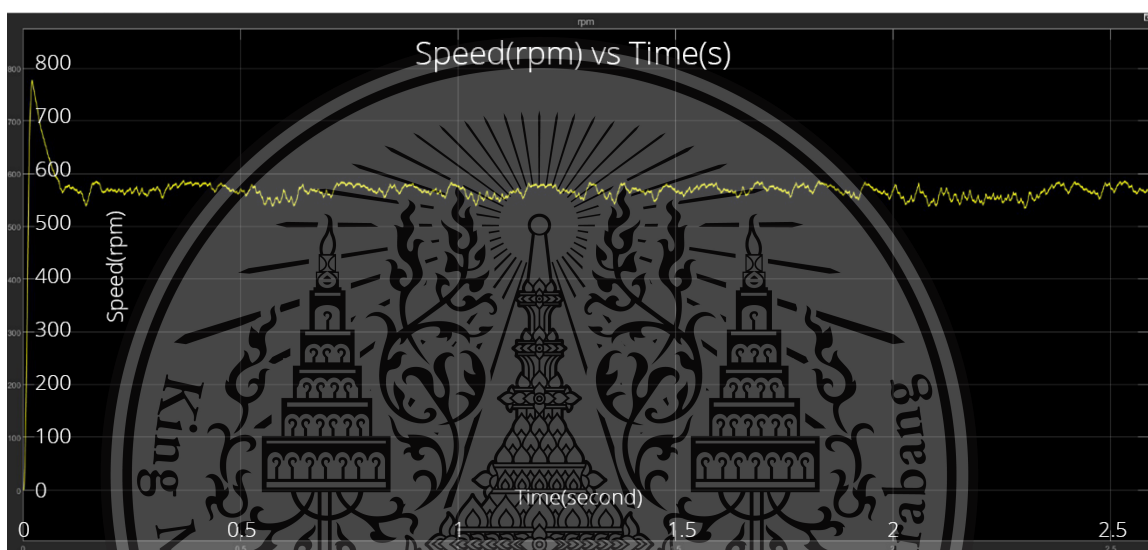
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จะเห็นได้ว่าที่ภาระทางไฟฟ้า 1.5 นิวตัน-เมตร ที่แหล่งจ่ายกระแสตรง 24 โวลต์ดังรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่ากราฟแรงดันไฟฟ้าคงที่ตลอด โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้กับภาระทางไฟฟ้านี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 8 แอมแปร์ และได้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 180 วัตต์

ในช่วงแรก เป็นช่วงเวลาที่มอเตอร์เริ่มสตาร์ท ความเร็วรอบของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและค่อยๆคงที่ตามค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่มอเตอร์สามารถตอบสนอง ได้ค่าความเร็วรอบที่มอเตอร์หมุน 570 รอบ/วินาที ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ผลการตอบสนองทางความเร็วรอบจาก MATLAB/SIMULINK

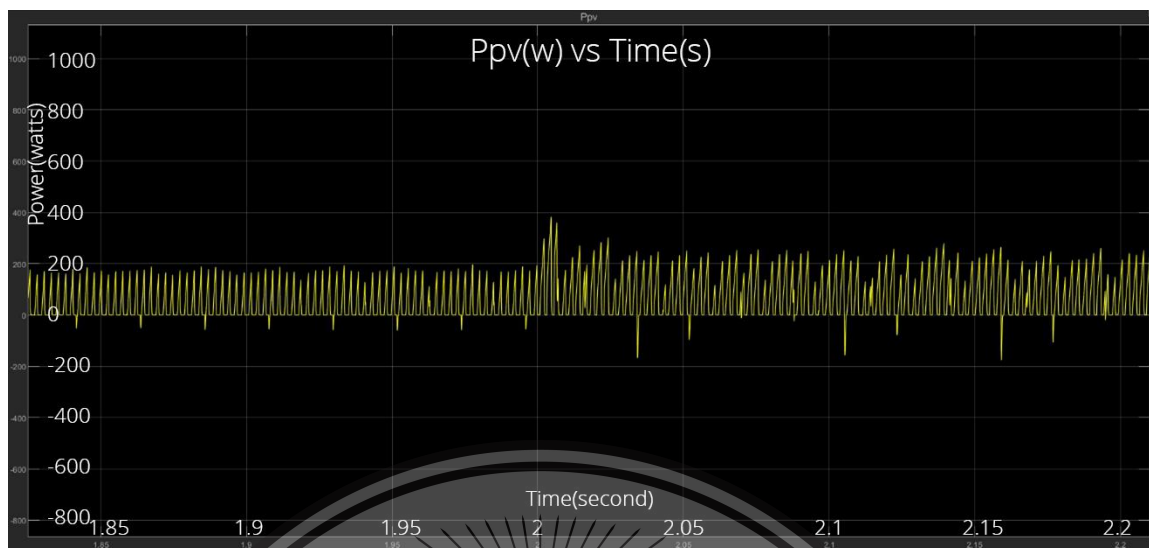
4.4.3 ผลทดสอบพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรง เมื่อภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ

จากรูปที่ 3.20 ออกแบบแบบจำลองเหตุการณ์เมื่อต่อแหล่งจ่ายกระแสตรง เมื่อภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ โดยกำหนดแหล่งจ่ายกระแสตรงที่ 24 โวลต์ จ่ายให้ภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.3-1.5 นิวตัน-เมตร จะได้ผลการตอบสนองของค่ากำลังไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ดังนี้

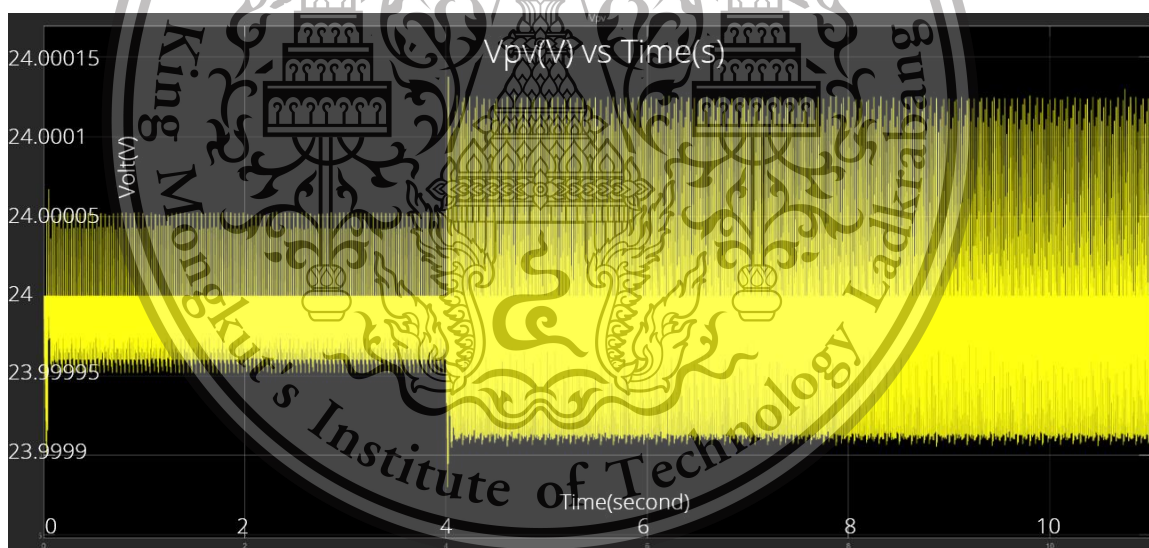
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.19 ผลการตอบสนองทางกำลังไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK

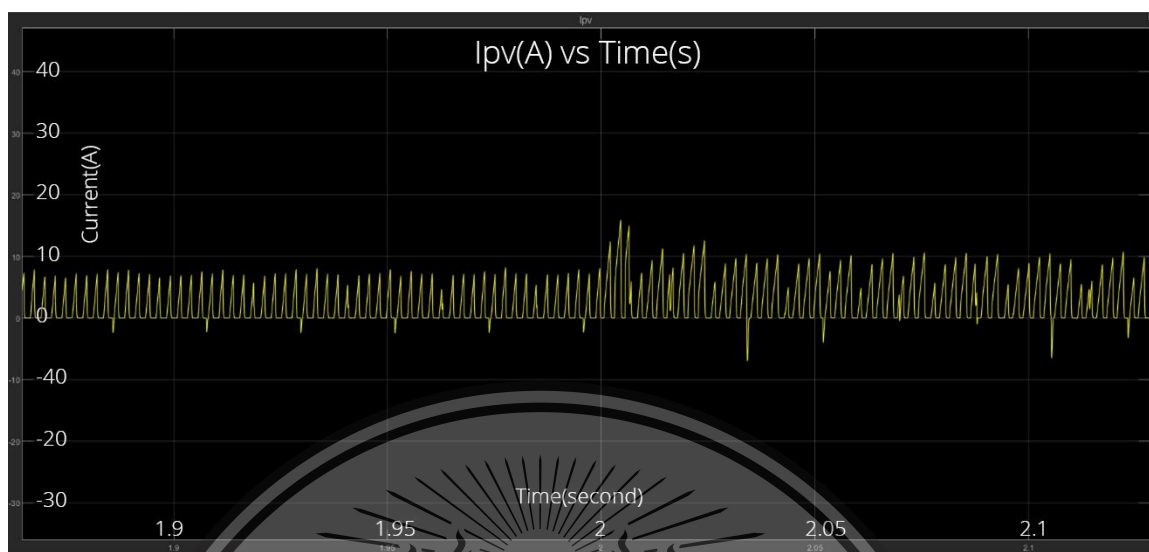


รูปที่ 4.20 ผลการตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.21 ผลการตอบสนองทางกระแสไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK

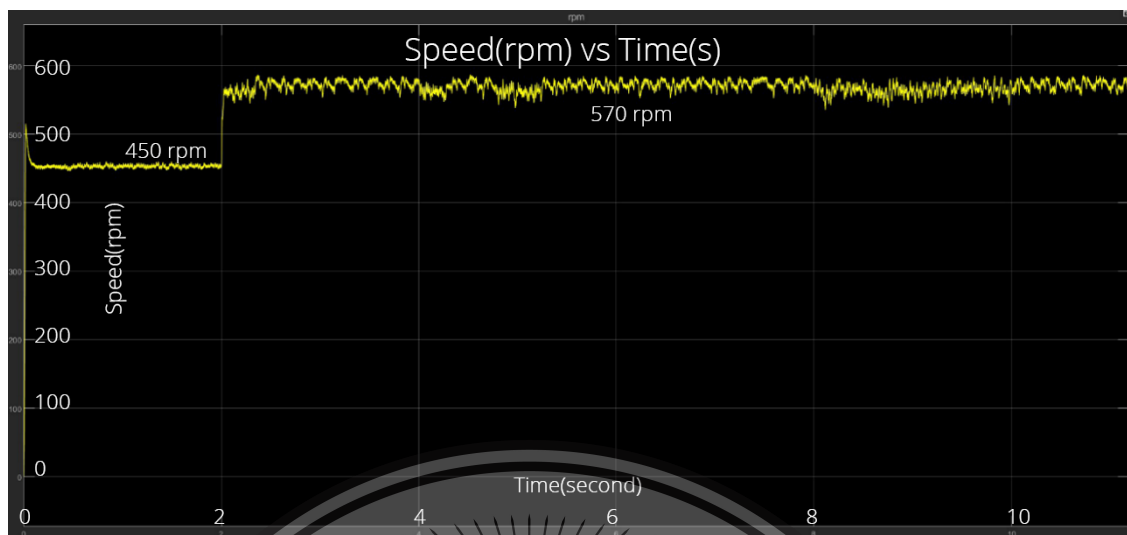
จะเห็นได้ว่าที่ภาระทางไฟฟ้า 1.5 นิวตัน-เมตร ที่แหล่งจ่ายกระแสตรง 24 โวลต์ดังรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่ากราฟแรงดันไฟฟ้าคงที่ตลอด โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้กับภาระทางไฟฟ้านี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 8 แอมแปร์ ในช่วงเวลา 0-2 วินาที หลังจากนั้นเมื่อภาระทางไฟฟ้ามีค่าเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้กับภาระทางไฟฟ้าต้องเพิ่มขึ้นที่ 10 แอมแปร์ และได้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 180 วัตต์ เมื่อภาระทางไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นประมาณ 240 วัตต์

จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 2 วินาทีแรก เป็นช่วงเวลาที่มอเตอร์เริ่มสตาร์ท ความเร็วรอบของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและค่อยๆคงที่ตามค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่มอเตอร์สามารถตอบสนองโดยมีภาระทางไฟฟ้าที่ 1.3 นิวตัน-เมตร ได้ความเร็วรอบมอเตอร์ 450 รอบ/วินาที เมื่อภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 นิวตัน-เมตร ได้ค่าความเร็วรอบที่มอเตอร์หมุน 570 รอบ/วินาที ดังรูปที่ 4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.22 ผลการตอบสนองทางความเร็วรอบจาก MATLAB/SIMULINK

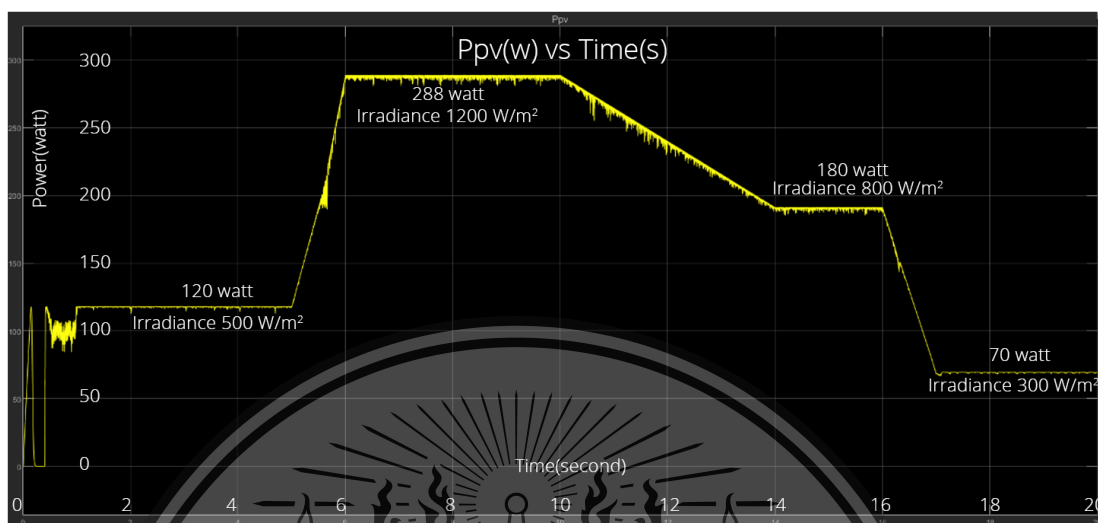
4.4.4 ผลทดสอบพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อต่อแผงโซลาร์เซลล์ เมื่อภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ

จากรูปที่ 3.21 ออกแบบแบบจำลองเหตุการณ์เมื่อต่อแหล่งจ่ายเป็นแผงโซลาร์เซลล์ เมื่อภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็ว กำหนดให้แหล่งจ่ายเป็นแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ขนาดแผงละ 120 วัตต์และภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เกิดขึ้น โดยทดลองที่ค่าความเข้มแสง  $500 \text{ W/m}^2$  แล้วปรับค่าความเข้มแสงไปที่  $1200 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$ , และ  $300 \text{ W/m}^2$  ตามลำดับ จ่ายให้ภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.3-1.5 นิวตัน-เมตร จะได้ผลการตอบสนองของค่ากำลังไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ดังนี้

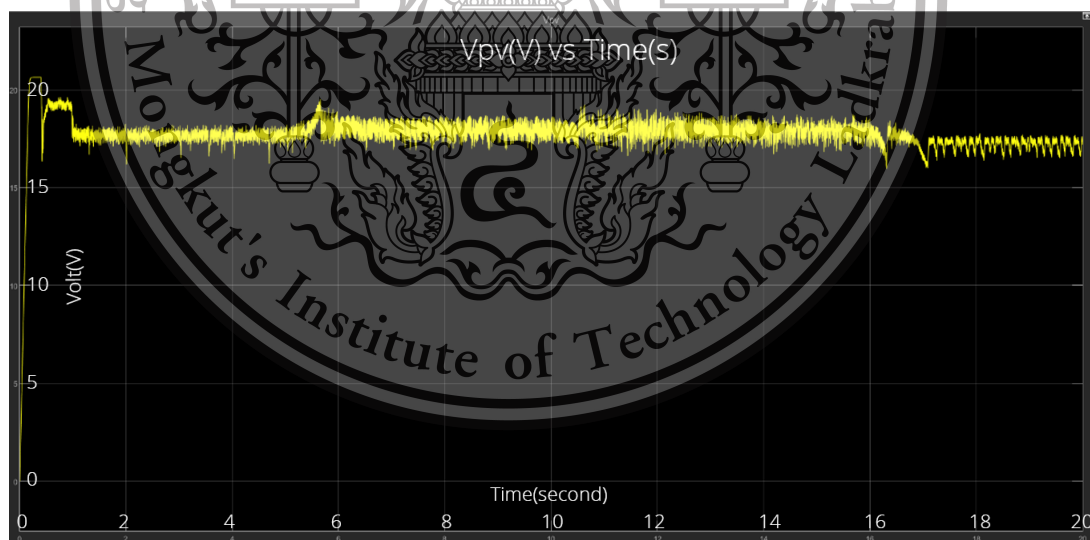
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.23 ผลการตอบสนองทางกำลังไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK

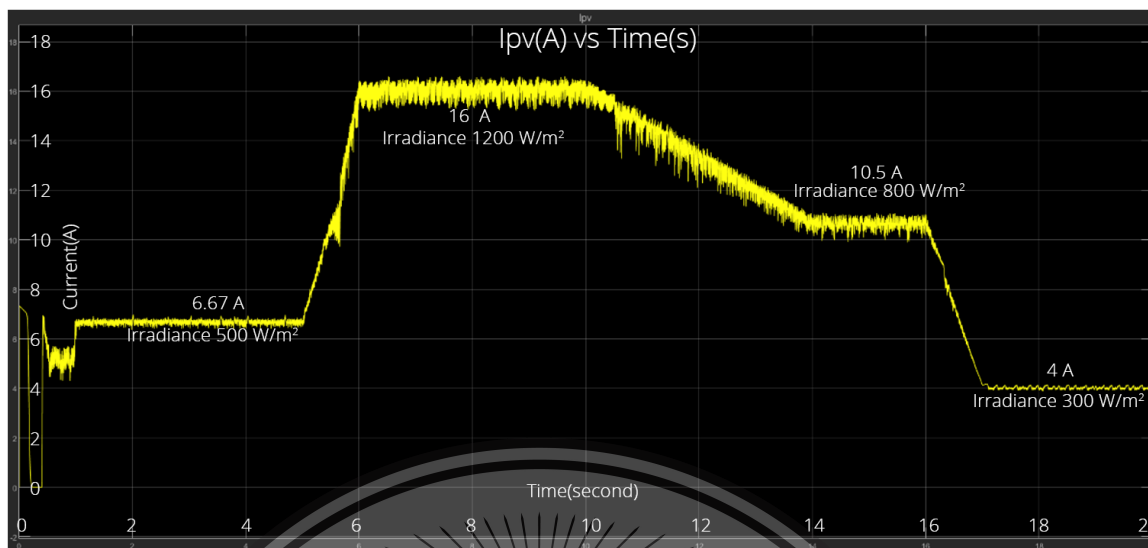


รูปที่ 4.24 ผลการตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



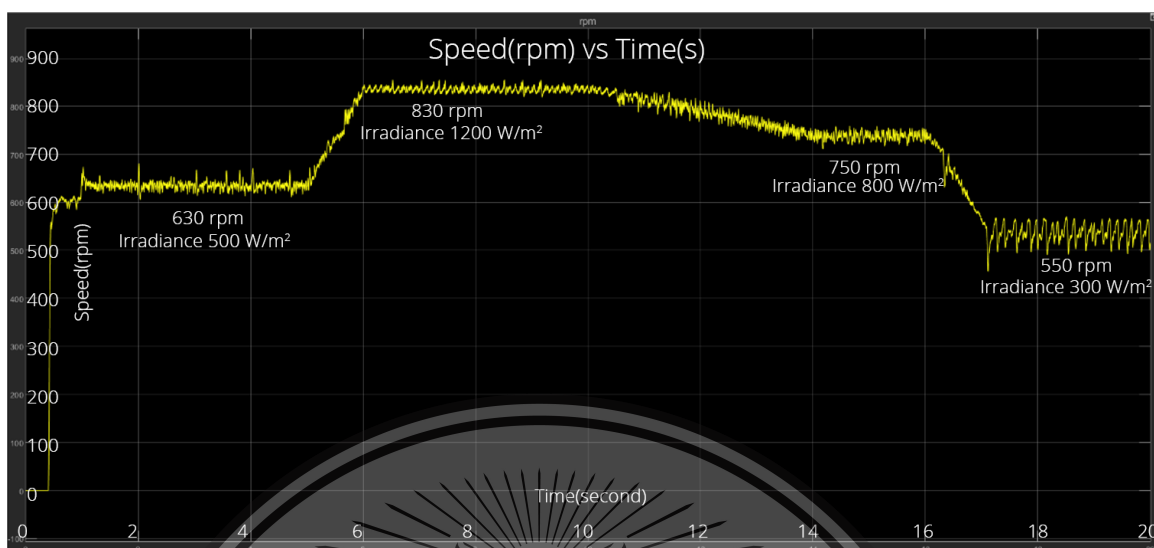
รูปที่ 4.25- ผลการตอบสนองทางกระแสไฟฟ้าจาก MATLAB/SIMULINK

จากกราฟการตอบสนองของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า สามารถอธิบายได้จากความเข้มแสงที่ค่าต่างๆ คือ ที่ค่าความเข้มแสง 500 W/m<sup>2</sup> แล้วปรับค่าความเข้มแสงไปที่ 1200 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup> และ 300 W/m<sup>2</sup> ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความเข้มแสงมีค่ามากขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นตามกราฟผลการตอบสนอง โดยที่แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากการติดตามหาจุดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าจะส่งผลกับค่าแอมพลิจูดของกำลังไฟฟ้าและมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

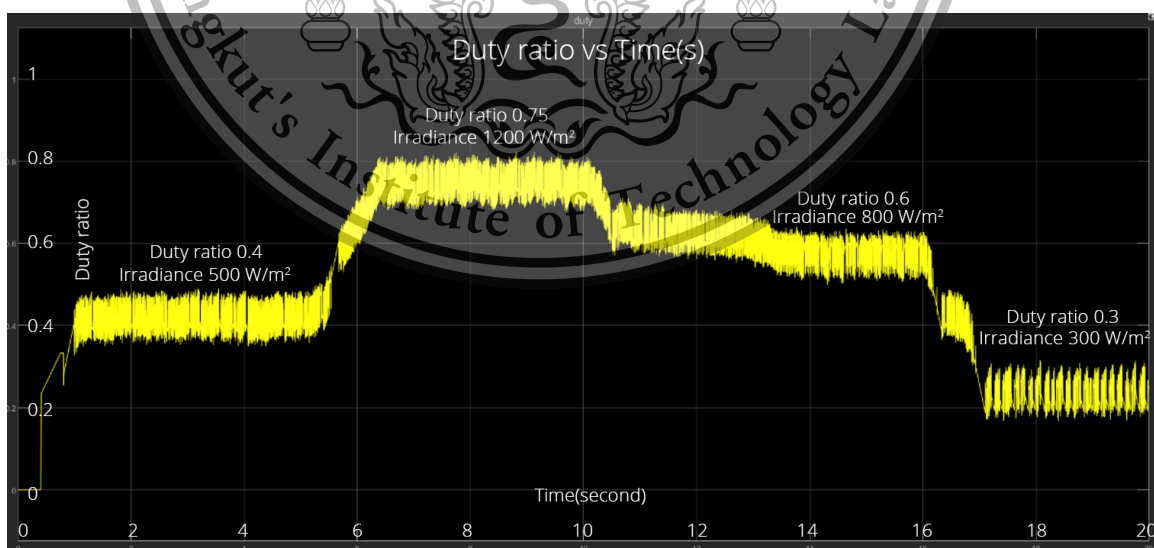
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.26 ผลการตอบสนองทางความเร็วรอบจาก MATLAB/SIMULINK

ส่วนกราฟผลการตอบสนองในรูปความเร็วรอบของมอเตอร์ อ้างอิงจากค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสง เมื่อค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าความเร็วรอบจะไต่ค่าตามพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและคงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ค่าความเร็วรอบจะเปลี่ยนแปลงตามโดยการไต่ระดับตาม ดังรูปที่ 4.26



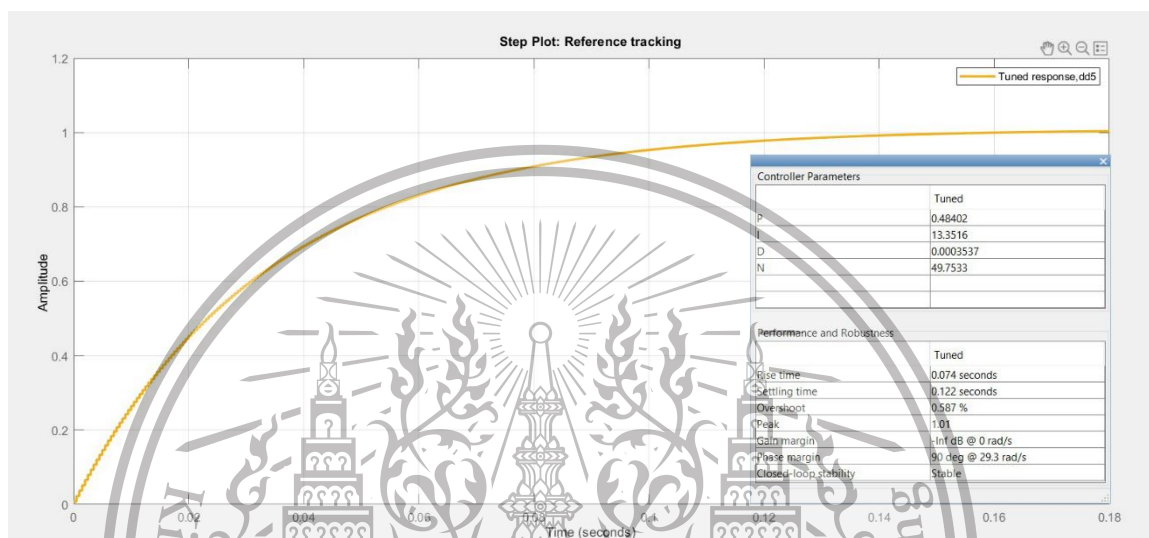
รูปที่ 4.27 ผลการตอบสนองทางดิวตี้สัญญาณ PWM ของมอเตอร์จาก MATLAB/SIMULINK

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการตอบสนองของดิวตี้สัญญาณ PWM บนมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่า แนวนอนของดิวตี้ที่มีการปรับเปลี่ยนตามความเข้มแสงเพื่อหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วคงที่จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลง ถ้าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลง ดิวตี้สัญญาณ PWM บนมอเตอร์จะไต่หาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดใหม่และคงที่



รูปที่ 4.28 ผลการตอบสนองของระบบหลังจาก PID จาก MATLAB/SIMULINK

จากกราฟผลตอบสนองของระบบรูปที่ 4.30 ได้ค่า  $K_p = 0.48402$ ,  $K_i = 13.3516$  และ  $K_d = 0.0003537$  ที่ทำให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วขึ้น ซึ่งมีค่า Rise time = 0.074 วินาที, ค่า Settling time = 0.122 วินาที และค่า Overshoot = 0.587%

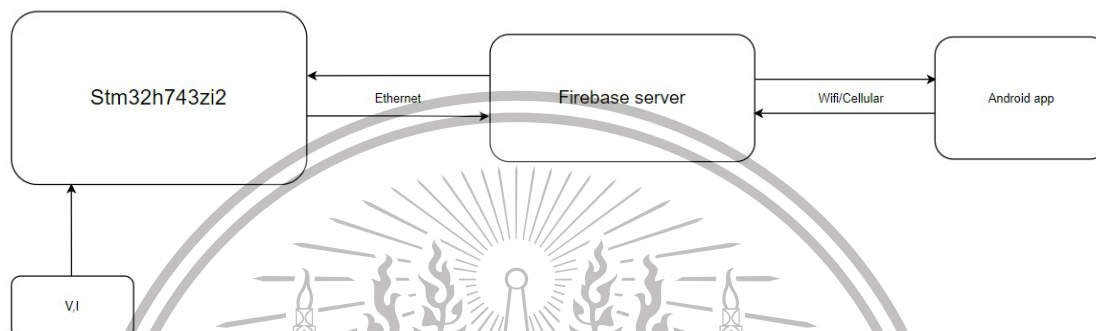
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.5 ผลการสร้างระบบ IOT

กำหนดการตั้งค่าของบอร์ด Nucleo-H743ZI2 ให้ส่งข้อมูลไปยังฐานข้อมูลที่อยู่ในรูป แอปพลิเคชันผ่านระบบแอนดรอยด์ในโทรศัพท์ โดยเชื่อมต่อกับที่อยู่จากเราท์เตอร์ตามไดอะแกรม ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ไดอะแกรมการรับ-ส่งข้อมูลผ่านระบบ Ethernet

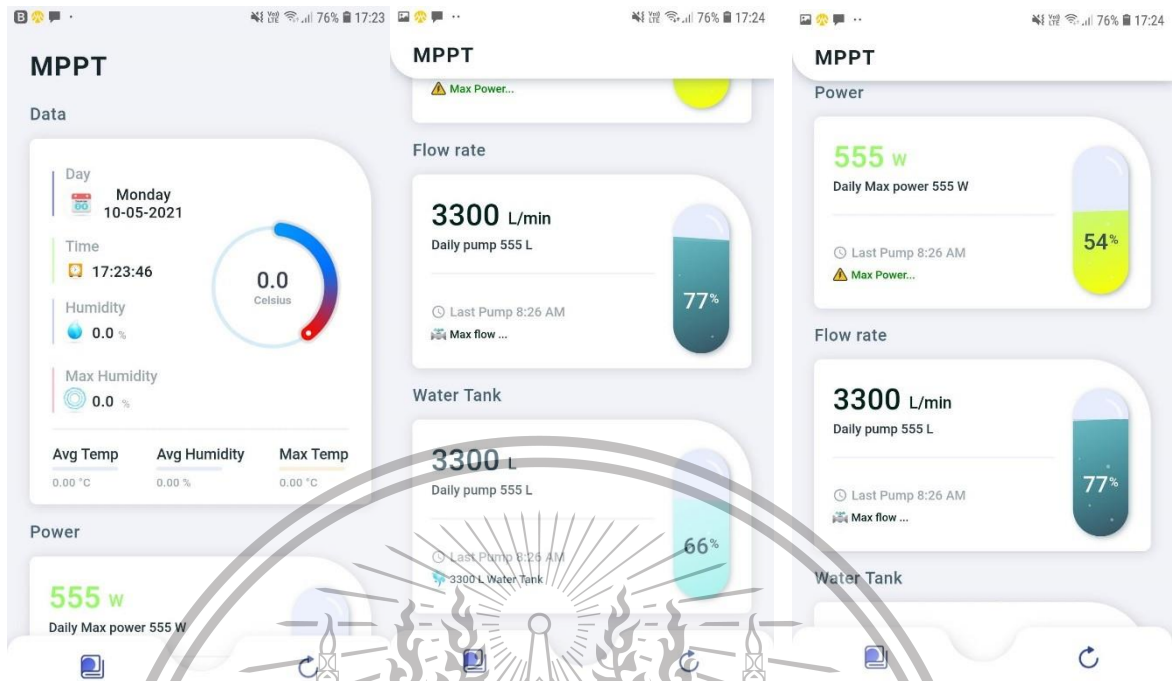
ทำการเชื่อมต่อสายแลนเข้าบอร์ด Nucleo-H743ZI2 แล้วต่อบอร์ดเข้าคอมพิวเตอร์ จากนั้นดาวน์โหลดไลบรารีของฐานข้อมูลเพื่อส่งค่าพารามิเตอร์ที่อ่านได้ไปเก็บไว้ยังฐานข้อมูล จากนั้นกำหนดตัวแปรเพื่อรับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อส่งทุกๆ 3 วินาทีไปยังฐานข้อมูลเมื่อ server ยินยอม จากนั้นเมื่อ server ได้รับข้อมูลแล้วจะทำการรับค่าใหม่แล้วส่งค่าไปยังฐานข้อมูล ในกรณีที่ server ไม่ได้รับข้อมูล บอร์ด Nucleo-H743ZI2 จะตัดการเชื่อมต่อจาก server และสร้างการเชื่อมต่อใหม่

ในส่วนของการแสดงผลทางแอปพลิเคชันบนมือถือผ่านระบบแอนดรอยด์ ทำการสร้างตัวแปรเพื่อรับค่าจากฐานข้อมูลโดยทำการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล จะทำการรับข้อมูลทุกครั้งที่มีกดอัปเดต และทำการแสดงผลข้อมูลใหม่ดังรูปที่ 4.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

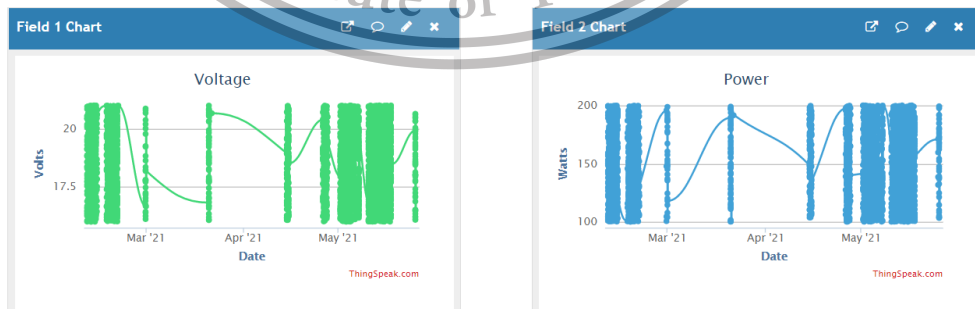
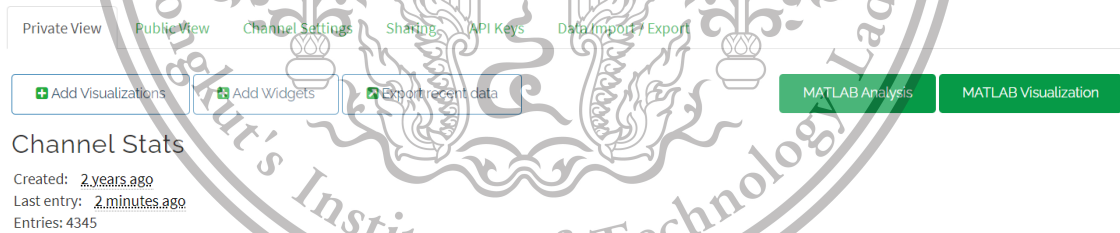
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.30 ภาพหน้าจอการแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน

จากภาพแสดงหน้าจอผ่านแอปพลิเคชันบนระบบแอนดรอยด์ในโทรศัพท์ จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ จะขึ้นแสดงผลตามเวลาจริง ซึ่งใช้ระบบการส่งข้อมูลเป็นรอบการทำงานของการอัปเดตบนฐานข้อมูล



รูปที่ 4.31 ภาพหน้าจอการแสดงผลบนฐานข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ส่วนตัวเท่านั้นเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่แนะนำให้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูล วางแนวทางการทำงานเพื่อกำหนดขอบเขตและเป้าหมายของการทำโครงการครั้งนี้ ได้ออกแบบระบบการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ผ่านวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC-SHIELD\_IFX007T ผ่านบอร์ด Nucleo-H743ZI2 โดยทำการกระตุ้นคู่เฟสใดคู่เฟสหนึ่งของสเตเตอร์ด้วยสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำกระแส  $120^\circ$  จากนั้นกระตุ้นคู่เฟสลำดับถัดไป โดยระยะเวลาในการเปลี่ยนลำดับจะน้อยลงเรื่อย ๆ จนมอเตอร์มีความเร็วมากพอที่จะส่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับมา และนำหลักการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์มาใช้ควบคู่กับระบบควบคุมปั้มน้ำมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเพื่อเก็บน้ำไว้ใช้ในยามจำเป็น พร้อมทั้งรายงานค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าผ่านระบบ Internet of Things ซึ่งผลลัพธ์ของการปฏิบัติงานครั้งนี้คือสามารถควบคุมให้ปั้มน้ำขึ้นสูงได้ถึง 10 เมตรและจากผลการจำลองแนวโน้มการตอบสนองของพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้า เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง พบว่าระบบดังกล่าวมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนไป และสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในทุกช่วงความเข้มแสงที่ทำการจำลองไว้ และจากการทำ PID พบว่าเวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดใช้ระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงเพียง 0.122 วินาที ที่ค่า  $K_p = 0.48402$ ,  $K_i = 13.3516$  และ  $K_d = 0.0003537$  ตามการจำลองเหตุการณ์ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK พร้อมทั้งรายงานค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการผ่านระบบ Internet of things แต่กระนั้นเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ส่งผลให้ไม่สามารถทำการควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลบวกอนุพันธ์บนระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงนำระบบมาจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และได้สิ้นสุดการทำงานเพียงเท่านี้ อีกทั้งยังนำปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นแนวทางการพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดค่าจากออสซิลโลสโคปสามารถแก้ไขได้โดยการใช้วงจรฟิลเตอร์ เพื่อกรองความถี่ที่เราไม่ต้องการออกไป ทำให้ค่าที่วัดได้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น
2. ควรเพิ่มอุปกรณ์สำหรับบันทึกความเร็วรอบเพื่อดูผลการตอบสนองในด้านความเร็วของมอเตอร์ในช่วงดิวตี้ต่างๆ
3. วิธีการขับมอเตอร์ที่เลือกใช้มีฮาร์มอนิกทำให้มอเตอร์ไม่เสถียรเท่าที่ควร

## 5.3 แนวทางการพัฒนา

1. เพิ่มประสิทธิภาพด้วยการควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลบวกอนุพันธ์บนระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด
2. สร้างระบบ IOT แบบส่งค่าแบบดิจิทัลให้สามารถควบคุมระบบการทำงานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อุบลรัตน์ อภัยวงศ์, “เกตเวย์สำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย, วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549
- [2] ไตรภพ บัวระกุด, “การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจับ อย่างประหยัดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดย วิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (โรงงาน), กรุงเทพมหานคร, 2553
- [4] รศ.ดร.วิระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 14, กรุงเทพมหานคร, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ.พรินต์ติ้ง, 2557
- [5] กฤตภาส ผินสันเพ็ญ “การออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากเซนเซอร์ด้วยเทคนิคการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558
- [6] จักรวาล แสงอาทิตย์, ณัฐพล การวิชา, ณัฐภัสส์ วัฒนเวคิน, ธนมิตร โพธิ์อ้อ “ระบบการเปลี่ยนพลังงานผสมผสานระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และพลังงานลมโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟตรง”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560
- [7] ธนามิตร โสวัตร์, ชารวี รงค์เดชประทีป, นรรัตน์ รินทราช, นัฏฐชัย สุวรรณภูมิ “ระบบการเปลี่ยนพลังงานผสมผสานระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานลม และแบตเตอรี่เพื่อจ่ายโหลดอิสระ”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2561
- [8] Jianwen Shao, Dennis Nolan, and Thomas Hopkins, “A novel direct back EMF detection for sensorless brushless DC (BLDC) motor drives”, *STMicroelectronics*, 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [9] P. Damodharan and Krishna Vasudevan, "Sensorless Brushless DC Motor Drive Based on the Zero-Crossing Detection of Back Electromotive Force (EMF) From the Line Voltage Difference", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol.25 No.3, 2010, pp. 661 – 668
- [10] P. Damodharan and Krishna Vasudevan, "Solar photovoltaic array fed water pump driven by brushless DC motor using Landsman converter", **The Institution of Engineering and Technology**, 2016



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# การควบคุมปั๊มน้ำโซล่าเซลล์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านร่วมกับเทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์

## SOLAR WATER PUMP CONTROL USING BRUSHLESS DC MOTOR

### WITH MAXIMUM POWER POINT TRACKING

พีรพัชร์ ธัญกรชินพงศ์ รมิตา คิ้วเจริญ และ ศรัณย์ ชูศรี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

#### บทคัดย่อ

ปฏิญานินพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอการควบคุมระบบปั๊มน้ำโซล่าเซลล์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านและนำเอาเทคนิคการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ NUCLEO-H743ZI2 ในการประมวลผลการทำงานของวงจรควบคุม และยังจำลองการควบคุมแบบ PID เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการทดลองพบว่าการควบคุมแบบ PID สามารถช่วยให้ระบบดังกล่าวสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีขึ้นและเป็นไปตามแนวโน้มในทุกช่วงแสง อีกทั้งยังประยุกต์ใช้ระบบ Internet of things เพื่อสามารถเก็บข้อมูลไว้ใช้พัฒนาต่อไปในอนาคต

ประสบปัญหาภัยแล้งทางธรรมชาติอย่างรุนแรง ทำให้เกษตรกรต้องเจอกับปัญหาน้ำไม่พอใช้ในการเกษตรจนต้องซื้อมอเตอร์มาปั๊มน้ำเพื่อแก้ปัญหาขึ้นเพื่อเอาไว้ใช้ในยามฉุกเฉิน ซึ่งในระบบดังกล่าวต้องรองรับกับแหล่งพลังงานที่สามารถเข้าถึงได้นั้นคือ กำลังไฟฟ้า ในความเป็นจริง ถ้าชาวเกษตรกรมีพื้นที่ภาคเกษตรกรรมขนาดใหญ่จนแหล่งพลังงานเข้าไปรองรับได้ไม่ทั่วถึง ทางเลือกต่อไปคือต้องมีแหล่งพลังงานย่อยเพื่อใช้งาน เช่น แบตเตอรี่ แผงโซล่าเซลล์ ซึ่งระบบโซล่าเซลล์

ทางคณะผู้จัดทำจึงเล็งเห็นว่าปัญหาที่เกิดขึ้นต่อชาวเกษตรกรมีความสำคัญมาก เราจึงศึกษาระบบการทำงานของมอเตอร์ปั๊มน้ำภายในมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่ให้กำลังสูงเมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน โดยต่อเข้าแผงโซล่าเซลล์เพื่อแก้ปัญหาไฟฟ้าไม่พอใช้ พร้อมทั้งติดตั้งระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในช่วงเวลาที่โซล่าเซลล์ทำงาน โดยการควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลบวกอนุพันธ์ (Proportional plus Integral plus Derivative Control) ผ่านระบบ IOT (Internet of Things) เพื่อนำข้อมูลค่าพารามิเตอร์ มาแสดงผลผ่านแอปพลิเคชันที่ทำไว้

#### ABSTRACT

This project proposes brushless DC (BLDC) water pump control with maximum power point tracking technique (MPPT) for solar energy system also applied PID control to improve the efficiency of the MPPT. The control of the power flow is implemented on a digital signal microcontroller NUCLEO-H743ZI2. The simulated results show that the utilization of PID control helps to improve the efficiency of the MPPT with less time and more stability. Moreover, internet of things (IOT) is applied in this project to collect the data for future development.

#### 1. บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกพืชผลทางเกษตรกรรมเป็นรายใหญ่ของเอเชีย แต่ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาประเทศไทย

#### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

(Maximum Power Point Tracking : MPPT) Maximum Power Point Tracking หรือ MPPT คือ ขั้นตอนวิธีหรืออัลกอริทึม ที่ถูกรวมเข้าไว้ในอุปกรณ์ควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งใช้ในการทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงสุด ทั้งนี้ กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเปลี่ยนแปลงไปตาม การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น

ความเข้มของแสงอาทิตย์, อุณหภูมิ สภาพแวดล้อม และอุณหภูมิของน้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

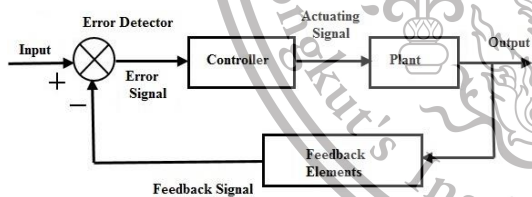
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งระบบ MPPT ได้รับการออกแบบให้ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์สำหรับทำการตรวจสอบค่าตั้ง ไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดเวลา เพื่อให้ได้กำลังผลิตสูงสุดในแต่ละเวลาตามค่าความเข้มแสงในแต่ละช่วงเวลาในรูปของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีของ MPPT ที่จะทำให้ได้ กำลังไฟฟ้ามากขึ้น หากตรวจสอบพบว่า กลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ขาออกสูงกว่า จะย้ายจุดควบคุมไปยังแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขาออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นั้น

**ทฤษฎีระบบควบคุม**

พื้นฐานของระบบควบคุม ระบบการควบคุม คือรูปแบบของระบบใด ๆ ที่มีการจัด องค์ประกอบต่าง ๆ ภายในระบบเพื่อให้มีผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่ต้องการ โดยเราจะนำ แนวคิดพื้นฐานของระบบมาช่วยในการวิเคราะห์นั่นก็คือ หลักการของเหตุและผล โดยคำนึงผลจากปัจจัย ทั้งสามคือ วัตถุประสงค์ของการควบคุม (Input) กระบวนการ ขั้นตอน หลักที่ใช้ในการควบคุม (Process) และค่าที่ได้จริง (Output) โดยที่ประเภทของการควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือการควบคุมแบบวงเปิด (Opened Loop) และ การควบคุมแบบวงปิด (Closed Loop)

รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมแบบวงปิด



**การควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลบวกอนุพันธ์ (Proportional Plus Integral plus Derivative Control)**

การควบคุมแบบสัดส่วนบวกอินทิกรัลบวกอนุพันธ์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การควบคุมแบบพีไอดี จะเป็นการนำการควบคุมพื้นฐานทั้ง 3 อย่าง คือ การควบคุมแบบสัดส่วน, การควบคุมแบบอินทิกรัล และการควบคุมแบบอนุพันธ์มารวมกัน ซึ่งเป็นการนำข้อดีทั้งสามอย่างมารวมกันเพื่อมาแก้จุดด้อยของแต่ละตัว ซึ่งทำให้ระบบมีความเสถียรมากกว่าการควบคุมอื่นๆ โดยมีสมการพื้นฐาน คือ

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_I}{T_I} \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

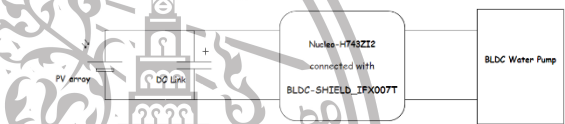
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $u(t)$  คือ ผลการตอบสนองของระบบควบคุม  $e(t)$  คือ ค่าความผิดพลาด  $K_p$  คือ อัตราขยายค่าสัดส่วน  $K_I$  คือ อัตราขยายค่าปริพันธ์  $K_D$  คือ อัตราขยายค่าอนุพันธ์  $t$  คือ เวลา และ  $T_I$  คือ เวลาในการอินทิกรัล

**3. ขั้นตอนการดำเนินงาน**

**การควบคุมปั้มน้ำกระแสตรงแบบไร้ปรองถ่าน**

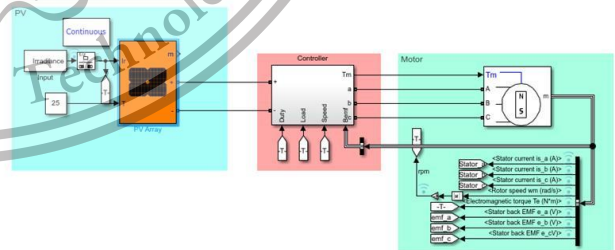
เนื่องจากต้องการปั้มน้ำจากแหล่งน้ำที่มีเฮดอยู่ที่ 10 เมตรโดยใช้มอเตอร์ปั้มน้ำกระแสตรงแบบไร้ปรองถ่านขนาด 350 W ขับเคลื่อนโดย BLDC-SHIELD\_IFX007T และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo-H743ZI2 ในการควบคุม จึงใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง(DC supply) ในการจ่ายกำลังให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์และมอเตอร์ปั้มน้ำ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การขับปั้มน้ำกระแสตรงแบบไร้ปรองถ่าน

**การใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการทำ PV simulation**

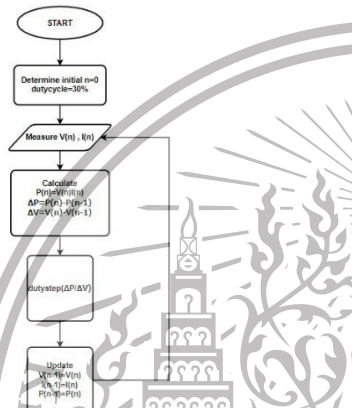
เนื่องจาก DC supply ไม่สามารถประพุดตัวได้เหมือนแผงโซลาร์เซลล์ได้ จึงจำเป็นต้องใช้ PV simulation ในการทดสอบระบบปั้มน้ำ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการจำลอง ดังรูปที่ 3.2 และตั้งค่า Parameter ต่างๆตามแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 120 W



รูปที่ 3.2 วงจรระบบปั้มน้ำโซลาร์เซลล์ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

**การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามกำลังไฟฟ้สูงสุดด้วย PID tuning**

การติดตามกำลังไฟฟ้สูงสุดจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ระบบการติดตามกำลังไฟฟ้สูงสุดได้รับการออกแบบให้ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์สำหรับการตรวจสอบกำลังไฟฟ้ขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดเวลา หากตรวจสอบพบว่า กลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใดให้ค่าแรงดันไฟฟ้และกระแสไฟฟ้ขาออกสูงกว่า จะย้ายจุดควบคุมไปยังแรงดันไฟฟ้และกระแสไฟฟ้ขาออกของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ตามFlow Chart ดังรูป

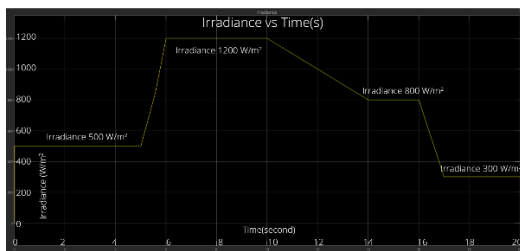


รูปที่ 3.3 Flow chart แสดงการทำงานของระบบการติดตามกำลังไฟฟ้สูงสุด

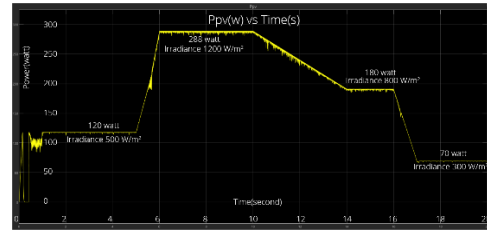
**4.ผลการทดลอง**

**ผลการจำลองการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้กระแสตรงเพื่อติดตามกำลังไฟฟ้สูงสุดโดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK**

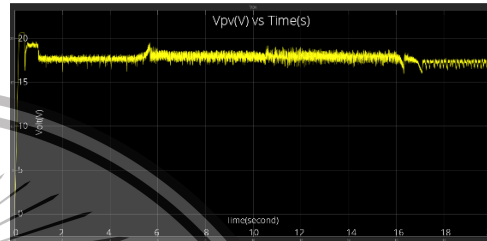
ผลการจำลองแผงโซลาร์เซลล์ จากคาร์นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแผงโซลาร์เซลล์ไปจำลองในโปรแกรมMATLAB/SIMULINKเพื่อหาผลตอบสนองค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้คือ แรงดันไฟฟ้กระแสไฟฟ้ และความเร็วรอบกับค่าความเข้มแสงที่แผงโซลาร์เซลล์ได้รับ โดยวัดความเข้มแสงที่ 1000, 500 และ 100 วัตต์ต่อตารางเมตร



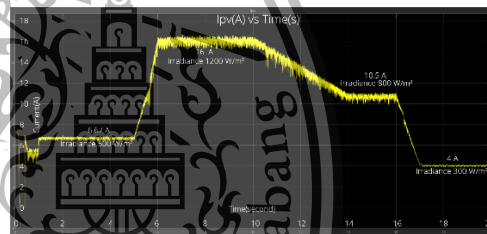
รูปที่ 4.1 กราฟความเข้มแสงตามเหตุการณ์จำลอง



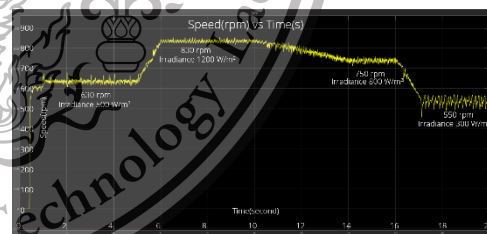
รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองทางกำลังไฟฟ้จาก MATLAB/SIMULINK



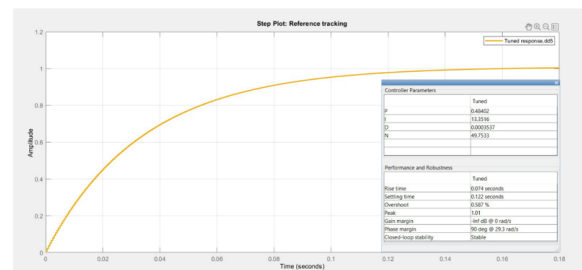
รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองทางแรงดันไฟฟ้จาก MATLAB/SIMULINK



รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองทางกระแสไฟฟ้จาก MATLAB/SIMULINK



รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองทางความเร็วรอบไฟฟ้จาก MATLAB/SIMULINK



รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองของระบบผ่านการ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟผลตอบสนองของระบบรูปที่ 4.5 ได้ค่า  $K_p = 0.48402$ ,  $K_i = 13.3516$  และ  $K_d = 0.0003537$  ที่ทำให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วขึ้น ซึ่งมีค่า Rise time = 0.074 วินาที, ค่า Setting time = 0.122 วินาที และค่า Overshoot = 0.587%

**5. สรุปผลการทดสอบ**

จากการออกแบบระบบการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไร้ตัว ตระวจับตำแหน่งโรเตอร์ผ่านวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC-SHIELD\_IFX007T ผ่านบอร์ด Nucleo-H743ZI2 โดยวิธีตัดผ่านศูนย์ควบคู่กับระบบควบคุมปั้มน้ำมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเพื่อักเก็บน้ำไว้ใช้ในยามจำเป็น พร้อมทั้ง รายงานค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าผ่านระบบ Internet of Things ซึ่งผลลัพธ์ของการปฏิบัติงานครั้งนี้คือ สามารถควบคุมให้ปั้มน้ำขึ้นสูงได้ถึง 10 เมตร และจากผลการจำลองแนวโน้มการตอบสนองของพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้า เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงพบว่าระบบดังกล่าวมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนไป และสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในทุกช่วงความเข้มแสงที่ทำการจำลองไว้ จากกรณี PWD พบว่าเวลาที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดใช้ระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงเพียง 0.122 วินาทีที่ค่า  $K_p = 0.48402$ ,  $K_i = 13.3516$  และ  $K_d = 0.0003537$  แต่กระนั้นเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ส่งผลให้ไม่สามารถทำการควบคุมแบบสัดส่วนบวก อนึ่ง กรัลบวกลบอนุพันธ์บนระบบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงนำระบบมา จำลองผ่าน โปรแกรม MATLAB/SIMULINK และได้สิ้นสุดการทำงานเพียงเท่านี้ อีกทั้งยังนำปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นแนวทางการพัฒนาต่อไป

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ในการเอื้ออำนวยความสะดวกในการทำโครงการ และทำให้โครงการนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

**เอกสารอ้างอิง**

[1] อุบลรัตน์ อภัยวงศ์, “เทคโนโลยีสำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย, วิทยาลัยเทคโนโลยีเกษตรศาสตร์, 2549

[2] ไตรภพ บัวระก, “การควบคุมความเร็วแบบปราศจากตัวตรวจจบ อย่างประหยัดสำหรับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ

ไร้แปรงถ่าน โดย วิธีการค้นหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ ลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552

[3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (โรงงาน), กรุงเทพมหานคร, 2553

[4] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาริธีรเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 14, กรุงเทพมหานคร, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ.พรินต์ติ้ง, 2557

[5] กฤตภาส ผินสันเทียะ “การออกแบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านปราศจากเซนเซอร์ด้วยเทคนิคการตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558

[6] จักรวาล แสงฤทธิ์, ณัฐพล การวิธา, ณัฐภัส วัฒนเวทิน, ธนมิตร โพธิ์วอ “ระบบการเปลี่ยนพลังงานผสมผสานระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และพลังงานลม โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไปตรง”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560

[7] ธนามิตร-โสวัตร์, ธราวีระศักดิ์เชษฐประทีป, นรรัตน์ รินทราข, ณัฐรัชย์ สุวรรณภณี “ระบบการเปลี่ยนพลังงานผสมผสานระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานลม และแบตเตอรี่เพื่อจ่ายโหลดอิสระ”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2561

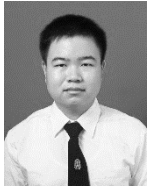
[8] Jianwen Shao, Dennis Nolan, and Thomas Hopkins, “A novel direct back EMF detection for sensorless brushless DC (BLDC) motor drives”, *STMicroelectronics*, 2002

[9] P. Damodharan and Krishna Vasudevan, “Sensorless Brushless DC Motor Drive Based on the Zero-Crossing Detection of Back Electromotive Force (EMF) From the Line Voltage Difference”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.25 No.3, 2010, pp. 661–668

เอกสารนี้เริ่มจากวารสารวิชาการเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] P. Damodharan and Krishna Vasudevan, "Solar photovoltaic array fed water pump driven by brushless DC motor using Landsman converter", **The Institution of Engineering and Technology**, 2016

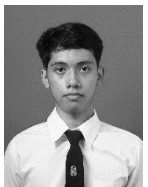
### ประวัติผู้เขียน



นาย พีรพัชร ชัญญกรชินพงษ์ รหัสนักศึกษา 60010734  
เกิดเมื่อวันที่ 20 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2541 ที่จังหวัด  
ชลบุรี ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาว รมิตา คิ้วเจริญ รหัสนักศึกษา 60010846  
เกิดเมื่อวันที่ 28 เดือน เมษายน พ.ศ. 2542 ที่จังหวัด  
กาญจนบุรี ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย ศรีณชัย ชูศรี รหัสนักศึกษา 60010955  
เกิดเมื่อวันที่ 22 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2541 ที่จังหวัด  
นครศรีธรรมราช ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

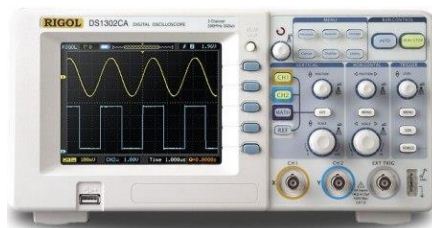
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



Oscilloscope  
RIGOL DS1204B



Multimeter  
FLUKE 73III

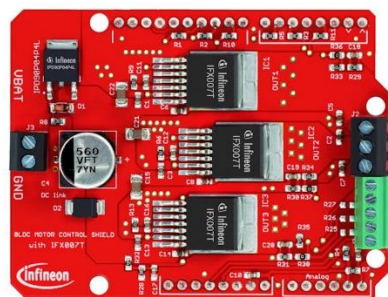


Power Meter  
Metrix PX110

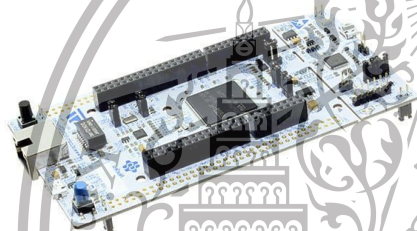
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

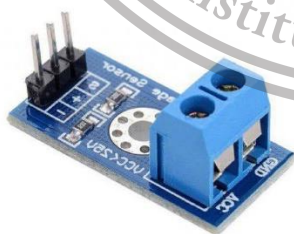
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



BLDC Motor Driver  
INFINEON BLDDCSHIELD IFX007T



Microcontroller  
NUCLEO-H743ZI2

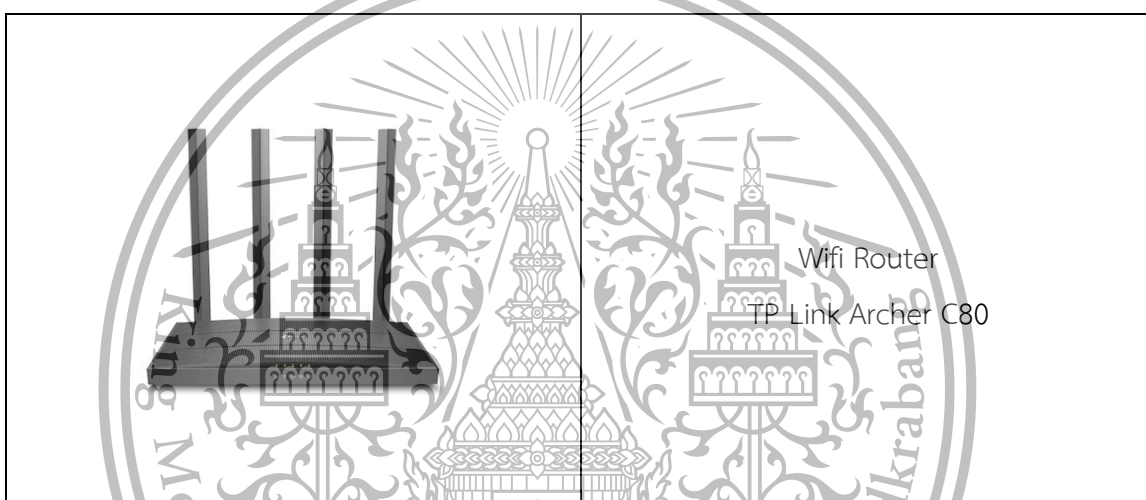
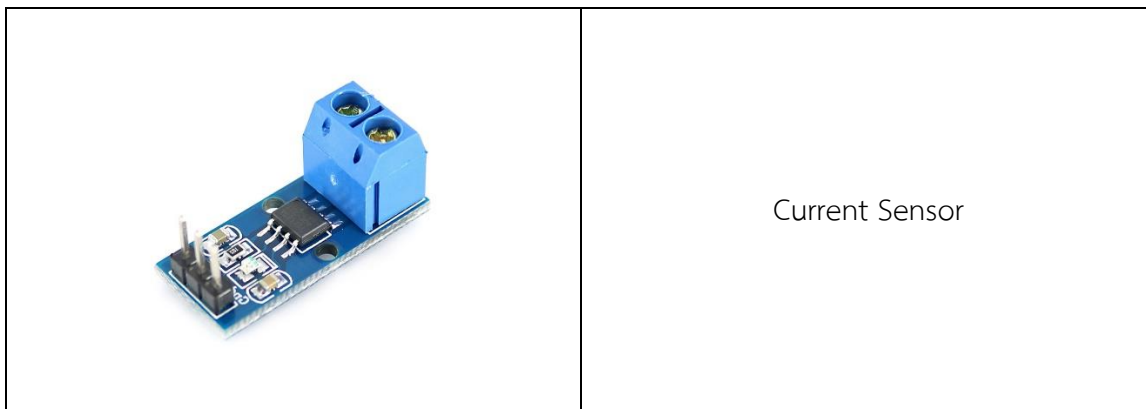


Voltage Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

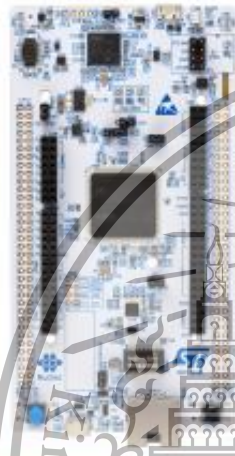
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



**NUCLEO-XXXXZX NUCLEO-XXXXZX-P  
NUCLEO-XXXXZX-Q**

Data brief

**STM32 Nucleo-144 boards**



NUCLEO-H755ZI-Q example. Boards with different references show different layouts. Picture is not contractual.

**Features**

- Common features
    - STM32 microcontroller in LQFP144 package
    - 3 user LEDs
    - 2 user and reset push-buttons
    - 32.768 kHz crystal oscillator
    - Board connectors:
      - SWD
      - ST Zio expansion connector including ARDUINO® Uno V3
      - ST morpho expansion connector
    - Flexible power supply options: ST-LINK, USB V<sub>BUS</sub> or external sources
    - On-board ST-LINK debugger/programmer with USB re-enumeration capability, mass storage, Virtual COM port, and debug port
    - Comprehensive free software libraries and examples available with the STM32Cube MCU Package
    - Support of a wide choice of Integrated Development Environments (IDEs) including IAR™, Keil™, and STM32CubeIDE
  - Board-specific features
    - External or internal SMPS to generate V<sub>core</sub> logic supply
    - EMI compliant with IEC61010-2-2002
    - 3.3V or 5V I/O speed or device only
    - Board connectivity:
      - USB with MicroAB or USB Type-C
      - Ethernet RJ45
- Arm® Mbed Enabled™ compliant

Product status link
<b>NUCLEO-XXXXZX</b>
NUCLEO-F207ZG, NUCLEO-F002E, NUCLEO-F412ZG, NUCLEO-F413ZL, NUCLEO-F429Z, NUCLEO-F407ZT, NUCLEO-F446ZE, NUCLEO-F722ZE, NUCLEO-F746ZG, NUCLEO-F755ZG, NUCLEO-F767ZM, NUCLEO-H723ZG, NUCLEO-H743ZI, NUCLEO-H753ZI, NUCLEO-L496ZG, NUCLEO-L4A6ZG, NUCLEO-L4P52G, NUCLEO-L552ZE
<b>NUCLEO-XXXXZX-P</b>
NUCLEO-L496ZG-P, NUCLEO-L4R5ZI-P.
<b>NUCLEO-XXXXZX-Q</b>
NUCLEO-H745ZI-Q, NUCLEO-H755ZI-Q, NUCLEO-H7A3ZI-Q, NUCLEO-L552ZE-Q.

**Description**

The STM32 Nucleo-144 board provides an affordable and flexible way for users to try out new concepts and build prototypes by choosing from the various combinations of performance and power consumption features, provided by the STM32 microcontroller. For the compatible boards, the internal or external SMPS significantly reduce power consumption in Run mode.

The ST Zio connector, which extends the ARDUINO® Uno V3 connectivity, and the ST morpho headers provide an easy means of expanding the functionality of the Nucleo open development platform with a wide choice of specialized shields.

The STM32 Nucleo-144 board does not require any separate probe as it integrates the ST-LINK debugger/programmer.

The STM32 Nucleo-144 board comes with the STM32 comprehensive free software libraries and examples available with the STM32Cube MCU Package.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



## 1 Ordering information

To order an STM32 Nucleo-144 board, refer to Table 1. For a detailed description of each board, refer to its user manual on the product web page. Additional information is available from the datasheet and reference manual of the target STM32.

Table 1. List of available products

Order code	Board reference	User manual	Target STM32	Differentiating features
NUCLEO-F207ZG			STM32F207ZGT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• Ethernet</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-F302ZE			STM32F302ZET6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• Device-only USB on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-F405ZG			STM32F405ZGT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-F410ZT			STM32F410ZHT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-F429ZG			STM32F429ZGT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• Ethernet</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-F439ZE	MB182	UM1974	STM32F439ZIT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• Ethernet</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> <li>• Cryptography</li> </ul>
NUCLEO-F446ZE			STM32F446ZET6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-F722ZE			STM32F722ZET6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-F746ZG			STM32F746ZGT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• Ethernet</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-F756ZG			STM32F756ZGT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• Ethernet</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> <li>• Cryptography</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



Order code	Board reference	User manual	Target STM32	Differentiating features
NUCLEO-F767ZI	MB1137	UM1974	STM32F767ZIT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• Ethernet</li> <li>• On-board USB OTG</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-H743ZI <sup>1)</sup>			STM32H743ZIT8U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• Ethernet</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-H723ZG	MB1304	UM2403	STM32H723ZGT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ethernet</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINK-V3E</li> </ul>
NUCLEO-H743ZI2			STM32H743ZIT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ethernet</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINK-V3E</li> </ul>
NUCLEO-H743ZI	MB1304	UM2403	STM32H743ZIT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ethernet</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINK-V3E</li> <li>• Cryptography</li> </ul>
NUCLEO-H743ZI-Q			STM32H743ZIT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ethernet</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINK-V3E</li> <li>• Internal SMPS</li> </ul>
NUCLEO-H755ZI-Q	MB1303	UM2408	STM32H755ZIT8U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ethernet</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINK-V3E</li> <li>• Internal SMPS</li> <li>• Cryptography</li> </ul>
NUCLEO-H7A3ZI-Q	MB1312	UM2179	STM32H7A3ZIT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINK-V3E</li> <li>• Internal SMPS</li> </ul>
NUCLEO-L496ZG			STM32L496ZGT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-L496ZG-P	MB1312	UM2179	STM32L496ZGT6PU	<ul style="list-style-type: none"> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> <li>• External SMPS</li> </ul>
NUCLEO-L4A6ZG			STM32L4A6ZGT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> <li>• Cryptography</li> </ul>
NUCLEO-L4P5ZG			STM32L4P5ZGT6U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-L4R5ZI	MB1312	UM2179	STM32L4R5ZIT8U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>
NUCLEO-L4R5ZI-Q			STM32L4R5ZIT8U	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arm® Mbed Enabled™</li> <li>• USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>• ST-LINKV2-1</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



Order code	Board reference	User manual	Target STM32	Differentiating features
NUCLEO-L4R5ZI-P	MB1312	UM2179	STM32L4R5ZIT6PU	<ul style="list-style-type: none"> <li>Arm® Mbed Enabled™</li> <li>USB OTG FS on Micro-AB connector</li> <li>ST-LINK/V2-1</li> <li>External SMPS</li> </ul>
NUCLEO-L552ZE-Q	MB1361	UM2581	STM32L552ZET6QU	<ul style="list-style-type: none"> <li>Device-only USB FS on USB Type-C™ connector</li> <li>ST-LINK/V2-1</li> <li>Internal SMPS</li> </ul>

1. Replaced with NUCLEO-H743Z12.

## 1.1 Product marking

Evaluation tools marked as "ES" or "E" are not yet qualified and therefore not ready to be used as reference design or in production. Any consequences deriving from such usage will not be at ST charge. In no event, ST will be liable for any customer usage of these engineering sample tools as reference designs or in production.

"E" or "ES" marking examples of location:

- On the targeted STM32 that is soldered on the board (For an illustration of STM32 marking, refer to the STM32 datasheet "Package information" paragraph at the [www.st.com](http://www.st.com) website).
- Next to the evaluation tool ordering part number that is static or silk screen printed on the board.

Some boards feature a specific STM32 device version, which allows the operation of any boarded commercial stack/library available. This STM32 device version has a "U" marking option at the end of the standard part number and is not available for sales.

In order to use the same commercial stack in the application, a developer may need to purchase a part number specific to this stack/library. The price of these part numbers includes the stack/library royalties.

## 1.2 Codification

The meaning of the codification is explained in Table 2.

Table 2. Codification explanation

NUCLEO-XXYYZT	NUCLEO-XXYYZT-P	NUCLEO-XXYYZT-Q	Describes	Example: NUCLEO-L496ZG-P
XX			MCU series in STM32 Arm Cortex MCUs	STM32L4 Series
YY			MCU product line in the series	STM32L496
Z			STM32 package in count	144 pins
T			STM32 Flash memory size: <ul style="list-style-type: none"> <li>E for 512 Kbytes</li> <li>G for 1 Mbyte</li> <li>H for 1.5 Mbytes</li> <li>I for 2 Mbytes</li> </ul>	1 Mbyte
	-P		STM32 has external SMPS function	External SMPS
		-Q	STM32 has internal SMPS function	-

The order code is mentioned on a sticker placed on the top or bottom side of the board.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



## 2 Development environment

### 2.1 System requirements

- Windows® OS (7, 8 and 10), Linux® 64-bit, or macOS®
- USB Type-A to Micro-B cable

*Note:* macOS® is a trademark of Apple Inc. registered in the U.S. and other countries.  
All other trademarks are the property of their respective owners.

### 2.2 Development toolchains

- IAR™ - EWARM<sup>(1)</sup>
- Keil® - MDK-ARM<sup>(1)</sup>
- STMicroelectronics - STM32CubeIDE
- Arm® Mbed™ (online)<sup>(3)</sup> ([mbed.org](https://mbed.org))

*Note:*

1. On Windows only.
2. Arm and Mbed are registered trademarks or trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere.
3. Refer to the [www.mbed.com](https://www.mbed.com) website and to the "Ordering Information" section to determine which order codes are supported.

### 2.3 Demonstration software

The demonstration software, included in the STM32Cube MCU Package corresponding to the on-board microcontroller, is preloaded in the STM32Cube memory for easy demonstration of the device peripherals in standalone mode. The latest versions of the demonstration source code and associated documentation can be downloaded from [www.st.com](http://www.st.com).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



## Revision history

Table 3. Document revision history

Date	Version	Changes
15-Feb-2017	1	Initial version.
16-Mar-2017	2	Document now scopes NUCLEO-L496ZG and NUCLEO-L496ZG-P products. Updated: <ul style="list-style-type: none"> <li>Cover page features (to cover LL APIs)</li> <li>Cover page description</li> <li>Table 2: Ordering information</li> <li>Table 3: Codification explanation</li> </ul>
08-Aug-2017	3	Document now also scopes NUCLEO-L4R5Z1 product. Added Table 1: Device summary. Updated: <ul style="list-style-type: none"> <li>Supports a wide choice of Integrated Development Environments (IDEs) including IAR™, Keil™, GCCbased IDEs</li> <li>Cover page description</li> <li>Table 2: Ordering information</li> <li>Table 3: Codification explanation</li> </ul>
30-Aug-2017	4	Deleted Table 2: Ordering information. Document scope extended to the NUCLEO-F297ZG, NUCLEO-F303ZE, NUCLEO-F412ZG, NUCLEO-F413ZH, NUCLEO-F429Z1, NUCLEO-F446ZE, NUCLEO-F722ZE, NUCLEO-F746ZG, NUCLEO-F767Z1, and NUCLEO-NU23Z1 products.
3-Nov-2017	5	Added: <ul style="list-style-type: none"> <li>Features</li> <li>System requirements</li> <li>Development tools chain</li> <li>Table 1: Device summary</li> <li>Table 2: Ordering information</li> </ul>
19-Dec-2017	6	Document scope extended to the NUCLEO-L496ZG, NUCLEO-F439Z1 and NUCLEO-F798ZG products. Updated: <ul style="list-style-type: none"> <li>Features</li> <li>System requirements</li> <li>Table 1: Device summary</li> <li>Table 2: Ordering information</li> </ul>
1-Feb-2018	7	Document scope extended to the NUCLEO-L4R5Z1-P product: updated Table 1: Device summary and Table 2: Ordering information.
8-Apr-2019	8	Revised the entire document to accommodate to multiple feature combinations: <ul style="list-style-type: none"> <li>Reorganized Features</li> <li>Updated Description</li> <li>Added Ordering information and Development environment</li> <li>Updated Table 1. List of available products and Table 2. Codification explanation</li> </ul> Extended document scope to the NUCLEO-H743Z12, NUCLEO-H745Z1-Q, NUCLEO-H753Z1, and NUCLEO-H755Z1-Q boards.
18-Apr-2019	9	Extended document scope to the NUCLEO-L552ZE-Q board.
30-Oct-2019	10	Extended document scope to the NUCLEO-H7A3Z1-Q board.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



Date	Version	Changes
26-Nov-2019	11	Extended document scope to the NUCLEO-L4P5ZG board.
24-Mar-2020	12	Extended document scope to the NUCLEO-H723ZG board.
3-Apr-2020	13	Updated order code NUCLEO-H743ZI in List of available products.

**IMPORTANT NOTICE – PLEASE READ CAREFULLY**

STMicroelectronics NV and its subsidiaries ("ST") reserve the right to make changes, corrections, enhancements, modifications, and improvements to ST products and/or to this document at any time without notice. Purchasers should obtain the latest relevant information on ST products before placing orders. ST products are sold pursuant to ST's terms and conditions of sale in place at the time of order acknowledgement.

Purchasers are solely responsible for the choice, selection, and use of ST products and ST assumes no liability for application assistance or the design of Purchasers' products.

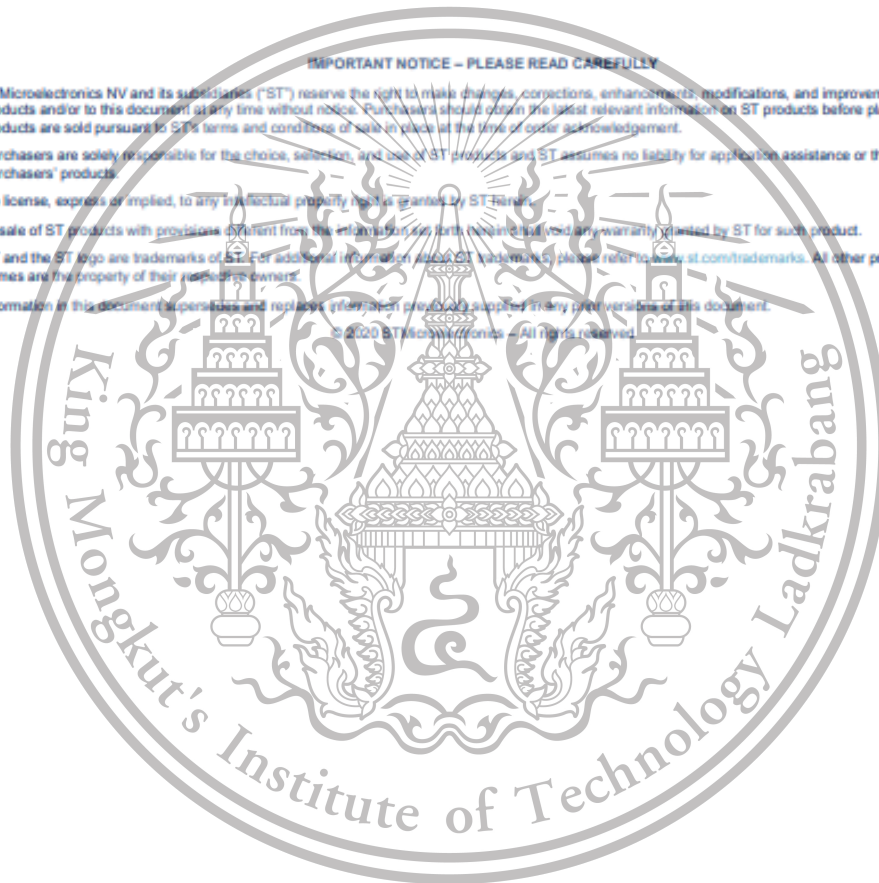
No license, express or implied, to any intellectual property rights is granted by ST herein.

Resale of ST products with provisions different from the information on this document voids any warranty granted by ST for such product.

ST and the ST logo are trademarks of ST. For additional information about ST trademarks, please refer to [www.st.com/trademarks](http://www.st.com/trademarks). All other product or service names are the property of their respective owners.

Information in this document supersedes and replaces information previously supplied in any prior versions of this document.

© 2020 STMicroelectronics – All rights reserved.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



# High Current PN Half Bridge with Integrated Driver

**IFX007T**  
**Industrial & Multi Purpose NovalithIC™**

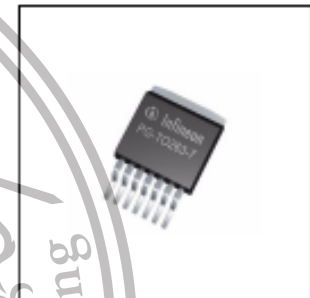


## 1 Overview

Quality Requirement Category: Industrial

### Features

- Path resistance of max. 12.8 mΩ @ 25°C (typ. 10.0 mΩ @ 25°C)
- High side: max. 6.5 mΩ @ 25°C (typ. 5.3 mΩ @ 25°C)
- Low side: max. 6.3 mΩ @ 25°C (typ. 4.7 mΩ @ 25°C)
- Enhanced switching speed for reduced switching losses
- Capable for high PWM frequency combined with active freewheeling
- Switched mode current limitation for reduced power dissipation in overcurrent
- Current limitation level of 55 A/min
- Status flag diagnosis with current sense capability
- Overtemperature shutdown with latch behavior
- Undervoltage shutdown
- Driver circuit with logic level inputs
- Adjustable slew rates for optimized EMI
- Operation up to 40 V
- Green Product (RoHS compliant)
- JESD471 Qualified



### Description

The IFX007T is an integrated high current half bridge for motor drive applications. It is part of the Industrial & Multi Purpose NovalithIC™ family containing one p-channel high-side MOSFET and one n-channel low-side MOSFET with an integrated driver IC in one package. Due to the p-channel high-side switch the need for a charge pump is eliminated thus minimizing EMI. Interfacing to a microcontroller is made easy by the integrated driver IC which features logic level inputs, diagnosis with current sense, slew rate adjustment, dead time generation and protection against overtemperature, undervoltage, overcurrent and short circuit.

The IFX007T provides a cost optimized solution for protected high current PWM motor drives with very low board space consumption.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## High Current PN Half Bridge with Integrated Driver IFX007T



### Block diagram

## 2 Block diagram

The IFX007T is part of the Industrial & Multi Purpose NovalithIC™ family containing three separate chips in one package: One p-channel high-side MOSFET and one n-channel low-side MOSFET together with a driver IC, forming an integrated high current half-bridge. All three chips are mounted on one common lead frame, using the chip-on-chip and chip-by-chip technology. The power switches utilize vertical MOS technologies to ensure optimum on state resistance. Due to the p-channel high-side switch the need for a charge pump is eliminated thus minimizing EMI. Interfacing to a microcontroller is made easy by the integrated driver IC which features logic level inputs, diagnosis with current sense, slew rate adjustment, dead time generation and protection against overtemperature, undervoltage, overcurrent and short circuit. The IFX007T can be combined with other IFX007Ts to form a H-bridge or a 3-phase drive configuration.

### 2.1 Block diagram

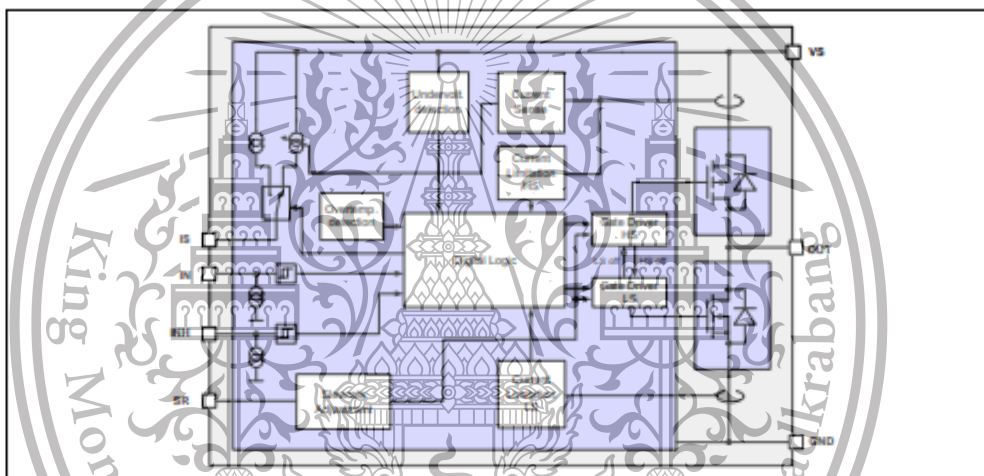


Figure 1 Block diagram

### 2.2 Terms

Following figure shows the terms used in this data sheet.

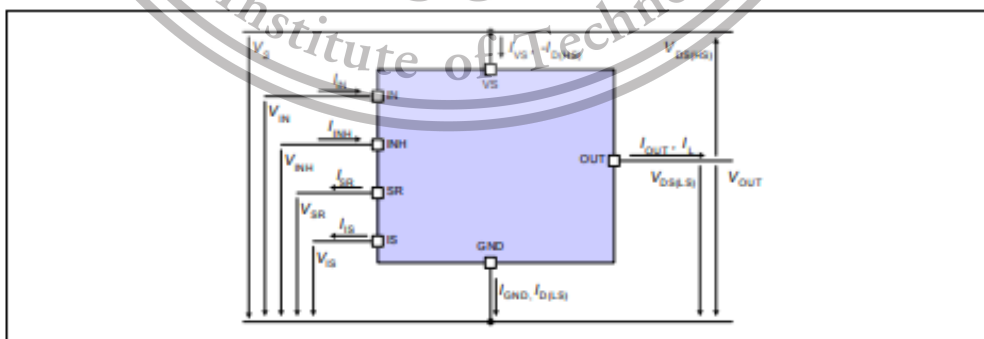


Figure 2 Terms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## High Current PN Half Bridge with Integrated Driver IFX007T



### Pin configuration

## 3 Pin configuration

### 3.1 Pin assignment

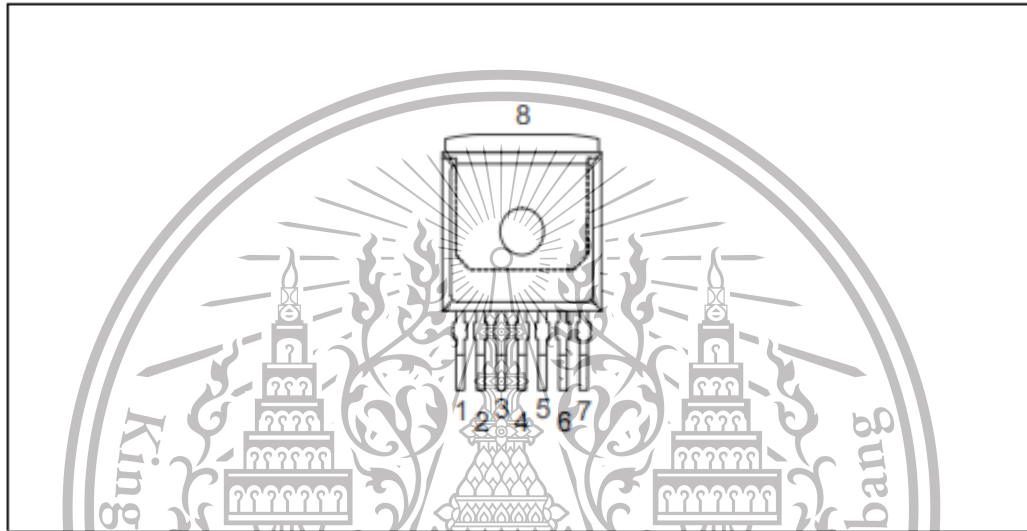


Figure 3 Pin assignment IFX007T (top view)

### 3.2 Pin definitions and functions

Table 1 Pin definitions and functions

Pin	Symbol	I/O	Function
1	GND	-	Ground
2	IN	I	Input Defines whether high - or low-side switch is activated
3	INH	I	Inhibit When set to low device goes in sleep mode
4,8	OUT	O	<b>Power output of the bridge</b>
5	SR	I	Slew Rate The slew rate of the power switches can be adjusted by connecting a resistor between SR and GND
6	IS	O	Current Sense and Diagnostics
7	VS	-	<b>Supply</b>

**Bold type: pin needs power wiring**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## High Current PN Half Bridge with Integrated Driver IFX007T



### General product characteristics

## 4 General product characteristics

The device is intended to be used in an industrial or consumer environment. The circumstances, how the device environment must look like are described in this chapter.

### 4.1 Absolute maximum ratings

Stresses above the ones listed here may cause permanent damage to the device. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

**Table 2 Absolute maximum ratings<sup>1)</sup>**

$T_j = 25^\circ\text{C}$ ; all voltages with respect to ground, positive current flowing into pin (unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note or Test Condition	Number
		Min.	Typ.	Max.			
<b>Voltages</b>							
Supply voltage	$V_S$	-0.3	-	40	V	-	P_4.1.1
Drain-source voltage high side	$V_{DS(HS)}$	40	-	40	V	$T_j \geq 25^\circ\text{C}$	P_4.1.2
		-88	-	40	V	$T_j < 25^\circ\text{C}$	
Drain-source voltage low side	$V_{DS(LS)}$	-	-	40	V	$T_j \geq 25^\circ\text{C}$	P_4.1.3
		-	-	38	V	$T_j < 25^\circ\text{C}$	
Logic input voltage	$V_{IN}$ $V_{INH}$	-0.3	-	5.3	V	-	P_4.1.4
Voltage at SR pin	$V_{SR}$	-0.3	-	10	V	-	P_4.1.5
Voltage between VS and IS pin	$V_S - V_{IS}$	-0.3	-	40	V	-	P_4.1.6
Voltage at IS pin	$V_{IS}$	-20	-	40	V	-	P_4.1.7
Voltage transient between VS and GND pin <sup>2)</sup>	$dV_S$	-1	-	1	V	Transient fall/rise time: $t_{trans} > 85\text{ ns}$ .	P_4.1.8
<b>Currents</b>							
HS/LS continuous drain current	$I_{D(HS)}$ $I_{D(LS)}$	-50	-	50	A	switch active	P_4.1.9
		-	-	50	A	switch active	
HS/LS pulsed drain current <sup>3)</sup>	$I_{D(HS)}$ $I_{D(LS)}$	-117	-	117	A	$t_{pulse} = 10\text{ ms}$ single pulse	P_4.1.10
<b>Temperatures</b>							
Junction temperature	$T_j$	-40	-	150	$^\circ\text{C}$	-	P_4.1.11
Storage temperature	$T_{stg}$	-55	-	150	$^\circ\text{C}$	-	P_4.1.12
<b>ESD susceptibility</b>							
ESD resistivity HBM IN, INH, SR, IS OUT, GND, VS	$V_{ESD}$	-2 -6	-	2 6	kV	HBM <sup>4)</sup>	P_4.1.13

1) Not subject to production test, specified by design.

2) "Under Voltage Shut Down" shall not be triggered.

3) Maximum reachable current may be smaller depending on current limitation level.

4) ESD susceptibility, HBM according to ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 (1.5 kV, 100 pF).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

1  import 'package:best_flutter_ui_templates/app_theme.dart';
2  import 'package:flutter/material.dart';
3  import 'model/homelist.dart';
4
5  class MyHomePage extends StatefulWidget {
6    const MyHomePage({Key key}) : super(key: key);
7
8    @override
9    _MyHomePageState createState() => _MyHomePageState();
10 }
11
12 class _MyHomePageState extends State<MyHomePage> with TickerProviderStateMixin {
13   List<Homelist> homeList = Homelist.homelist;
14   AnimationController animationController;
15   bool multiple = true;
16
17   @override
18   void initState() {
19     animationController = AnimationController(
20       duration: const Duration(milliseconds: 2000), vsync: this);
21     super.initState();
22   }
23
24   Future<bool> getData() async {
25     await Future<dynamic>.delayed(const Duration(milliseconds: 0));
26     return true;
27   }
28
29   @override
30   void dispose() {
31     animationController.dispose();
32     super.dispose();
33   }
34

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

35  @override
36  Widget build(BuildContext context) {
37    return Scaffold(
38      backgroundColor: AppTheme.white,
39      body: FutureBuilder<bool>(
40        future: getData(),
41        builder: (BuildContext context, AsyncSnapshot<bool> snapshot) {
42          if (!snapshot.hasData) {
43            return const SizedBox();
44          } else {
45            return Padding(
46              padding: EdgeInsets.only(top: MediaQuery.of(context).padding.top),
47              child: Column(
48                mainAxisAlignment: MainAxisAlignment.center,
49                crossAxisAlignment: CrossAxisAlignment.start,
50                children: <Widget>[
51                  appBar(),
52                  Expanded(
53                    child: FutureBuilder<bool>(
54                      future: getData(),
55                      builder:
56                        (BuildContext context, AsyncSnapshot<bool> snapshot) {
57                          if (!snapshot.hasData) {
58                            return const SizedBox();
59                          } else {
60                            return GridView(
61                              padding: const EdgeInsets.only(
62                                top: 0, left: 12, right: 12),
63                              physics: const BouncingScrollPhysics(),
64                              scrollDirection: Axis.vertical,
65                              children: List<Widget>.generate(
66                                homeList.length,
67                                (int index) {
68                                  final int count = homeList.length;
69                                  final Animation<double> animation =
70                                    Tween<double>(begin: 0.0, end: 1.0).animate(
71                                    CurvedAnimation(

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

72         parent: animationController,
73         curve: Interval((1 / count) * index, 1.0,
74             curve: Curves.fastOutSlowIn),
75     ),
76 );
77 animationController.forward();
78 return HomeListView(
79     animation: animation,
80     animationController: animationController,
81     listData: homelist[index],
82     callBack: () {
83         Navigator.push<dynamic>(
84             context,
85             MaterialPageRoute<dynamic>(
86                 builder: (BuildContext context) =>
87                     homelist[index].navigateScreen(),
88             ),
89         );
90     },
91     ),
92     ),
93     ),
94     gridDelegate:
95         SliverGridDelegateWithFixedCrossAxisCount(
96             crossAxisCount: multiple ? 2 : 1,
97             mainAxisSpacing: 10.0,
98             crossAxisSpacing: 12.0,
99             childAspectRatio: 1.5,
100         ),
101     );
102     ),
103     ),
104     ),
105     ),
106     ),

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

107         ),
108     );
109     }
110     },
111     ),
112     );
113 }
114
115 Widget appBar() {
116     return SizedBox(
117         height: AppBar().preferredSize.height,
118         child: Row(
119             mainAxisAlignment: MainAxisAlignment.center,
120             children: <Widget>[
121                 Padding(
122                     padding: const EdgeInsets.only(top: 8, left: 8),
123                     child: Container(
124                         width: AppBar().preferredSize.height - 8,
125                         height: AppBar().preferredSize.height - 8,
126                     ),
127                 Expanded(
128                     child: Center(
129                         child: Padding(
130                             padding: const EdgeInsets.only(top: 4),
131                             child: Text(
132                                 'Flutter UI',
133                                 style: TextStyle(
134                                     fontSize: 22,
135                                     color: AppTheme.darkText,
136                                     fontWeight: FontWeight.w700,
137                                 ),
138                             ),
139                         ),
140                     ),
141                 ),

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

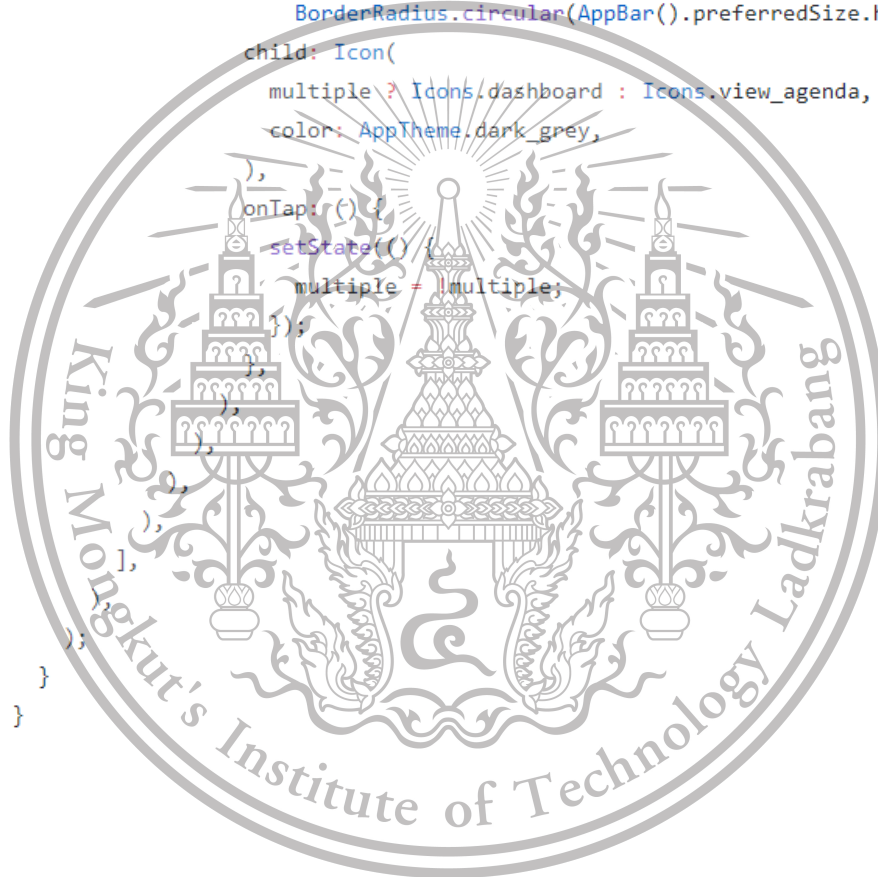
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

142     ),
143     Padding(
144       padding: const EdgeInsets.only(top: 8, right: 8),
145       child: Container(
146         width: AppBar().preferredSize.height - 8,
147         height: AppBar().preferredSize.height - 8,
148         color: Colors.white,
149         child: Material(
150           color: Colors.transparent,
151           child: InkWell(
152             borderRadius:
153               BorderRadius.circular(AppBar().preferredSize.height),
154             child: Icon(
155               multiple ? Icons.dashboard : Icons.view_agenda,
156               color: AppTheme.dark_grey,
157             ),
158             onTap: () {
159               setState(() {
160                 multiple = !multiple;
161               });
162             },
163           ),
164         ),
165       ),
166     ),
167   ),
168 ),
169 ),
170 },
171 },
172

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

172
173 class HomeListView extends StatelessWidget {
174   const HomeListView(
175     {Key key,
176     this.listData,
177     this.callBack,
178     this.animationController,
179     this.animation})
180     : super(key: key);
181
182   final HomeList listData;
183   final VoidCallback callBack;
184   final AnimationController animationController;
185   final Animation<dynamic> animation;
186
187   @override
188   Widget build(BuildContext context) {
189     return AnimatedBuilder(
190       animation: animationController,
191       builder: (BuildContext context, Widget child) {
192         return FadeTransition(
193           opacity: animation,
194           child: ?Transform(
195             transform: Matrix4.translationValues(
196               0.0, 50 * (1.0 - animation.value), 0.0),
197             child: AspectRatio(
198               aspectRatio: 1.5),
199             child: ClipRRect(
200               borderRadius: const BorderRadius.all(Radius.circular(4.0)),
201             child: Stack(
202               alignment: AlignmentDirectional.center,

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

203     children: <Widget>[
204       Image.asset(
205         listData.imagePath,
206         fit: BoxFit.cover,
207       ),
208       Material(
209         color: Colors.transparent,
210         child: InkWell(
211           splashColor: Colors.grey.withOpacity(0.2),
212           borderRadius:
213             const BorderRadius.all(Radius.circular(4.0)),
214           onTap: () {
215             callBack();
216           },
217         ),
218       ),
219     ],
220   ),
221 ],
222 ],
223 ],
224 ],
225 ],
226 ],
227 ],
228 }

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ประวัติผู้เขียน



นาย พิรพัชร ธัญกรชินพงศ์ รหัสนักศึกษา 60010734  
เกิดเมื่อวันที่ 20 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2541 ที่จังหวัดชลบุรี  
จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจาก โรงเรียนบ้านบึงอุตสาหกรรมนุเคราะห์  
ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาว รมิตา คิ้วเจริญ รหัสนักศึกษา 60010846  
เกิดเมื่อวันที่ 28 เดือน เมษายน พ.ศ. 2542 ที่จังหวัดกาญจนบุรี  
จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจาก โรงเรียนวิสุทธิรังษี  
ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย ศรัณย์ ชูศรี รหัสนักศึกษา 60010955  
เกิดเมื่อวันที่ 22 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2541 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช  
จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจาก โรงเรียนเบญจมราชูทิศ  
ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรีภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.