

การศึกษาการประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน

**EVALUATION OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR
POWER LOSS USING AIR-COOLING TEMPERATURE
MEASUREMENT TECHNIQUE**

ณัฐพล แจ่มจดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาการประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิโดยความร้อน

ณัฐพล แจ่มจดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน

Evaluation of Three Phase Induction Motor Power Loss Using Air-
Cooling Temperature Measurement Technique

ชื่อ - นามสกุล

นายณัฐพล แจ่มจดี

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.

ปีการศึกษา

2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์ชาญวิทย์ บุญช่วย, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์สุรินทร์ แห่งงาม, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสะอาด, Ph.D.)

วันที่ 10 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน
ชื่อ – นามสกุล	นายณัฐพล แจ่มจดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการใช้งานอุตสาหกรรมมากมาย เช่น ลิฟท์ เคน สายพานลำเลียง เนื่องจากมีราคาถูก ทนทาน และบำรุงรักษาง่าย ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงมีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส กันอย่างไม่มีการบำรุงรักษา หรือใช้งานเกินพิกัด วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน เพื่อสามารถวิเคราะห์การทำงาน หรือ ข้อบกพร่องของมอเตอร์ได้ ซึ่งได้ทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 0.25 HP และ ขนาด 0.5 HP ชนิดที่มีการระบายความร้อนแบบ TEFC (Totally Enclosed Fan Cooled)

การประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน ซึ่งจะมีการนำค่าของอุณหภูมิที่ได้จากการวัดลมระบายความร้อน ทั้งด้านลมเข้าและลมออกของมอเตอร์ ค่าของความเร็วลมในการระบายความร้อนของมอเตอร์ โดยนำมาเป็นอินพุตให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ (dsPIC30F4011 Microcontroller) เพื่อประมวลผลและแสดงสัญญาณของ อุณหภูมิ ความเร็วลมระบาย และกำลังสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์ โดยมีการทดสอบเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเช่น เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ เครื่องวัดความเร็วลม เพื่อให้มีความถูกต้องแม่นยำ และจำลองภาระโหลดจากอิเล็กทรอนิกส์ไดนาโมมิเตอร์ ที่ร้อยละ 0 20 40 60 80 และร้อยละ 100 ที่พิกัดของมอเตอร์ ทั้ง 2 ขนาด พร้อมบันทึกค่าการทดสอบ

ผลการวิจัย การประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน ที่มอเตอร์ขนาด 0.25 HP มีความผิดพลาดเฉลี่ยที่ร้อยละ 4.5 และมอเตอร์ขนาด 0.5 HP มีความผิดพลาดเฉลี่ยที่ร้อยละ 6.4 ซึ่งเปรียบเทียบกับ การทดสอบด้วยวงจรสมมูล สามารถหาลำดับสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์ ได้โดยไม่ต้องปิดหรือปลดมอเตอร์ออกจากระบบ

คำสำคัญ: มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ กำลังสูญเสีย ไมโครคอนโทรลเลอร์ อุณหภูมิลมระบายความร้อน

Thesis Title	Evaluation of Three Phase Induction Motor Power Loss Using Air-Cooling Temperature Measurement Technique
Name – Surname	Mr. Nattapon Jangjongdee
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Wanchai Subsigha, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

Three phase induction motors are electrical machines that used industries. The motors are commonly found in lifts, cranes and conveyors as they are cheap, durable and low-maintenance. According to the reasons mentioned earlier, three-phase induction motors have been being used inappropriately such as overloading. This thesis presents the evaluation of three-phase induction motor power loss using air-cooling temperature measurement technique in order to analysis its operation and motor's defective using technique with totally enclosed fan cooled motors at 0.25 and 0.5 HP rating.

Evaluation of three phase induction motor power loss is carried out using air-cooling temperature measurement technique records both the temperatures at the entrance as well as at the exit and the wind speed velocities from air-cooling motors. Recorded temperatures and wind speed velocities are the inputs for microcontroller (dsPIC30F4011) in order to evaluate and display temperatures, wind speed velocities and motor power losses. Those values are tested for precise and accuracy. Artificial load model is constructed from electrodynamicometer at 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100% of 0.25 and 0.5 HP motor rating. The result values are recorded.

This thesis presents the capability of calculating the motor power losses while the motors are still running. The results from the evaluation of three phase induction motor loss using air-cooling temperature measurement technique are both from 0.25 HP motor and from 0.5 HP motor rating. The average errors are 4.5% and 6.4%, comparing with their equivalent circuits.

Keywords: induction motor, motor power loss, microcontroller, air-cooling temperature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความสะดวกอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ กรรมการวิชาเอก ดร.สุรินทร์ แห่งมงาม กรรมการวิชาเอก และ ดร.ชาญวิทย์ บุญช่วย ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 4 ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรองต้นแบบชิ้นงานวิจัยและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 4 ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญ 1 ท่าน ที่สละเวลาอันมีค่าตอบข้อสัมภาษณ์อันเป็นผลให้งานวิจัยมีความชัดเจน ครบถ้วนและสามารถนำมาประยุกต์ใช้งาน ได้จริง ที่ให้ความร่วมมือออกทุนในการดำเนินกิจกรรมวิจัยร่วมกันจนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่มอบทุนสนับสนุนพัฒนาบุคลากรตลอดระยะเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณัฐพล แจ็งจดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ขั้นตอนการวิจัย	4
1.6 ข้อยกเว้นของการวิจัย	4
1.7 กรอบแนวคิดในการวิจัย	5
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	6
2.2 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	24
2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์และภาษาซี	29
2.4 การวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลด้วยไอซี และการวัดความเร็วลม	35
2.5 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา	40
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
3 วิธีการดำเนินการวิจัย	45
3.1 ส่วนประกอบของระบบ	45
3.2 การออกแบบและสร้างชุดวัดอุณหภูมิดิจิตอลด้วยไอซี LM335AZ	46

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4 การออกแบบและสร้างชุดควบคุมความเร็วสำหรับมอเตอร์ 52	52
3.5 การออกแบบและสร้างชุดประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD 58	58
3.6 การออกแบบและสร้างลายวงจรพิมพ์ (PCB) 62	62
3.7 การออกแบบโปรแกรม 65	65
4 ผลการวิจัย 67	67
4.1 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 67	67
4.2 ผลการทดสอบชุดควบคุมดิจิทัลด้วยไอซี LM335AZ 69	69
4.3 ผลการทดสอบชุดวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน 74	74
4.4 ผลการทดสอบการหาค่าคงที่สูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวงจร สมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส 75	75
4.5 ผลการทดสอบการหาค่าคงที่สูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสด้วยการ ประมวลผลและแสดงผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิ ลมระบายความร้อน 82	82
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 89	89
5.1 สรุปผลการวิจัย 89	89
5.2 ข้อเสนอแนะ 90	90
รายการอ้างอิง 92	92
ภาคผนวก 94	94
ภาคผนวก ก รูปการติดตั้งเซนเซอร์ และการทดสอบ 95	95
ภาคผนวก ข Print Circuit Board (PCB) 99	99
ภาคผนวก ค Program 103	103
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ 113	113
ประวัติผู้เขียน 138	138

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประสิทธิภาพขั้นต่ำของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	18
2.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน	19
2.3 รายละเอียดดัชนีแสดงโครงสร้างของมอเตอร์	20
4.1 การเปรียบเทียบอนุกรมมิ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LM335AZ สัญญาณแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณ และข้อมูลสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล ขนาด 10 บิต	69
4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	79
4.3 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาด 0.25 HP	79
4.4 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาด 0.5 HP	80
4.5 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ได้จากการประมวลผล และแสดงผล ของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิสมรรถนะความร้อนขนาด 0.25 HP	82
4.6 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ได้จากการประมวลผล และแสดงผล ของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิสมรรถนะความร้อนขนาด 0.5 HP	83



สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แผนผังของชุดประมวลผลและแสดงผลของกำลังสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	3
2.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก	7
2.2 การพันขดลวดสเตเตอร์ 2 โพล 3 เฟส	9
2.3 รูปคลื่นของกระแสที่จ่ายเข้ามอเตอร์ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน	9
2.4 การเกิดสนามแม่เหล็กที่เวลาต่างๆ คือ t_1, t_2 และ t_3	10
2.5 การส่งผ่านกำลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	12
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและทอร์ก ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก	15
2.7 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	16
2.8 แสดงวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก เมื่อมีอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเป็น 1	16
2.9 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานเอาต์พุต กำลังงานสูญเสีย และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	24
2.10 วงจรทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส	25
2.11 วงจรการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสถานะไม่มีโหลด	26
2.12 วงจรการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยวิธียึดโรเตอร์	28
2.13 โครงสร้างภายนอกของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011	30
2.14 บล็อกไดอะแกรม dsPIC30F4011	31
2.15 ไดอะแกรมการทำงานของ MPLAB C30 คอมไพเลอร์	33
2.16 ลักษณะของเซนเซอร์อุณหภูมิแบบเชิงเส้น เบอร์ LM335AZ ตัวถังแบบ TO-92	35
2.17 การต่อใช้งาน และการปรับตั้งความแม่นยำ	36
2.18 ความผิดพลาดในการปรับตั้งความแม่นยำของ LM335AZ	37
2.19 เครื่องวัดความเร็วลมแบบถ้วย	38
2.20 เครื่องวัดความเร็วลมแบบพรอเพลเลอร์ ชนิดที่เป็น โพรป	38
2.21 เครื่องวัดความเร็วลมแบบหลอดความกดดัน	39
2.22 สูตรสำหรับวัดทิศทางลม	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.23 เครื่องวัดความเร็วลมแบบแอโรเวน	40
2.24 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาออกจากผนังแผ่นเรียบ	41
3.1 แผนผังของชุดประมวลผลและแสดงผลของกำลังสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	45
3.2 ลักษณะของเซนเซอร์อุณหภูมิแบบเชิงเส้น เบอร์ LM335AZ	46
3.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LM335AZ ทั้ง 4 ตัว ที่อุณหภูมิ 29 °C	47
3.4 แผนผังการออกแบบชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิด้วย LM335AZ	47
3.5 วงจรวัดอุณหภูมิดิจิทัลด้วยไอซีเบอร์ LM335AZ พร้อมวงจรปรับแต่งสัญญาณ	48
3.6 กราฟคุณสมบัติของวงจรปรับความชัน และตำแหน่งศูนย์	49
3.7 โครงสร้างภายในของพัดลมระบายความร้อน	50
3.8 โครงสร้างของพัดลมระบายความร้อน และการติดตั้งอินดักทีฟเซนเซอร์	50
3.9 เครื่องวัดความเร็วลมที่ใช้ในการสอบเทียบ (DIGICON ANEMOMETER รุ่น DA-43)	51
3.10 วงจรตรวจจับสัญญาณความถี่จากอินดักทีฟเซนเซอร์	51
3.11 ชุดอุโมงค์ลมในการสอบเทียบเครื่องวัดความเร็วลม	52
3.12 วงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ด้วย PWM	53
3.13 ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	54
3.14 สัญญาณ PWM ที่ Duty Cycle ต่างๆ	56
3.15 การสอบเทียบเครื่องวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน	57
3.16 ความถี่ของการหมุนของพัดลมระบายความร้อนที่ความเร็วลมต่างๆ	58
3.17 วงจรไฟฟ้าของชุดประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD	61
3.18 ชุดประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD	62
3.19 โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับออกแบบลายวงจรพิมพ์ Express PCB	62
3.20 ลายวงจรพิมพ์ชุดวัดอุณหภูมิดิจิทัลด้วย ไอซี LM335AZ	63
3.21 ลายวงจรพิมพ์ชุดวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน	64
3.22 ลายวงจรพิมพ์ภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	64
3.23 ลายวงจรพิมพ์ชุดประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD	65
3.24 แผนผังการทำงานของระบบประมวลผลและแสดงผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 เครื่องจำลองภาระโหลด และวัดความเร็วรอบ ถูกขับด้วยสายพานอยู่กับเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	67
4.2 ชุดประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน	68
4.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส พร้อมเครื่องวัดและวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า	68
4.4 การทดสอบหาลำดับสูญเสียมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ภาระโหลดต่างๆ	68
4.5 ความผิดพลาดของเซนเซอร์อุณหภูมิตัวที่ 1 เฉลี่ยร้อยละ 1.0	72
4.6 ความผิดพลาดของเซนเซอร์อุณหภูมิตัวที่ 2 เฉลี่ยร้อยละ 1.1	73
4.7 ความผิดพลาดของเซนเซอร์อุณหภูมิตัวที่ 3 เฉลี่ยร้อยละ 0.8	73
4.8 ความผิดพลาดของเซนเซอร์อุณหภูมิตัวที่ 4 เฉลี่ยร้อยละ 0.5	74
4.9 ความผิดพลาดของเซนเซอร์วัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน เฉลี่ยร้อยละ 0.3.....	75
4.10 การทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์	76
4.11 การทดสอบขณะไม่มีโหลด	77
4.12 การทดสอบการยึดโรเตอร์อยู่กับที่	78
4.13 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	78
4.14 ระยะเวลาของอุณหภูมิสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดพิกัด 0.5 HP	81
4.15 ความเร็วลมด้านเข้าของมอเตอร์	83
4.16 อุณหภูมิลมระบายความร้อนของมอเตอร์	84
4.17 อุณหภูมิลมด้านเข้าของมอเตอร์	84
4.18 การประมวลผลและแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ของกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อนของมอเตอร์ขนาด 0.25 HP	85
4.19 การประมวลผลและแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ของกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อนของมอเตอร์ขนาด 0.5 HP	85
4.20 ความผิดพลาดในการประมวลผลและแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ของกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน ของมอเตอร์ขนาด 0.25 HP	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.20 ความผิดพลาดในการประมวลผล และแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ของกำลัง สูญเสียรวมของมอเตอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน ของมอเตอร์ ขนาด 0.5 HP	86
4.22 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 0.25 HP	87
4.23 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 0.5 HP	87
4.24 ความผิดพลาดด้านประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 0.25 HP	88
4.25 ความผิดพลาดด้านประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 0.5 HP	88



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดหนึ่ง มีหน้าที่เปลี่ยนรูปแบบพลังงานไฟฟ้าเป็นรูปแบบพลังงานกล ซึ่งรูปแบบของพลังงานไฟฟ้านี้อาจใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ หรือไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนรูปแบบของพลังงานกลจะได้ออกมาจากเพลลาของมอเตอร์ซึ่งสามารถนำพลังงานกลนี้ไปใช้งานได้หลากหลายเช่น ติดตั้งเป็นพัดลม ขับสายพาน ปั้มน้ำ ฯลฯ

ปัจจุบันในหลายๆประเทศทั่วโลก ได้มีการนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำ ทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส มาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในงานอุตสาหกรรม สถานที่ราชการ หรือแม้แต่อาคารบ้านเรือน ก็มีให้พบเห็น ในที่นี้จะกล่าวถึงการนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมักเรียกสั้นๆว่า “มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส” ไปใช้งานในงานต่างๆ ซึ่งผู้ใช้งานมีการเลือกมอเตอร์ไฟฟ้ามาใช้งานในระบบ โดยที่ผู้ใช้งานส่วนใหญ่อาศัยการเลือกซื้อและพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้า จากข้อมูลของแคตาล็อก หรือ ราคาและยี่ห้อ เมื่อผู้ใช้งานได้เลือกซื้อมอเตอร์ไฟฟ้ามาแล้วก็ทำการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าเข้ากับงานจริง และด้วยผู้ใช้งานมีความเข้าใจว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีความทนทานและอายุการใช้งานที่ยาวนาน จึงปราศจากการหมั่นดูแลรักษา หรืออาจตรวจสอบเพียงเล็กน้อย ซึ่งนั่นเองอาจจะเป็นที่มาของปัญหาหลายๆ อย่าง อาทิเช่น การใช้งานเกินพิกัด การใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าพิกัด ฯลฯ และจากจุดดังกล่าว ผู้ใช้งานใช้มอเตอร์ไฟฟ้าได้ไม่เหมาะสมกับเนมเพลต หรือป้ายบอกรายละเอียด เพราะว่าผู้ใช้งานไม่มีอุปกรณ์ที่จะทำการหาค่าลึงสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และหากต้องการจะทำการหาค่าลึงสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ก็ต้องนำมอเตอร์ไฟฟ้าไปทดสอบหาการหาค่าลึงสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ซึ่งตรงนี้มีค่าใช้จ่ายในการทดสอบ จึงทำให้ผู้ใช้งานหลีกเลี่ยงที่จะทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า และบางสถานการณ์ไม่สามารถหยุดการทำงานหรือปิดระบบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าได้ ผู้ใช้งานก็จะใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าต่อไปโดยที่ไม่ทราบว่าผู้ใช้งานเองต้องเสียค่าใช้จ่ายระยะยาวกับการไม่ทราบถึงค่าลึงสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากปัญหาข้างต้นสามารถแก้ปัญหาได้โดยสร้างอุปกรณ์ที่สามารถประมวลผลค่าลึงสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล และแสดงผลทางจอ LCD โดยอุปกรณ์ชุดนี้สามารถประมวลผลค่าลึงสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้โดยไม่จำเป็นต้องปลด

หรือปิดระบบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งค่าที่ได้มาจะได้มาจากการติดตั้งเซ็นเซอร์แบบชั่วคราว และนำค่าที่ได้มาเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเขียนคำสั่งหรือโปรแกรมลงใน ซีพียู เพื่อให้ซีพียู ของไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่าที่วัดได้ มาคำนวณในสูตรที่โปรแกรมไว้ และแสดงค่าที่คำนวณ แสดงผลผ่านทางจอ LCD ซึ่งซีพียูที่ใช้ในอุปกรณ์วัดชุดนี้จะใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dsPIC เพราะราคาถูกขนาดเล็กและผลิตจากบริษัทที่ได้รับการยอมรับจากบุคคลทั่วโลก ประโยชน์ที่ได้จากการประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ คือสามารถที่จะวิเคราะห์ปัญหาหรือ ข้อบกพร่องในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่แล้วได้ เพื่อที่จะสามารถตรวจสอบและซ่อม บำรุงรักษามอเตอร์ได้อย่างตรงจุดมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้ทราบถึงกำลังสูญเสีย และอุณหภูมิของ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำงาน ณ ปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการสร้างอุปกรณ์ประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิสมรรถนะความร้อน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการลดระยะเวลาในการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ถึงปัญหา หรือข้อบกพร่องในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

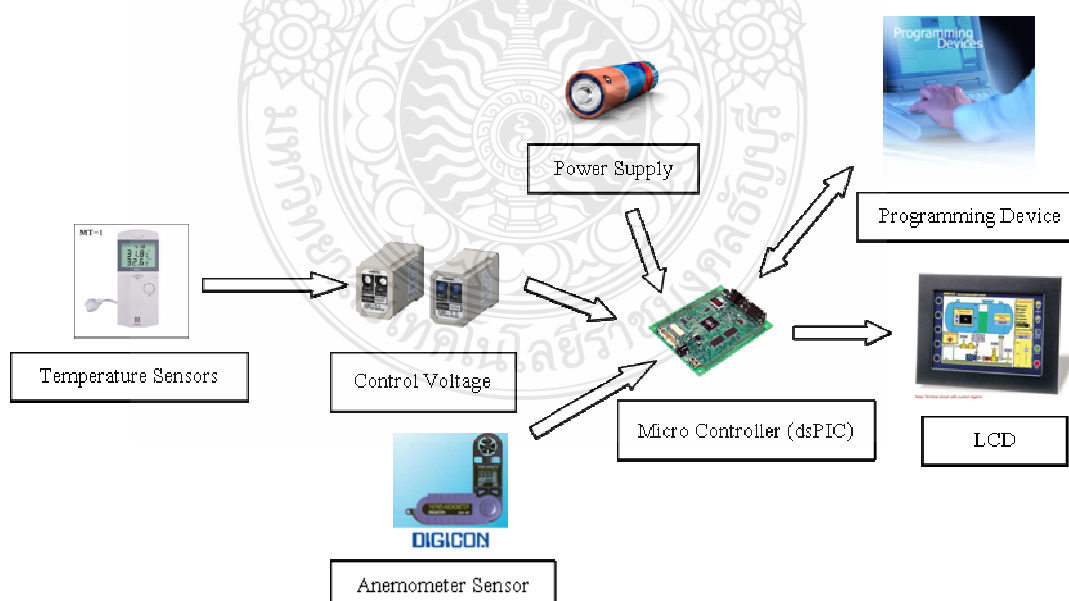
จัดสร้างอุปกรณ์ประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ เทคนิคการวัดอุณหภูมิสมรรถนะความร้อน โดยใช้ เซ็นเซอร์อุณหภูมิ และอุปกรณ์วัดความเร็วลม เป็น ภาคอินพุตให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ และเขียนโปรแกรมลงในอุปกรณ์ดังกล่าว เพื่อนำค่าที่ได้มา แทนลงในโปรแกรม และคำนวณออกมาเป็นค่าต่างๆ ที่ต้องการวัดโดยมีความรวดเร็ว และแสดงผลที่ ชัดเจน

การวัดกำลังงานสูญเสีย นั้น จะใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิสมรรถนะความร้อนของมอเตอร์ ไฟฟ้า ขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ากำลังขับเคลื่อนทางกล ซึ่งไม่จำเป็นต้องหยุดการทำงานของมอเตอร์จาก ระบบ หลักการคำนวณจะใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์ ที่ เปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนและระบาย ความร้อนสู่อุณหภูมิแวดล้อม โดยจะมีการวัดค่าต่างๆ เช่น พื้นที่หน้าตัดของลมด้านเข้า อัตราความเร็วลมเฉลี่ยของใบพัดระบายความร้อน อุณหภูมิสม รร้อน และอุณหภูมิแวดล้อม และนำค่าที่วัดได้มาลดระดับแรงดันให้มีค่าไม่เกิน 5 โวลต์ เพื่อที่จะนำค่า มาเข้าในไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วนำค่าแทนลงในสมการที่ถูกสร้างขึ้นคือ

$$P_{loss_total} = \rho AVC(T_o - T_i) \quad (1.1)$$

ซึ่งค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์ (P_{loss_total}) ที่ได้จะมีหน่วยเป็นวัตต์ (W) โดยค่าของความหนาแน่นของอากาศจะแทนด้วย (ρ) ค่าพื้นที่หน้าตัดของลมด้านเข้าจะแทนด้วย (A) อัตราความเร็วลมเฉลี่ยของใบพัดระบายความร้อนจะแทนด้วย (V) ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่จะแทนด้วย (C) อุณหภูมิลมร้อนจะแทนด้วย (T_o) และอุณหภูมิลมจะแทนด้วย (T_i)

เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ผลจากการคำนวณในสมการข้างต้นแล้ว ก็จะนำค่ามาแสดงผลผ่านทางจอ LCD โดยอุปกรณ์ประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์นี้ย่นย่อ 3 เฟส สามารถทำการวัดได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของมอเตอร์ในระบบ อีกทั้งยังสามารถวัดและบอกรายละเอียดค่าต่างๆ ได้อย่างละเอียดรวดเร็ว สามารถถือหรือพกพาไปทดสอบได้ที่หน้างาน ซึ่งจะทำให้สามารถมีความรวดเร็วในการวัดได้ ในกรณีที่มีการประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์นี้ย่นย่อ 3 เฟส หลายตัว และมีค่าความผิดพลาดน้อย เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า อุปกรณ์ประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์นี้ย่นย่อ 3 เฟส ประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จะแสดงค่าที่ได้จากการวัดและการคำนวณ ผ่านทางจอ LCD โดยค่าที่จะแสดงคือ กำลังงานสูญเสีย อุณหภูมิการทำงานของมอเตอร์ และอุณหภูมิมอเตอร์เฉลี่ย ซึ่งหากทราบค่าที่กล่าวมาด้านบน จะทำให้สามารถวิเคราะห์ถึงปัญหาหรือข้อบกพร่องในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าขณะทำงานได้



ภาพที่ 1.1 แผนผังของชุดประมวลผลและแสดงผลของกำลังสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 สามารถการนำไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC มาใช้ในการรับส่งค่าข้อมูล จำนวน
ประมวลผล
- 1.4.2 สามารถวัดและคำนวณ แสดงผลผ่านทางจอ LCD ได้โดยไม่จำเป็นต้องปลดหรือปิด
ระบบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส อาทิเช่น
- กำลังงานสูญเสียทั้งหมด หน่วยเป็น วัตต์ (W)
 - อุณหภูมิการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า หน่วยเป็น องศาเซลเซียส (°C)

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.5.1 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำงานวิจัย
- 1.5.2 จัดทำรูปแบบในการเสนอหัวข้อครั้งที่ 1 และศึกษาการทำวิทยานิพนธ์ในทศวรรษ
- 1.5.3 จัดทำชุดทดสอบวัดในส่วนของกำลังสูญเสีย
- 1.5.4 เขียนโปรแกรมในการคำนวณ และการแสดงผล
- 1.5.5 ทดสอบโปรแกรมในส่วนแสดงผลผ่านจอ LCD
- 1.5.6 ทดสอบการศึกษาการประมวลผลกำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้
เทคนิคการวัดอุณหภูมิระบายความร้อน กับมอเตอร์เหนี่ยวนำจริง
- 1.5.7 ทดสอบการศึกษาการประมวลผลกำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้
เทคนิคการวัดอุณหภูมิระบายความร้อน โดยเทียบกับการทดสอบด้วยวงจรสมมูล โดยใช้
มอเตอร์ตัวเดิมทดสอบ
- 1.5.8 จัดทำรูปเล่มฉบับสมบูรณ์

1.6 ข้อกำหนดของการวิจัย

- 1.6.1 ใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบโรเตอร์แบบกรงกระรอก
ขนาด 0.25 HP (186 W) และขนาด 0.5 HP (373 W)
- 1.6.2 ใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้าที่ติดตั้งระบายอากาศระบายความร้อนด้วยตัวเอง Totally Enclosed
Fan Cooled (TEFC) [1]
- 1.6.3 ใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง (Continuous Running Duty)
- 1.6.4 ไม่สามารถใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดปิดมิดชิดหรือแบบจุ่ม

1.7 กรอบแนวคิดในการวิจัย

การหาค่ากำลังสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส สามารถหาได้หลายวิธี เช่น การวัดกำลังงาน อินพุตและเอาต์พุต จากวัตต์มิเตอร์ 3 เฟส และอิเล็กทรอนิกส์โมมิเตอร์ได้โดยตรง การใช้วงจรมุมล ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส การวัดโดยใช้หลักการของความเร็วสลลิป ซึ่งที่กล่าวมานี้เป็นการ ทดสอบที่นิยมใช้กันมากเพราะมีความเที่ยงตรง แม่นยำ และสามารถวิเคราะห์ค่าต่างๆ ได้ แต่เนื่องจาก วิธีดังกล่าว มีค่าใช้จ่ายในการวัด หรือทดสอบมอเตอร์ที่ค่อนข้างสูง จำเป็นต้องมีการเคลื่อนย้าย มอเตอร์เพื่อนำไปทดสอบ ซึ่งปัญหาตรงจุดนี้ อาจไม่สามารถกระทำได้หากจำเป็นต้องเดินเครื่อง มอเตอร์อยู่ตลอดเวลา ซึ่งจากปัญหาดังกล่าว จึงมีแนวคิดในการหาค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้า เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยที่ไม่จำเป็นต้องปลด หรือถอดมอเตอร์ออกมาทดสอบหรือทำการวัดใดๆ ทั้งสิ้น ซึ่ง ใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อน กำลังสูญเสียของมอเตอร์ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นทุกส่วน ไม่ว่าจะเป็น กำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก กำลังสูญเสียที่ขดลวด กำลังสูญเสียที่โรเตอร์ และกำลังสูญเสียที่ความฝืด และแรงต้านลม โดยมอเตอร์ส่วนใหญ่จะมีการระบายความร้อนแบบ Totally Enclosed Fan Cooled (TEFC) เป็นการนำลมเย็นด้านท้ายของมอเตอร์มาระบายความร้อนให้กับผิวมอเตอร์ เพื่อลดอุณหภูมิ การทำงานของมอเตอร์ไม่ให้มีความร้อนสูงเกินไป ซึ่งจากการระบายความร้อนของมอเตอร์แบบ TEFC นี้ ได้มีการนำทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้า เหนี่ยวนำ 3 เฟส ดังสมการที่ 1.1 ผลการใช้ทฤษฎีนี้มีความผิดพลาดต่ำกว่าร้อยละ 5 ซึ่งเป็นที่ยอมรับ ได้ และในงานวิจัยนี้จะเป็นการต่อยอดจากสมการดังกล่าว มาปรับปรุงให้มีความสามารถในการทราบ กำลังสูญเสียของมอเตอร์ ได้รวดเร็วขึ้น ใช้อุปกรณ์น้อย ราคาถูก ลดความผิดพลาดจากการคำนวณ หลายๆ ครั้ง โดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เข้ามาช่วยในการรับ และส่งข้อมูลต่างๆ พร้อมทั้ง ประมวลผล แสดงผลผ่านจอ LCD

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.8.1 ได้ค้นแบบชุดประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ เทคนิคการวัดอุณหภูมิระบายความร้อน
- 1.8.2 ลดระยะเวลาในการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- 1.8.3 ทราบถึงปัญหา หรือข้อบกพร่องในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อประกอบการพิจารณาใช้ในการสร้างอุปกรณ์ประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล ซึ่งประกอบด้วยหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่สำคัญคือ

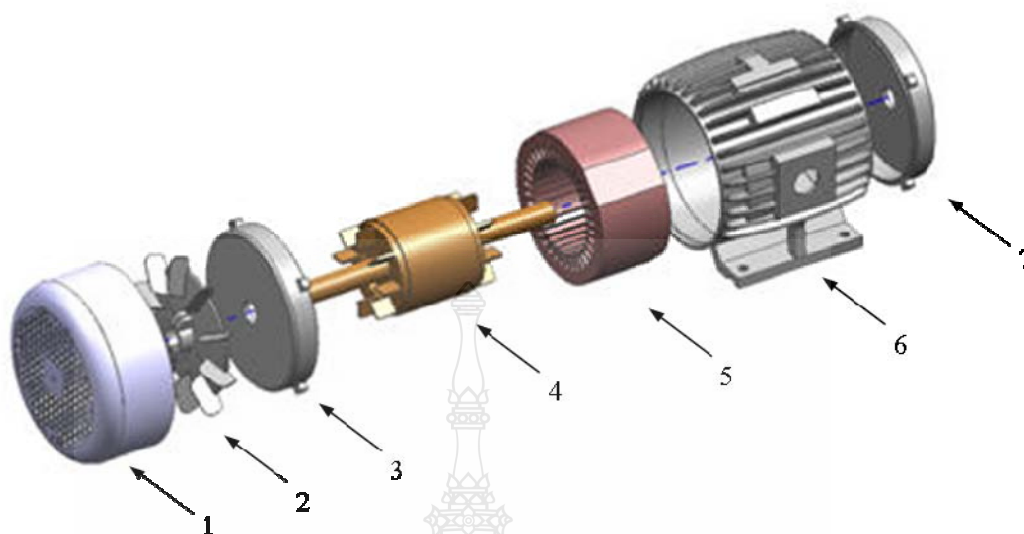
- 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส
- 2.2 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส
- 2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์และภาษาซี
- 2.4 การวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลด้วยไอซี และการวัดความเร็วลม
- 2.5 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา
- 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [2 - 3]

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งมอเตอร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำนี้อาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวหรือมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟส (Poly Phase Induction Motor) ก็ได้ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟสนั้นมักนิยมเรียกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

2.1.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน จึงมีส่วนประกอบหลักๆ คือ ส่วนอยู่กับที่หรือสเตเตอร์ ส่วนหมุนหรือโรเตอร์ และฝาปิดหัวท้ายของมอเตอร์ที่ทำหน้าที่ประคองแกนเพลลาเท่านั้นรายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

ส่วนประกอบต่างๆ ตามหมายเลขที่ระบุไว้ในภาพที่ 2.1 ดังนี้

- หมายเลข 1: ฝาครอบตัวพัดลม
- หมายเลข 2: พัดลมดูดอากาศระบายความร้อน
- หมายเลข 3: ฝาครอบมอเตอร์ด้านหลัง พร้อมเบร็งลูกปืน
- หมายเลข 4: ตัวโรเตอร์
- หมายเลข 5: ตัวสเตเตอร์
- หมายเลข 6: โครงมอเตอร์
- หมายเลข 7: ฝาครอบมอเตอร์ด้านหน้า พร้อมเบร็งลูกปืน

2.1.2 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นดังนี้ ตัวโรเตอร์ของมอเตอร์มีแท่งตัวนำฝังอยู่บนตัวของมันและต่อครบวงจรทั้งห้าขั้ว มีลักษณะเป็นกรงกระรอก พร้อมทั้งจะให้กระแสไหลครบวงจร และเนื่องจากตัวนำในตัวโรเตอร์เหล่านี้อยู่ในสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากกระแสไหลเข้าขดลวดของสเตเตอร์ จึงเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ขดโรเตอร์ มีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดโรเตอร์ และเกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นที่ตัวโรเตอร์ เกิดการดูดและผลักกับขั้วแม่เหล็กหมุนบนตัว

สเตเตอร์ ทำให้โรเตอร์หมุนตามการหมุนของสนามแม่เหล็กหมุน แต่การหมุนของตัวโรเตอร์จะช้ากว่าสนามแม่เหล็กหมุน

การเกิดสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Field) เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเข้าไปที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ก็จะมีสมการดังนี้

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I_m \sin \omega t \\ i_b &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_c &= I_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลเข้าขดลวดสเตเตอร์

$$\phi_1 = \frac{i_a N_a}{R} \quad (2.2)$$

แทนค่า i_a จากสมการที่ 2.1 จะได้ดังนี้

$$\phi_1 = \frac{i_a N_a}{R} \sin \omega t \quad (2.3)$$

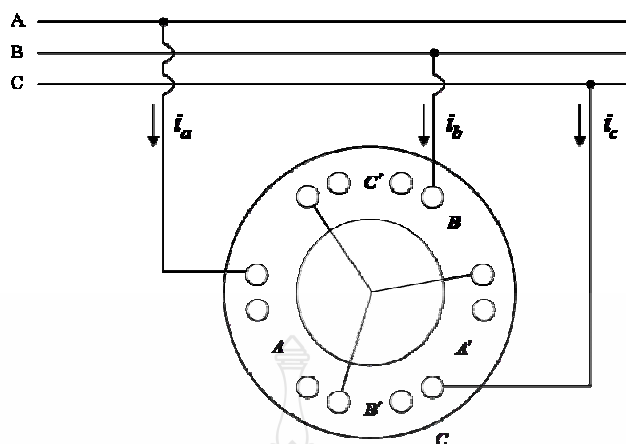
เมื่อ N_a คือจำนวนรอบของขดเตเตอร์ต่อเฟส

R คือความต้านทาน (Reluctance) ของทางเดินแม่เหล็ก

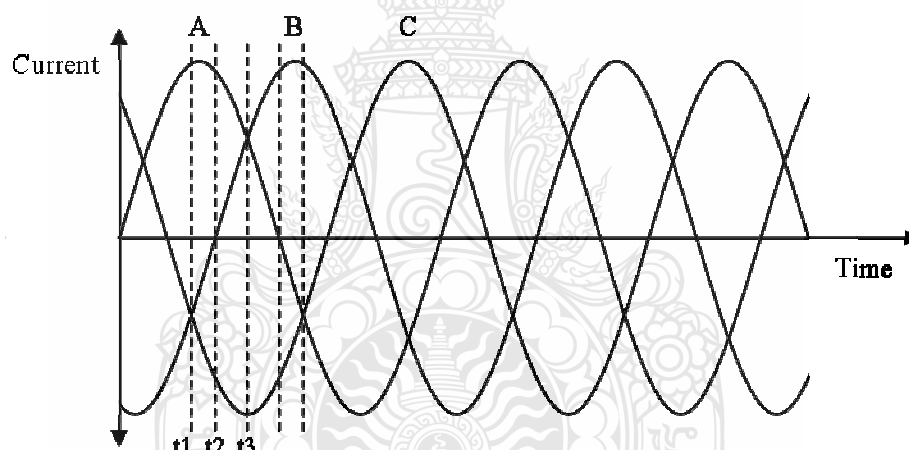
ϕ_m คือเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ $\frac{i_a N_a}{R}$ มีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Weber)

ดังนั้น

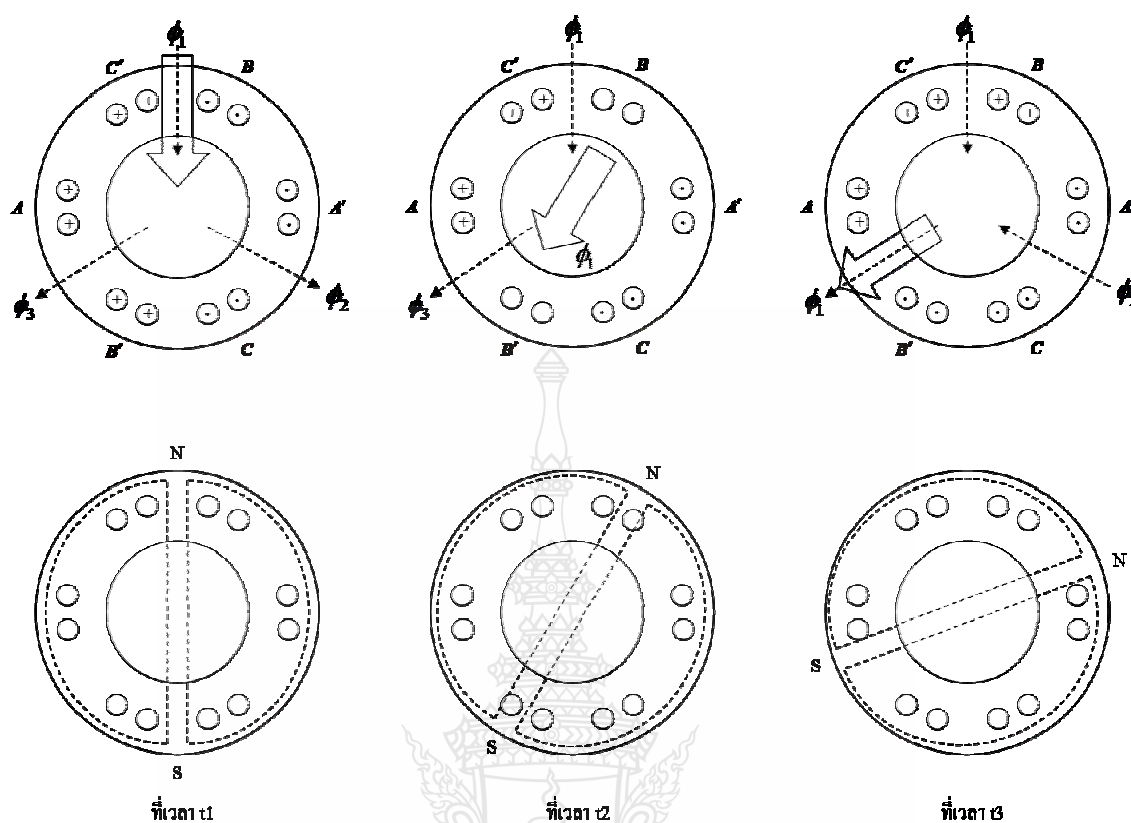
$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \phi_m \sin \omega t \\ \phi_2 &= \phi_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \phi_3 &= \phi_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$



ภาพที่ 2.2 การพันขดลวดสเตเตอร์ 2 โพล 3 เฟส



ภาพที่ 2.3 รูปคลื่นของกระแสที่จ่ายเข้ามอเตอร์ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน



ภาพที่ 2.4 การเกิดสนามแม่เหล็กที่เวลาต่างๆ คือ t_1, t_2 และ t_3

จากภาพที่ 2.4 (ซึ่งเป็นผลที่ได้จากภาพที่ 2.2 และภาพที่ 2.3) จะเห็นว่า ในกรณีนี้ สนามแม่เหล็กหมุนตามเข็มนาฬิกาที่เวลา t_1 กระแสไหลเข้าที่ A B' และ C' และไหลออกที่ A' B และ C เส้นแรงแม่เหล็กรวมที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง ที่เวลา t_2 กระแสไหลเข้าที่ A C' และไหลออกที่ A' C และส่วนที่ B B' ไม่มีกระแสไหล เส้นแรงแม่เหล็กรวมเลื่อนจากแนวเดิมตามเข็มนาฬิกา ที่เวลา t_3 กระแสไหลเข้าที่ A B และ C' กระแสไหลออกที่ A' B' และ C เส้นแรงแม่เหล็กยังคงเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา เส้นแรงแม่เหล็กรวมเคลื่อนที่นี้จะมีค่าคงที่คือ $1.5\phi_m$ ทุกๆ ขณะ เช่น ที่ $\omega t = 90^\circ$ หรือ 120° หรือ 150° หรือ 180°

2.1.3 ผลกระทบต่อคุณสมบัติการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อแรงดันไม่สมดุล

ในกรณีที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบไม่สมดุล หมายความว่ามีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส ซึ่งอาจจะมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด หรือแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าพิกัด ก็มีผลกระทบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสเช่นกัน ดังเช่น

1) เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (ในกรณีที่กำลังมอเตอร์คงที่)

1.1 กระแสโรเตอร์และสเตเตอร์ อันเนื่องมาจากโหลดจะลดลง ในอัตราส่วนกลับหรือผกผันกับแรงดันไฟฟ้า

1.2 กระแสเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และกำลังสูญเสียในแกนเหล็กเพิ่มขึ้น (อุณหภูมิในแกนเหล็กเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก และกระแสเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ยังผลทำให้แม่เหล็กอิ่มตัวเร็วขึ้นจำเป็นต้องจำกัดการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า)

1.3 กระแสเริ่มหมุนเพิ่มขึ้น ในอัตราที่เท่ากับกระแสมอเตอร์

1.4 ทอร์กเริ่มหมุนและทอร์กขณะปลดโหลดออก (Pull out torque) จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่เท่ากับแรงดันไฟฟ้ายกกำลัง 2

1.5 เพาเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสเหนี่ยวนำ

1.6 อุณหภูมิในขดลวดโรเตอร์ สูงขึ้น ยังผลให้มอเตอร์ร้อนขึ้น

1.7 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าของการเปลี่ยนแปลงของเนื้อทองแดง และแกนเหล็กตามลำดับ

1.8 มอเตอร์หมุนเร็วขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในโรเตอร์ต่ำ

2) เมื่อแรงดันไฟฟ้าลดลง

2.1 กระแสสเตเตอร์และกระแสโรเตอร์เพิ่มขึ้น

2.2 กระแสเหนี่ยวนำ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กตลอดจนอุณหภูมิในแกนเหล็กลดลง

2.3 กระแสเริ่มหมุนจะลดลงตามอัตราส่วน

2.4 ทอร์กเริ่มหมุนและทอร์กขณะปลดโหลดออก จะลดลงในอัตราที่เท่ากับแรงดันไฟฟ้ายกกำลัง 2

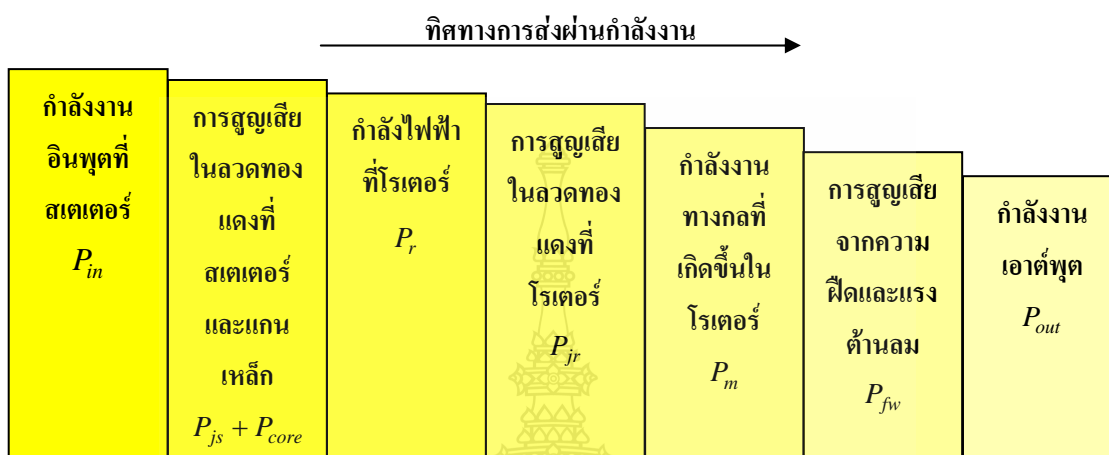
2.5 เพาเวอร์แฟกเตอร์เพิ่มขึ้น

2.6 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในเนื้อทองแดงของโรเตอร์และสเตเตอร์เพิ่มขึ้น ยังผลให้มอเตอร์ร้อนขึ้นตาม

2.7 ประสิทธิภาพของมอเตอร์มีผลกระทบอย่างรุนแรง (ประสิทธิภาพของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก)

2.1.4 กำลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าอินพุตจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปสู่กำลังงานกลเอาต์พุต [4] เป็นไปตามลำดับของดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การส่งผ่านกำลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

การสูญเสียในแกนเหล็กของโรเตอร์ไม่นำมาพิจารณาเพราะว่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานอยู่นั้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นยังคงเหลือการสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์เพียงอย่างเดียว

จากภาพที่ 2.5 กำลังงานอินพุตที่สเตเตอร์ คือ พลังงานไฟฟ้าอินพุตที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ผ่านมายังขดลวดสเตเตอร์ โดยที่สเตเตอร์จะมีการสูญเสีย 2 ส่วน คือ กำลังสูญเสียของขดลวดสเตเตอร์ และกำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก กำลังที่เหลือออกมา คือกำลังที่ส่งผ่านช่องอากาศมายังโรเตอร์ อย่างไรก็ตาม พลังงานที่ส่งมายังโรเตอร์ก็มีการสูญเสียจากขดลวดโรเตอร์เช่นกัน ส่วนการสูญเสียในแกนเหล็กที่โรเตอร์มีค่าน้อยมาก จึงเปรียบเสมือนไม่มีการสูญเสียที่แกนเหล็กโรเตอร์ กำลังที่เหลือออกมาอีกคือ กำลังงานกลที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ โดยพลังงานกลนี้จะต้องเอาชนะการสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลม ซึ่งก็คือกำลังสูญเสียอย่างหนึ่งเป็นการสูญเสียทางกล จากนั้นกำลังงานทางกลนี้ก็คือกำลังงานที่เพลของมอเตอร์ ซึ่งสามารถส่งให้กับโหลดได้ จากรูปจะเห็นว่ากำลังงานจะผ่านจากซ้ายไปขวา หรือตามลูกศรนั่นเอง และก็จะเห็นอีกอย่างว่ากำลังงานจะลดลงตามลำดับ ซึ่งจะสรุปได้ว่า กำลังสูญเสียรวม P_{loss_total} ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

- การสูญเสียในลวดทองแดงที่สเตเตอร์และแกนเหล็ก
- การสูญเสียในลวดทองแดงที่โรเตอร์
- การสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลม

จากภาพที่ 2.5 และแผนผังจะสามารถหาค่ากำลังในส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

จากกำลังงานอินพุตที่สเตเตอร์ (P_{in})

$$P_{in} = (P_{js} + P_{core}) + P_r \quad (2.5)$$

หรือ
$$P_{in} = (P_{js} + P_{core}) + P_{jr} + P_m \quad (2.6)$$

หรือ
$$P_{in} = (P_{js} + P_{core}) + P_{jr} + P_{fw} + P_{out} \quad (2.7)$$

หรือ
$$P_{in} = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta \quad (2.8)$$

จากกำลังไฟฟ้าที่โรเตอร์ (P_r)

$$P_r = P_{in} - (P_{js} + P_{core}) \quad (2.9)$$

หรือ
$$P_r = P_{jr} + P_m \quad (2.10)$$

จากกำลังงานทางกลที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ (P_m)

$$P_m = P_r - P_{jr} \quad (2.11)$$

หรือ
$$P_m = P_{fw} + P_{out} \quad (2.12)$$

จากกำลังงานเอาต์พุต (P_{out})

$$P_{out} = P_m - P_{fw} \quad (2.13)$$

หรือ
$$P_{out} = HP \times 746 \quad (2.14)$$

หรือ
$$P_{out} = P_{in} - P_{loss_total} \quad (2.15)$$

และประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (η) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.16

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.16)$$

ส่วนทอร์กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (T_m) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.17

$$T_m = \frac{P_{out}}{\omega_r} \quad (2.17)$$

ซึ่ง T_m คือ ทอร์กของมอเตอร์ไฟฟ้า (N-m.)

และ ω_r คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/sec)

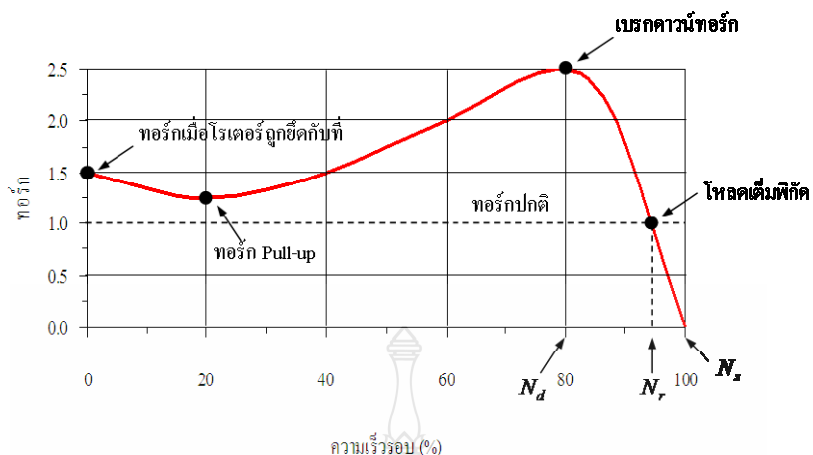
โดยที่ ω_r สามารถหาได้จากสมการที่ 2.18

$$\omega_r = \frac{2\pi N_r}{60} \quad (2.18)$$

ซึ่ง N_r คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (RPM)

2.1.5 เส้นความสัมพันธ์ของความเร็วและทอร์ก

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและทอร์กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอกในสถานะที่ขั้วโหลดเต็มพิกัด ดังแสดงในภาพที่ 2.6 จะพบว่าทอร์กในสถานะปกติที่โหลดเต็มพิกัดคือ ทอร์กในสถานะที่โรเตอร์ถูกยึดอยู่กับที่เท่ากับ 1.5 เท่าของทอร์กเต็มพิกัด สำหรับเบรกคาน์ทอร์กจะมีค่าประมาณ 2 เท่าของทอร์กเต็มพิกัด

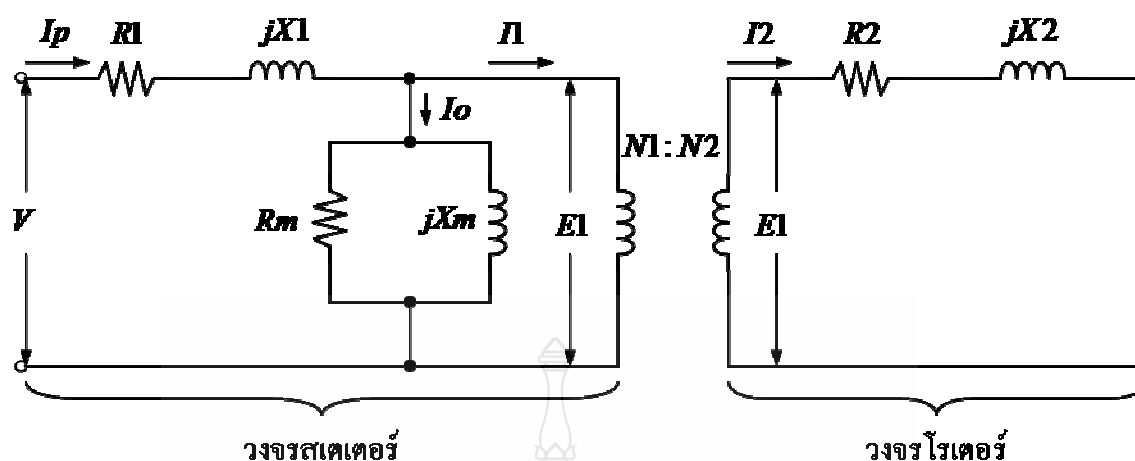


ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและทอร์ก ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก

ที่โหลดเต็มพิกัดของมอเตอร์ ความเร็วของมอเตอร์จะเท่ากับ N_r แต่ถ้าทอร์กของโหลดเพิ่มขึ้นความเร็วจะลดลง จนกระทั่งมอเตอร์สร้างทอร์กได้เท่ากับทอร์กของโหลด ในสภาวะดังกล่าวมอเตอร์ยังคงหมุนไปได้ แต่เมื่อใดก็ตามที่ทอร์กของโหลดเกินกว่า 2.5 เท่าของทอร์กเต็มพิกัด ซึ่งเรียกว่า เบรกควาน์ทอร์ก จะทำให้มอเตอร์หยุดหมุนอย่างรวดเร็ว เพราะวามอเตอร์ไม่สามารถสร้างทอร์กขึ้นมาเท่ากับทอร์กของโหลดได้ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีขนาดเล็กกว่า 10 kW ความเร็วที่เบรกควาน์ทอร์ก N_d จะเท่ากับประมาณร้อยละ 80 ของความเร็วซิงโครนัส (N_s) แต่สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ที่มีพิกัดมากกว่า 1,000 kW ความเร็วที่เบรกควาน์ทอร์กจะเท่ากับประมาณร้อยละ 98 ของความเร็วซิงโครนัส

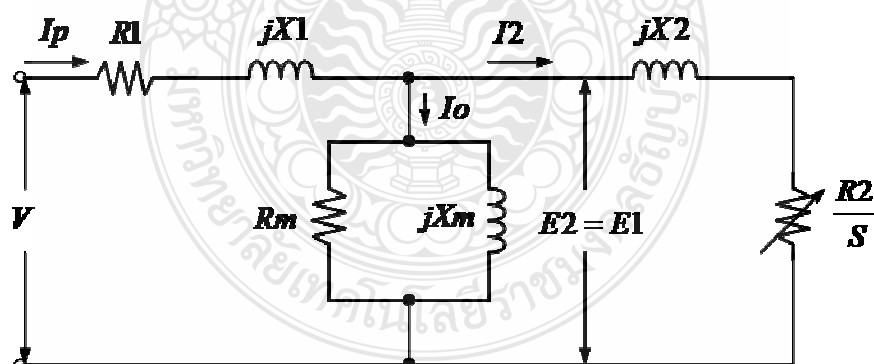
2.1.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส [5 - 6]

วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส (Equivalent Circuit of Induction Motor) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก จะมีโครงสร้างของวงจรสมมูลคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส เมื่อนำมาเขียนวงจรสมมูลต่อเฟสแทนพารามิเตอร์ส่วนต่างๆ ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ ได้ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลในภาพที่ 2.7 นั้น วงจรสเตเตอร์และวงจรโรเตอร์จะแยกกัน เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จะมีการย้ายค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไปไว้ทางวงจรโรเตอร์ และนำค่าที่ย้ายไปกลับมารวมกันด้านเดียวกันใหม่โดยใช้ด้านสเตเตอร์เป็นด้านที่อ้างอิง ดังนั้นจึงเขียนไดอะแกรมของวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ถ้าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็น 1 นั่นคือ $\frac{E_2}{E_1} = 1$ ดังนั้นวงจรสมมูลจึงเขียนได้ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก เมื่อมีอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเป็น 1

จากภาพที่ 2.8 นั้น ความต้านทานทางด้านโรเตอร์ที่มารวมกับด้านสเตเตอร์ จะมีค่าไม่แน่นอนโดยขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของโรเตอร์ หรือก็คือสลิปมันเอง (S) ส่วนใหญ่มอเตอร์แบบกรง

กระรอกจะมีอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองด้านใกล้เคียงกันมาก แทบจะไม่แตกต่างกัน คือหากมอเตอร์มีค่าสลิปน้อย (โรเตอร์หมุนที่ความเร็วใกล้เคียงความเร็วซิงโครนัส) ค่าความต้านทานโรเตอร์ก็จะมีค่ามาก ในทางกลับกันหากมอเตอร์มีค่าสลิปมาก (โรเตอร์หมุนที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสมาก) ค่าความต้านทานโรเตอร์ก็จะมีค่าน้อย

2.1.7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสและประสิทธิภาพขั้นต่ำ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ครอบคลุมเฉพาะ ข้อกำหนดด้านประสิทธิภาพขั้นต่ำของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส [7] แบบกรงกระรอกที่มีกำลังออกที่กำหนดตั้งแต่ 0.73 กิโลวัตต์ ถึง 185 กิโลวัตต์ และมีแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไม่เกิน 1,000 โวลต์ ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า “มอเตอร์” โดยที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ไม่ครอบคลุมถึงประสิทธิภาพขั้นต่ำของมอเตอร์ดังต่อไปนี้

1) มอเตอร์แบบจุ่มในของเหลว (Submersible Motor) โดยเฉพาะที่ออกแบบให้ทำงานขณะมอเตอร์จุ่มอยู่ในของเหลว แต่ไม่รวมถึงมอเตอร์ที่โดยทั่วไปทำงานในตัวกลางโดยรอบที่เป็นอากาศแต่อาจทนต่อน้ำท่วมได้

2) มอเตอร์ที่รวมเข้ากับชุดขับเคลื่อนและไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ตัวอย่างเช่นมอเตอร์ที่สร้างโดยใช้พลาสติกกับคอมเพรสเซอร์สำหรับเครื่องปรับอากาศ

3) มอเตอร์ที่ใช้เฉพาะสำหรับการใช้งานวัฏจักรหน้าที่ระยะสั้น (ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ที่ใช้สำหรับกว้านประตูลม และปั้นจั่น) ที่มีพิกัดหน้าที่ชนิด S2 ตาม มอก.866-2550

4) ประสิทธิภาพ อัตราส่วนของกำลังออกต่อกำลังเข้าซึ่งมีหน่วยเดียวกัน และโดยทั่วไปประสิทธิภาพมีหน่วยเป็นร้อยละ

5) มอเตอร์หลายความเร็วรอบ มอเตอร์ที่สามารถเดินเครื่องที่ความเร็วรอบสองค่าหรือมากกว่าซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน โดยใช้สวิตช์เกียร์เพื่อจัดโครงสร้างการต่อใหม่ของขดลวดมอเตอร์หรือขดลวดมอเตอร์กับแหล่งจ่าย โดยไม่รวมถึงมอเตอร์ที่เดินเครื่องที่ความเร็วรอบต่างกันโดยใช้ตัวควบคุมที่แปรผันแรงดันไฟฟ้าหรือแปรผันความถี่ได้

6) ประสิทธิภาพขั้นต่ำ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 60034-2 ที่โหลดเต็มพิกัดหรือที่ร้อยละ 75 ของโหลดเต็มพิกัด ประสิทธิภาพของมอเตอร์ต้องไม่น้อยกว่าประสิทธิภาพขั้นต่ำที่ระบุไว้ในตาราง 2.1 โดยใช้เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนตามตาราง 2.2

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพขั้นต่ำของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

ค่าด้านออกที่ กำหนด (kW)	ประสิทธิภาพขั้นต่ำ (%)			
	2 ขั้ว	4 ขั้ว	6 ขั้ว	8 ขั้ว
0.73	74.0	74.4	72.4	68.4
0.75	74.0	74.0	72.4	68.4
1.1	76.2	76.2	75.2	71.5
1.5	78.5	78.5	77.3	74.6
2.2	81.0	81.0	79.6	77.6
3	82.6	82.6	81.4	79.7
4	84.2	84.2	83.0	81.5
5.5	85.7	85.7	84.6	83.3
7.5	87.0	87.0	86.0	85.0
11.0	88.4	88.4	87.6	86.8
15.0	89.4	89.4	88.8	88.2
18.5	90.0	90.0	89.6	89.0
22.0	90.5	90.5	90.1	89.7
30.0	91.4	91.4	91.1	90.8
37.0	92.0	92.0	91.7	91.5
45.0	92.5	92.5	92.3	92.0
55.0	93.0	93.0	92.8	92.6
75.0	93.6	93.6	93.5	93.4
90.0	93.9	93.9	93.9	93.7
110.0	94.4	94.4	94.3	94.1

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพขั้นต่ำของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส (ต่อ)

ค่าด้านออกที่ กำหนด (kW)	ประสิทธิภาพขั้นต่ำ (%)			
	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง
132.0	94.8	94.7	94.7	94.4
150.0	95.0	95.0	94.9	94.7
185.0	95.0	95.0	94.9	94.7

หมายเหตุ สำหรับค่าด้านออกที่กำหนดซึ่งอยู่ระหว่างค่าในตาราง ให้หาประสิทธิภาพขั้นต่ำโดยการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น

7) เครื่องหมายและฉลาก ต้องเป็นไปตามที่กำหนดใน มอก.866-2550 โดยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายระบุประสิทธิภาพของมอเตอร์บนแผ่นป้ายพิกัด หรือระบุไว้ในเอกสารทางเทคนิค หรือแสดงไว้ในเอกสารรับรองอื่น และค่าประสิทธิภาพที่แสดงต้องไม่เกินค่าที่ได้จากการทดสอบ

8) เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะต้องเป็นไปตามที่กำหนดในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

รายการ	ปริมาณ	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน
1	ประสิทธิภาพ η - มอเตอร์ที่มีพิกัดไม่เกิน 150 kW - มอเตอร์ที่มีพิกัดมากกว่า 150 kW	- ร้อยละ 15 ของ $(1-\eta)$ - ร้อยละ 10 ของ $(1-\eta)$
2	ความสูญเสียทั้งหมด (ใช้ได้กับมอเตอร์ที่มีพิกัดมากกว่า 150 kW)	ร้อยละ 10 ของความสูญเสียทั้งหมด

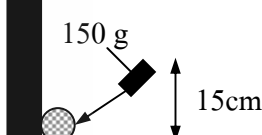

2.1.8 มาตรฐานการระบุลักษณะสภาพโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

มาตรฐานการระบุลักษณะ โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่นิยมใช้กันแพร่หลายจะเป็นดัชนีแสดงภาพโครงสร้าง (Index of Protection) ซึ่งใช้ตัวย่อว่า IP ตามด้วยตัวเลขบอกสภาพโครงสร้างของมอเตอร์ เช่น IP232 ตัวเลข 2 3 และ 2 จะเป็นตัวบอกสภาพของมอเตอร์ โดยระบุกำหนดลักษณะและสภาพตามโครงสร้างตามช่วงดัชนีตัวที่ 1 (1st Figure) ช่วงดัชนีตัวที่ 2 (2nd Figure) และช่วงดัชนีตัวที่ 3 (3rd Figure) ตามลำดับตัวเลข ดังตัวอย่าง IP232 ตัวอย่างนี้บอกสภาพโครงสร้างของมอเตอร์ดังต่อไปนี้ ตัวเลขตัวแรก (2) ตามช่องดัชนีตัวที่ 1 หมายถึงป้องกันไม่ให้วัสดุที่มีเส้นผ่าน

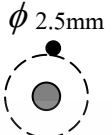
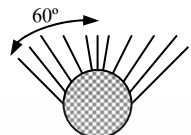
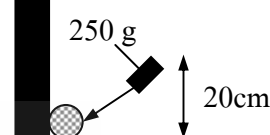
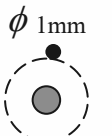
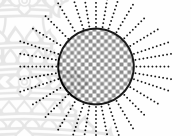
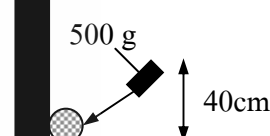
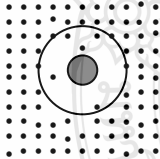
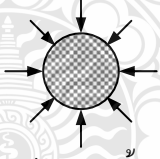
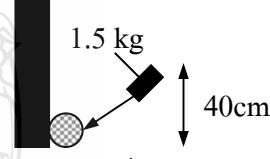
ศูนย์กลางเกินกว่า 12 มิลลิเมตร เข้าไปในตัวมอเตอร์ได้ ตัวเลขตัวที่สอง (3) ตามช่องดัชนีตัวที่ 2 หมายถึงป้องกันต่อของเหลวหรือละอองน้ำที่ตกลงมาใส่มอเตอร์ในมุม 60 องศาจากแนวตั้ง ตัวเลขตัวที่สาม (2) ตามช่องดัชนีตัวที่ 3 หมายถึงสามารถป้องกันแรงกระแทกจากวัสดุได้ 0.5 จูล โดยไม่เกิดการเสียหาย

ดัชนีแสดงภาพโครงสร้างดังตารางที่ 2.3 ได้รับการกำหนดขึ้นโดยการประชุมตกลงกันที่ประเทศฝรั่งเศสของกลุ่มยุโรป ซึ่งยึดถือเป็นมาตรฐานอันเดียวกัน ระบุไว้ในมาตรฐานต่างๆ คือ IEC 529, DIN 40 050 และ NFC 20010 ต่อมาได้ใช้กันแพร่หลายในประเทศนอกกลุ่มด้วย

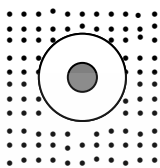
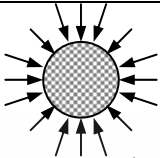
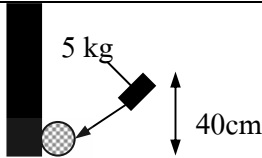
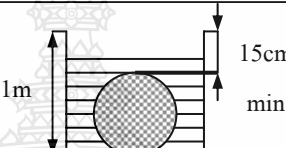
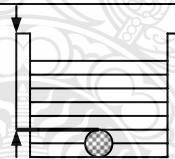
ตารางที่ 2.3 รายละเอียดดัชนีแสดงโครงสร้างของมอเตอร์ [8]

IP	ดัชนีตัวที่หนึ่ง	ดัชนีตัวที่สอง	ดัชนีตัวที่สาม
ดัชนี	รายละเอียด	รายละเอียด	รายละเอียด
0	ไม่มีการป้องกัน	ไม่มีการป้องกัน	ไม่มีการป้องกัน
1	 <p>สามารถป้องกันของแข็งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 mm ที่มากระทบไม่ให้ผ่านเข้าไปข้างในได้</p>	 <p>สามารถป้องกันน้ำตกใส่ลงมาในแนวตั้ง</p>	 <p>สามารถป้องกันแรงตกกระทบของวัตถุที่มีน้ำหนัก 150 g ที่ปล่อยมาจากที่สูง 15 cm</p>
2	 <p>สามารถป้องกันของแข็งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 12 mm ที่มากระทบไม่ให้ผ่านเข้าไปข้างในได้</p>	 <p>สามารถป้องกันน้ำตกใส่ลงมาในแนวตั้งและในแนวที่ทำมุม 15° กับแนวตั้ง</p>	 <p>สามารถป้องกันแรงตกกระทบของวัตถุที่มีน้ำหนัก 250 g ที่ปล่อยมาจากที่สูง 15 cm</p>

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดดัชนีแสดงโครงสร้างของมอเตอร์ (ต่อ)

IP	ดัชนีตัวที่หนึ่ง	ดัชนีตัวที่สอง	ดัชนีตัวที่สาม
ดัชนี	รายละเอียด	รายละเอียด	รายละเอียด
3	 <p>สามารถป้องกันของแข็งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 2.5 mm ที่มากระทบไม่ให้ผ่านเข้าไปข้างในได้</p>	 <p>สามารถป้องกันน้ำฝนสาดใส่ในแนวตั้งจนถึงในแนวทำมุมกับแนวตั้ง 60°</p>	 <p>สามารถป้องกันแรงตกกระทบของวัตถุที่มีน้ำหนัก 250 g ที่ปล่อยมาจากที่สูง 20 cm</p>
4	 <p>สามารถป้องกันของแข็งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 mm ที่มากระทบไม่ให้ผ่านเข้าไปข้างในได้</p>	 <p>สามารถป้องกันน้ำตกใส่หรือสาดใส่ที่มาจากทุกทิศทาง</p>	 <p>สามารถป้องกันแรงตกกระทบของวัตถุที่มีน้ำหนัก 500 g ที่ปล่อยมาจากที่สูง 40 cm</p>
5	 <p>สามารถป้องกันฝุ่นได้</p>	 <p>สามารถป้องกันน้ำที่ถูกฉีดมากระทบได้ในทุกทิศทาง</p>	 <p>สามารถป้องกันแรงตกกระทบของวัตถุที่มีน้ำหนัก 1.5 kg ที่ปล่อยมาจากที่สูง 40 cm</p>

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดดัชนีแสดงโครงสร้างของมอเตอร์ (ต่อ)

IP	ดัชนีตัวที่หนึ่ง	ดัชนีตัวที่สอง	ดัชนีตัวที่สาม
ดัชนี	รายละเอียด	รายละเอียด	รายละเอียด
6	 <p>สามารถป้องกันฝุ่นได้อย่างสมบูรณ์</p>	 <p>สามารถป้องกันน้ำที่ถูกลัดมากกระทบอย่างรุนแรง เทียบได้จากคลื่นของน้ำทะเลหรือป้องกันน้ำท่วมชั่วคราว</p>	 <p>สามารถป้องกันแรงตกกระทบของวัตถุที่มีน้ำหนัก 5 kg ที่ปล่อยมาจากที่สูง 40 cm</p>
7	-	 <p>สามารถป้องกันอันตรายจากการเกิดน้ำท่วมตัวมอเตอร์ในระดับน้ำตื้นๆ</p>	-
8	-	 <p>สามารถป้องกันอันตรายจากการเกิดน้ำท่วม ที่มีความลึกหรือในน้ำท่วมที่มีความกดดันสูง</p>	-

2.1.9 การระบายอากาศของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

NEMA กำหนดลักษณะโครงสร้างสำหรับการระบายความร้อนด้วยอากาศไว้ดังนี้

- 1) มอเตอร์ที่ติดตั้งระบายอากาศระบายความร้อนด้วยตัวของมันเอง (Self – Ventilated Machine)
- 2) มอเตอร์ที่มีโครงสร้างปิดมิดชิดไม่มีการถ่ายเทของอากาศระหว่างภายนอกและภายในมอเตอร์ (Totally Enclosure Machine)

3) มอเตอร์ที่มีโครงสร้างปิดมิดชิดและประกอบด้วยใบพัดลมระบายอากาศติดอยู่ภายนอกตัวเครื่องให้พัดลมต่อกับเพลลาของตัวมอเตอร์ (Totally Enclosure Fan-Cooled Machine)

4) มอเตอร์ที่ติดตั้งพัดลมระบายความร้อนให้แก่ตัวเครื่องของมอเตอร์ โดยพัดลมแยกอิสระกับมอเตอร์ (Separately Ventilated Machine)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวดมอเตอร์ (Temperature Rise) จะขึ้นอยู่กับจำนวนกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากขดลวดทองแดงและแกนเหล็ก ปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการระบายความร้อน และพื้นที่ที่ใช้ในการระบายความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.19

$$Q = \frac{K \times P_{loss}}{T} \quad (2.19)$$

เมื่อ	Q	คือปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการระบายความร้อน (f^3)
	K	ค่าคงที่โดยมีค่าเท่ากับ 1.8 สำหรับอุณหภูมิของบรรยากาศรอบตัวมอเตอร์ 25 °C
หรือ	K	ค่าคงที่โดยมีค่าเท่ากับ 1.9 สำหรับอุณหภูมิของบรรยากาศรอบตัวมอเตอร์ 50 °C
	P_{loss}	กำลังสูญเสียของมอเตอร์ (W)
	T	ค่าของอุณหภูมิที่แตกต่าง (°C)

2.1.10 มาตรฐานการใช้งานมอเตอร์ [9]

โดยทั่วไปการเลือกขนาดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จะเลือกจากการทำงานที่โหลดต่อเนื่องที่ค่าเอาต์พุตที่พิกัด ซึ่งบางงานมอเตอร์อาจทำงานเป็นช่วงๆ มากกว่าทำงานแบบต่อเนื่อง ทำให้ค่าเอาต์พุตพิกัดของมอเตอร์จะแตกต่างออกไป จึงเป็นเหตุผลที่มีมาตรฐานหน้าที่การทำงาน (Motor Duty) มารองรับ และมีความสำคัญในการวางแผนการใช้งานเพื่อความถูกต้องและเหมาะสม โดยแบ่งลักษณะการทำงานไว้ทั้งหมด 9 ชนิด ซึ่งจะกำหนดเป็นตัวอักษรย่อ เช่น S1 S2 S3 เป็นต้น

ชนิด S1 การทำงานอย่างต่อเนื่อง

ชนิด S2 การทำงานช่วงสั้น

ชนิด S3 การทำงานเป็นคาบไม่คิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการสตาร์ท

ชนิด S4 การทำงานเป็นคาบที่คิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการสตาร์ท

ชนิด S5 การทำงานเป็นคาบที่คิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการสตาร์ท และเบรกทางไฟฟ้า

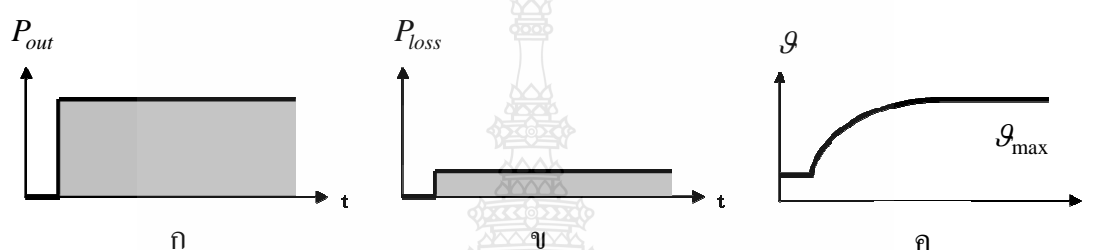
ชนิด S6 การทำงานต่อเนื่องเป็นคาบเวลา

ชนิด S7 การทำงานต่อเนื่องเป็นคาบที่คิดการการสแตร์ท และเบรกทางไฟฟ้า

ชนิด S8 การทำงานต่อเนื่องเป็นคาบที่คิดความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงโหลดต่อความเร็ว

ชนิด S9 การทำงานต่อเนื่องโหลดไม่เป็นคาบ และความเร็วไม่เปลี่ยนแปลง

ในที่นี้จะกล่าวถึงชนิด S1 เพียงเท่านั้น เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่สามารถพบเห็นได้มาก และได้ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยชนิด S1 เป็นการทำงานที่โหลดคงที่ ซึ่งขณะทำงานการเพิ่มขึ้นของความร้อนจะถึงจุดสมดุลย์ (Thermal Equilibrium) ตลอดเวลาดังภาพที่ 2.9



(ก) กำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์

(ข) กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์

(ค) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และถึงจุดสมดุลย์

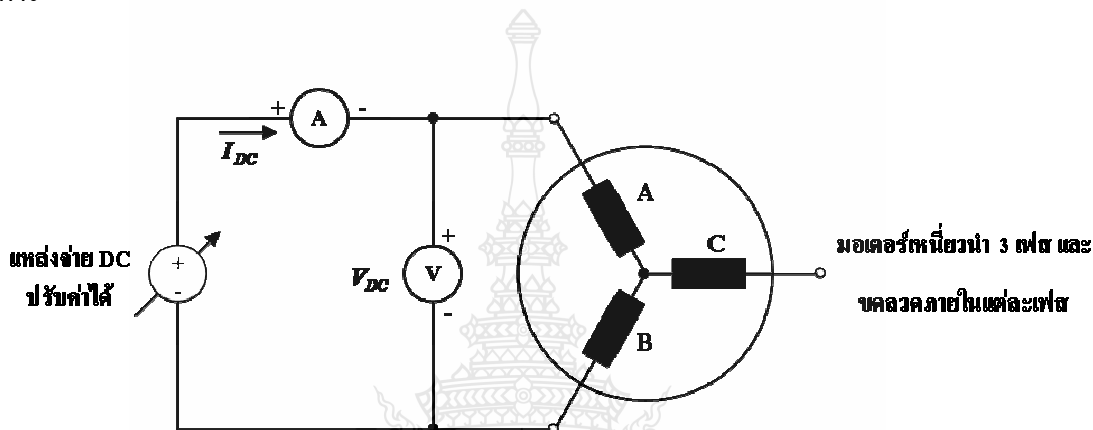
ภาพที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานเอาต์พุต กำลังงานสูญเสีย และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

2.2 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส [4, 6]

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์โดยประมาณในวงจรสมมูล เช่น R_1 , R_2 , X_m , R_m และ X อันเป็นผลให้นำค่าต่างๆ เหล่านี้ไปวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาค่าทอร์ก กำลังกล กำลังไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กระแส แรงดัน และประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส จึงมีความสำคัญและควรเข้าใจถึงหลักการทดสอบที่สำคัญ 3 ประการ คือ การทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์ การทดสอบขณะไม่มีโหลด และการทดสอบด้วยการยึดโรเตอร์อยู่กับที่

2.2.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (Stator Resistance Test) ทำได้โดยใช้วิธีโวลต์แอมป์ โดยต่อวงจรดังภาพที่ 2.10 การทดสอบนี้ทำโดยนำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ไปต่อกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่สามารถปรับระดับแรงดันไฟฟ้าได้ และทดสอบเฉพาะปลายคู่ใดคู่หนึ่ง ของขดลวดสเตเตอร์เท่านั้น จากภาพที่ 2.10 เป็นการต่อขดลวดของสเตเตอร์แบบสตาร์



ภาพที่ 2.10 วงจรทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส

จากภาพที่ 2.10 จะพบว่าค่า I_{DC} และ V_{DC} นำมาหาค่าความต้านทานต่อเฟส (R_1) ของขดลวดสเตเตอร์ได้ดังนี้

$$R_{AB} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad (2.20)$$

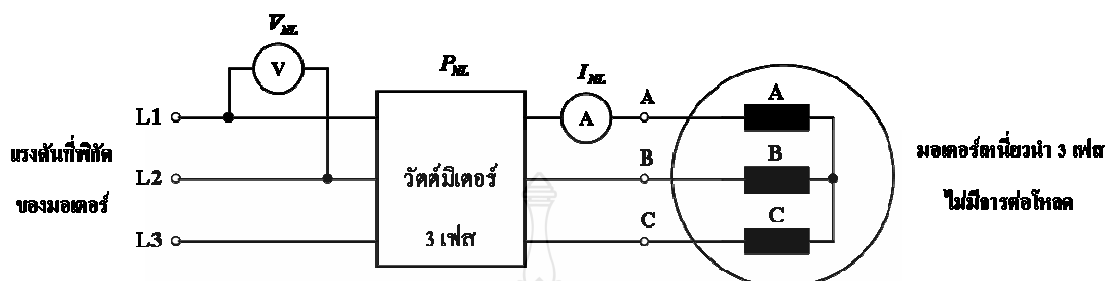
และ

$$R_1 = \frac{R_{AB}}{2} = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \quad (2.21)$$

2.2.2 การทดสอบในสถานะไม่มีโหลด

การทดสอบในสถานะไม่มีโหลด (No-Load Test) มีความประสงค์เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของสเตเตอร์ (P_{js}) กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความฝืดและแรงต้านลม (P_{fw}) และกำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก (P_{core}) รวมทั้งยังสามารถนำค่ามาคำนวณหาค่าของ R_m และ X_m ได้อีกด้วย การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสถานะไม่มีโหลด คือการควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้า

เหนี่ยวนำทำงานที่ความเร็วที่พิกัด ตามขนาดของแรงดันตามพิกัดโดยไม่มีโหลดต่ออยู่ที่เพลของมอเตอร์ และใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าวัดแรงดันระหว่างสายและวัดกระแสในสายดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 วงจรการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะไม่มีโหลด

จากวงจรการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะไม่มีโหลด จะได้ค่าของปริมาณไฟฟ้าดังนี้

P_{NL} คือกำลังไฟฟ้าอินพุตขณะไม่มีโหลด (W)

I_{NL} คือกระแสอินพุตขณะไม่มีโหลด (A)

V_{NL} คือแรงดันอินพุตขณะไม่มีโหลด (V)

จากปริมาณของ P_{NL} , I_{NL} และ V_{NL} นำไปคำนวณหาค่าต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

$$S_{NL} = V_{NL} I_{NL} \sqrt{3} \quad (2.22)$$

S_{NL} คือกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏขณะไม่มีโหลด (VA)

$$Q_{NL} = \sqrt{S_{NL}^2 - P_{NL}^2} \quad (2.23)$$

Q_{NL} คือกำลังไฟฟ้าต้านกลับขณะไม่มีโหลด (VAR)

$$P_{js} = 3I_{NL}^2 R_1 \quad (2.24)$$

P_{js} คือกำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส (W)

$$P_{core} + P_{fw} = P_{NL} - P_{js} \quad (2.25)$$

P_{core} คือกำลังสูญเสียที่แกนเหล็กของสเตเตอร์ (W)

P_{fw} คือกำลังสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลม (W)

$$R_m = \frac{3V_{NL}^2}{P_{core} + P_{fw}} \quad (2.26)$$

R_m คือแมกเนไตซิ่งรีซิสแตนซ์ (Ω)

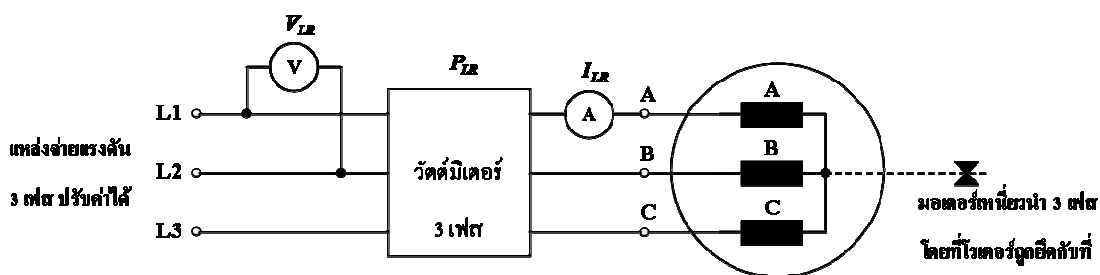
$$X_m = \frac{3V_{NL}^2}{Q_{NL}} \quad (2.27)$$

X_m คือแมกเนไตซิ่งรีแอคแตนซ์ (Ω)

2.2.3 การทดสอบโดยการยึดโรเตอร์

การทดสอบโดยยึดโรเตอร์ (Locked-Rotor Test) มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าของรีแอคแตนซ์รวมในวงจรสมมูล ($X = X_1 + X_2$) และค่าความต้านทานรวมในวงจรสมมูล ($R_1 + R_2$) เนื่องจากเมื่อโรเตอร์ถูกยึดอยู่กับที่ และมอเตอร์ได้รับแรงดันอินพุตตามพิกัด กระแสที่ไหลเข้าขดลวดสเตเตอร์ (I_p) จะสูงมากประมาณ 5 - 6 เท่าของกระแสเต็มพิกัด ในสภาวะที่โรเตอร์ถูกยึดอยู่กับที่ ค่าสลิปจะเท่ากับ 1 เป็นผลให้ $\frac{R_2'}{S} = R_2$

เมื่อ R_2' เท่ากับความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ที่โอนย้ายไปยังสเตเตอร์ ในสภาวะนี้ค่าของกระแส $I_p \gg I_o$ (I_o คือกระแสในวงจรแมกเนไตซิ่ง) ดังนั้นส่วนของ X_m และ R_m ในวงจรแมกเนไตซิ่งอาจจะทิ้งได้ในการคำนวณ ขั้นตอนการทดสอบโดยยึดโรเตอร์ทำได้ดังนี้



ภาพที่ 2.12 วงจรการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยวิธีชัตโรเตอร์

- 1) ต่อดังภาพที่ 2.12 และชัตเพลลาของโรเตอร์ให้อยู่กับที่ ค่อยๆ ปรับแรงดันอินพุตทั้ง 3 เฟส เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งกระแสเดเตอร์ I_p เท่ากับกระแสฟัด
- 2) อ่านค่าแรงดัน (V_{LR}) (ระหว่างสาย) กระแส (I_{LR}) และกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ในสถานะที่โรเตอร์ถูกชัตอยู่กับที่ (P_{LR})
- 3) นำค่าที่ได้มาคำนวณค่าต่างๆ ต่อไปนี้

$$S_{LR} = V_{LR} I_{LR} \sqrt{3} \tag{2.28}$$

S_{LR} คือกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏขณะชัตโรเตอร์ (VA)

$$Q_{LR} = \sqrt{S_{LR}^2 - P_{LR}^2} \tag{2.29}$$

Q_{LR} คือกำลังไฟฟ้าต้านกลับขณะชัตโรเตอร์ (VAR)

$$X = \frac{Q_{LR}}{3I_{LR}^2} \tag{2.30}$$

X คือรีแอกแตนซ์รวมในวงจรสมมูล (Ω)

$$P_{LR} = 3I_{LR}^2 (R_1 + R_2) \tag{2.31}$$

P_{LR} คือกำลังไฟฟ้าขณะชัตโรเตอร์ (W)

$$R_2' = \left(\frac{P_{LR}}{3I_{LR}^2} \right) - R_1 \quad (2.32)$$

R_2' คือความต้านทานโรเตอร์ที่โอนย้ายมาทางสเตเตอร์ (Ω)

2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์และภาษาซี [10]

2.3.1 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์

dsPIC คือชื่อของไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิตจาก Microchip Technology Inc. ผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ซึ่งรู้จักกันเป็นอย่างดีในแวดวงนักพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ โดย Microchip Technology ได้กำหนดชื่ออย่างเป็นทางการสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ใหม่นี้ว่า Digital Signal หรือ DSP นั้นหมายความว่า dsPIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่องานประมวลผลสัญญาณดิจิทัล สำหรับสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถสูง

2.3.2 คุณสมบัติซีพียูของ dsPIC

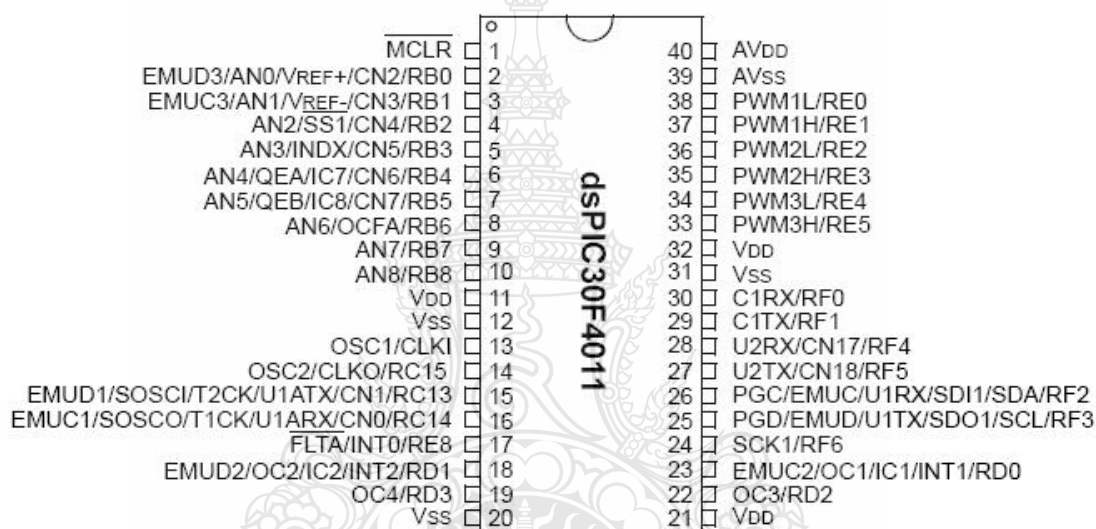
- 1) เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ซีพียูแบบ
- 2) ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- 3) มี 84 คำสั่งภาษาแอสเซมบลีมาตรฐาน รองรับรูปแบบการอ้างแอดเดรสได้อย่างอิสระ
- 4) ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- 5) ในตัวของไมโครคอนโทรลเลอร์มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ซึ่งสามารถลบและเขียนใหม่ได้มากกว่า 100,000 ครั้ง สามารถป้องกันการอ่านได้
- 6) มีหน่วยความจำข้อมูลอีพรอม สามารถลบและเขียนใหม่ได้มากกว่า 1,000,000 ครั้ง
- 7) มีอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์จำนวนมากรองรับการตอบสนองสัญญาณอินเตอร์รัปต์ได้ดี
- 8) มีวงจรตรวจจับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- 9) มีเพาเวอร์ – ออนรีเซต เพาเวอร์ – อับไทเมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ท – อับไทเมอร์

2.3.3 คุณสมบัติซีพียูด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

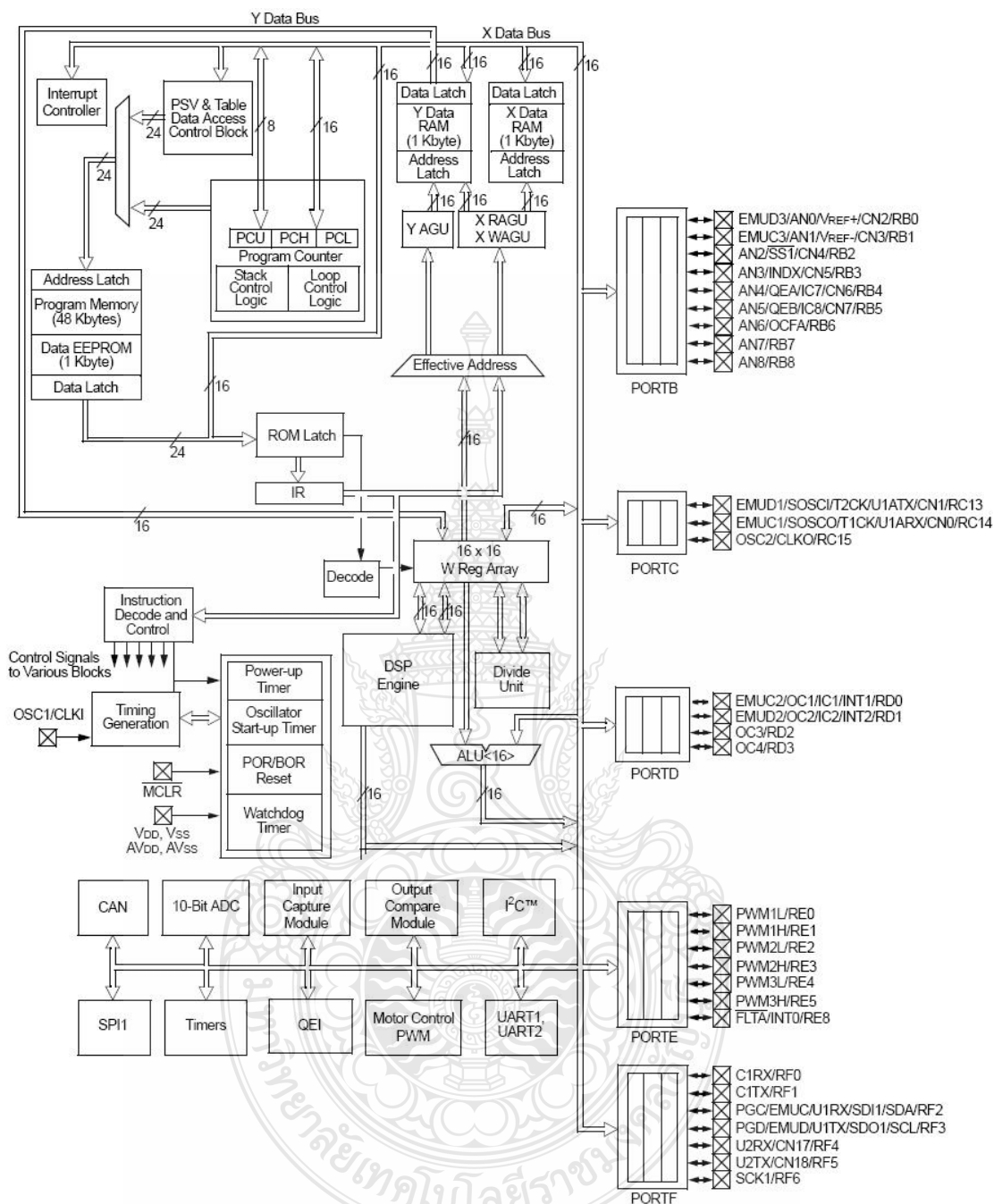
- 1) มีแอกคิวมูเลเตอร์ขนาด 40 บิต 2 ตัว รองรับการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ได้
- 2) มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและหารเลข 17 บิต ในรูปของฮาร์ดแวร์จึงทำให้สามารถคูณและหารเลขได้อย่างรวดเร็ว

- 3) ทำการคูณเลข 16 บิตได้ภายในสัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ไชเกิล
- 4) มีตัวเลื่อนข้อมูลบิตเรด 40 บิตเรด เป็นตัวที่ช่วยการประมวลผลข้อมูลที่มีจำนวนบิตมากๆ ให้สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว
- 5) มีวงจรเฟลตข้อมูลคู่ จึงทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว

สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตระกูล dsPIC ที่นำมาใช้ในการเรียนรู้และทำการวิจัย คือ เบอร์ dsPIC30F4011 ซึ่งมีขาต่อใช้งาน 40 ขา ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างภายนอกของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011



ภาพที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรม dsPIC30F4011

2.3.4 การโปรแกรมภาษาซีในการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย MPLAB C30

ในการพัฒนาโปรแกรมภาษาซี สำหรับการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ด้วย MPLAB C30 คอมไพเลอร์ [11] มีรูปแบบและลักษณะไวยากรณ์ในการทำงานเดียวกันกับมาตรฐาน ANSI ซึ่งประกอบด้วย การประกาศตัวแปร ชุดคำสั่งการควบคุม โอเพอเรเตอร์ต่างๆ รูปแบบการ

ใช้งานฟังก์ชัน เป็นต้น โดยการทำงานจะเริ่มต้นขึ้นที่ main () หรือเรียกว่าโปรแกรมหลัก ดังตัวอย่างต่อไปนี้

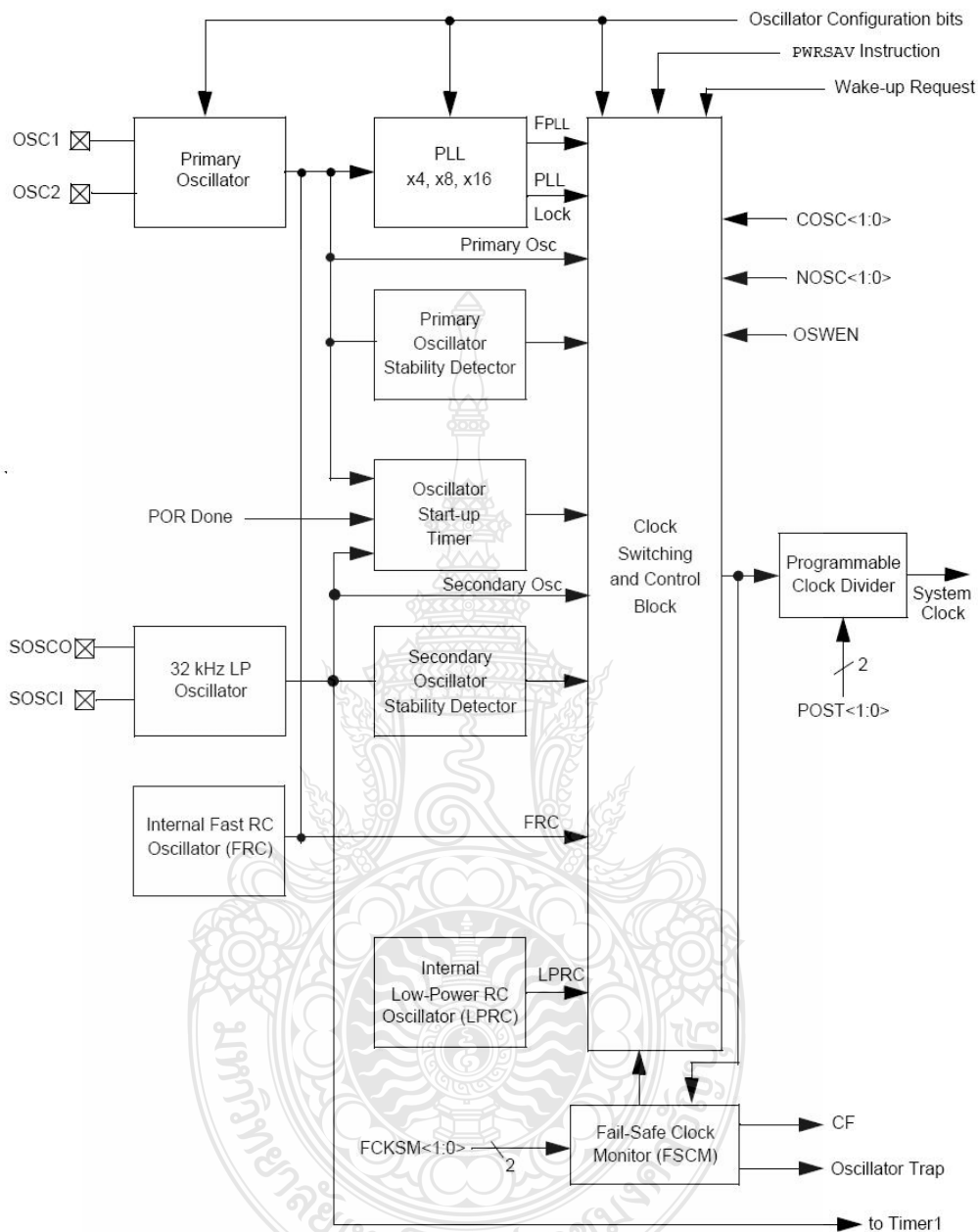
```
main ()
{
    // Statement of main are enclosed in braces

    int x,y , result ;    // Defines 3 variable of type int
    x = 0x25 ;           // Assign 0x25 to variable x */
    y = 0x0F ;           /* Assign 0x0F to variable y */
    result = x & y ;     /* And x with y and assigns it to result*/
    return 0 ;          // Return of main function
}
```

2.3.5 ภาระงานการทำงานของ MPLAB C30 คอมไพเลอร์

MPLAB C30 คอมไพเลอร์ เป็นตัวแปลภาษาซี หรือ ซี คอมไพเลอร์ที่พัฒนาต่อจาก GCC คอมไพเลอร์ โดยมีภาระงานที่เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ANSI x3.159-1989 โดยผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปโปรแกรมลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC มีภาระงานทำงานดังภาพที่ 2.15





ภาพที่ 2.15 ไดอะแกรมการทำงานของ MPLAB C30 คอมไพเลอร์

จากไฟล์ .cof สามารถนำไปใช้งานได้ 2 ทาง คือ

- 1) ส่งต่อไปยัง MPLAB IDE เพื่อทำการทดสอบ และดีบั๊ก
- 2) นำไปแปลงเป็นไฟล์.hex ในรูปแบบของ Intel HEX เพื่อดาวน์โหลดไปยังหน่วยความจำโปรแกรมภายใน dsPIC หรือส่งไปยังโปรแกรมจำลองการทำงาน (คอมมานไลน์ ซิมูเลเตอร์)

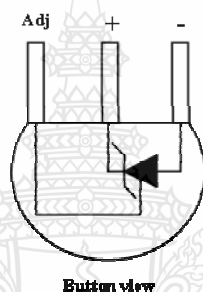
2.3.6 ชนิดข้อมูลที่ MPLAB C30 สนับสนุน

<u>ชนิดข้อมูล</u>	<u>คำอธิบาย</u>
char, signed char	ชนิดข้อมูลจำนวนเต็ม 8 บิต มีค่า -128 ถึง 127
unsigned char	ชนิดข้อมูลจำนวนเต็ม 8 บิต มีค่า 0-255
short, signed short	ชนิดข้อมูลจำนวนเต็ม 16 บิต มีค่า -32,768 ถึง 32,767
unsigned short	ชนิดข้อมูลจำนวนเต็ม 16 บิต มีค่า 0- 65,535
int, signed int	ชนิดข้อมูลจำนวนเต็ม 16 บิต มีค่า -32,768 ถึง 32,768
unsigned int	ชนิดข้อมูลจำนวนเต็ม 16 บิต มีค่า 0- 65,535
long, signed long	ชนิดข้อมูลจำนวนเต็ม 32 บิต มีค่า -2^{31} ถึง $2^{31} - 1$
unsigned long	ชนิดข้อมูลจำนวนเต็ม 32 บิต มีค่า 0 ถึง $2^{31} - 1$
long long, signed long long	ชนิดข้อมูลจำนวนเต็ม 64 บิต มีค่า -2^{63} ถึง $2^{63} - 1$
unsigned long long	ชนิดข้อมูลจำนวนเต็ม 64 บิต มีค่า 0 ถึง $2^{63} - 1$
float	ชนิดข้อมูลทศนิยม 32 บิต มีค่า 1.175×10^{-38} ถึง 3.403×10^{38}
Double	ชนิดข้อมูลทศนิยม 32 บิต มีค่า 1.175×10^{-38} ถึง 3.403×10^{38}
Long double	ชนิดข้อมูลทศนิยม 64 บิต มีค่า 2.225×10^{308} ถึง 1.798×10^{308}
Pointer	ชนิดตัวแปรชี้ตำแหน่งข้อมูล
Array	ชนิดตัวแปรอะเรย์
Structure	ชนิดตัวแปรโครงสร้าง

2.4 การวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลด้วยไอซี และการวัดความเร็วลม

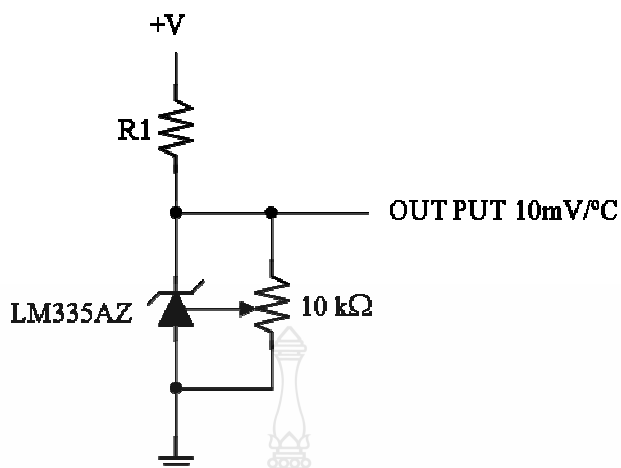
2.4.1 การวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลด้วยไอซี [12]

การวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลด้วยไอซีนั้น มีไอซีที่สามารถวัดอุณหภูมิอยู่มากมายหลายขนาดหลายรูปแบบ ในที่นี้เลือกใช้ไอซีเบอร์ LM335AZ ผู้ผลิตไอซีตัวนี้คือ National Semiconductor เป็นไอซีที่ใช้วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล สามารถวัดอุณหภูมิได้เป็นเชิงเส้นและแม่นยำในช่วง $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุปกรณ์สามารถวัดได้สูงสุดที่ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยให้แรงดันไฟฟ้าออกมาที่ขาบวกเท่ากับ $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ขนาดเล็กมีราคาถูก ความผิดพลาดเฉลี่ยที่ $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขนาดเล็กและราคาถูก ซึ่งสามารถปรับให้มีความแม่นยำมากขึ้นได้จากขา Adj ลักษณะของ LM335AZ เป็นดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 ลักษณะของเซนเซอร์อุณหภูมิแบบเชิงเส้น เบอร์ LM335AZ ตัวถังแบบ TO-92

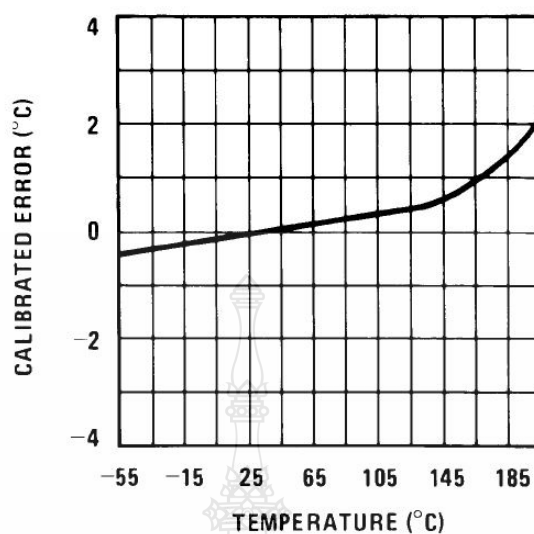
จากภาพที่ 2.16 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ เบอร์ LM335 จะมีขา Adj เพื่อปรับค่าความแม่นยำ ขาบวกจะเป็นขาที่รับไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาเลี้ยงวงจร โดยจำเป็นต้องมีความต้านทาน R1 มาจำกัดกระแสการใช้งาน อีกทั้งยังสามารถจ่ายแรงดันออกไปได้ ขาลบจะต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ส่วนการต่อใช้งาน และการปรับตั้งความแม่นยำจะเป็นดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 การต่อใช้งาน และการปรับตั้งความแม่นยำ

จากภาพที่ 2.17 ความต้านทาน R1 มีหน้าที่จำกัดกระแสการทำงานของ LM335AZ ให้มีค่าไม่เกิน 1 mA ขาบวก หรือขาเอาพุต จะใช้หลักการของวงจรแบ่งแรงดันซึ่ง LM335AZ จะเปลี่ยนแปลงความต้านทานภายในตัว เมื่อมีอุณหภูมิสูงก็จะมีค่าความต้านทานสูง แรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากขาเอาต์พุตก็จะมีค่าสูง ในทางกลับกัน เมื่อมีอุณหภูมิต่ำก็จะมีค่าความต้านทานต่ำ แรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากขาเอาต์พุตก็จะมีค่าต่ำเช่นเดียวกัน ในการปรับตั้งความแม่นยำ จะปรับความต้านทานที่ 10 kΩ เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ขาเอาต์พุตมีความเที่ยงตรง LM335AZ จะให้แรงดันไฟฟ้าออกมาเท่ากับ 0 V ที่อุณหภูมิ 0 °K ทุกๆ 1 °K จะให้แรงดันไฟฟ้าออกมาที่ 10 mV/ °K เพราะฉะนั้น ที่ 0 °C ก็จะมีแรงดันไฟฟ้าที่ขาเอาต์พุตเท่ากับ 2.73 V (0 °K เท่ากับ -273 °C) ดังนั้นที่ 0 °C = 10 mV x 273 °C จึงเท่ากับ 2.73 V

Calibrated Error



ภาพที่ 2.18 ความผิดพลาดในการปรับตั้งความแม่นยำของ LM335AZ

จากภาพที่ 2.18 เมื่อทำการปรับตั้งความแม่นยำของ LM335 แล้วจะเห็นว่า ค่าความผิดพลาดจะมีความเป็นเชิงเส้น (Linear) ที่ อุณหภูมิ -40°C ถึง $+100^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีความผิดพลาดอยู่ที่ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ แต่หากมีอุณหภูมิมากกว่า 100°C จะเห็นว่า ความผิดพลาดจะมีค่าขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งย่านการใช้งานที่เหมาะสมที่สุดควรอยู่ในช่วงอุณหภูมิ -40°C ถึง $+100^{\circ}\text{C}$

2.4.2 การวัดความเร็วลม [13]

การวัดความเร็วลมนั้นสามารถวัดได้จากเครื่องวัดความเร็วลมชนิดต่างๆ ดังนี้

1) เครื่องวัดความเร็วลมแบบการหมุน

1.1 เครื่องวัดความเร็วลมแบบถ้วย (Cup Anemometer) มีลักษณะเป็นถ้วยกลมครึ่งซีก 3 - 4 ใบ ติดอยู่ที่ปลายก้านซึ่งต่อกับแกนกลาง เมื่อลมพัดจะทำให้ลูกถ้วยหมุนไปรอบๆ แกนกลาง จำนวนรอบที่หมุนแสดงความเร็วของลม เครื่องวัดความเร็วลมชนิดนี้สามารถวัดลมได้จากทุกทิศทาง แสดงดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 เครื่องวัดความเร็วลมแบบถ้วย

2.2 เครื่องวัดลมแบบพรอเพลเลอร์ (Propeller) มีลักษณะคล้ายกังหันลมแนวนอน โดยจะมีใบพัดเพื่อวัดความเร็วลม ภายในจะมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็วของใบพัดเพื่อนำความถี่มาเปลี่ยนเป็นค่าความเร็วลม เครื่องวัดความเร็วลมชนิดนี้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถหาซื้อได้ง่าย มีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง อีกทั้งยังสามารถแสดงค่าได้หลายรูปแบบ ซึ่งตัวใบพัดมีทั้งชนิดที่ติดอยู่กับเครื่องวัด และชนิดที่เป็น โพรป ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 เครื่องวัดความเร็วลมแบบพรอเพลเลอร์ ชนิดที่เป็น โพรป

2) เครื่องวัดความเร็วลมแบบหลอดความกดดัน

โดยอาศัยแรงของลมพัดเข้าไปในหลอด เพื่อให้แรงของลม กดลงไปบนพื้นผิวโลหะที่มีแขนต่อไปยังหน้าปัดที่บอกสเกลความเร็ว การทำงานเหมือนกับแอนนิรอยด์ซึ่งวัดความดันอากาศ เครื่องวัดความเร็วลมแบบนี้ได้พัฒนาไปจนสามารถบอกความเร็วของลมได้ตลอดเวลา มีกระดาษกราฟเป็นม้วนหมุนได้อย่างช้าๆ ซึ่งขับเคลื่อนด้วยระบบโซลารานแบบนาฬิกา จึงเป็นเครื่องวัดความเร็วลมแบบอัตโนมัติ เรียกว่า อะนิโมกราฟ (Anemograph) ดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 เครื่องวัดความเร็วลมแบบหลอดความกดดัน

ในการวัดความเร็วลมนั้น ต้องทราบทิศทางที่ลมพัดด้วย ซึ่งใช้อุปกรณ์ง่ายๆ ในการวัดทิศทางของลม เรียกว่า ศรลม (Wind Vane) ลักษณะจะเป็นลูกศรที่มีหางเป็นแผ่นใหญ่กว่าลูกศรมาก เมื่อลมพัดมาทางลูกศรจะถูกผลักแรงกว่าหัวลูกศร หัวลูกศรจึงชี้ไปทางที่ลมพัด ดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 ศรลมสำหรับวัดทิศทางลม

3) เครื่องวัดความเร็วลมแบบแอรโรเวน

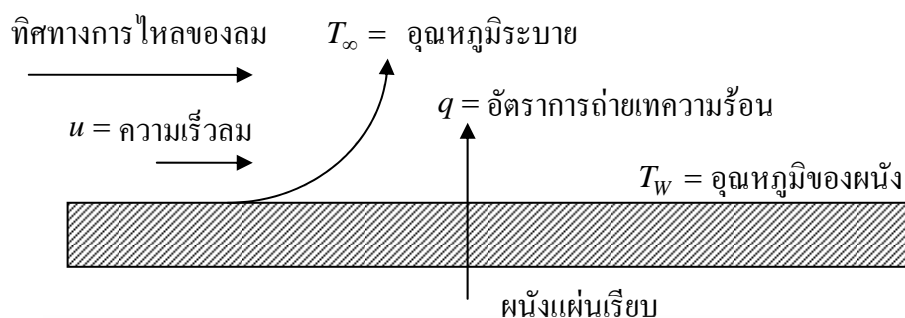
แอรโรเวนเป็นเครื่องมือที่วัดได้ทั้งทิศทางและความเร็วลมส่วนในการวัดทิศทางและความเร็วของลมนั้น แอรโรเวน (Aero Vane) คือ เครื่องที่วัดทั้งทิศทางและความเร็วของลมมีรูปร่างคล้ายเครื่องบินไม่มีปีกปลาย ด้านใบพัดจะชี้ไปทางลมพัดแสดงทิศทางลม และการหมุนของใบพัดแสดงความเร็วของลมโดยอ่านจากหน้าปัดของเครื่องวัดโดยตรง เครื่องมือที่ใช้ทั้งตรวจทิศทางลมและวัดความเร็วลมมีลักษณะรูปร่างคล้ายเครื่องบิน ไม่มีปีกปลายด้านใบพัดจะชี้ไปในทิศทางที่ลมพัดมา และการหมุนของใบพัดจะแสดงความเร็วของลม ดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 เครื่องวัดความเร็วลมแบบแอรโรเวน

2.5 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา [14]

แผ่นโลหะร้อนจะเย็นตัวลงได้อย่างรวดเร็วเมื่อเมื่อนำไปวางให้พัดลมเป่ามากกว่านำไปวางไว้ในอากาศนิ่งๆ วิธีการนี้เรียกว่าการพา หรือเรียกว่า กระบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา สำหรับการพาได้มาจากการตั้งเอาพฤติกรรมที่สังเกตได้ในกระบวนการถ่ายเทความร้อน ตัวอย่างเช่น ความเร็วที่อากาศเป่าบนแผ่นเรียบที่ร้อนทำให้มีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน และมีผลกระทบทำให้เกิดการระบายความร้อนโดยตรง สำหรับกลไกทางกายภาพของการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาออกจากผนังแผ่นเรียบ

จากภาพที่ 2.24 ผนังแผ่นเรียบที่มีความร้อน (T_w) จะถูกลมเย็นเป่าด้วยความเร็ว (u) และจะมีอุณหภูมิจากการระบายออก (T_∞) กระบวนการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อนเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของพลังงานจากแหล่งอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่โมเลกุลตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปด้วย ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของลมที่ผ่านหน้าขดลวดความร้อน ลมดังกล่าวก็จะมีอุณหภูมิสูงตามไปด้วย นอกจากนี้การถ่ายโอนความร้อนแบบพายังมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิตอาหารหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นโดยตรง หรือ ในด้านการใช้ลมหรือน้ำเป็นสารตัวกลางในกระบวนการ การพาความร้อนสามารถจำแนกได้ออกเป็น 2 แบบดังนี้

2.5.1 การพาความร้อนแบบบังคับ

เกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่พร้อมๆกับทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อน มักจะอาศัยอุปกรณ์ช่วย ตัวอย่างเช่น บั๊มพ์ พัดลม การพาความร้อนแบบบังคับนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบธรรมชาติ

2.5.2 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

กลไกการเกิดการถ่ายโอนความร้อนมักเกิดเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นในระบบ ตัวอย่างเช่น การถ่ายโอนความร้อนของอาหารภายในกระป๋องที่ผ่านการทำเย็นหลังจากการฆ่าเชื้อ ภายในกระป๋องจะมีการเคลื่อนที่ความร้อนเนื่องจากความหนาแน่น การถ่ายโอนในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นค่อนข้างช้า

การถ่ายโอนความร้อนแบบพาในลักษณะใดๆ จะมีสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนเรียกว่า กฎการเย็นตัวของนิวตัน "Newton's Cooling Law" ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนเนื่องจากการระบายความร้อน ได้ดังสมการที่ 2.33

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (2.33)$$

เมื่อ

q คือปริมาณความร้อนจากการระบายความร้อน (W)

h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)

A คือพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

T_w คืออุณหภูมิด้านร้อน ($^\circ\text{C}$)

T_∞ คืออุณหภูมิด้านเย็น ($^\circ\text{C}$)

อัตราการถ่ายเทความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างรวมทั้งหมด ระหว่างผนังกับของไหล และพื้นที่ผิว (A) ปริมาณของ h อาจนำไปใช้ในบางระบบ สำหรับในสถานะที่ซับซ้อนต้องหาค่าด้วยวิธีการทดลอง โดยภาพรวมสิ่งหนึ่งอาจจะกำหนดค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาว่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนของของไหล เช่น ค่าสภาพการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ หรือความหนาแน่น ฯลฯ ซึ่ง รัชต มั่งมีชัย ได้มีการนำเสนอสมการที่ 2.33 มาประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์ [15] ซึ่งสมการที่ใช้คือสมการที่ 2.34

$$P_{loss} = \rho A v c (T_h - T_\alpha) \quad (2.34)$$

เมื่อ

P_{loss} คือกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ (W)

ρ คือความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A คือพื้นที่หน้าตัดของลมเข้า (m^2)

v คืออัตราความเร็วเฉลี่ยของใบพัดลมระบายความร้อน (m/s)

c คือความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ ($\text{J}/\text{kg } ^\circ\text{C}$)

T_h คืออุณหภูมิลมร้อน ($^\circ\text{C}$)

T_α คืออุณหภูมิแวดล้อม ($^\circ\text{C}$)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ได้ใช้วิธีวงจรมูลของมอเตอร์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรมูลหาได้จากการทดสอบ ทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ หาความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (V-I Method Test) การทดสอบมอเตอร์สถานะไม่มีภาระทางกล (No-Load Test) การทดสอบยึดโรเตอร์ (Block-Rotor Test) ซึ่งสมอ. จะใช้วิธีนี้เป็นการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย และประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ที่วัดได้จากการทดสอบ โดยต้องทำการทดสอบทั้ง 3 ข้อ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะถูกแทนลงในวงจรมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย และประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า [16]

รัชต มั่งมีชัย ได้นำเสนอเทคนิคการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อนของมอเตอร์ ขณะที่มอเตอร์กำลังขับภาระทางกลซึ่งไม่จำเป็นต้องหยุดการทำงานของมอเตอร์จากระบบ หลักการคำนวณจะใช้ทฤษฎี การถ่ายเทความร้อนเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์ที่เปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน และระบายความร้อนสู่อุณหภูมิแวดล้อม บทความนี้ได้ทำการทดสอบมอเตอร์ขนาด 3 และ 5 HP ในสถานะแหล่งจ่าย สมดุลและไม่สมดุลรวมถึงการเปลี่ยนแปลงภาระทางกลคงที่ด้วย ผลลัพธ์ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบตามมาตรฐานพบว่ามีความผิดพลาดต่ำกว่าร้อยละ 5 [15]

เปรมศักดิ์ ปรีชา ได้นำเสนอเทคนิคการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่างๆ โดยใช้ผลของการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อนแทนค่าลงในสมการถ่ายเทความร้อน ซึ่งข้อดีของเทคนิคที่นำเสนอนี้สามารถวัดได้ขณะที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ากำลังทำงานอยู่กับระบบ โดยไม่ต้องหยุดการทำงาน ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกอีกวิธีหนึ่งที่สะดวกรวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการพิสูจน์สมการที่ใช้ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียกับเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 ชนิด คือ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2.24 kW เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ 3 เฟสขนาด 1 kW และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 kW ผลการทดสอบที่นำมาอ้างอิงกับการคำนวณ มี 2 กรณี คือ กรณีแรกที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะนำผลการทดสอบจริง และมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกลเปรียบเทียบกับการคำนวณกับสมการที่นำเสนอ และในกรณีที่สอง ที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะใช้วงจรมูลไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นๆ คำนวณเปรียบเทียบกับสมการที่นำเสนอ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้พบว่ามีค่าความผิดพลาดต่ำกว่าร้อยละ 4 ดังนั้นวิธีและสมการที่นำเสนอนี้ สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้หลายชนิด [17]

ธนภวิวัฒน์ ภูมิภาค ได้นำเสนอเทคนิคการทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในขณะที่ใช้งาน เมื่อแหล่งจ่ายไม่เป็นไซน์ ซึ่งเทคนิคนี้จะเน้นไปที่มอเตอร์ที่ใช้งานจริงในระบบ โดยไม่มีการเคลื่อนย้ายมอเตอร์ และไม่มีการวัดกำลังเอาต์พุต วิธีการนี้จะใช้ข้อมูลจากการวัดขณะใช้งาน เพียง 1 ชุดเป็นอินพุต ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าอินพุต และความเร็วรอบของมอเตอร์ นำมาใช้พิจารณาพร้อมกับจินตคณิตอัลกอริทึม เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์โดยไม่ต้องทำการทดสอบ ไม่มีภาระทางไฟฟ้า และจับยึดโรเตอร์ และนำไปคำนวณหาสมรรถนะของมอเตอร์ได้ เทคนิคนี้นำไปทดสอบกับมอเตอร์พิกัด 3 HP และ 7.5 HP ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าผลการทำนายมีค่าความแม่นยำประมาณร้อยละ 3 [18]



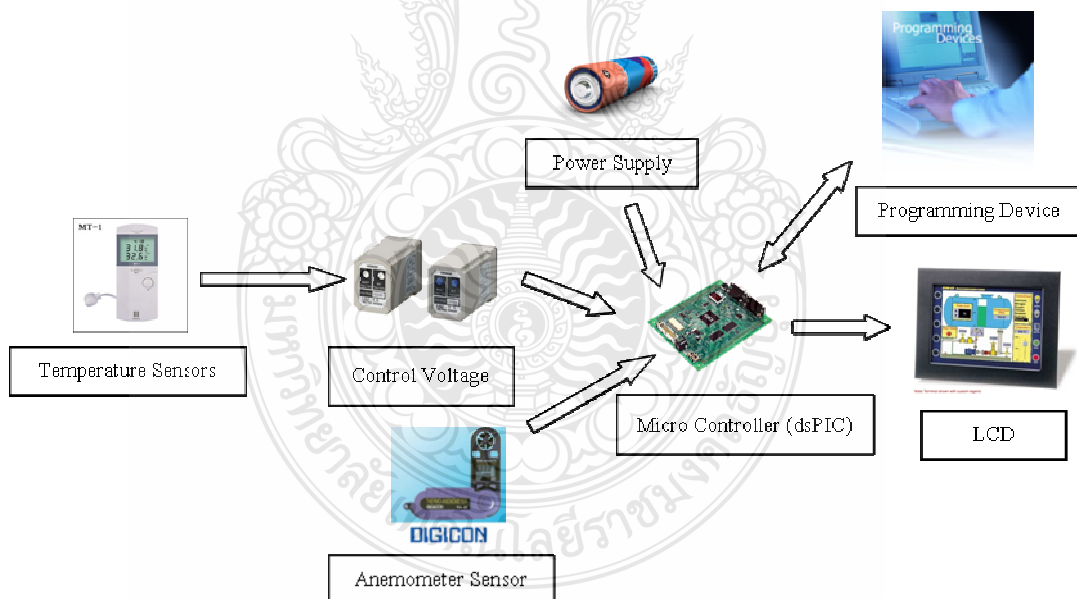
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

บทนี้เป็นการนำเสนอขั้นตอนและวิธีการดำเนินการในส่วนต่างๆ ภายในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ส่วนประกอบของระบบ การออกแบบและจัดสร้างชุดวัดอุณหภูมิดิจิทัลด้วยไอซี LM335AZ การออกแบบและจัดสร้างเซนเซอร์วัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน การออกแบบและสร้างชุดควบคุมความเร็วสำหรับอุโมงค์ลม การออกแบบและจัดสร้างชุดประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD ของกำลังสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 0.25 HP และขนาด 0.5 HP ด้วยเทคนิคการวัดอุณหภูมิระบายความร้อน

3.1 ส่วนประกอบของระบบ

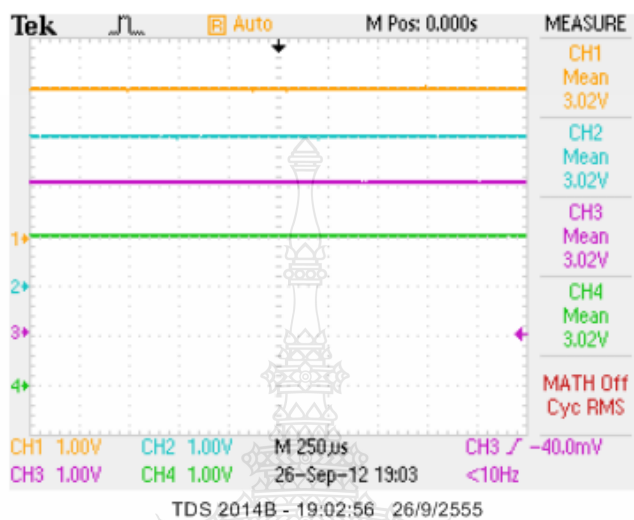
การจัดสร้างชุดประมวลผลและแสดงผลของกำลังสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ดังภาพแผนผังที่ 3.1



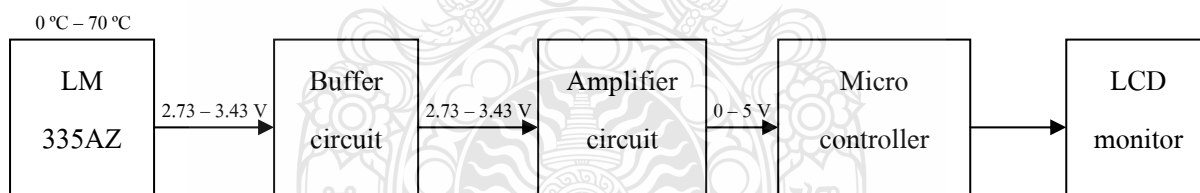
ภาพที่ 3.1 แผนผังของชุดประมวลผลและแสดงผลของกำลังสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากภาพที่ 3.1 ส่วนของการวัดอุณหภูมิ (Temperature Sensors) จะใช้ไอซีเบอร์ LM335AZ ทำการวัดอุณหภูมิระบายความร้อนและอุณหภูมิลมเข้าของมอเตอร์ ส่วนของการควบคุมแรงดันจะ

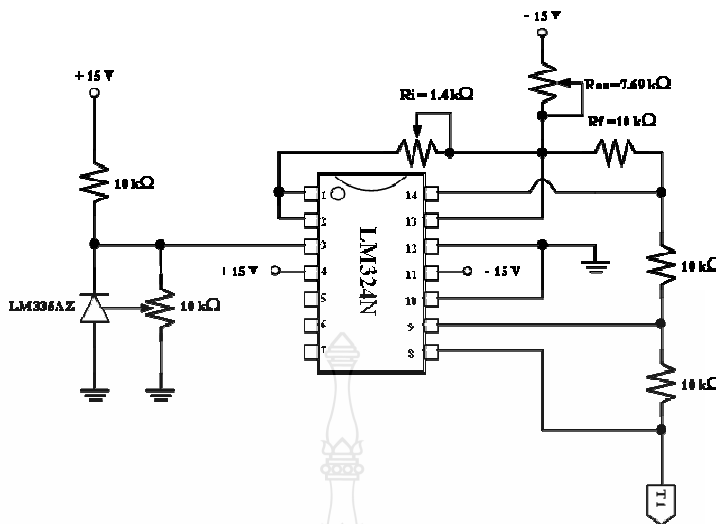
สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ 0 – 5 V) จากนั้นนำสัญญาณ Output จาก LM335AZ มาเข้าขาอะนาลอกของไมโครคอนโทรลเลอร์ จำนวน 4 Input ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LM335AZ ทั้ง 4 ตัว ที่อุณหภูมิ 29 °C



ภาพที่ 3.4 แผนผังการออกแบบชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิด้วย LM335AZ



ภาพที่ 3.5 วงจรวัดอุณหภูมิดิจิทัลด้วยไอซีเบอร์ LM335AZ พร้อมวงจรปรับแต่งสัญญาณ

จากภาพที่ 3.5 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ LM335AZ จะให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ 2.73 V ที่อุณหภูมิ 0 °C และ 3.43 V ที่อุณหภูมิ 70 °C เพื่อให้ได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนเป็น 0 – 5 V และนำไปเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์โดยจะเปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับเข้ามา จาก 0 – 5 V เป็นข้อมูลขนาด 10 บิต ตั้งแต่ 0000 – 1023 (2¹⁰ หรือ 1,024 ค่า) จึงมีการคำนวณค่าต่างๆ โดยการหาความชัน และหาตำแหน่งศูนย์ [19] ดังต่อไปนี้

$$m = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = \frac{5V - 0V}{3.43V - 2.73V} = 7.14 \tag{3.1}$$

เมื่อ m คือ ความชัน
 V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณ (V)
 V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตของเซนเซอร์ (V)

หรือ
$$m = \frac{R_f}{R_i} = 7.14 \tag{3.2}$$

โดยถ้าเลือก $R_f = 10 \text{ k}\Omega$ จะได้ $R_i = 1.4 \text{ k}\Omega$

จาก
$$y = mx + b \tag{3.3}$$

หรือเขียนได้เป็น $V_{out} = mV_{in} + b$

เมื่อ b คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น หรือค่าแห่งศูนย์ (V)

ดังนั้น $V_{in} = 2.73V$ แล้ว $V_{out} = 0V$ นั่นคือ

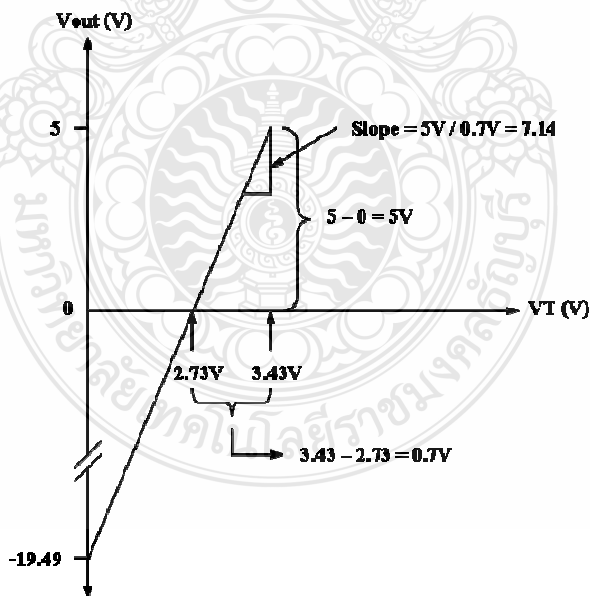
$$0V = (7.14 \times 2.73) + b$$

$$b = -19.49V$$

แต่ $b = \frac{R_f}{R_{os}}(\pm V) = -19.49V$ (3.4)

ดังนั้นต้องเลือก $\pm V$ เป็น โฟลบ และในที่นี้เลือก $V = -15V$ จะได้

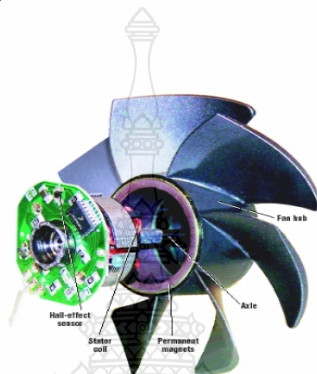
$$R_{os} = \frac{R_f}{b}(\pm V) = \frac{10k\Omega \times (-15V)}{-19.49} = 7.69k\Omega$$



ภาพที่ 3.6 กราฟคุณสมบัติของวงจรปรับความชัน และค่าแห่งศูนย์

3.3 การออกแบบและสร้างเซนเซอร์วัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกพัดลมระบายความร้อนมาเป็นเซนเซอร์วัดความเร็วลม เนื่องจากพัดลมระบายความร้อนสามารถหาซื้อได้ง่ายราคาถูก มีหลากหลายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้เลือกใช้อีกทั้งเซนเซอร์หรือเครื่องวัดความเร็วลมยังมีราคาสูง จึงเป็นเหตุผลที่งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้พัดลมระบายความร้อนมาแทนเซนเซอร์วัดความเร็วลม พัดลมระบายความร้อนส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดไร้แปรงถ่าน (Brushless Motor) ซึ่งมีทั้งชนิดไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับ

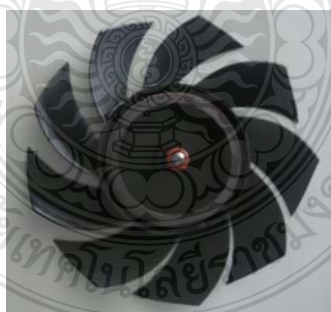


ภาพที่ 3.7 โครงสร้างภายในของพัดลมระบายความร้อน [20]

โครงสร้างภายในของพัดลมระบายความร้อนจะประกอบด้วยใบพัด แม่เหล็กถาวร แกน เหล็กโรเตอร์ ขดลวดโรเตอร์ โครง และวงจรจับ



(ก)



(ข)



(ค)

(ก) พัดลมระบายความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 cm.

(ข) ใบพัดลมที่ยึดติดกับแกนเพลลา

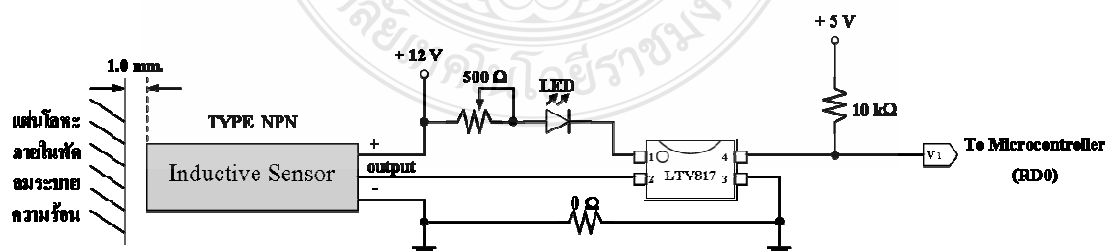
(ค) การติดตั้งอินดักทีฟเซนเซอร์เพื่อตรวจจับความถี่

ภาพที่ 3.8 โครงสร้างของพัดลมระบายความร้อน และการติดตั้งเซนเซอร์

ในภาพที่ 3.8 ได้ทำการประยุกต์โดยการถอดแม่เหล็กถาวร แกนเหล็กโรเตอร์ ขดลวดโรเตอร์ โดยเหลือเพียงแต่ใบพัด และแกนเพลาท่อนั้น ภายในใบพัดจะติดแผ่นโลหะบางๆ ใไว้ 2 แผ่น เพื่อความสะดวก และเพื่อให้อินดักทีฟเซนเซอร์สามารถตรวจจับได้ อินดักทีฟเซนเซอร์ที่ใช้เป็นยี่ห้อ OMRON รุ่น E2E-CR8C1 โดยตั้งระยะการตรวจจับไว้ที่ 1.0 mm. พัดลมระบายความร้อนที่เลือกใช้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 cm. (เนื่องจากต้องมีขนาดเท่ากับเครื่องวัดความเร็วลมที่ใช้ในการสอบเทียบคือ ยี่ห้อ DIGICON ANEMOMETER รุ่น DA-43 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดที่ 7 cm. เช่นเดียวกัน) ดังภาพที่ 3.9 สัญญาณที่ได้จากอินดักทีฟเซนเซอร์ จะเป็นลักษณะเป็นพัลส์ ซึ่งความถี่ในการส่งพัลส์ของอินดักทีฟเซนเซอร์จะแปรผันตามความเร็วลม



ภาพที่ 3.9 เครื่องวัดความเร็วลมที่ใช้ในการสอบเทียบ (DIGICON ANEMOMETER รุ่น DA-43)

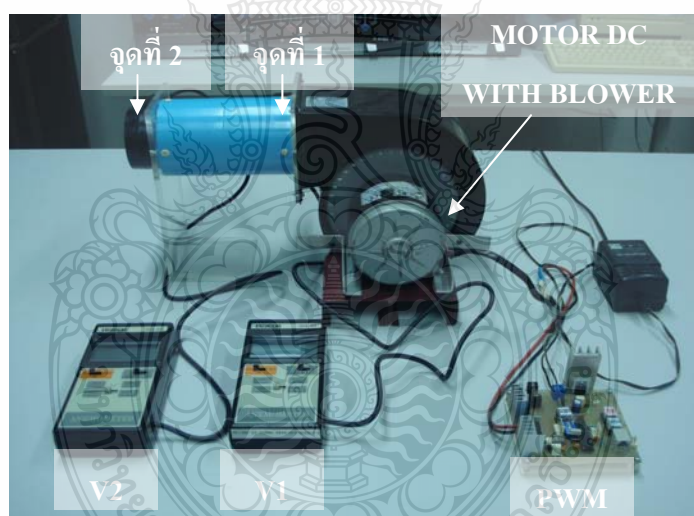


ภาพที่ 3.10 วงจรตรวจจับสัญญาณความถี่จากอินดักทีฟเซนเซอร์

จากภาพที่ 3.10 อินดักทีฟเซนเซอร์ที่ใช้ยี่ห้อ OMRON รุ่น E2E-CR8C1 ชนิด NPN มีระยะการตรวจจับตั้งแต่ 0 – 3 mm. ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 12 – 24 V ให้สัญญาณออกมาที่ขาเอาต์พุตเป็นชนิด N โดยมีหลอด LED แสดงสัญญาณการตรวจจับ สัญญาณเอาต์พุต จะเข้า ออฟดีสวิตช์เบอร์ LTV817 เพื่อแยกกราวด์ ระหว่างแรงดันด้านสูงและแรงดันด้านต่ำ และนำสัญญาณความถี่ (พัลส์) ส่งต่อไปที่ขาอินพุต RDO ของไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป

3.4 การออกแบบและสร้างชุดควบคุมความเร็วสำหรับอุโมงค์ลม

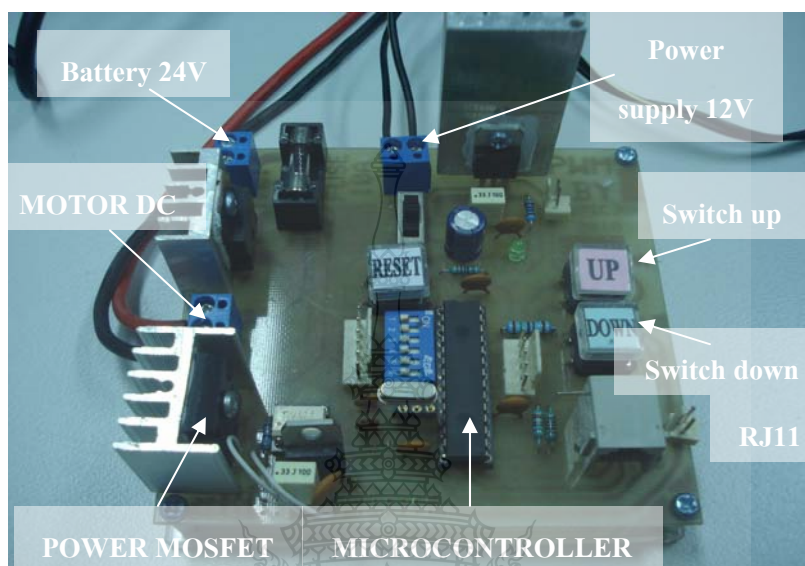
การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน ทดสอบโดยการสร้างอุโมงค์ลม [21] ซึ่งมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 300 W 24 V 2,750 RPM เป็นมอเตอร์ที่มีใบพัดลมแบบกรงกระรอก สามารถควบคุมความเร็วลมได้โดยการปรับสัญญาณ PWM ซึ่งสามารถปรับความเร็วลมได้ตั้งแต่ 0 – 20 m/s โดยมีเครื่องวัดความเร็วลมมาตรฐาน จำนวน 2 ตัวติดตั้งทั้ง 2 จุด ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ชุดอุโมงค์ลมในการสอบเทียบเครื่องวัดความเร็วลม

จากภาพที่ 3.11 จะใช้เครื่องวัดความเร็วแบบมาตรฐานจำนวน 2 ชุด ติดตั้งในจุดที่ 1 และ 2 ซึ่งจุดที่ 1 จะแสดงค่าความเร็วลมจากเครื่องวัดความเร็วลมตัวที่ 1 (V1) และจุดที่ 2 จะแสดงค่าความเร็วลมจากเครื่องวัดความเร็วลมตัวที่ 2 (V2) ในลำดับแรกจะเป็นการปรับความเร็วเพื่อบันทึกหรือจดค่าความเร็วลม จากเครื่องวัดความเร็วลมแบบมาตรฐานทั้ง 2 เครื่อง โดยการปรับชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีใบพัดแบบกรงกระรอก เพื่อเป็นการจำลองพลังงานลม

สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ 5 V โดยได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 V จากแอดปเตอร์ และมอเตอร์ไฟฟ้าจะใช้แบตเตอรี่แห่ง ขนาด 12 V จำนวน 2 ลูก ต่อแบบอนุกรมกัน จึงได้แรงดันไฟฟ้าที่ 24 V ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในการออกแบบส่วนโปรแกรมนั้นจะใช้สูตรในการควบคุมความถี่ และปรับ Duty Cycle ดังสมการที่ 3.5 - 3.8

$$T_{pwm} = T_{cy} \times (PTPER + 1) \quad (3.5)$$

และ

$$F_{pwm} = \frac{1}{T_{pwm}} \quad (3.6)$$

เมื่อ	T_{pwm}	คือคาบเวลาของสัญญาณ PWM (Sec)
	T_{cy}	คือคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกา (Sec) = $\frac{1}{F_{cy}}$
	$PTPER$	คือค่าของรีจิสเตอร์ กำหนดค่าเท่ากับ 1510
	F_{cy}	คือความถี่ของสัญญาณนาฬิกาในระบบ (Hz)
	F_{pwm}	คือความถี่ในการสวิตช์ (Hz)

เมื่อ

$$F_{cy} = \frac{PLL}{4} \times F_{osc} \quad (3.7)$$

และ F_{osc} คือความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ (Hz)

แทนค่าต่างๆ ในสมการที่ 3.7

$$F_{cy} = \frac{16}{4} \times 7372800 = 29491200 \text{ Hz}$$

คาบเวลาของสัญญาณนาฬิกา T_{cy}

$$T_{cy} = \frac{1}{29491200} = 3.39 \times 10^{-8} \text{ sec}$$

แทนค่า T_{cy} ในสมการที่ 3.5

$$T_{pwm} = (3.39 \times 10^{-8}) \times (1,510 + 1) = 5.12 \times 10^{-5} \text{ sec}$$

ฉะนั้น ความถี่ในการสวิตช์ จากสมการที่ 3.6

$$F_{pwm} = \frac{1}{5.12 \times 10^{-5}} = 19.517 \text{ kHz}$$

และ Duty cycle สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.8

$$Duty = \frac{Counter \times 20}{Pr_x} \times 100\% \quad (3.8)$$

เมื่อ

$Duty$

คือค่าดีวตี้ไซเคิล (%)

$Counter$

คือค่าจำนวนครั้งที่ กดสวิตช์เพิ่มและลด (ครั้ง)

Pr_x

คือค่าข้อมูลของดีวตี้ไซเคิล กำหนดค่าเท่ากับ 3000

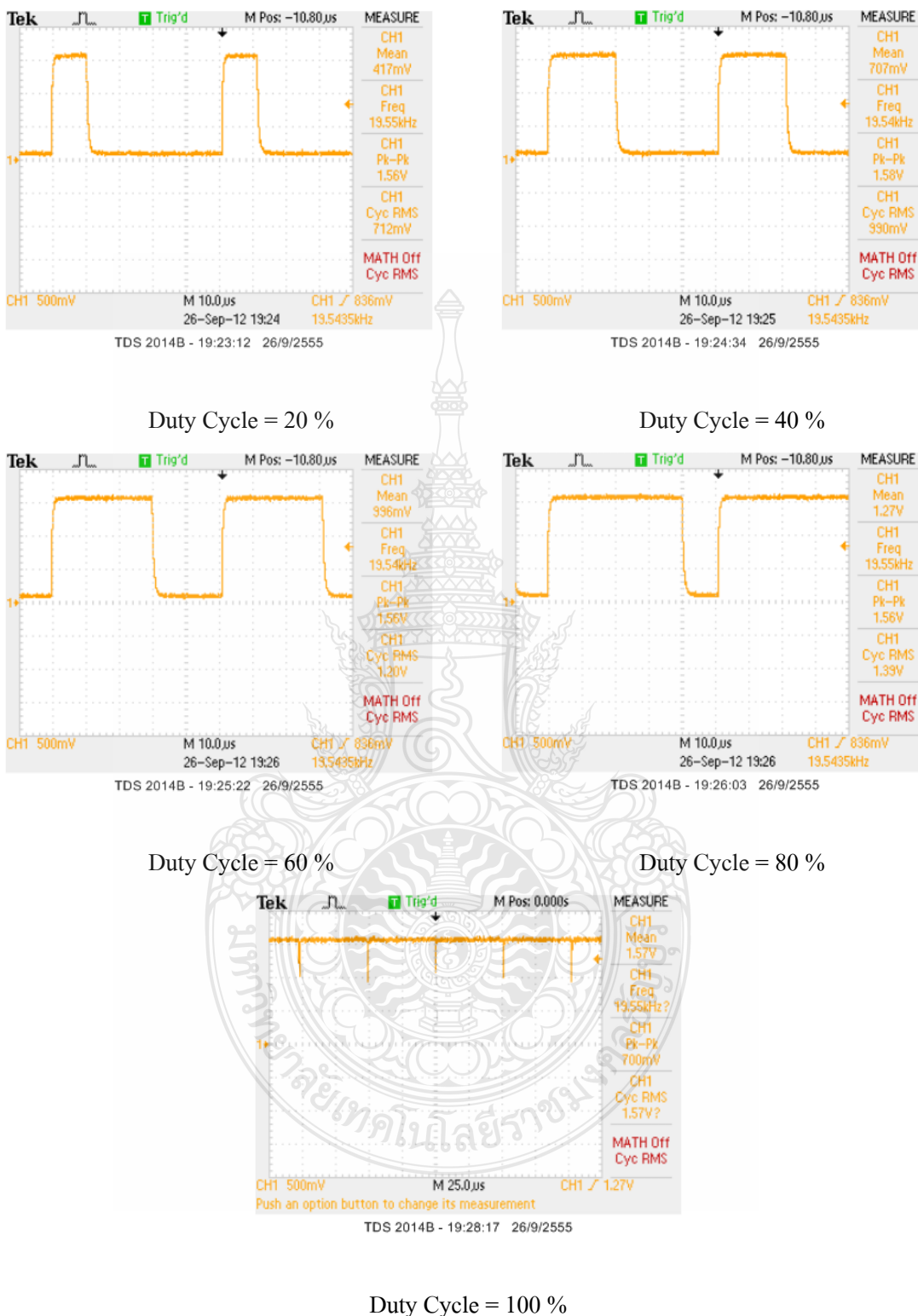
แทนค่าสมการที่ 3.8 โดยยกตัวอย่างเมื่อมีการกดสวิตช์เพิ่ม (Switch UP) จำนวน 10 ครั้ง และจำนวน 150 ครั้ง

กดสวิตช์ จำนวน 10 ครั้ง

$$Duty = \frac{10 \times 20}{3,000} \times 100\% = 20\%$$

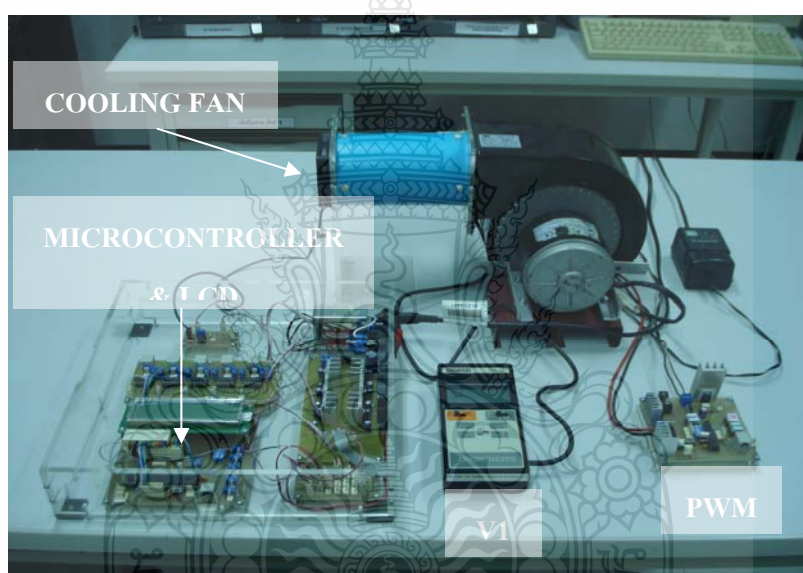
และกดสวิตช์ จำนวน 150 ครั้ง

$$Duty = \frac{150 \times 20}{3,000} \times 100\% = 100\%$$



ภาพที่ 3.14 สัญญาณ PWM ที่ Duty Cycle ต่างๆ

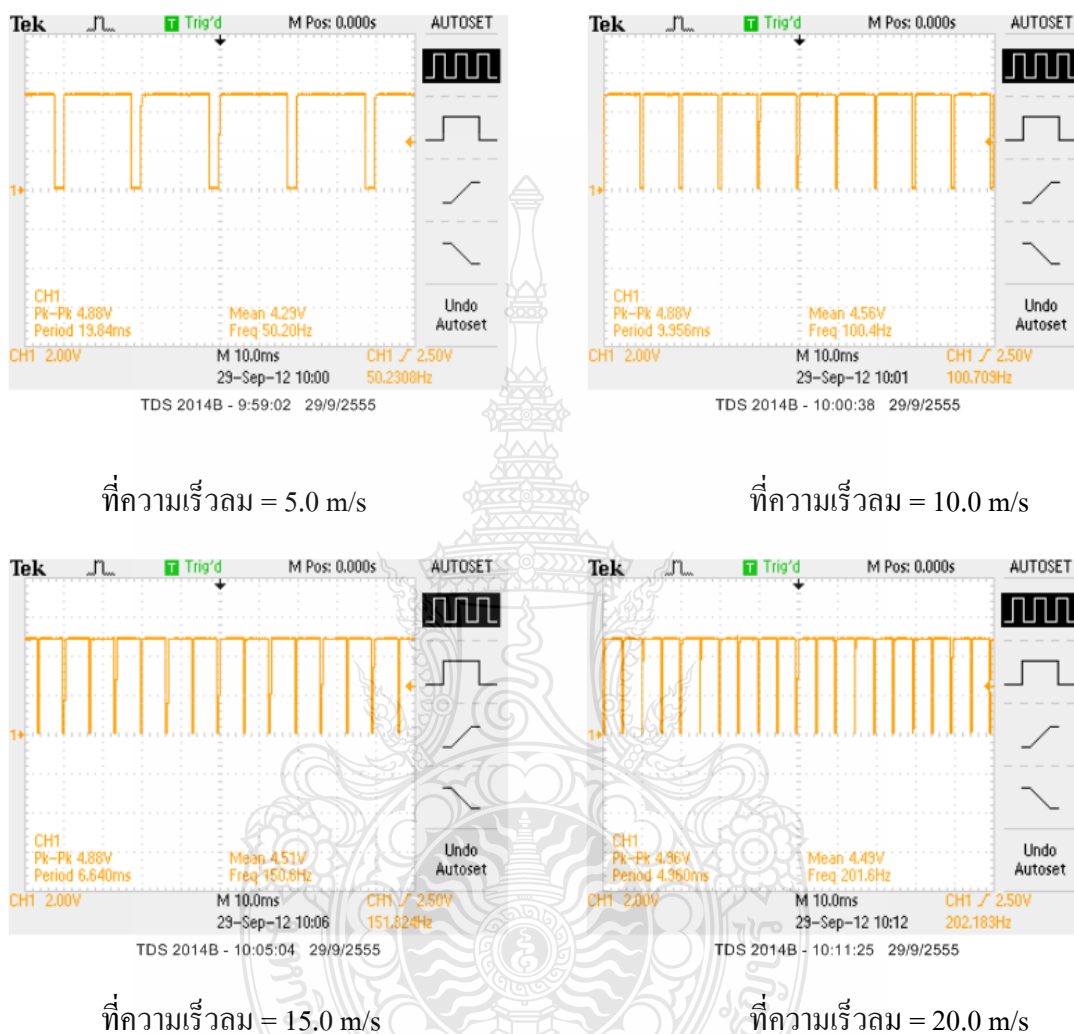
เมื่อสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์พัฒนาได้แล้ว ก็จะสามารถควบคุมความเร็วลมได้ด้วยเช่นกัน โดยจะทำการปรับความเร็วลมเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 m/s จนถึง 20.0 m/s โดยจะจดบันทึกค่าความเร็วลมของเครื่องวัดความเร็วลมมาตรฐานทั้ง 2 ตัว โดยใช้เครื่องวัดความเร็วลมตัวที่ 1 เป็นเกณฑ์ในการปรับความเร็วลม และใช้เครื่องวัดความเร็วลมตัวที่ 2 เป็นเกณฑ์ในการวัดความเร็วลมของพัดลมระบายความร้อน ขั้นตอนต่อมาจะนำเครื่องวัดความเร็วลมมาตรฐานตัวที่ 2 ออกจากอุโมงค์ลม และเปลี่ยนเป็นพัดลมระบายความร้อนแทนในตำแหน่งเดียวกันกับเครื่องวัดความเร็วลมมาตรฐานตัวที่ 2 และทำการทดสอบเช่นเดียวกันคือปรับความเร็วลมเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 m/s จนถึง 20.0 m/s และทำการจดบันทึกค่าความเร็วที่แสดงผลผ่านจอ LCD จากไมโครคอนโทรเลอร์อีกชุดหนึ่งเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำ ดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 การสอบเทียบเครื่องวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน

จากภาพที่ 3.15 เมื่อทำการทดสอบเครื่องวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน จะให้เอาต์พุตมาในรูปแบบของความถี่ มีหน่วยเป็น Hz เมื่อจ่ายพลังงานลมเพิ่มขึ้นความถี่ก็จะเพิ่มขึ้นตามเช่นเดียวกัน ซึ่งที่ทดสอบที่ความเร็วลมเท่ากับ 5.0 m/s จะตรวจจับความถี่ได้ 50 Hz เพื่อให้เป็นค่าความเร็วลมที่ถูกต้อง จึงได้ทำการนำค่าความถี่ที่อ่านได้มาหารด้วย 10 แล้วเปลี่ยนจากหน่วย Hz เป็นความเร็วลมคือ m/s หรือ เมตรต่อวินาที เช่นเดียวกันที่ความเร็วลมเท่ากับ 10.0 m/s ก็จะตรวจจับความถี่ได้ 100 Hz ความเร็วลมเท่ากับ 15.0 m/s ก็จะตรวจจับความถี่ได้ 150 Hz ความเร็วลมเท่ากับ

20.0 m/s ก็จะสามารถจับความถี่ได้ 201 Hz (ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย) เพราะความถี่จะแปรผันตรงกับความเร็วลมดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 ความถี่ของการหมุนของพัดลมระบายความร้อนที่ความเร็วลมต่างๆ

3.5 การออกแบบและสร้างชุดประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างชุดประมวลผล พร้อมทั้งแสดงผลผ่านจอ LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด ชุดประมวลผลเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dsPIC30F4011 ขนาด 16 บิต จากบริษัท Microchip Technology Inc. ขนาด 40 ขา ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที หน่วยความจำข้อมูลอีพรอม สามารถลบและเขียนใหม่ได้มากกว่า 1,000,000 ครั้ง ทำการคูณ

เลข 16 บิตได้ภายในสัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ไซเคิล มีขานาออกสูงถึง 9 ขา ราคาถูกเป็นที่นิยมกัน โดยทั่วไปในงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นเหตุผลที่งานวิจัยนี้เลือกใช้ โดยชุดประมวลผล พร้อมทั้งแสดงผลผ่านจอ LCD นั้น จะรับข้อมูลต่างๆ จากขาอินพุต คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิทั้ง 4 ตัว โดยตัวที่ 1 จะติดตั้งด้านท้ายมอเตอร์ (ช่องลมเข้า) และตัวที่ 2 - 4 จะติดตั้งบริเวณผิวโครงด้านหน้าของมอเตอร์ แล้วนำค่าทั้ง 3 ตัวมาเฉลี่ยกัน อินพุตอีกส่วนหนึ่งนั้น เป็นเครื่องวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน จากนั้นทำการเขียน โปรแกรม รับค่าต่างๆ เข้ามาแทนในตัวแปรที่ได้สร้างไว้ในโปรแกรม เพื่อนำค่าต่างๆ แทนในสมการ หาค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยเทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน ดังสมการที่ 3.9

$$P_{loss_total} = \rho AVC(T_o - T_i) \quad (3.9)$$

เมื่อ	P_{loss_total}	คือกำลังสูญเสียรวมในมอเตอร์ (W)
	ρ	คือความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
	A	คือพื้นที่หน้าตัดของลมด้านเข้ามอเตอร์ (m^2)
	V	คือความเร็วลมของใบพัดระบายความร้อน (m/s)
	C	คือความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ ($J/kg^\circ C$)
	T_o	คืออุณหภูมิลมออก หรือลมระบาย ($^\circ C$)
	T_i	คืออุณหภูมิลมเข้า ($^\circ C$)

จากสมการที่ 3.9 ค่า P_{loss_total} จะเป็นค่ากำลังสูญเสียรวมทั้งหมดของมอเตอร์ คือ กำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก กำลังสูญเสียที่ขดลวด กำลังสูญเสียที่โรเตอร์ และกำลังสูญเสียที่ความฝืดและแรงต้านลม จะเห็นว่ากำลังสูญเสียทั้งหมดที่กล่าวมาล้วนมีผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่มอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อมีการทำงาน ส่วนจะมีมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับภาระโหลดของมอเตอร์ หากมอเตอร์รับภาระโหลดน้อยกำลังสูญเสียก็จะมีน้อย ในทางกลับกัน หากมอเตอร์รับภาระโหลดมากกำลังสูญเสียก็จะมีมากเช่นเดียวกัน ρ นั้น จะมีค่าคงที่เท่ากับ $1.2 kg/m^3$ A คือพื้นที่หน้าตัดของลมด้านเข้ามอเตอร์ ซึ่งในที่นี้ใช้พื้นที่ ของเซนเซอร์วัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อนที่มีรัศมีของใบพัดเท่ากับ $0.0335 m$. ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของลมด้านเข้ามอเตอร์ จึงมีค่าเท่ากับ $0.00352 m^2$ V คือความเร็วลมของใบพัดระบายความร้อน มีหน่วยเป็น m/s C คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ [23] ซึ่งได้นำค่ามาจากตารางความร้อนจำเพาะของอากาศ และมีการใช้หลักการใช้

บัญญัติไตรยางค์ (เนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะของอากาศเป็นสมการแบบเชิงเส้น) และมีหลายช่วงความชัน ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้มาจากสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.3 โดยมีเงื่อนไข 2 กรณีดังนี้คือ

1) เมื่อ $T_o \leq 27^\circ C$

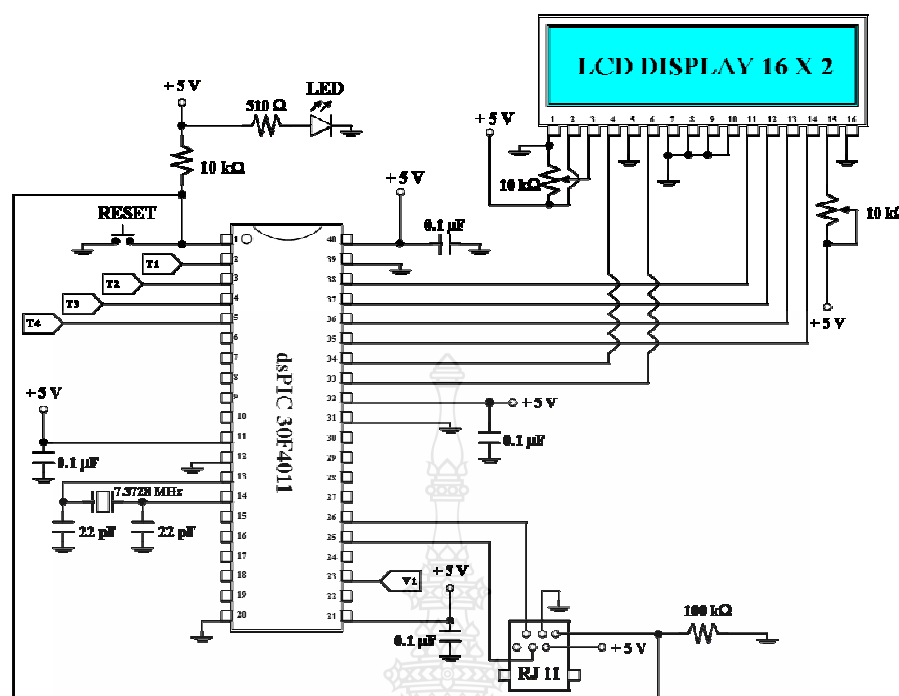
$$C = \frac{T_o + 25098}{25} \quad (3.10)$$

2) เมื่อ $T_o > 27^\circ C$

$$C = \frac{T_o + 16723}{16.6666} \quad (3.11)$$

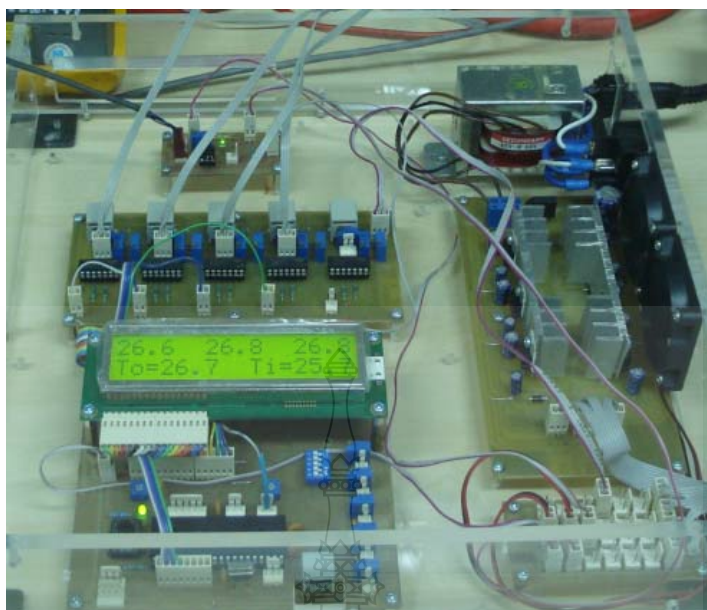
ส่วน T_o และ T_i คือ อุณหภูมิลมออก หรือลมระบาย และอุณหภูมิลมเข้า ตามลำดับ มีหน่วยเป็น $^\circ C$ ซึ่งได้ค่ามาจาก เซนเซอร์วัดอุณหภูมิดิจิทัล เบอร์ LM335AZ จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะนำค่าดังกล่าวมาแทนลงในสมการที่ 3.9 เพื่อประมวลผลกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ พร้อมทั้งแสดงผลผ่านจอ LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด ซึ่งจะแสดงค่าต่างๆ เช่น T_o , T_i และ P_{loss_total} ซึ่งจะมีการประมวลผลและแสดงผลตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ ดังภาพที่ 3.17 และ 3.18





ภาพที่ 3.17 วงจรไฟฟ้าของชุดประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD

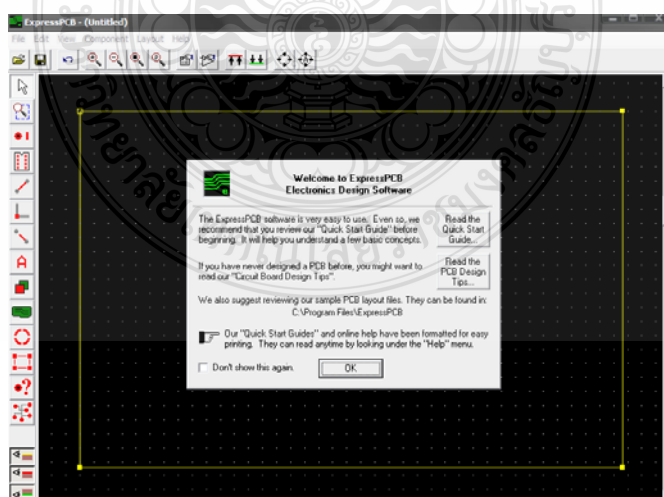
จากภาพที่ 3.17 ขาอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ จะเป็นขาที่ 2 – 5 และขาที่ 23 โดยขาที่ 2 – 5 จะต่ออยู่กับ ชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิดิจิทัล เบอร์ LM335AZ ทั้ง 4 ตัวตามลำดับ ส่วนขาที่ 23 จะต่ออยู่กับชุดเซนเซอร์วัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน ในขาเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ จะเป็นขาที่ 33 – 38 โดยเป็นการแสดงผลผ่านทางจอ LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด ในส่วนของการโปรแกรมข้อมูลหรือคำสั่งนั้นจะติดต่อสื่อสารผ่านทาง RJ11 และเข้าขา 25 – 26 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนความถี่ของสัญญาณนาฬิกา จะใช้ คริสตัลความถี่ที่ 7.3728 MHz



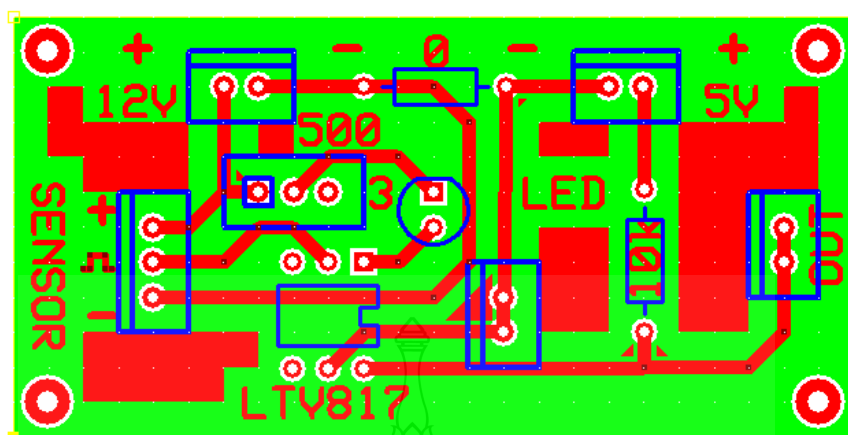
ภาพที่ 3.18 ชุดประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD

3.6 การออกแบบและจัดสร้างลายวงจรพิมพ์ (PCB)

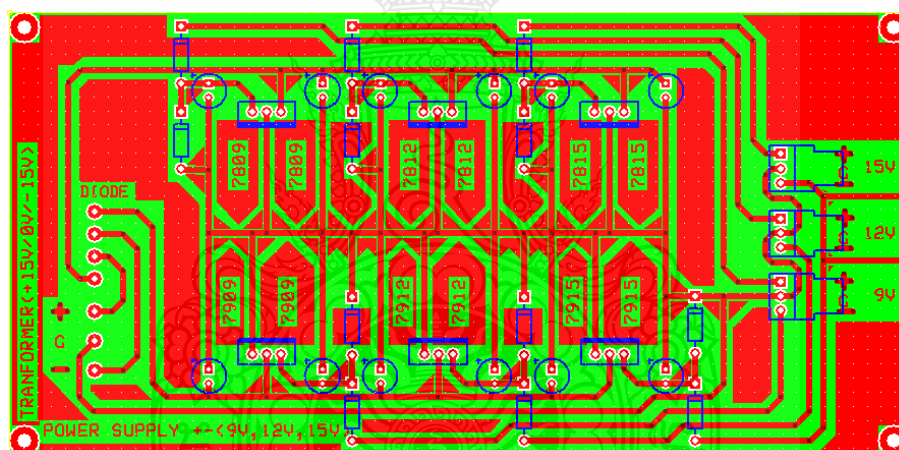
วงจรพิมพ์ หรือมักจะเรียกโดยทั่วไปว่า PCB เป็นแผ่นที่ทำจากวัสดุที่พอกซึ่ง แล้วเคลือบด้วยทองแดง หรือเงิน ซึ่งอาจมีด้านเดียวหรือ สองด้าน แผ่น PCB เป็นที่นิยมมากในการขึ้นลายวงจร หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การออกแบบลายวงจรพิมพ์นั้นจะทำการออกแบบบนโปรแกรมสำเร็จรูป ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Express PCB ดังภาพที่ 3.19



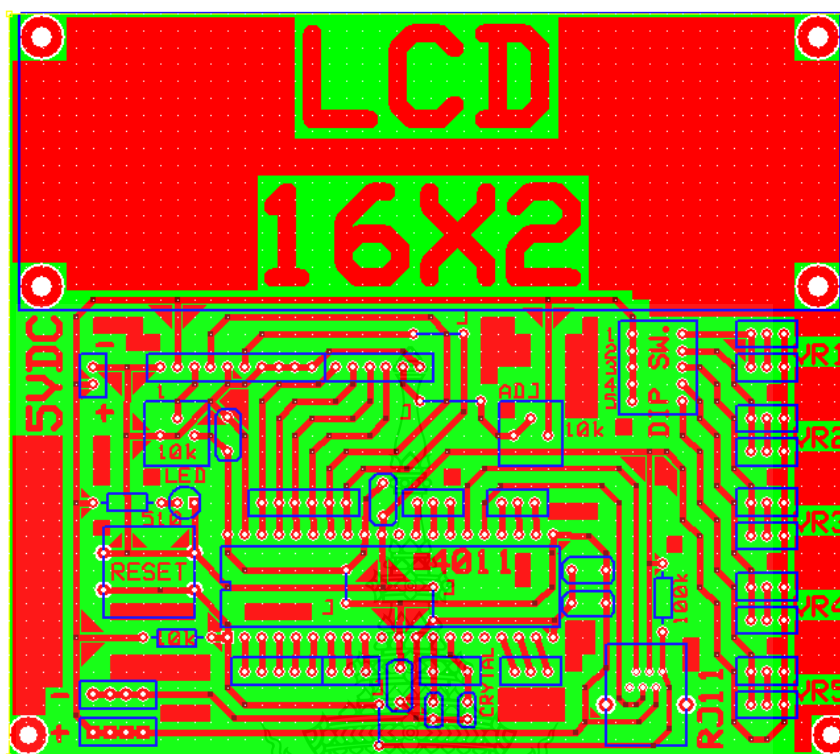
ภาพที่ 3.19 โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับออกแบบลายวงจรพิมพ์ Express PCB



ภาพที่ 3.21 ลายวงจรพิมพ์ชุดวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน



ภาพที่ 3.22 ลายวงจรพิมพ์ภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

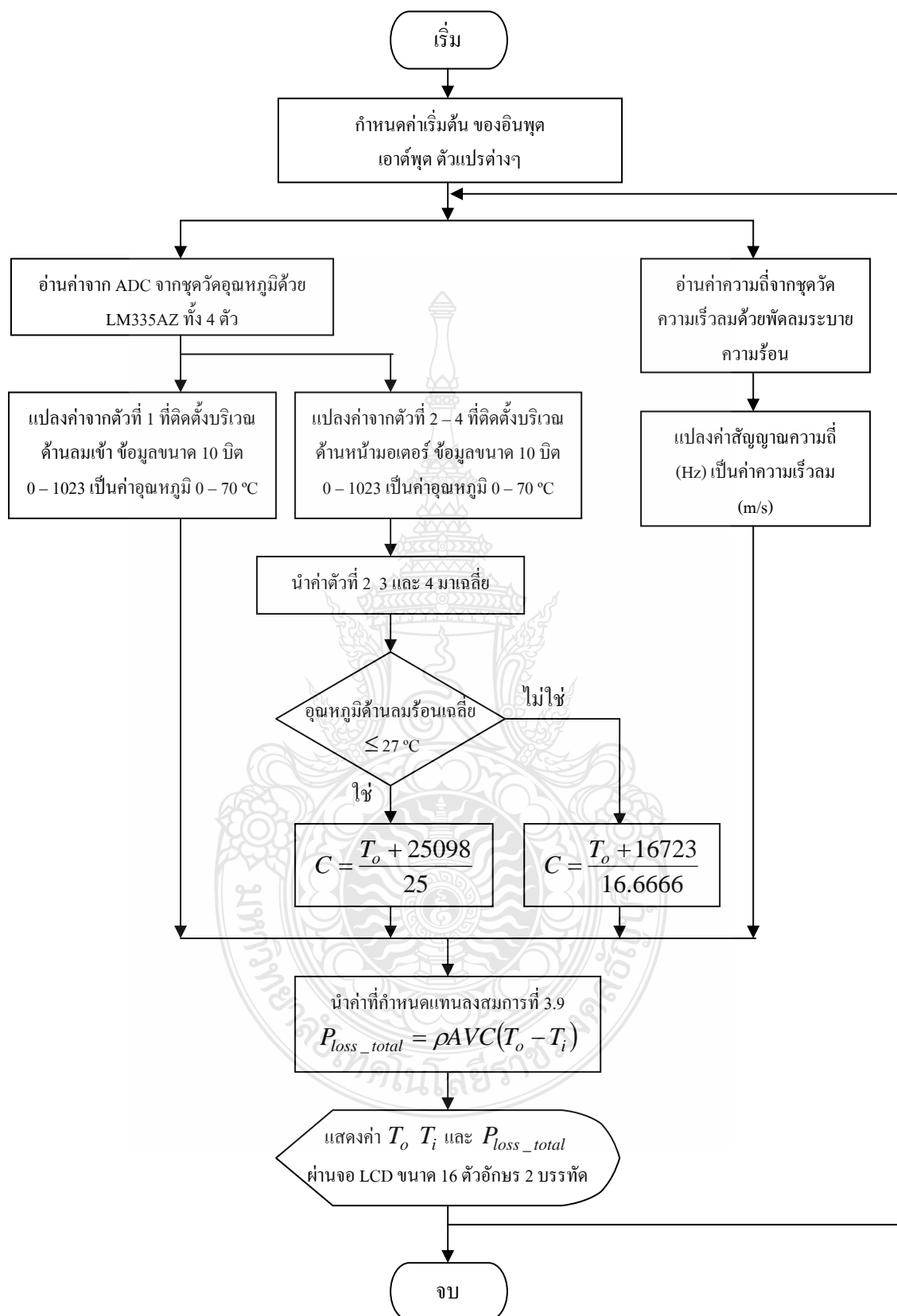


ภาพที่ 3.23 ลายวงจรพิมพ์ชุดประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD

3.7 การออกแบบโปรแกรม

การเขียนโปรแกรมการทำงานของชุดประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD นั้นจะเขียนด้วยภาษาซี สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ MPLAB IDE เป็นตัว Editor และ MPLAB C30 เป็นตัว Compiler โดยทำการแบ่งไฟล์โปรแกรมต่างๆ ออกเป็นดังนี้

- 1) ไฟล์โปรแกรมหลัก
 - 2) ไฟล์โปรแกรมอ่านค่าจากโมดูลแปลงสัญญาณ ADC
 - 3) ไฟล์โปรแกรมตรวจจับความถี่
 - 4) ไฟล์โปรแกรมแสดงผลผ่านจอ LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด
- ซึ่งการทำงานของโปรแกรมสามารถแสดงเป็นแผนผังดังนี้



ภาพที่ 3.24 แผนผังการทำงานของระบบประมวลผลและแสดงผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์

บทที่ 4

ผลการวิจัย

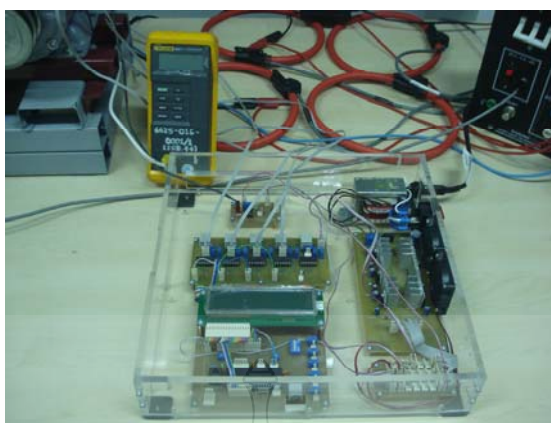
บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบชุดวัดอุณหภูมิดิจิทัลด้วยไอซี LM335AZ ผลการสอบเทียบเครื่องวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน ผลการทดสอบการหาค่าลึงสูญเสียนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส การทดสอบหาช่วงเวลาของอุณหภูมิสมมูลของมอเตอร์ และผลการทดสอบการทำงานของชุดประมวลผลค่าลึงสูญเสียนของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อนที่ทำการสร้างขึ้น

4.1 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) มัลติมิเตอร์ดิจิทัล FLUKE 29
- 2) เทอร์โมมิเตอร์ดิจิทัล FLUKE 50D
- 3) เครื่องวัดความเร็วลม DIGICON DA-43
- 4) เครื่องวัดและวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า FLUKE 1735
- 5) ออสซิลโลสโคป Tektronix TDS2014B
- 6) เครื่องจำลองภาระ โหลด และวัดความเร็วรอบ Lab-Volt 8960-15



ภาพที่ 4.1 เครื่องจำลองภาระ โหลด และวัดความเร็วรอบ ถูกจับด้วยสายพานอยู่กับเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส



ภาพที่ 4.2 ชุดประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน



ภาพที่ 4.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส พร้อมเครื่องวัดและวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า



ภาพที่ 4.4 การทดสอบหาลำดับสูญเสียมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ภาระโหลดต่างๆ

4.2 ผลการทดสอบชุดวัดอุณหภูมิดิจิทัลด้วยไอซี LM335AZ

เมื่อออกแบบและจัดสร้างชุดวัดอุณหภูมิดิจิทัลด้วยไอซี LM335AZ จำนวนทั้ง 4 ตัว ก็ได้ทำการทดสอบเบื้องต้นเช่นอุณหภูมิ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LM335AZ ระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณ และข้อมูลสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LM335AZ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณ และข้อมูลสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต

อุณหภูมิ (°C)	สัญญาณแรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตของ LM335 (V)	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ของวงจรปรับแต่งสัญญาณ (V)	ข้อมูลสัญญาณอนาลอก เป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต
0	2.73	0.00	0000
1	2.74	0.07	0015
2	2.75	0.14	0029
3	2.76	0.21	0044
4	2.77	0.29	0059
5	2.78	0.36	0073
6	2.79	0.43	0088
7	2.80	0.50	0102
8	2.81	0.57	0117
9	2.82	0.64	0132
10	2.83	0.71	0146
11	2.84	0.79	0161
12	2.85	0.86	0176
13	2.86	0.93	0190
14	2.87	1.00	0205
15	2.88	1.07	0219
16	2.89	1.14	0234
17	2.90	1.21	0249

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LM335AZ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณ และข้อมูลสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LM335 (V)	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณ (V)	ข้อมูลสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต
18	2.91	1.29	0263
19	2.92	1.36	0278
20	2.93	1.43	0293
21	2.94	1.50	0307
22	2.95	1.57	0322
23	2.96	1.64	0336
24	2.97	1.71	0351
25	2.98	1.79	0366
26	2.99	1.86	0380
27	3.00	1.93	0395
28	3.01	2.00	0410
29	3.02	2.07	0424
30	3.03	2.14	0439
31	3.04	2.21	0453
32	3.05	2.29	0468
33	3.06	2.36	0483
34	3.07	2.43	0497
35	3.08	2.50	0512
36	3.09	2.57	0527
37	3.10	2.64	0541
38	3.11	2.71	0556
39	3.12	2.79	0571
40	3.13	2.86	0585
41	3.14	2.93	0600

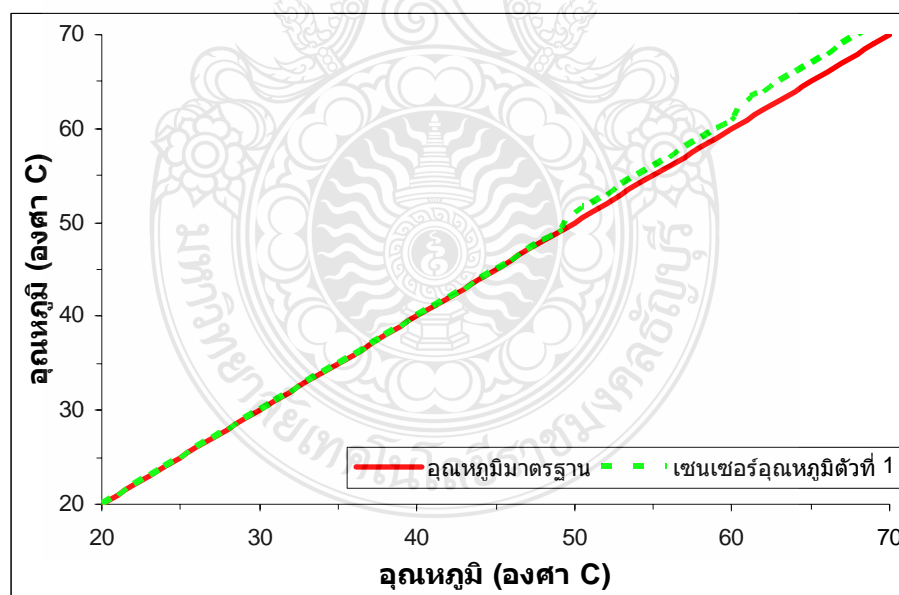
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LM335AZ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณ และข้อมูลสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LM335 (V)	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณ (V)	ข้อมูลสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต
42	3.15	3.00	0614
43	3.16	3.07	0629
44	3.17	3.14	0644
45	3.18	3.21	0658
46	3.19	3.29	0673
47	3.20	3.36	0688
48	3.21	3.43	0702
49	3.22	3.50	0717
50	3.23	3.57	0731
51	3.24	3.64	0746
52	3.25	3.71	0761
53	3.26	3.79	0775
54	3.27	3.86	0790
55	3.28	3.93	0805
56	3.29	4.00	0819
57	3.30	4.07	0834
58	3.31	4.14	0848
59	3.32	4.21	0863
60	3.33	4.29	0878
61	3.34	4.36	0892
62	3.35	4.43	0907
63	3.36	4.50	0922
64	3.37	4.57	0936
65	3.38	4.64	0951

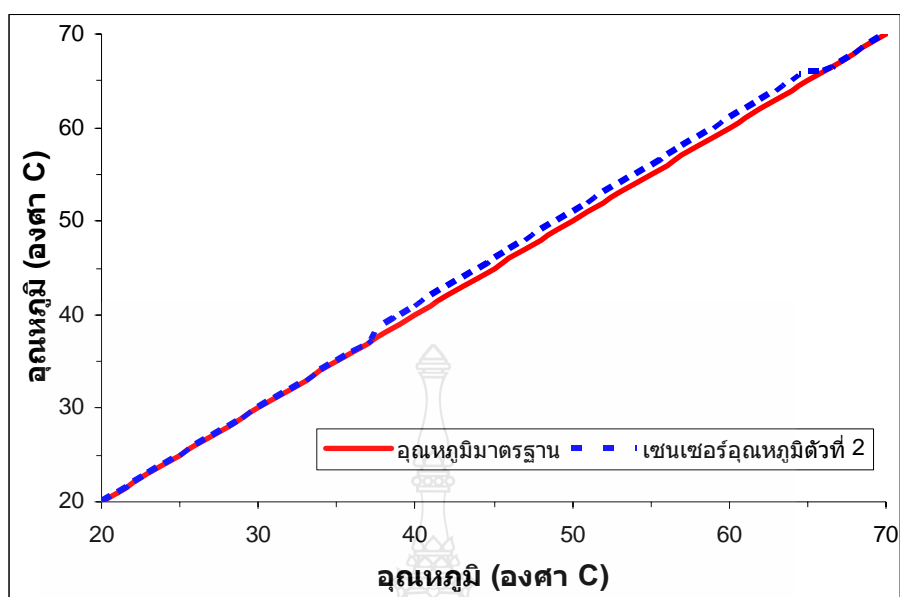
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LM335AZ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณ และข้อมูลสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LM335 (V)	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณ (V)	ข้อมูลสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต
66	3.39	4.71	0965
67	3.40	4.79	0980
68	3.41	4.86	0995
69	3.42	4.93	1009
70	3.43	5.00	1023

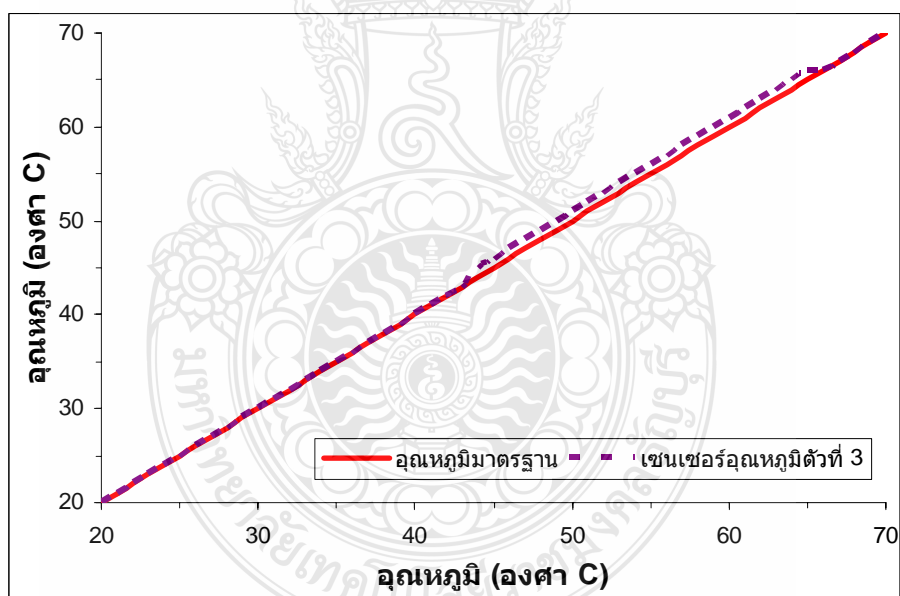
เมื่อได้ข้อมูล ขนาด 10 บิตมาแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะประมวลผลโดยเปลี่ยนเป็นค่าอุณหภูมิ และแสดงผลผ่านจอ LCD ของเซนเซอร์อุณหภูมิทั้ง 4 ตัว โดยทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 20 – 70 °C ซึ่งเมื่อแสดงค่าของอุณหภูมิที่วัด ได้มาแล้วก็จะมีค่าความผิดพลาดอยู่เล็กน้อย



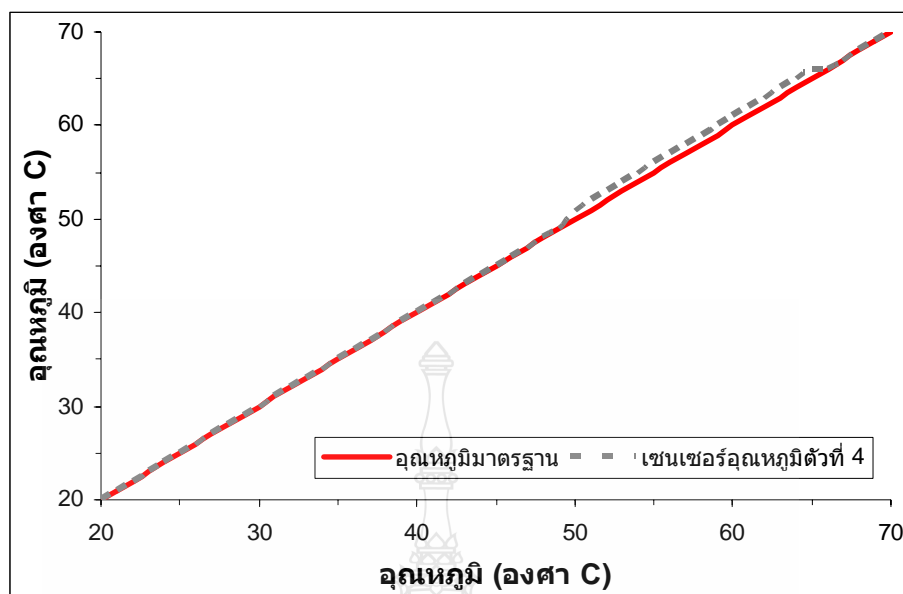
ภาพที่ 4.5 ความผิดพลาดของเซนเซอร์อุณหภูมิตัวที่ 1 เฉลี่ยร้อยละ 1.0



ภาพที่ 4.6 ความผิดพลาดของเซนเซอร์อุณหภูมิตัวที่ 2 เฉลี่ยร้อยละ 1.1



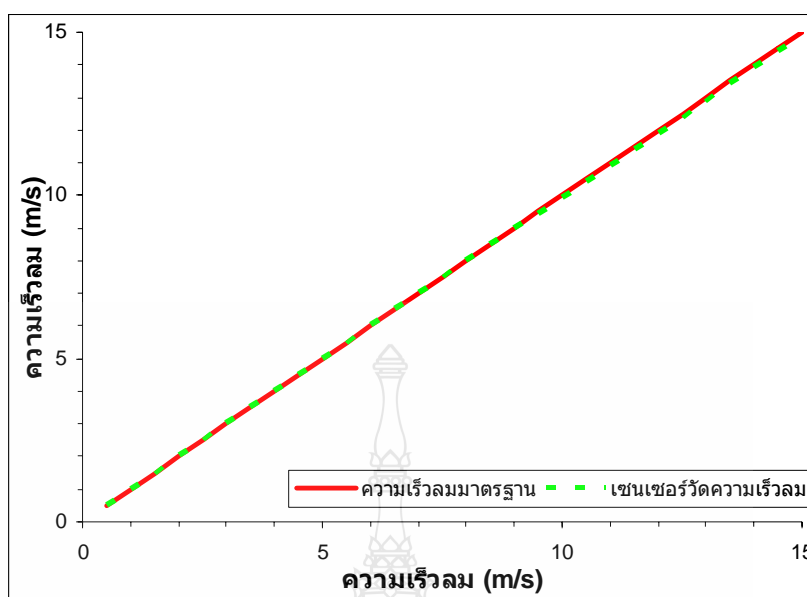
ภาพที่ 4.7 ความผิดพลาดของเซนเซอร์อุณหภูมิตัวที่ 3 เฉลี่ยร้อยละ 0.8



ภาพที่ 4.8 ความผิดพลาดของเซ็นเซอร์อุณหภูมิตัวที่ 4 เฉลี่ยร้อยละ 0.5

4.3 ผลการทดสอบชุดวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน

เมื่อออกแบบและจัดสร้างชุดวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อนได้แล้ว ก็ได้้นำค่าที่อ่านและแสดงผล จากไมโครคอนโทรลเลอร์ มาสอบเทียบกับเครื่องวัดความเร็วลมมาตรฐาน โดยมีอุโมงค์ลมเป็นเครื่องทดสอบ ซึ่งสอบเทียบที่ความเร็วลมตั้งแต่ 0.5 m/s ถึง 15.0 m/s โดยในช่วงย่านต่ำกว่า 0.4 m/s เครื่องวัดความเร็วลมมาตรฐานไม่สามารถแสดงค่าได้ ดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ความผิดพลาดของเซนเซอร์วัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน เฉลี่ยร้อยละ 0.3

4.4 ผลการทดสอบการหาค่าดังสูญเสียนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

การทดสอบการหาค่าดังสูญเสียนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ทดสอบด้วยวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า เช่น การทดสอบค่าความต้านทาน, การทดสอบขณะไม่มีโหลด และการทดสอบการล๊อคโรเตอร์ เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์มาใส่ในวงจรสมมูล เพื่อคำนวณหาค่าดังสูญเสียนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าที่ทำการทดสอบทั้ง 2 ขนาดมีคุณสมบัติดังนี้

ขนาด 0.25 HP (186 W)

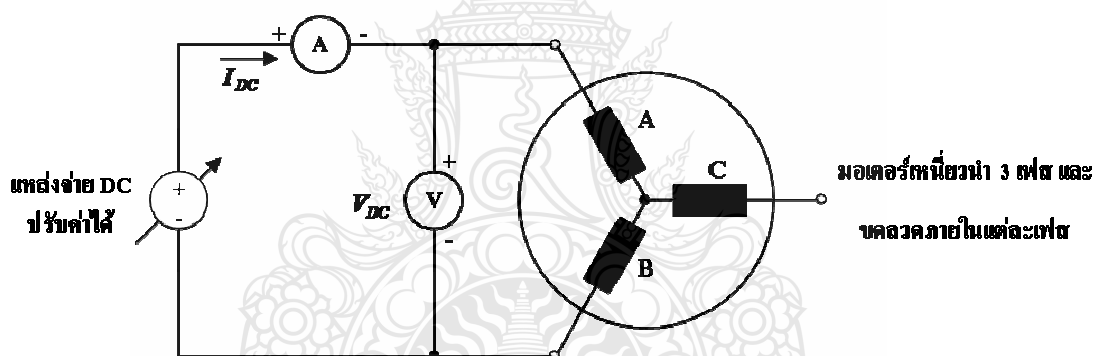
- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| - แรงดันไฟฟ้า 380 V | - กระแสไฟฟ้า 0.64 A |
| - ความเร็วรอบ 1,430 RPM | - ความถี่ 50 Hz |
| - ขั้วแม่เหล็ก 4 Pole | - ฉนวน Class B |
| - ระดับการป้องกัน IP44 | - การระบายความร้อน IC41 |
| - โรเตอร์ Class A | - มาตรฐานการใช้งาน S1 |

ขนาด 0.5 HP (373 W)

- แรงดันไฟฟ้า 380 V
- ความเร็วรอบ 1,410 RPM
- ขั้วแม่เหล็ก 4 Pole
- ระดับการป้องกัน IP44
- โรเตอร์ Class A
- กระแสไฟฟ้า 1.15 A
- ความถี่ 50 Hz
- ฉนวน Class B
- การระบายความร้อน IC41
- มาตรฐานการใช้งาน S1

4.4.1 การทดสอบหาค่าความต้านทาน

การทดสอบหาค่าความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์ นั้นทำได้โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงแบบปรับระดับแรงดันได้ เข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ แล้วทำการบันทึก ค่าแรงดันไฟฟ้า และ กระแสไฟฟ้า โดยทำรูปแบบนี้วนให้ครบทั้ง 3 ชุด ดังภาพที่ 4.10



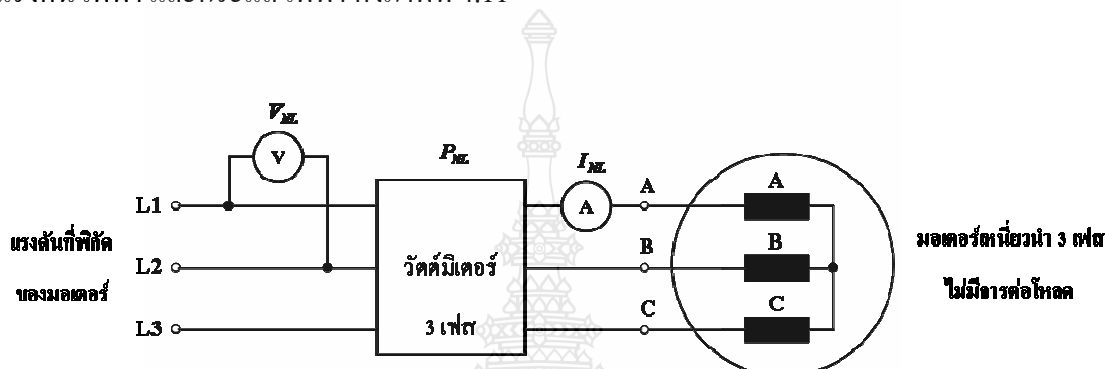
ภาพที่ 4.10 การทดสอบหาค่าความต้านทานสเตเตอร์

จากภาพที่ 4.10 ได้ค่าเฉลี่ยจากการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าคือ

- 1) มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.25 HP $V_{DC} = 44.3 \text{ V}$ และ $I_{DC} = 0.64 \text{ A}$
- 2) มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.5 HP $V_{DC} = 39.6 \text{ V}$ และ $I_{DC} = 1.15 \text{ A}$

4.4.2 การทดสอบขณะไม่มีโหลด

การทดสอบขณะไม่มีโหลดมีความประสงค์เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของสเตเตอร์ (P_{js}) กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความฝืดและแรงต้านลม (P_{fw}) กำลังสูญเสียที่แกนเหล็ก (P_{core}) แมกเนไตซิงรีซิสแตนซ์ (R_m) และ แมกเนไตซิงรีแอกแตนซ์ (X_m) ทำได้โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าตามพิกัด โดยที่ปลายเพลลาของมอเตอร์ไม่มีการต่อโหลดอยู่ และวัดกำลังไฟฟ้าอินพุต แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.11



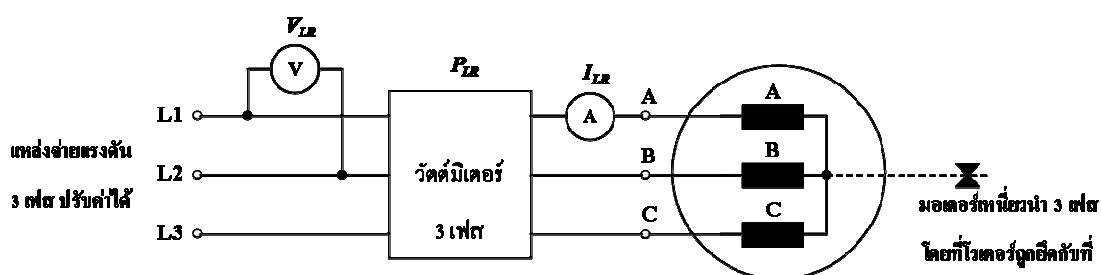
ภาพที่ 4.11 การทดสอบขณะไม่มีโหลด

จากภาพที่ 4.11 ได้ค่าจากการวัดกำลังงานอินพุต แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าคือ

- 1) มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.25 HP $P_{NL} = 42 \text{ W}$ $V_{NL} = 220 \text{ V}$ และ $I_{NL} = 0.483 \text{ A}$
- 2) มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.5 HP $P_{NL} = 54 \text{ W}$ $V_{NL} = 220 \text{ V}$ และ $I_{NL} = 0.783 \text{ A}$

4.4.3 การทดสอบโดยการยึดโรเตอร์อยู่กับที่

การทดสอบโดยการยึดโรเตอร์อยู่กับที่ที่มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าของรีแอกแตนซ์รวมในวงจรสมมูล $X = X_1 + X_2$ และค่าความต้านทานรวมในวงจรสมมูล $RT = R_1 + R_2$ ทำได้โดยการยึดโรเตอร์ไม่ให้เกิดการหมุน แล้วค่อยๆ ปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ให้มีค่ากระแสไฟฟ้าที่พิกัด จากนั้นทำการบันทึกค่า กำลังไฟฟ้าอินพุต แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.12

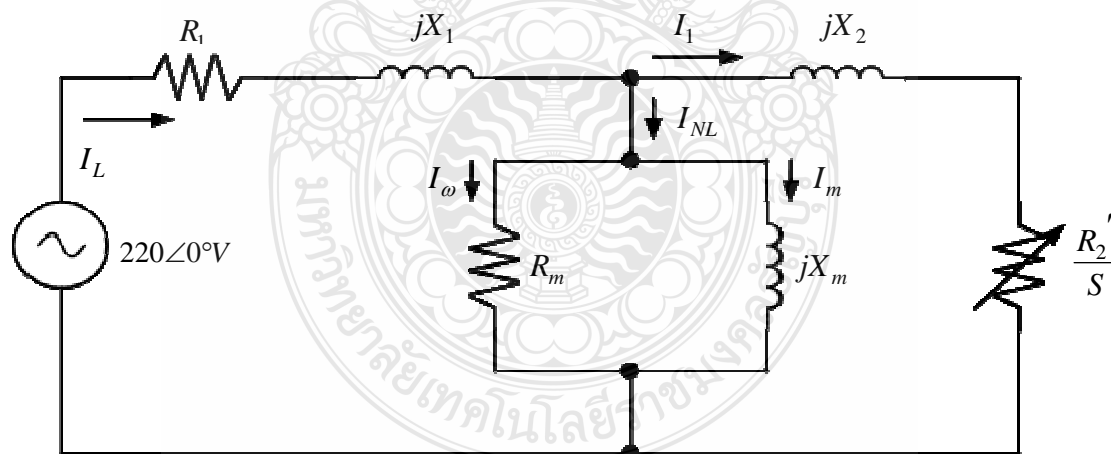


ภาพที่ 4.12 การทดสอบการยึดโรเตอร์อยู่กับที่

จากภาพที่ 4.12 ได้ค่าจากการวัดกำลังงานอินพุต แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าคือ

- 1) มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.25 HP $P_{LR} = 69 \text{ W}$ $V_{LR} = 60.3 \text{ V}$ และ $I_{LR} = 0.64 \text{ A}$
- 2) มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.5 HP $P_{LR} = 119 \text{ W}$ $V_{LR} = 51.4 \text{ V}$ และ $I_{LR} = 1.15 \text{ A}$

เมื่อได้ทำการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าครบทั้ง 3 วิธีแล้ว จึงนำค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าทั้ง 2 ขนาด โดยให้แหล่งจ่ายมีแรงดันไฟฟ้าและมุมเริ่มต้นที่ $220\angle 0^\circ \text{ V}$ (เพื่อง่ายต่อการคำนวณ) มาแทนลงในวงจรสมมูลดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

ค่าพารามิเตอร์ต่อเฟสของมอเตอร์ ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.25 HP	มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.5 HP
R_1 (Ω)	34.65	17.21
R_m (Ω)	3,203.8	2,543.95
R_2' (Ω)	29.64	12.79
jX_1 (Ω)	34.43	16.56
jX_2 (Ω)	34.43	16.56
jX_m (Ω)	422.25	264.85
I_{NL} (A)	0.483	0.783
I_ω (A)	0.063	0.081
I_m (A)	0.478	0.778

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาด 0.25 HP

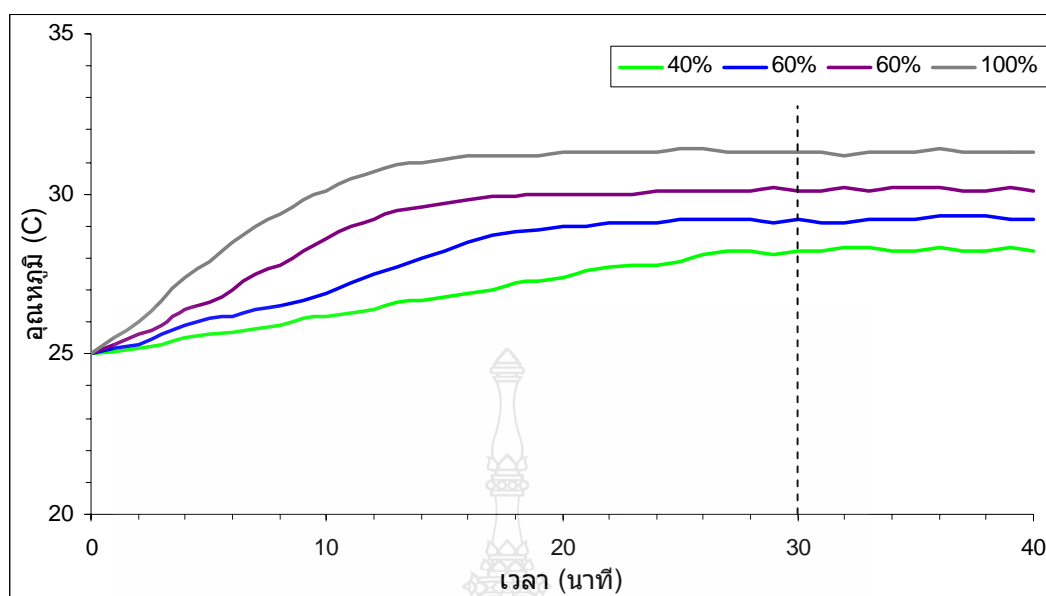
ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	พิกัดกำลังงานเอาต์พุต (ร้อยละ)					
	0	20	40	60	80	100
P_{in} (W)	68.44	100.96	130.38	169.66	208.22	236.77
P_{js} (W)	23.65	24.65	25.88	28.65	32.13	35.45
P_{core} (W)	12.71	12.71	12.71	12.71	12.71	12.71
P_r (W)	32.08	63.6	91.79	128.3	163.38	188.61
P_{jr} (W)	0.06	0.63	1.65	3.59	6.2	8.67
P_m (W)	32.02	62.97	90.14	124.71	157.18	179.94
P_{fw} (W)	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04
P_{out} (W)	26.98	57.93	85.1	119.67	152.14	174.9
P_{loss_total} (W)	41.46	43.03	45.28	49.99	56.08	61.87
pf	0.218	0.315	0.397	0.491	0.569	0.616
$Speed$ (RPM)	1,497	1,485	1,473	1,458	1,443	1,431
$Slip$	0.002	0.01	0.018	0.028	0.038	0.046

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาด 0.5 HP

ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	พิกัดกำลังงานเอาต์พุต (ร้อยละ)					
	0	20	40	60	80	100
P_{in} (W)	99.46	196.43	310	418.13	523.82	620.12
P_{js} (W)	31.33	33.95	40.62	50.39	63.61	78.11
P_{core} (W)	16.69	16.69	16.69	16.69	16.69	16.69
P_r (W)	51.44	145.79	252.69	351.05	443.52	525.32
P_{jr} (W)	0.1	1.74	6.06	12.63	21.28	31.51
P_m (W)	51.34	144.05	246.63	338.44	422.24	493.81
P_{fw} (W)	5.66	5.66	5.66	5.66	5.66	5.66
P_{out} (W)	45.68	138.39	240.97	332.78	416.58	488.15
P_{loss_total} (W)	53.78	58.04	69.03	85.37	107.24	131.97
pf	0.194	0.368	0.531	0.643	0.717	0.766
$Speed$ (RPM)	1,497	1,482	1,464	1,446	1,428	1,410
$Slip$	0.002	0.012	0.024	0.036	0.048	0.060

4.4.4 การทดสอบหาระยะเวลาของอุณหภูมิสมมูลของมอเตอร์

ตามที่ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีการทำงานแบบ S1 หรือชนิดการทำงานแบบโหลดต่อเนื่อง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมอเตอร์ไฟฟ้านั้น จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกแต่ในเมื่อเวลาผ่านไปการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะมีค่าน้อยลง และคงที่ หรือสมมูลในที่สุด ซึ่งระยะเวลาที่อุณหภูมิสมมูลนี้ โดยทั่วไปจะทำการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าใดๆ จะต้องทำการเดินมอเตอร์ไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 30 นาที [24] เพื่อให้มอเตอร์มีอุณหภูมิที่สมมูลก่อน โดยในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบระยะเวลาของอุณหภูมิสมมูลของมอเตอร์ด้วยเช่นกัน ซึ่งทดสอบกับมอเตอร์ขนาดพิกัด 0.5 HP ในภาระโหลดที่ร้อยละ 40 60 80 และร้อยละ 100 ผลการทดสอบเป็นดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 ระยะเวลาของอุณหภูมิสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดพิกัด 0.5 HP

จากภาพที่ 4.14 ได้ทำการติดตั้งเซนเซอร์อุณหภูมิจำนวน 3 ตัว ไว้ที่บริเวณด้านหน้าของโครงมอเตอร์ เพื่อวัดอุณหภูมิลมร้อนของมอเตอร์ ซึ่งตัวเซนเซอร์อุณหภูมิจะห่างจากผิวโครงมอเตอร์ประมาณ 0.5 ซม. [18] แล้วนำค่าที่วัดได้ทั้ง 3 ตัวมาเฉลี่ย โดยเริ่มเดินมอเตอร์ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 °C ที่ภาระโหลดร้อยละ 40 60 80 และร้อยละ 100 จะเห็นว่าเมื่อเริ่มเดินมอเตอร์ อุณหภูมิของลมร้อนจะเริ่มมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ในภาระที่ร้อยละ 40 อุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้นอย่างช้าๆ จนอุณหภูมิเริ่มนิ่งและมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อย หรือเรียกว่า “อุณหภูมิสมมูล” ในเวลาประมาณ 30 นาที และในภาระโหลดที่ค่าอื่นๆ ก็จะมีลักษณะเดียวกัน แต่จะเริ่มสมมูลที่เวลาต่างกัน ซึ่งจะมีค่าน้อยเมื่อภาระโหลดมีค่าสูงขึ้นในที่นี้ ภาระโหลดที่ร้อยละ 100 จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลมร้อนอย่างรวดเร็ว เวลาสมมูลของอุณหภูมิ จะอยู่ในนาทีที่ 18 เมื่อทราบว่าอุณหภูมิสมมูลของมอเตอร์จะสมมูลที่ 30 นาที (ที่ภาระโหลดร้อยละ 40) ก็จะทดสอบมอเตอร์ต่อไป โดยเริ่มทดสอบหลังจากมอเตอร์ทำงานแล้ว 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิมีความคงที่มากที่สุด

4.5 ผลการทดสอบการหาค่าสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยการประมวลผลและแสดงผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน

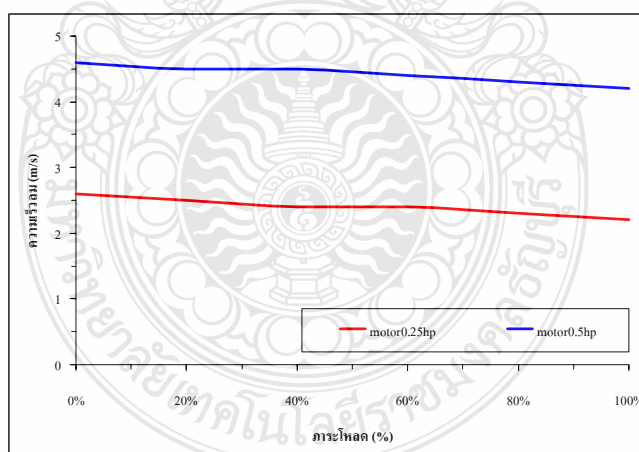
การทดสอบหาค่าสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส กระทำโดยการนำค่าต่างๆ ที่ได้มาเช่น อุณหภูมิลมเข้า อุณหภูมิลมร้อน ความเร็วลม มาเข้าในส่วนอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ และมีการเขียนโปรแกรมและสร้างสมการภายใน ดังในบทที่ 3 สมการที่ 3.9 คือ $P_{loss_total} = \rho AVC(T_o - T_i)$ โดยค่าของ $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $A = 0.00352 \text{ m}^2$ จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการประมวลผลและแสดงผลของค่าต่างๆ ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ได้จากการประมวลผลและแสดงผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อนขนาด 0.25 HP

ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	พิกัดกำลังงานเอาต์พุต (ร้อยละ)					
	0	20	40	60	80	100
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
$A \text{ (m}^2\text{)}$	0.00352	0.00352	0.00352	0.00352	0.00352	0.00352
$V \text{ (m/s)}$	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.2
$C \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}$	1005.16	1005.18	1005.20	1005.23	1005.25	1005.29
$T_o \text{ (}^\circ\text{C)}$	29.6	30.0	30.4	30.8	31.1	31.9
$T_i \text{ (}^\circ\text{C)}$	26.0	26.0	26.1	26.0	25.9	25.8
$P_{loss_total} \text{ (W)}$	39.7	42.4	43.8	48.9	50.7	56.9
$\eta \text{ (\%)}$	35.9	54.4	61.9	69.6	74.6	76.5
$Speed \text{ (RPM)}$	1,497	1,485	1,473	1,458	1,443	1,431
$Slip$	0.002	0.01	0.018	0.028	0.038	0.046

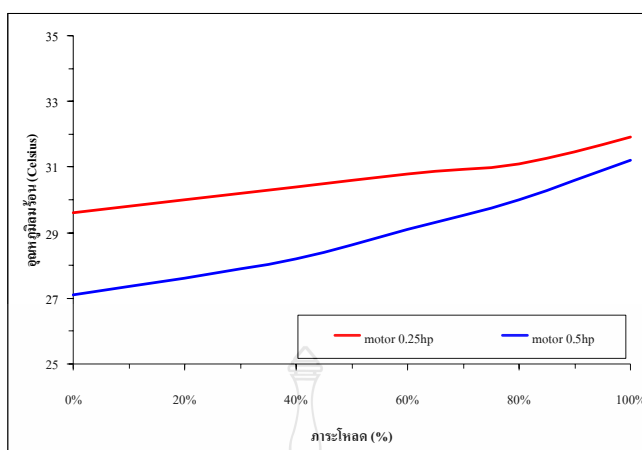
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ได้จากการประมวลผลและแสดงผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อนขนาด 0.5 HP

ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	พิกัดกำลังงานเอาต์พุต (ร้อยละ)					
	0	20	40	60	80	100
ρ (kg/m^3)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
A (m^2)	0.00352	0.00352	0.00352	0.00352	0.00352	0.00352
V (m/s)	4.6	4.5	4.5	4.4	4.3	4.2
C ($J/kg^\circ C$)	1005.01	1005.04	1005.07	1005.13	1005.18	1005.25
T_o ($^\circ C$)	27.1	27.6	28.2	29.1	30.0	31.2
T_i ($^\circ C$)	24.2	24.3	24.2	24.2	24.3	24.3
P_{loss_total} (W)	56.6	63	76.4	91.5	104.0	123.0
η (%)	39.7	62.7	69.5	70.9	74.1	75.2
Speed (RPM)	1,497	1,482	1,464	1,446	1,428	1,410
Slip	0.002	0.012	0.024	0.036	0.048	0.060



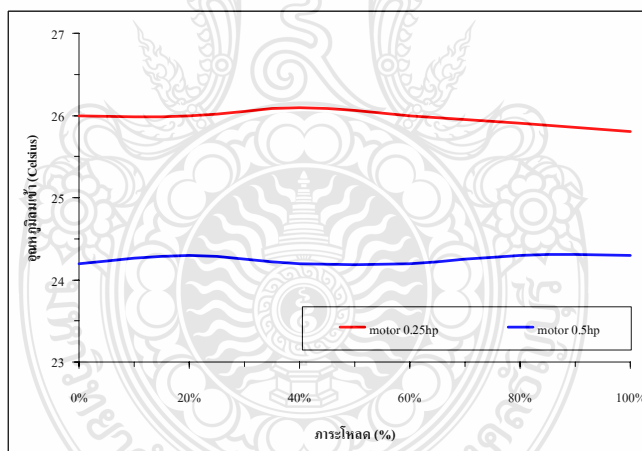
ภาพที่ 4.15 ความเร็วลมด้านเข้าของมอเตอร์

จากภาพที่ 4.15 ในขณะที่มอเตอร์ไม่มีโหลดความเร็วโรเตอร์จะหมุนเร็วมากเกือบเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ค่าความเร็วลมที่วัดได้จึงมีค่าสูง แต่เมื่อมอเตอร์มีโหลดเพิ่มมากขึ้น ค่าความเร็วลมก็จะลดลง



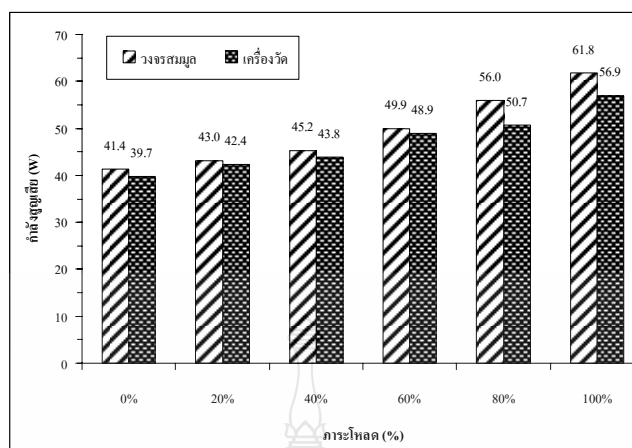
ภาพที่ 4.16 อุณหภูมิระบายความร้อนของมอเตอร์

จากภาพที่ 4.16 อุณหภูมิระบายความร้อนจะมีค่าสูงเพิ่มมากขึ้นตามภาระโหลด เช่นเดียวกัน



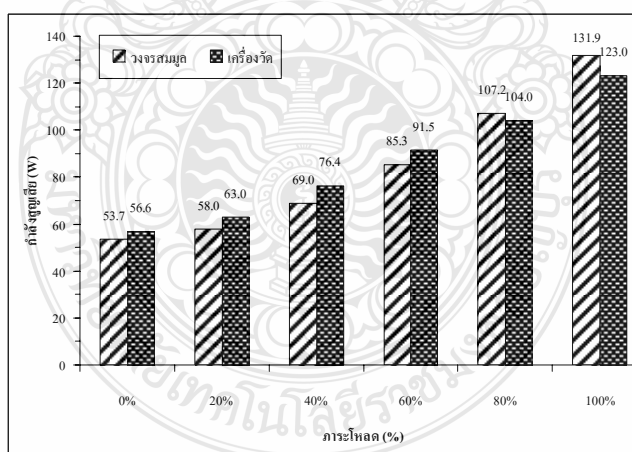
ภาพที่ 4.17 อุณหภูมิลมด้านเข้าของมอเตอร์

จากภาพที่ 4.17 อุณหภูมิด้านลมเข้าของมอเตอร์ทั้ง 2 ขนาด จะมีอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากการทดสอบนั้นมีการควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมที่ประมาณ 25 °C



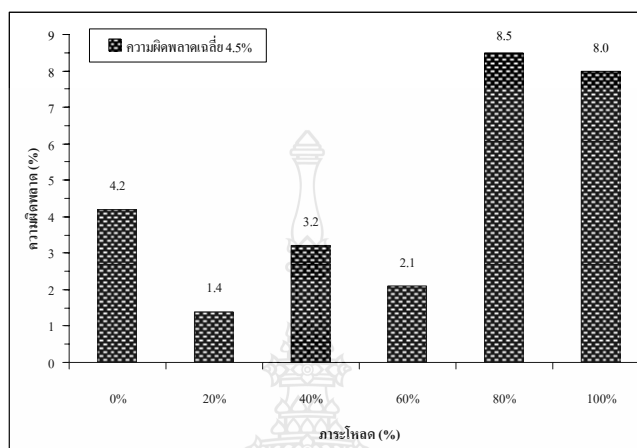
ภาพที่ 4.18 การประมวลผลและแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ของกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิผลระบายความร้อนของมอเตอร์ขนาด 0.25 HP

จากภาพที่ 4.18 เป็นการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 0.25 HP ระหว่างวิธีวงจรสมมูล และการประมวลผลและแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ของกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิผลระบายความร้อน



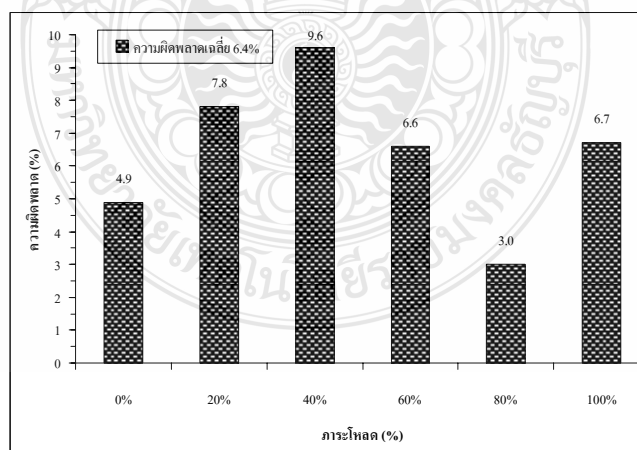
ภาพที่ 4.19 การประมวลผลและแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ของกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิผลระบายความร้อนของมอเตอร์ขนาด 0.5 HP

จากภาพที่ 4.19 เป็นการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียของมอเตอร์ขนาด 0.5 HP ระหว่างวิธีวงจรสมมูล และการประมวลผลและแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ของกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิแบบระบายความร้อน



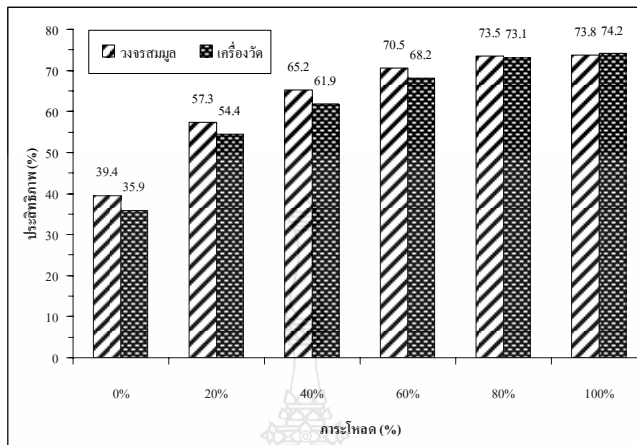
ภาพที่ 4.20 ความผิดพลาดในการประมวลผลและแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ของกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิแบบระบายความร้อน ของมอเตอร์ขนาด 0.25 HP

จากภาพที่ 4.20 จะมีความผิดพลาดเฉลี่ยด้านกำลังสูญเสีย ของมอเตอร์ขนาด 0.25 HP อยู่ที่ร้อยละ 4.5 ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้



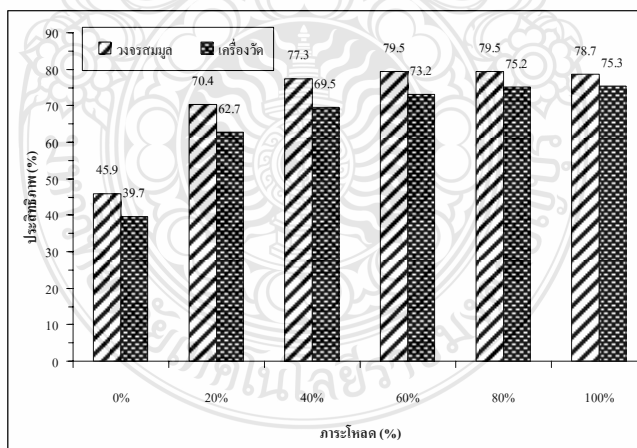
ภาพที่ 4.21 ความผิดพลาดในการประมวลผลและแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ของกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิแบบระบายความร้อน ของมอเตอร์ขนาด 0.5 HP

จากภาพที่ 4.21 จะมีความผิดพลาดเฉลี่ยด้านกำลังสูญเสีย ของมอเตอร์ขนาด 0.5 HP อยู่ที่ร้อยละ 6.4 ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้



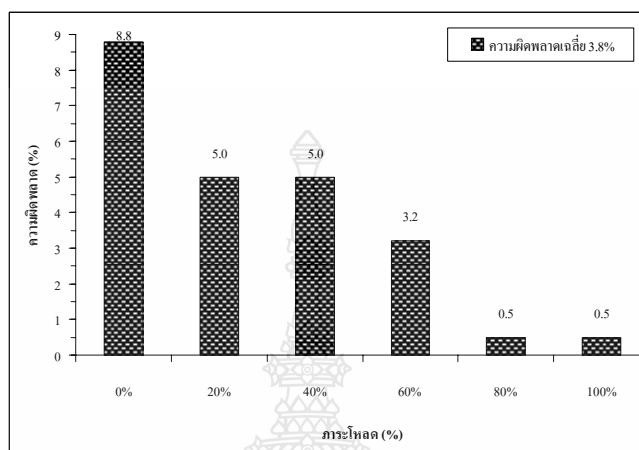
ภาพที่ 4.22 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 0.25 HP

จากภาพที่ 4.22 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 0.25 HP ระหว่างวิธีวงจรสมมูล และการประมวลผลและแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ของกำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิระบายความร้อน



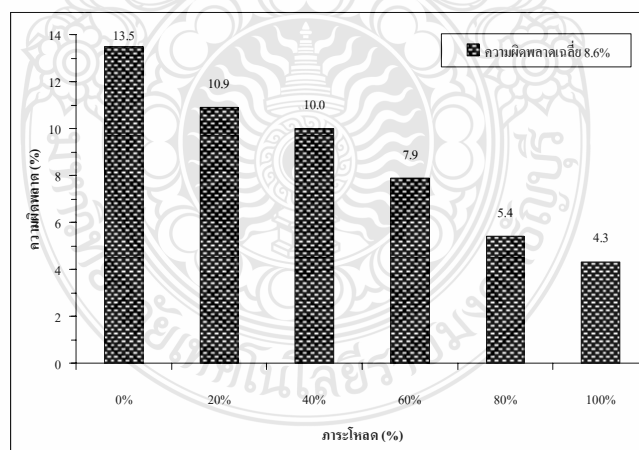
ภาพที่ 4.23 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 0.5 HP

จากภาพที่ 4.23 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 0.5 HP ระหว่างวิธี วงจรสมมูล และการประมวลผลและแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ของกำลังสูญเสียรวมของ มอเตอร์ โดยเทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน



ภาพที่ 4.24 ความผิดพลาดด้านประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 0.25 HP

จากภาพที่ 4.24 จะมีความผิดพลาดเฉลี่ยด้านประสิทธิภาพ ของมอเตอร์ขนาด 0.25 HP อยู่ที่ ร้อยละ 3.8 ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้



ภาพที่ 4.25 ความผิดพลาดด้านประสิทธิภาพของมอเตอร์ขนาด 0.5 HP

จากภาพที่ 4.25 จะมีความผิดพลาดเฉลี่ยด้านประสิทธิภาพ ของมอเตอร์ขนาด 0.5 HP อยู่ที่ ร้อยละ 8.6 ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิผลรวมความร้อน ซึ่งมีกระบวนการในการปฏิบัติ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การออกแบบชุดวัดอุณหภูมิ ด้วยไอซีดิจิตอล เบอร์ LM335AZ ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความละเอียดที่ $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ เช่นเดียวกันแต่สามารถปรับตั้งความแม่นยำได้จากขา Adj ตัวถังเป็นแบบ TO-92 อีกทั้งยังมีขนาดเล็กสามารถติดตั้งในส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ได้อย่างสะดวก และสามารถให้แรงดันเอาต์พุตเป็นแบบเชิงเส้นได้อีกด้วย ส่วนที่ 2 การออกแบบการวัดความเร็วลมเบื้องต้นได้ทำการสำรวจเครื่องวัดความเร็วลมที่จำหน่ายในบริษัทชั้นนำทั่วไป พบว่าราคาค่อนข้างสูง จึงได้มีการนำพัดลมระบายความร้อน มาทดสอบการวัดความถี่ของการหมุนของใบพัด ซึ่งได้ทำการเลือกใช้พัดลมระบายความร้อนชนิดที่มีแบร์ริง เพื่อให้โรเตอร์มีความถี่มีความถี่น้อย และทำการถอดแกนเหล็ก ขดลวด และแม่เหล็กถาวรออก เพื่อให้ไม่มีผลของอำนาจแม่เหล็กในการหมุน และทำการติดตั้งฟลักซ์มิเตอร์เซ็นเซอร์ทางด้านท้ายของพัดลมระบายความร้อน เพื่อตรวจจับความถี่ในการหมุน ซึ่งผลการทดสอบพบว่าสามารถวัดความเร็วลมได้ตั้งแต่ 0.4 m/s และสูงสุดอยู่ที่ 20.0 m/s (ชุดอุโมงค์ลมสามารถจำลองพลังงานลมได้สูงสุด 20.0 m/s) โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยที่ร้อยละ 0.3 และมีความละเอียดที่ 0.1 m/s ส่วนที่ 3 การจัดสร้างอุโมงค์ลมเบื้องต้นได้ทำการสำรวจการสอบเทียบเครื่องวัดความเร็วลมจากสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ด้วยวิธีการสอบเทียบภายในอุโมงค์ลม ซึ่งการสอบเทียบดังกล่าวมีราคาสูงในการทดสอบเครื่องมือวัด จึงได้ทำการจัดสร้างชุดอุโมงค์ลม จากท่อ PVC ขนาด 2.5 นิ้ว โดยมีการติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมมาตรฐานจำนวน 2 ตัว ไว้ในด้านลมเข้า และลมออกของอุโมงค์ลม ซึ่งมีการจำลองพลังงานลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงปลายเพลลาติคใบพัดชนิดกรงกระรอก ควบคุมความเร็วด้วยสัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถจำลองความเร็วลมได้ตั้งแต่ $0.1 - 20.0\text{ m/s}$ (เทียบกับเครื่องวัดความเร็วลมมาตรฐานตัวที่อยู่ด้านลมเข้าของอุโมงค์ลม)

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ถูกนำมาใช้ในการแทนค่าในสมการที่ 3.9 โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล และแสดงค่าของกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส ผ่านทางจอ LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด โดยมีการทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 0.25 HP และ 0.5 HP ซึ่งทดสอบใน

ภาระโหลดที่ร้อยละ 0 20 40 60 80 และร้อยละ 100 มีการจำลองโหลดชุดอิเล็กทรอนิกส์โคโนนาโมมิเตอร์ ด้วยการเชื่อมต่อแบบสายพาน โดยไม่ได้คิดประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง ซึ่งอาจจะเป็นผลให้เกิดความผิดพลาดเช่นกัน

การประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน สามารถแสดงผลของกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส ได้โดยไม่ต้องปลดมอเตอร์ออกจากระบบขณะทำงาน

สรุปผลการทดสอบ

1) การออกแบบสร้างชุดวัดอุณหภูมิด้วยไอซี เบอร์ LM335AZ จำนวนทั้งหมด 4 ตัว ได้ใช้ช่วงที่มีความเป็นเชิงเส้นที่ 0 – 70 °C และ ปรับแต่งความละเอียดสูงสุดที่ 0.1 °C และความผิดพลาดเฉลี่ยทั้ง 4 ตัวดังนี้ ตัวที่ 1 เฉลี่ยร้อยละ 1.0 ตัวที่ 2 เฉลี่ยร้อยละ 1.1 ตัวที่ 3 เฉลี่ยร้อยละ 0.8 และ ตัวที่ 4 เฉลี่ยร้อยละ 0.5 โดยมีการนำตัวที่ 1 ถึง 3 มาเฉลี่ยกัน ได้ร้อยละ 0.9 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

2) การออกแบบสร้างชุดวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน จำนวน 1 ตัว ได้สอบเทียบกับอุโมงค์ลมที่มีการจำลองพลังงานลมได้ตั้งแต่ 0.1 – 20.0 m/s โดยมีความถี่ที่ตรวจจับการหมุนเป็น 10 เท่า ของความเร็วลม ตัวอย่างเช่น ที่ความเร็วลมเท่ากับ 5.0 m/s จะตรวจจับความถี่ได้ 50 Hz ดังนั้นเมื่อนำค่าความถี่มาหารด้วย 10 แล้วทำการเปลี่ยนหน่วยจาก Hz เป็นหน่วย m/s ก็ได้ค่าที่มีแม่นยำ ตลอดตั้งแต่ความเร็วลม 0.5 – 15.0 m/s โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยที่ร้อยละ 0.3 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

3) การประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน สามารถแสดงค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส ได้โดยมีความละเอียดที่ 0.1 W สามารถแสดงผลได้สูงสุด 9,999.9 W โดยทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 0.25 HP และขนาด 0.5 HP ซึ่งได้ความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 4.5 และร้อยละ 6.4 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน ควรติดตั้งในช่วงด้านบนของมอเตอร์ เพราะความร้อนของมอเตอร์จะถูกระบายขึ้นด้านบนของโครงมอเตอร์ ไม่ควรติดตั้งด้านใต้เนื่องจากค่าของอุณหภูมิจะต่างจากด้านบนมาก ซึ่งเมื่อนำมาประมวลผลก็จะผิดพลาดมากเช่นกัน

5.2.2 การวัดกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส จะต้องเดินมอเตอร์มาแล้วไม่ต่ำกว่า 30 นาที เพื่อให้มอเตอร์มีอุณหภูมิคงที่ และเกิดเสถียรภาพในการประมวลผล

5.2.3 การติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมควรจะให้ได้ศูนย์กลางของพัดลมระบายความร้อนของมอเตอร์ และอาจมีการป้องกันลมรั่วจากการที่ฝาครอบพัดลมไม่เรียบ ซึ่งอาจเกิดจากการบุบ หรือยุบ

5.2.4 การส่งกำลังงานของมอเตอร์ด้วยสายพานกับอิเล็กทรอนิกส์โรโตนาโมมิเตอร์ ควรมีการส่งกำลังงานที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เช่น การต่อแบบคัปปลิง (ต่อปลายเพลลาทั้ง 2 ตัวเข้าด้วยกัน) และมีอิเล็กทรอนิกส์โรโตนาโมมิเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง

5.2.5 การประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน สามารถใช้ได้กับมอเตอร์ที่มีการระบายความร้อนแบบ IC41 ของมาตรฐาน IEC-34-6 หรือ Totally Enclosed Fan Cooled (TEFC) ของมาตรฐาน NEMA MG1-1.26 คือมอเตอร์ปิดมิดชิดระบายความร้อนที่ผิวเฟรมด้วยพัดลมระบายความร้อนด้วยอากาศรอบข้าง และระบายความร้อนด้วยลมภายในตัวเอง



รายการอ้างอิง

- [1] ฟิรพงค์ ลิมประสิทธิ์วงศ์, **มาตรฐานวิธีการระบายความร้อนมอเตอร์ Standard Type of Motor Cooling (IC)**, บริษัท ไทนามิก จำกัด, 2003.
- [2] ไชยชาญ หินเกิด, **เครื่องกลไฟฟ้า 2**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2545.
- [3] Gilbert A. McCoy, Todd Litman, John G. Douglass, **Energy – Efficient Electric Motor Selection Handbook**. Washington State Energy Office Olympia, 1993.
- [4] ประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ, **ทฤษฎีเครื่องกลไฟฟ้า 2**. บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด, 2544.
- [5] ธวัชชัย อัครวิบูลย์กุล, **เครื่องกลไฟฟ้า 2 (สขฟ.1442)**. สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ, 2533.
- [6] พุทธพร เสวตสกุลานนท์, “การวิเคราะห์และศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบมาตรฐาน และมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูง” **การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1**, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, 2550.
- [7] มอก.867-2550, **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส: ประสิทธิภาพขั้นต่ำ**. สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2550.
- [8] ฟิรพงค์ ลิมประสิทธิ์วงศ์, **มาตรฐานการป้องกันมอเตอร์ Degrees of Protection (IP standard)**. บริษัท ไทนามิก จำกัด. 2003
- [9] ฟิรพงค์ ลิมประสิทธิ์วงศ์, **มาตรฐานการใช้งานมอเตอร์ Standard Motor duty**. บริษัท ไทนามิก จำกัด, 2003.
- [10] ชำนาญ อุ่นเสียม, รัฐพล ศรีสุวรรณ, บุษยวรรณ บัวแก้ว, **เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ, ปริมาณอินพุตปริญาอุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์**, 2551.
- [11] นคร ภัคดีชาติ, ชัยวัฒน์ ลิมพรจิตรวิไล, **คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller เบื้องต้นด้วยภาษา C กับ MPLAB C 30**. บริษัท อินโนโวลิตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด.
- [12] ธีภูพล แจ่มจดี, วันชัย ทรัพย์สิงห์, “การลดอุณหภูมิระบายความร้อนของอินดักชั่นมอเตอร์ โดยการบังคับทิศทางลม,” **การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 9**, 2554. หน้า 23.
- [13] **เครื่องมือวัดความเร็วลม (Online)**, 2547. Available:
<http://61.19.202.164/works/smtweb52/B05/tools.html> (7 January 2012).

- [14] ผศ.ดร.ชนาคม สุนทรชัยนาคแสง, การถ่ายเทความร้อน. บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2547. หน้า 4 – 8.
- [15] รัชต์ มั่งมีชัย, เปรมศักดิ์ ปรีชา, ชีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์, “การหาค่าลึงไฟฟ้าสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมทางไฟฟ้า ครั้งที่ 28, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2548. หน้า 565 – 568.
- [16] IEEE Standard 112-1996 (Method B), **IEEE Standard Test Procedure for Poly phase Induction Motors and Generators (1997)**. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE), New York, 1997.
- [17] เปรมศักดิ์ ปรีชา, “เทคนิคการหาค่าลึงสูญเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมทางไฟฟ้า ครั้งที่ 29, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2549. หน้า 141 – 144.
- [18] ชนภวิวัฒน์ ภูมิภาค, ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, “การทำนายสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายไม่เป็นไซน์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29, หน้า 117 – 120.
- [19] ผศ.วรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์, ออปแอมป์และการประมวลผลสัญญาณอนาล็อก. ส.ส.ท.เยาวชน, 2545.
- [20] Robert Repas, **Brushless dc fan motor (Online)**, 2007. Available: http://mechatronic-design.com/features/keeping_cool (7 January 2012).
- [21] คุณิต งามรุ่งโรจน์, ธวัชชัย จิตต์สนธิ, สันติ หวังนิพนพาน โด, “เครื่องวัดความเร็วลมและทิศทางการไหล” การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 3, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ. 2554. หน้า 286 – 290.
- [22] ณัฐพล แจ้งจดี, วันชัย ทรัพย์สิงห์, “การศึกษาการวัดความเร็วลม ด้วยพัดลมระบายความร้อน” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, 2555. หน้า 11.
- [23] Yildiz Bayazitoglu, M.Necati Ozisik, **Elements of Heat Transfer**. McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [24] พีรพงศ์ ลิ้มประสิทธิ์วงศ์, อุณหภูมิกับการใช้งานมอเตอร์ **Motor with Temperature Utilization**. บริษัท ไทนามิก จำกัด, 2005.



ภาคผนวก



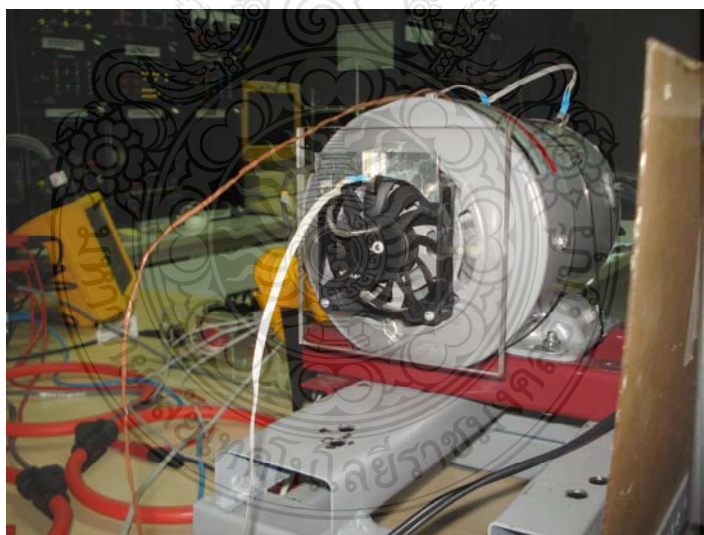
ภาคผนวก ก

รูปการติดตั้งเซนเซอร์และการทดสอบ

2) เซนเซอร์วัดความเร็วลม จะใช้การประยุกต์และดัดแปลงพัดลมระบายความร้อน มาใช้แทน เซนเซอร์วัดความเร็วลม โดยมีการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับความถี่ในการหมุนของใบพัด



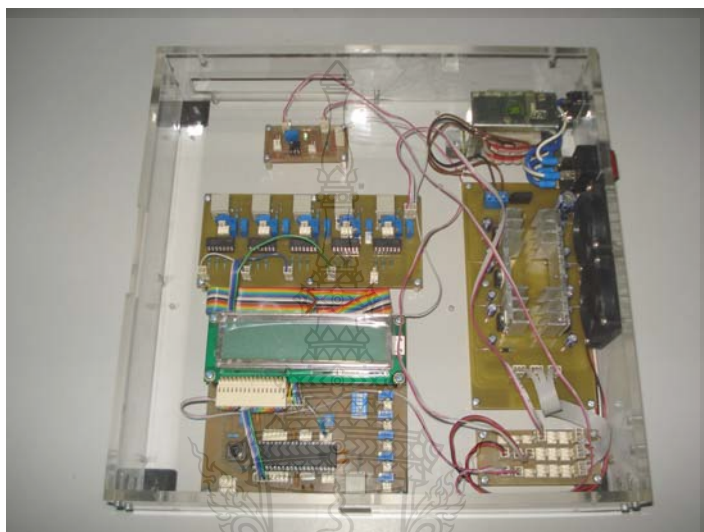
ภาพที่ ก.3 การนำเซนเซอร์ชนิด อินดักทีฟ มาตรวจจับความถี่ของใบพัด



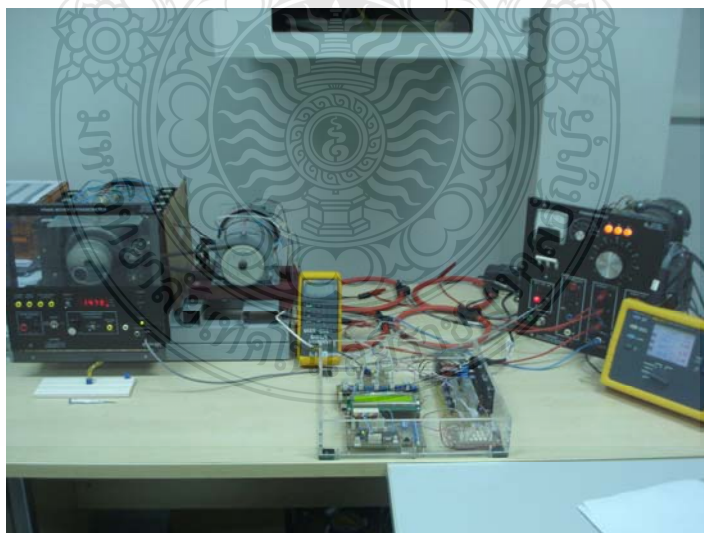
ภาพที่ ก.4 การติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วลม บริเวณกึ่งกลางของด้านท้ายมอเตอร์

การทดสอบ

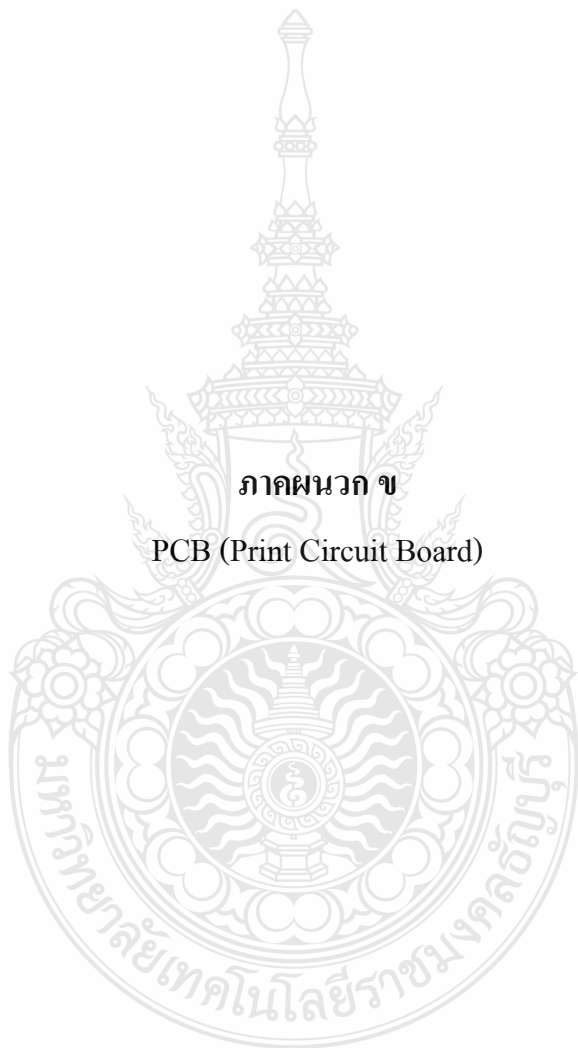
การทดสอบการประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการวัดอุณหภูมิลมระบายความร้อน จะทดสอบกับมอเตอร์ จำนวน 2 ขนาด คือ 186 วัตต์ (0.25 HP) และ 373 วัตต์ (0.5 HP)



ภาพที่ ก.5 ชุดประมวลผล พร้อมทั้งแสดงผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส



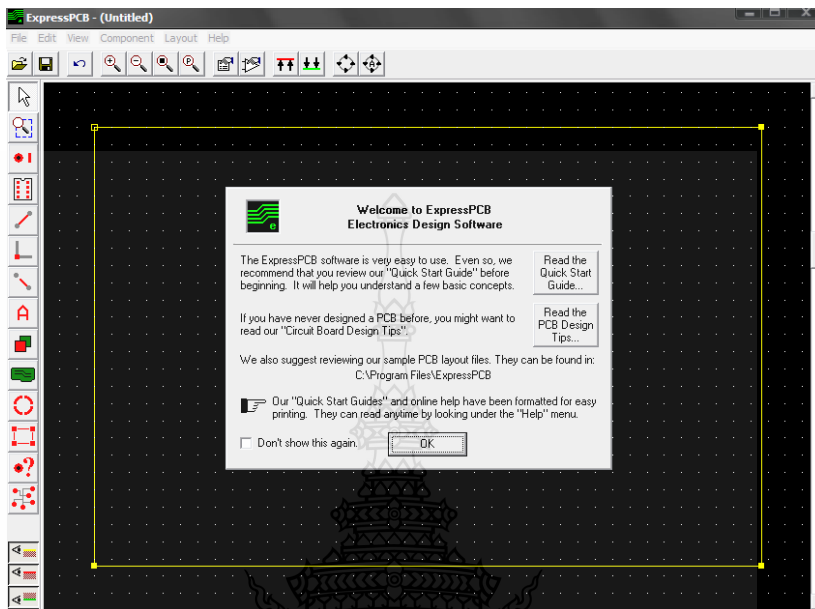
ภาพที่ ก.6 การทดสอบการประมวลผลกำลังสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยมีการจำลองสภาวะโหลดที่ร้อยละ 0 20 40 60 80 และร้อยละ 100



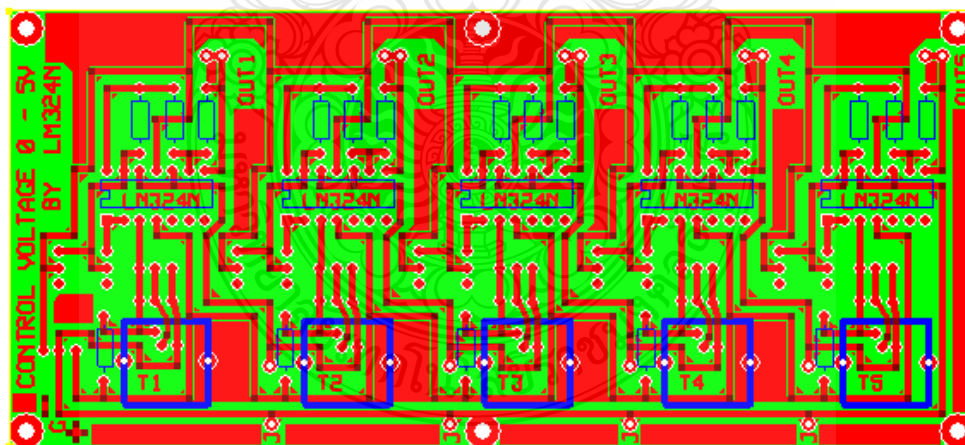
ภาคผนวก ข
PCB (Print Circuit Board)

PCB (Print Circuit Board)

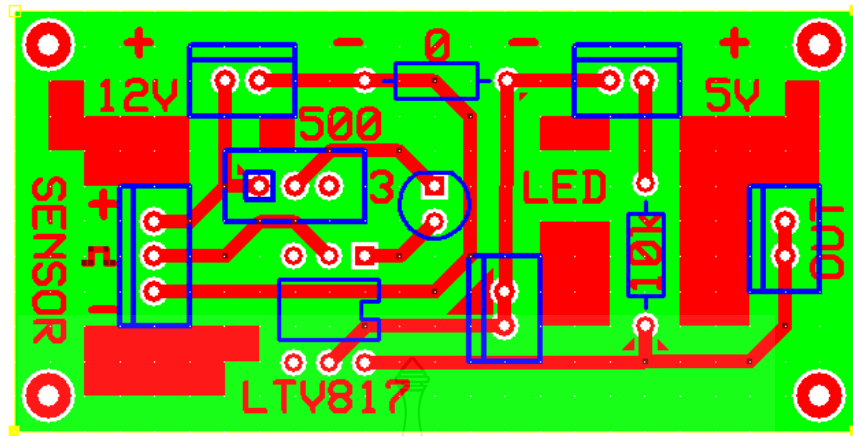
ลายวงจรพิมพ์นั้นจะทำการออกแบบบนโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งก็คือโปรแกรม Express PCB



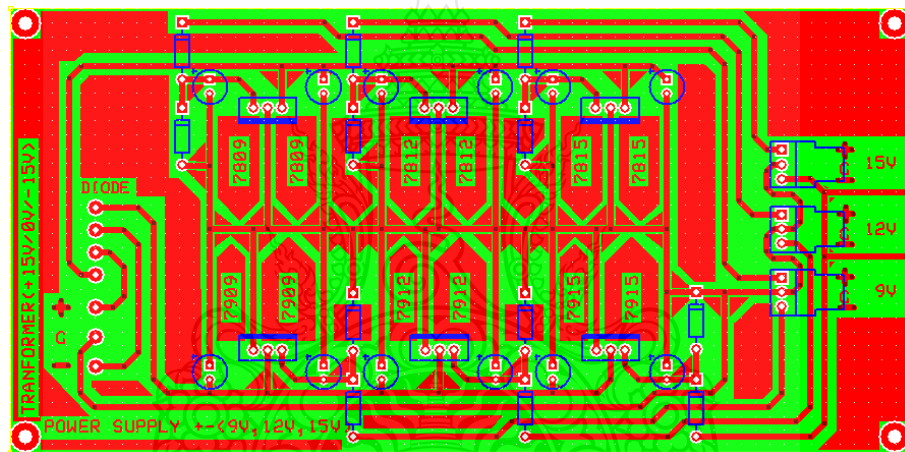
ภาพที่ ข.1 โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับออกแบบลายวงจรพิมพ์ Express PCB



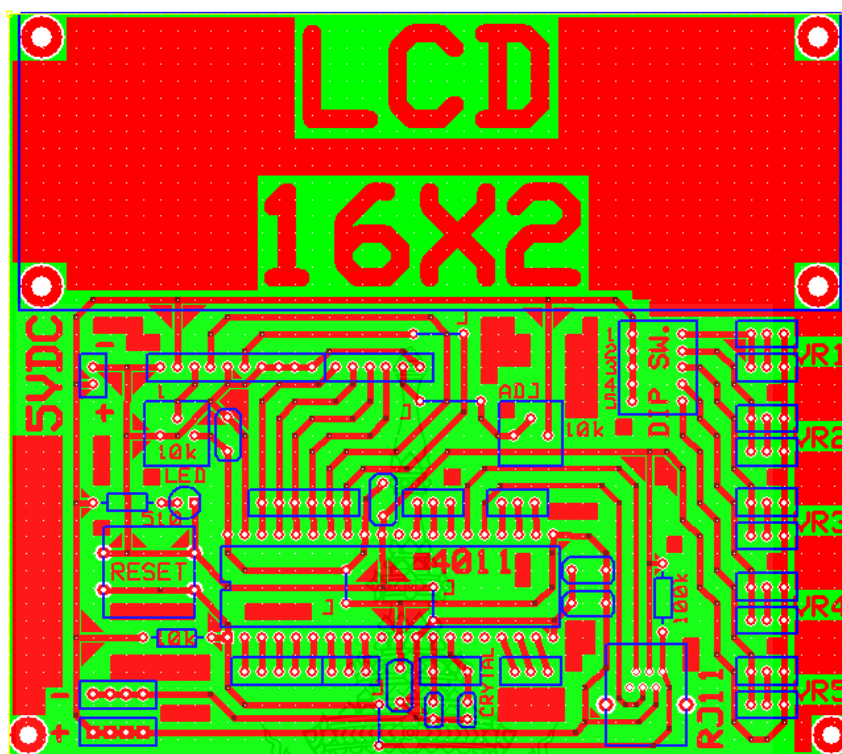
ภาพที่ ข.2 ลายวงจรพิมพ์ชุดวัดอุณหภูมิดิจิตอลด้วย ไอซี LM335AZ



ภาพที่ ข.3 ลายวงจรพิมพ์ชุดวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน



ภาพที่ ข.4 ลายวงจรพิมพ์ภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ ข.5 ลายวงจรพิมพ์ชุดประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD





Program

```

//=====
// This project is The Relax Project in Thailand
// USE MPLAB IDE V7.21
// Compiler = MPLAB C30 V1.32
// CPU dsPIC30f4011
// XTAL=7.3728 Mhz Config Clock At XT_PLL*16
// LCD 16*2 + back light
// setup Heap_Size=512
//=====
//=====
#include <p30f4011.h>
#include <stdio.h>
#include <yvals.h>
#include <stdlib.h>
#include <adc10.h>
#include <incap.h>
#include <timer.h>

_FOSC(CSW_FSCM_OFF & XT_PLL16);
_FWDT(WDT_OFF);
_FBORPOR(PBOR_OFF & MCLR_EN);
_FGS(CODE_PROT_OFF);

static unsigned char str_buf[30]; // buffer for display_lcd,Stream Char,Other putc Function
unsigned long freq_count,frequency; // Count frequency variable
float V=0;
float Time=0;
float C=0;
float PLOSS=0;
int count=0; // Count time variable

```

```

#include "lcd_dspic.c"
#include "my_func.c"

#define FCY 7372800          // Instruction cycle rate (Osc x PLL / 4)
#define pi      3.1415926535 // ให้ pi เท่ากับ 3.1415926535
#define Div     0.0693359375 // 71/1024

#define fac 10.0
#define P 1.2
#define A 0.00352

//-----//
//----- Interrupt service routine Timer 1 every 5 ms -----//
//-----//

void _ISR_T1Interrupt(void)
{
    IFS0bits.T1IF = 0;          // Clear Timer interrupt flag
    WriteTimer1(0);           // Clear count value at TMR1 register
    count++;
    if(count>=780)            // Block for 1 sec
    {
        count = 0;             // Clear counter value
        frequency = freq_count; // Keep frequency count value
        V = freq_count/fac;
        freq_count = 0;        // Clear frequency count value
    }
}

//-----//
//-----Interrupt service routine Capture every Falling edge -----//
//-----//

void _ISR_IC1Interrupt(void)
{
    IFS0bits.IC1IF = 0;        // Clear IC1 interrupt flag
    freq_count++;              // Increase frequency counter value 1 time
}

```

```

//-----//
//----- Function display screen title -----//
//-----//

void display_title()
{
    lcd_init();
    lcd_gotoxy(1,1);
    out_lcd(sprintf(str_buf,"MOTOR POWER LOSS"));
    lcd_gotoxy(1,2);
    out_lcd(sprintf(str_buf,"  DETECTOR  "));
    delay_ms(1000);
}
//-----//
//----- Function initialize ACD module -----//
//-----//

void adc_init()
{
    unsigned int Channel, PinConfig, Scanselect, Adcon3_reg, Adcon2_reg,
    Adcon1_reg;

    ADCON1bits.ADON = 0; // Turn off ADC

    Channel = ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN0 & // Channel 0 positive input select AN0
              ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN1 & // Channel 0 positive input select AN1
              ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN2 & // Channel 0 positive input select AN2
              ADC_CH0_POS_SAMPLEA_AN3 & // Channel 0 positive input select AN3
              ADC_CH0_NEG_SAMPLEA_NVREF ; // Channel 0 negative VREF

    SetChanADC10(Channel); // Set channel
configuration
    ConfigIntADC10(ADC_INT_DISABLE); // Disable interrupt for ADC
    PinConfig = ENABLE_AN0_ANA & // Enable AN0-AN3 analog port
               ENABLE_AN1_ANA &
               ENABLE_AN2_ANA &
               ENABLE_AN3_ANA ;

```

```

Scanselct      = SKIP_SCAN_AN4 &           // Scan for AN0-AN3
                SKIP_SCAN_AN5 &
                SKIP_SCAN_AN6 &
                SKIP_SCAN_AN7;

Adcon3_reg     = ADC_SAMPLE_TIME_10 &     // Sample for 10 time
                ADC_CONV_CLK_INTERNAL_RC & // Internal Clock
                ADC_CONV_CLK_13Tcy;

Adcon2_reg     = ADC_VREF_AVDD_AVSS &     // Vref at Vdd and Vss
                ADC_SCAN_ON &            // Enable scan for ADC
                ADC_ALT_BUF_OFF &       // Disable alternate buffer
                ADC_ALT_INPUT_OFF &     // Disable alternate input
                ADC_CONVERT_CH0&       // Select CH0 convert
                ADC_SAMPLES_PER_INT_16;  // 16 sample between interrupt

Adcon1_reg     = ADC_MODULE_ON &         // Enable module ADC
                ADC_IDLE_CONTINUE &     // ADC run on idle mode
                ADC_FORMAT_INTG &      // Output value integer format
                ADC_CLK_MANUAL &       // ADC manual clock
                ADC_SAMPLE_SIMULTANEOUS & // ADC sampling simultaneous
                ADC_AUTO_SAMPLING_ON;   // ADC auto sampling

OpenADC10(Adcon1_reg, Adcon2_reg, Adcon3_reg, PinConfig, Scanselct); // Turn on ADC module

}

//-----//
//----- Function for Initial Input Capture -----//
//-----//

void capture_init()
{
    unsigned int match_value;
    ConfigIntTimer1(T1_INT_PRIOR_1 & T1_INT_ON); // Timer 1 Enable interrupt

```



```

/***** Configuration Timer 1 for interrupt every 5 ms *****/
WriteTimer1(0); // Timer 1 clear period
match_value = 36864; // Timer1 interval 5 ms
OpenTimer1(T1_ON &T1_GATE_OFF & T1_IDLE_STOP &
T1_PS_1_1 & T1_SYNC_EXT_OFF &T1_SOURCE_INT, match_value);
/***** Configuration IC1 *****/
ConfigIntCapture1(IC_INT_PRIOR_2 & IC_INT_ON); // Enable IC1 interrupt
T3CON = 0x8000; // Start timer 3

OpenCapture1(IC_IDLE_STOP & // Capture disable in idle mode
             IC_TIMER3_SRC & // Timer 3 count for IC1
             IC_INT_1CAPTURE & // Capture per 1 count for interrupt
             IC_EVERY_FALL_EDGE); // Capture every falling edge only
}

//=====
//=====

int main(void) //main program start here
{
    float TEMP1=0;
    float TEMP2=0;
    float TEMP3=0;
    float TEMP4=0;
    unsigned result[4], old_result[4],i; // Keep data
    unsigned int Vb = 0;
    unsigned int Z = 0;
    float Tavg=0;
    Vb = 71;
    Z = 1023;

    ADPCFG = 0x0FFF; // Set analog off (RB0 - RB 11)
    TRISB = 0xFFFF; // ฐานสองจะได้ 1111 1111 1111 1111 (กำหนดอินพุต/เอาต์พุต)
    0=Output,1=Input

```

```

//-----In put-----//
LATC = 0x0000; //ฐานสองจะได้ 0000 0000 0000 0000 (กำหนดอินพุต/เอาต์พุต)
0=Output,1=Input
TRISC = 0xFFFF; //ฐานสองจะได้ 1111 1111 1111 1111 (กำหนดอินพุต/เอาต์พุต)
0=Output,1=Input
LATF = 0x0000; //ฐานสองจะได้ 0000 0000 0000 0000 (กำหนดอินพุต/เอาต์พุต)
0=Output,1=Input
TRISF = 0xFFFF; //ฐานสองจะได้ 1111 1111 1111 1111 (กำหนดอินพุต/เอาต์พุต)
0=Output,1=Input
//-----Out put-----//
// LATD = 0x0000; //ฐานสองจะได้ 0000 0000 0000 0000 (กำหนดอินพุต/เอาต์พุต)
0=Output,1=Input
// TRISD = 0xFFFF0; //ฐานสองจะได้ 1111 1111 1111 0000 (กำหนดอินพุต/เอาต์พุต)
0=Output,1=Input

init_lcd_port(); // setup port to drive lcd
lcd_init(); //initial lcd to 4-bit mode
adc_init();
capture_init(); // Initial IC1
display_title();
clr_lcd();

while(1)
{
for(i=0;i<4;i++) // Loop 4 time for read ADC keep to result array
{
ADCON1bits.SAMP = 1; // Start Sampling
while(!ADCON1bits.SAMP); // Wait for End Sampling process
ConvertADC10(); // Convert ADC
while(ADCON1bits.SAMP); // Ensure for Sampling success
// while(BusyADC10()); // Ensure for Sampling success
delay_ms(5); // Delay for display
result[i] = ReadADC10(i); // Keep value for ADC value
}
}

```

```

if(result[0] != old_result[0] )
{
    TEMP1=(result[0]*Div);
    //lcd_gotoxy(5,1);
    //out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.0f",TEMP1));    // %0.1f ให้มีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
}
if(result[1] != old_result[1] )
{
    TEMP2=(result[1]*Div);
    //lcd_gotoxy(13,1);
    //out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.0f",TEMP2));    // %0.1f ให้มีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
}
if(result[2] != old_result[2] )
{
    TEMP3=(result[2]*Div);
    //lcd_gotoxy(5,2);
    //out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.0f",TEMP3));    // %0.1f ให้มีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
}
if(result[3] != old_result[3] )
{
    TEMP4=(result[3]*Div);
    //lcd_gotoxy(13,2);
    //out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.0f",TEMP4));    // %0.1f ให้มีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
}
Tavg = ((TEMP2+TEMP3+TEMP4)/3);

if(Tavg <= 27.0)
{
    C=(Tavg+25098)/25;
}
else
{
    C=(Tavg+16723)/16.6666;
}

```

```

PLOSS = (P*A*V*C*(Tavg-TEMP1));

clr_lcd();

// lcd_gotoxy(1,1);
// out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.1f",TEMP2));           // %0.1f ให้มีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
// lcd_gotoxy(7,1);
// out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.1f",TEMP3));           // %0.1f ให้มีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
// lcd_gotoxy(13,1);
// out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.1f",TEMP4));           // %0.1f ให้มีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
//     lcd_gotoxy(1,2);
// out_lcd(sprintf(str_buf,"To="));
// lcd_gotoxy(4,2);
// out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.1f",Tavg));             // %0.1f ให้มีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
lcd_gotoxy(10,2);
out_lcd(sprintf(str_buf,"Ti="));
lcd_gotoxy(13,2);
out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.1f",TEMP1));             // %0.1f ให้มีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
delay_ms(2000);
clr_lcd();

//     lcd_gotoxy(1,1);
// out_lcd(sprintf(str_buf,"P="));
//     lcd_gotoxy(3,1);
// out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.1f",P));               // %0.1f ให้มีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
//     lcd_gotoxy(8,1);
// out_lcd(sprintf(str_buf,"A="));
// lcd_gotoxy(10,1);
// out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.5f",A));               // %0.5f ให้มีทศนิยม 5 ตำแหน่ง
lcd_gotoxy(1,2);
out_lcd(sprintf(str_buf,"V="));
lcd_gotoxy(3,2);
out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.1f",V));                 // %0.1f ให้มีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
// lcd_gotoxy(8,2);
// out_lcd(sprintf(str_buf,"C="));

```

```
//      lcd_gotoxy(10,2);
//      out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.2f",C));          // %0.2f ให้มีทศนิยม 2 ตำแหน่ง
//      delay_ms(2000);
//      clr_lcd();
//
      lcd_gotoxy(1,1);
out_lcd(sprintf(str_buf,"MOTOR POWER LOSS"));
lcd_gotoxy(5,2);
      out_lcd(sprintf(str_buf,"%0.1f",PLOSS));          // %0.1f ให้มีทศนิยม 1 ตำแหน่ง
lcd_gotoxy(13,2);
out_lcd(sprintf(str_buf,"WATT"));
delay_ms(2000);
clr_lcd();
}
return 0;
}
```





ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่


การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ครั้งที่ 9


ณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ศูนย์รังสิต

30 มิถุนายน - 1 กรกฎาคม 2554

สัมมนาเชิงปฏิบัติการ
ป้ารุกดาพิเศษ แพทย์แผนไทยอภัยภูเบศร
นิทรรศการด้านสมุนไพรไทย และการแพทย์แผนไทย
ตลาดนัดสีเขียว

หัวข้อการนำเสนอผลงาน

- วิทยาศาสตร์ชีวภาพ (Biological Science)
- วิทยาศาสตร์กายภาพ (Physical Science)
- วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี (Engineering & Technology)
- International Symposium on Material Science Engineering and Energy Technology

กำหนดการ

22 เมษายน 2554 : วันสุดท้ายของการรับสมัครบทความวิชาการ
 6 พฤษภาคม 2554 : รางวัลพิจารณาบทความ
 20 พฤษภาคม 2554 : วันสุดท้ายของการส่งต้นฉบับบทความฉบับสมบูรณ์
 มีนาคม - 9 มิถุนายน 2554 : กำหนดชำระค่าลงทะเบียน
 13 พฤษภาคม 2554 : วันสุดท้ายของการชำระค่าลงทะเบียนล่วงหน้า
 30 มิถุนายน - 1 กรกฎาคม 2554 : กำหนดวันประชุมวิชาการ และสัมมนาเชิงปฏิบัติการ

สอบถามข้อมูลเพิ่มเติม โทร ๐-25๑4-444๑-๕๑ ต่อ 2๐21 (นศทพภคส) โทรสาร ๐-25๑4-44๘5

www.slcd2011.org



คำสั่งคณะกรรมการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่ ๒๐๔ /2554

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 9

ตามที่คณะฯ กำหนดจะจัดงานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 9 ขึ้นในวันที่ 30 มิถุนายน – 1 กรกฎาคม 2554 ณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต นั้น เพื่อให้การดำเนินงานฯ เป็นไปด้วยความเรียบร้อย อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 31 แห่งพระราชบัญญัติ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พ.ศ. 2531 จึงแต่งตั้งคณะกรรมการดำเนินงานด้านต่างๆ ดังนี้

1. คณะกรรมการอำนวยการจัดงาน

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี	ประธานกรรมการ
รองคณบดีฝ่ายวิจัยและวางแผน	กรรมการ
รองคณบดีฝ่ายวิเทศสัมพันธ์และประชาสัมพันธ์	กรรมการ
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ	กรรมการ
รองคณบดีฝ่ายการนอกรักษา	กรรมการ
ผู้อำนวยการบัณฑิตศึกษา	กรรมการ
ที่ปรึกษาคณบดีฝ่ายสารสนเทศ	กรรมการ
หัวหน้าภาควิชาทุกภาค	กรรมการ
เลขานุการคณะฯ	กรรมการ
รศ.ดร.กิ่งแก้ว เจริญพรสุข	กรรมการและเลขานุการ
น.ส.เนตรนภัส จันทร์พวง	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

หน้าที่

- กำหนดวัตถุประสงค์ / เป้าหมาย การจัดประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- กำหนดแผนการดำเนินงาน
- ประสานงานการจัดงานให้เป็นไปด้วยความเรียบร้อย
- สรุปผลการจัดงาน

2. อนุกรรมการฝ่ายวิชาการ

รองคณบดีฝ่ายวิชาการ	ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.ประเสริฐ วงศ์วัฒนารัตน์)	
รศ.ดร.ศักดิ์วัลย์ ชวนชาติประเสริฐ	กรรมการ
ผศ.ดร.รัชฎา คงคะจันทร์	กรรมการ
ผศ.ดร.บัณฑิต อนุรักษ์	กรรมการ
ผศ.ดร.ภาณุมาศ อุตฮีไชย	กรรมการ
ผศ.ดร.ชนิท เรืองรุ่งชัยกุล	กรรมการ
ผศ.ดร.ณัฐยา พรพรรณรัตนศิลป์	กรรมการ

- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| ผศ.ดร.แสงหล้า ชัยมงคล | กรรมการ |
| ผศ.ดร.เทพปัญญา เจริญรัตน์ | กรรมการ |
| อ.ดร.สุกัลยา อุทัยคา | กรรมการ |
| อ.ดร.วิไลลักษณ์ ชัยสิทธิ์ | กรรมการ |
| อ.ดร.กุลวดี พรรณเขมร | กรรมการ |
| อ.ดร.วราวุธ ดิยพงศ์พัฒนา | กรรมการ |
| อ.ดร.อวันวี เพชรคงแก้ว | กรรมการ |
| อ.ดร.นพพร พูลยรัตน์ | กรรมการ |
| อ.วนิดา ชูอักษร | กรรมการ |
| อ.ชุมพล วิจิตรนาคม | กรรมการ |
| ผศ.ดร.ชนาธิป สามารถ | กรรมการและเลขานุการ |
| น.ส.เนตรนภัส จันทร์พวง | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
- หน้าที่
- ติดต่อวิทยากร
 - ติดต่อผู้ทรงคุณวุฒิอ่านผลงานวิชาการของผู้นำเสนอผลงาน
 - อ่านผลงานของผู้นำเสนอผลงาน
3. อนุกรรมการฝ่ายจัดทำเอกสารประกอบการประชุม
- | | |
|---------------------------|---------------------|
| อ.ดร.วราวุธ ดิยพงศ์พัฒนา | ประธานกรรมการ |
| ผศ.ดร.ชนาธิป สามารถ | กรรมการ |
| อ.ดร.ศิริพร นาประเสริฐกุล | กรรมการ |
| อ.ดร.สุวดี ก้องพารากุล | กรรมการ |
| นายวิศิษฐ์พล สุวรรณสาร | กรรมการ |
| น.ส.เนตรนภัส จันทร์พวง | กรรมการและเลขานุการ |
- หน้าที่
- จัดทำเอกสารประกอบการประชุม
 - จัดหาของที่ระลึกให้วิทยากรและผู้นำเสนอผลงานแบบบรรยาย
4. อนุกรรมการฝ่ายสถานที่และยานพาหนะ
- | | |
|------------------------------|---------------------|
| อ.สรณ์ สุวรรณโชติ | ประธานกรรมการ |
| นางมัลลิกา บรรีรักษ์ | กรรมการ |
| นายบรรจงศักดิ์ พิทักษ์ศักดิ์ | กรรมการ |
| นายมงคล วาวตะคุ | กรรมการและเลขานุการ |
- หน้าที่
- ควบคุม ดูแล การทำงานเกี่ยวกับสถานที่ และ โสตทัศนูปกรณ์
 - จัดการวางแผนการจอดรถของวิทยากรและผู้เข้าร่วมประชุม
 - ควบคุม ดูแล การทำงานที่เกี่ยวข้องกับสถานที่ ตั้งแต่การเตรียมงาน จนกระทั่งเสร็จสิ้นการทำงาน
 - วางแผนการดำเนินงานให้เป็นไปด้วยความเรียบร้อย
5. อนุกรรมการฝ่ายอาหารและเครื่องดื่ม
- | | |
|-------------------------|---------------|
| รศ.ดร.ประกาศรี เทพรักษา | ประธานกรรมการ |
|-------------------------|---------------|

อ.ดร.เปี่ยมสุข สุวรรณภู	กรรมการ
น.ส.กาญจนา ทองเต็ม	กรรมการ
น.ส.สุลกี พลสงคราม	กรรมการ
น.ส.ปณิชา สดาวรศิษพร	กรรมการ
นางชุภา ร่มทิกุล	กรรมการ
นายฉัตรพัฒน์ สงวนถิ่น	กรรมการ
นายแสนสุข ไสภณ	กรรมการ
น.ส.กาญจนา โมธินา	กรรมการ
น.ส.สิรินันท์ ศรีนันทวัน	กรรมการ
น.ส.กนกกาญจน์ หวังนุช	กรรมการ
น.ส.จารุญา เจริญหงษ์	กรรมการ
นางศลนพร วราโพธิ์	กรรมการ
นางมาลี ขอบธรรม	กรรมการและเลขานุการ

หน้าที่

- จัดเตรียมอาหารว่าง และเครื่องดื่ม สำหรับวิทยากรและผู้เข้าร่วมประชุม
- จัดเตรียมอาหารกลางวันสำหรับวิทยากรและผู้เข้าร่วมประชุม

6. อนุกรรมการฝ่ายต้อนรับและการแสดง

รศ.ดร.ปณศยา พัฒนาการ	ประธานกรรมการ
อ.ดร.กุลวดี พรรณเชษฐ์	กรรมการ
รศ.ดร.อัญชลี จาละ	กรรมการ
ผศ.ดร.ทองดี เล็กโตภี	กรรมการ
ผศ.ดร.รัชฎา คงจันทร	กรรมการ
ผศ.ดร.สมบูรณ์ กิระดีประยูร	กรรมการ
อ.ดร.ไตรเทพ วิชัยโกวิทแทน	กรรมการ
น.ส.พิศมัย โพธิ์ศรี	กรรมการ
น.ส.ปรียา เพ็งไพบูลย์	กรรมการ
นางปวีณา บินสอาด	กรรมการ
น.ส.ชัชชนก รัตนกิจบุญไธ	กรรมการและเลขานุการ

หน้าที่

- จัดทำข้อมูลผู้ลงทะเบียนเข้าประชุมล่วงหน้า
- รับลงทะเบียนในวันจัดประชุม
- รับลงทะเบียนหน้างาน
- การแสดงงานเลี้ยงต้อนรับ

7. อนุกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์และลงทะเบียนและประเมินผล

รองคณบดีฝ่ายวิเทศสัมพันธ์และประชาสัมพันธ์ (รศ.ดร.กมล นุชบา)	ประธานกรรมการ
อ.ดร.ปาริยา ณ นคร	กรรมการ
ผศ.ดร.ครุณี ศรีชนะ	กรรมการ

อ.	กรรมการ
ร.	กรรมการ
ผ.	กรรมการ
อ.ดร.มนวรรรัตน์ ผ่องไพฑูริ	กรรมการ
อ.ดร.สิรินดา กุสุมภ์	กรรมการ
อ.ดร.นพพร พูลย์รัตน์	กรรมการ
น.ส.เนตรนภา กุลเพ็ง	กรรมการ
น.ส.อรนุช ศรีบาท	กรรมการและเลขานุการ
หน้าที่	
- ประชาสัมพันธ์การจัดงาน	
- จัดทำป้ายประชาสัมพันธ์	
- ช่วยฝ่ายต้อนรับและลงทะเบียนในวันงาน	
- จัดทำแบบประเมิน	
- ประเมินผลการจัดงาน	
8. อนุกรรมการฝ่ายพิธีการ	
อ.ดร.กุลวดี พรรณเชษฐ์	ประธานกรรมการ
รศ.ดร.ปิ่นศุขา พัฒนางกูร	กรรมการ
อ.ดร.ไศรยเทพ วิชัยโกวิทเทม	กรรมการ
ผศ.ดร.จิรดา สิงขรรัตน์	กรรมการ
ผศ.ดร.สุเป็ญญา จิตคพันธ์	กรรมการ
อ.ดร.สุปราณี ลิขิตสวัสดิ์	กรรมการ
ผศ.ดร.ชนาธิป สามารถ	กรรมการ
น.ส.เนตรนภัส จันทร์พ่วง	กรรมการและเลขานุการ
หน้าที่	
- ดำเนินรายการภายในห้องประชุมต่างๆ ให้เป็นไปตามกำหนด	
9. อนุกรรมการฝ่ายหารายได้และการเงิน	
รองคณบดีฝ่ายบริหารและการคลัง	ประธานกรรมการ
(รศ.ดร.กิ่งแก้ว เจริญพรสุข)	
ผศ.ดร.ชนาธิป สามารถ	กรรมการ
นางพรศิริ สุทธิธรรม	กรรมการ
นางชมคมนต์ เพ็ชรรัตน์มณี	กรรมการ
น.ส.ศุภิสสา ปัญญาใส	กรรมการ
น.ส.จารุวรรณ ชื่นเสียง	กรรมการ
น.ส.ลดาวัลย์ เชื้อสีเบ็ง	กรรมการ
นางโนรี เทียนขวัญ	กรรมการและเลขานุการ
หน้าที่	
- ติดต่อหาผู้ให้การสนับสนุนการประชุม	
- ดูแลเรื่องงบประมาณ การจัดซื้อจัดจ้างและการทำบัญชีค่าใช้จ่าย	

- จัดเก็บและทำบัญชีค่าลงทะเบียน
- จัดเตรียมใบเสร็จสำหรับผู้ลงทะเบียน, จัดรับชำระค่าลงทะเบียน

10. อนุกรรมการฝ่ายการนักศึกษาสนับสนุนการประชุม

ศศ.ดร.ชนาธิป สามารถ	ประธานกรรมการ
อ.ดร.ภาวิติ พุฒประเสริฐ	กรรมการ
รศ.วราภรณ์ ถักนทีนวงศ์	กรรมการ
ศศ.ดร.รวมพร สิทธิมงคล	กรรมการ
รศ.ดร.พิพัฒน์ สมภาร	กรรมการ
อ.ธีรวัฒนา ภาระมาศย์	กรรมการ
อ.จิรวัดน์ รุ่งเลิศระกูลชัย	กรรมการ
อ.เสาวณี ศรีสุข	กรรมการ
น.ศ.กาญจนา ทองเต็ม	กรรมการ
น.ศ.ชัชชนก รัตนกิจบุญโญ	กรรมการและเลขานุการ

หน้าที่

- จัดเตรียมนักศึกษาเข้าร่วมพิธีการประชุมในห้องต่างๆ และสนับสนุนกิจกรรมของฝ่ายต่างๆ

11. อนุกรมฝ่ายสารสนเทศ

นายนิรัช รมเย็น	ประธานกรรมการ
ว่าที่ร้อยตรี ภฤศ สวัสดิ์มงคล	กรรมการ
นายวิศิษฐ์พล สุวรรณสาร	กรรมการ
นายประณต ศาสตกริชวัน	กรรมการและเลขานุการ

หน้าที่

- จัดทำ website งานประชุมวิชาการ
- ดูแลระบบส่งผลงานออนไลน์
- จัดเตรียมสไลด์ทศนุปรกรณ์

ทั้งนี้ให้อนุกรรมการแต่ละชุดดำเนินการตามหน้าที่ที่ได้รับมอบหมาย และรายงานความก้าวหน้าให้คณะกรรมการอำนวยการ ทุกครั้งที่มีการประชุม จนกว่าการดำเนินงานจะเสร็จสิ้น

สั่ง ณ วันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

(รองศาสตราจารย์สายทอง อมรวิเศษฐ์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

การลดอุณหภูมิลมระบายความร้อนของอินดักชันมอเตอร์
 โดยการบังคับทิศทางลม
**The reduce air - cooling system of induction motors
 by controlled-wind direction**

ณัฐพล แจ่มจงค์¹ วันชัย ทรัพย์สิงห์²

สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทร 0-2549-4990-2 www.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอการลดอุณหภูมิลมระบายความร้อนของอินดักชันมอเตอร์ โดยการบังคับทิศทางลม เพื่อลดอุณหภูมิการทำงานและยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์ โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบจัดสร้าง ชุดเซนเซอร์อุณหภูมิแบบเชิงเส้น ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ (dsPIC 30F4011) ซึ่งจะรับค่าประมวลผล และแสดงค่าของอุณหภูมิ ผ่านทางจอ LCD โดยติดตั้ง ชุดเซนเซอร์อุณหภูมิแบบเชิงเส้น ในส่วนด้านหน้า และด้านหลังของมอเตอร์ และทำการทดสอบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 0.25 แรงม้า และ 0.5 แรงม้า 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 เฮิร์ตซ์ ต่อแบบสตาร์ ขณะขับภาระทางกลที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ของที่กีด ใน 2 รูปแบบ คือ แบบไม่บังคับทิศทางลม และแบบบังคับทิศทางลม ผลลัพธ์ที่ได้ การบังคับทิศทางลมสามารถลดอุณหภูมิลมระบายความร้อนได้มากกว่า 20% และมี PF. สูงขึ้น 1.6% จะเห็นได้ว่าเทคนิคที่ใช้นี้สามารถลดอุณหภูมิการทำงานของมอเตอร์ และประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษามอเตอร์ได้

Abstract

This paper presents how to reduce air - cooling system induction motors by controlled-wind direction. Not only is the temperature decreased, but the motor life also lasts longer. The linear temperature sensors are designed and construction by using micro controller (dsPIC 30F4011). The obtain process and results are shown on LCD. These temperature sensors are installed at front and end of the motors. The sample induction motors used in the experiment are 0.25 and 0.5 HP, 4 poles, 50Hz, star connection. The induction motors are tested at 25%, 50%, 75% and 100% of rated mechanical load. The 2 type are tested in both the control set and the experiment set (controlled- wind direction). The results illustrate that the experiment one can reduce temperature at least 20% and PF. increases 1.6% (compared with the control one). Therefore, this controlled - wind direction can reduce temperature operating and the maintenance cost of motors.

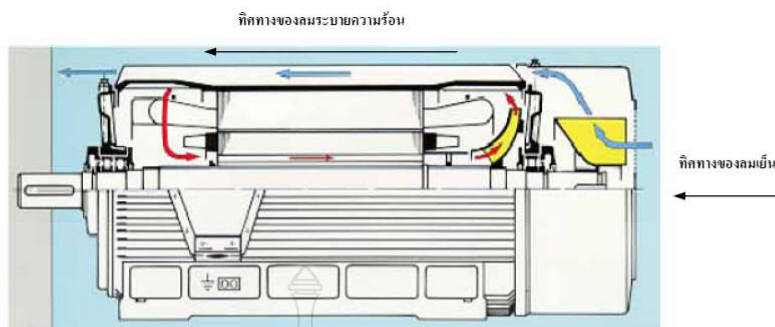
1. บทนำ

อินดักชันมอเตอร์หรือนิยมเรียกว่า มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นเครื่องจักรกลที่มีความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม โรงแรม สถาบันการศึกษา เป็นต้น ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีทั้งระบบหนึ่งเฟสและสามเฟส จะมีขนาดตั้งแต่ 0.2 แรงม้า จนถึง 500 แรงม้า เมื่อมอเตอร์เหล่านี้มีการใช้งานก็จะมีกำลังสูญเสียต่างๆ เกิดขึ้น ทั้งรูปแบบทางไฟฟ้าและรูปแบบทางกล ซึ่งกำลังสูญเสียทั้งสองแบบนี้ จะแปรรูปเป็นพลังงานความร้อนเกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกมอเตอร์ ซึ่งเป็นผลให้บริเวณที่ผิวของมอเตอร์จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม มอเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นอันเนื่องมาจากสาเหตุจากหลายประการเช่น มอเตอร์รับภาระทางกลเกินพิกัด แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่เท่ากัน อิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ผิดปกติ หรือการใช้งานมอเตอร์ในบริเวณที่มีอุณหภูมิแวดล้อมสูง เป็นต้น ซึ่งปัญหาต่างๆ เหล่านี้เป็นสาเหตุทำให้กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เกินพิกัดได้ และอาจทำให้ขดลวดมอเตอร์เสียหายอีกด้วย วิธีการทำให้อุณหภูมิที่ผิวมอเตอร์ลดลงได้ อาจทำได้โดยการติดตั้งพัดลมจากภายนอก เพื่อเพิ่มอัตราการระบายความร้อนของมอเตอร์ [1] แต่มีข้อเสียคือ มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและการใช้งาน อีกวิธีหนึ่งอาจเลือกใช้มอเตอร์ที่มีโครงทำจากวัสดุที่เป็นอลูมิเนียม สามารถระบายความร้อนจากตัวมอเตอร์ได้ดี แต่มีข้อเสียคือ ราคาสูง ไม่ทนทาน ดังนั้น บทความวิจัยนี้จึงนำเสนอการลดอุณหภูมิลมระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้การบังคับทิศทางลม ซึ่งทำการออกแบบจัดสร้างชุดเซนเซอร์อุณหภูมิ ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ มีการรับค่า ประมวลผล แสดงค่าของอุณหภูมิผ่านทางจอ LCD โดยติดตั้งชุดเซนเซอร์อุณหภูมิ ทั้งด้านหน้า ด้านท้ายของมอเตอร์ และมีการติดตั้งอุปกรณ์บังคับทิศทางลมจากส่วนท้ายมอเตอร์จนถึง ด้านหน้ามอเตอร์เพื่อบังคับทิศทางลมระบายความร้อนให้อุณหภูมิที่ผิวมอเตอร์ลดลง เมื่ออุณหภูมิที่ผิวมอเตอร์ลดลง มอเตอร์จะมีอุณหภูมิในการทำงานลดลง และช่วยให้มอเตอร์มีอายุการใช้งานยาวนานมากขึ้น

2. วิธีการทดลอง

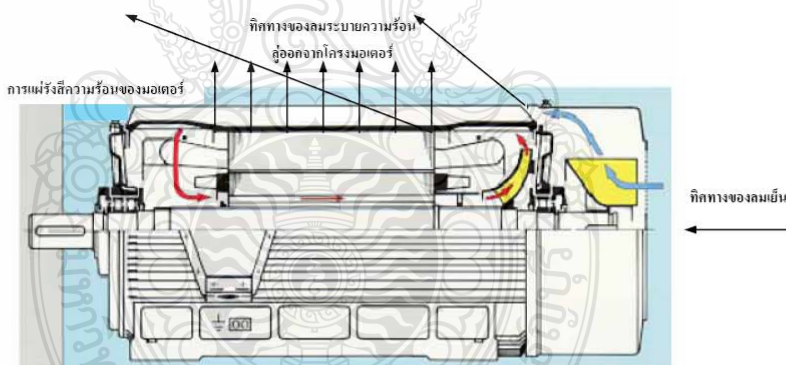
2.1 การระบายความร้อนของมอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ส่วนใหญ่จะเป็นชนิดกรงกระรอก จะมีการระบายความร้อนเป็นแบบชนิด IC411 หรือแบบ Self Cool หรือ TEFC (Total Enclosure Fan Cool) [7]โดยจะมีพัดลมอยู่สองชุด แยกวงจรมอกเป็นวงจรมอบภายใน และภายนอก โดยวงจรมอบภายในจะมีครีบบพัดลมหักที่ตัวโรเตอร์ทำหน้าที่ตีลมให้มีการหมุนเวียนภายในห้อง โรเตอร์ให้ลมกระจายโดยทั่ว เพื่อสามารถนำพาความร้อนจากตัว โรเตอร์เอง และขดลวดสเตเตอร์ ถ่ายเท ไปยังผิวโครงสร้างตัวมอเตอร์ โดยวิธีการนำพาความร้อน ส่วนวงจรมอบด้านนอกจะมีพัดลมติดด้านท้ายของตัวโรเตอร์ด้านนอก โครงมอเตอร์ ทำหน้าที่ดูดลมเย็นจากด้านท้าย (Non Drive End) ผ่านทางผิวด้านนอกเพื่อช่วยนำพา และระบายความร้อนออกจากตัว โครงมอเตอร์ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงลักษณะการระบายความร้อนของมอเตอร์ ชนิด IC411

หากวิเคราะห์ดูตามหลักพลศาสตร์ การระบายความร้อน ส่วนที่ร้อนที่สุดคือส่วนกลางคั้วมอเตอร์ เพราะอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดความร้อนคือ ขดลวดสเตเตอร์มากที่สุด ส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดคือส่วนท้ายคั้วมอเตอร์ เพราะอยู่ใกล้แหล่งลมเย็นที่ระบายความร้อนมากที่สุด ในการวิจัยนี้ทดสอบกับมอเตอร์ชนิด IC411 เช่นเดียวกัน แต่ลักษณะการระบายความร้อนในการทำงานจริงจะแตกต่างกันคือ ทิศทางของลมระบายความร้อนนั้นไม่ได้เดินทางไปตามผิวของมอเตอร์ แต่เดินทางลู่ออกจากคั้วมอเตอร์ อันเนื่องมาจากการแผ่รังสีความร้อนของมอเตอร์ และการไม่ได้บังคับทิศทางลมระบายความร้อนของมอเตอร์ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงลักษณะการระบายความร้อนของมอเตอร์ ชนิด IC411 ที่ทำการทดสอบจริง

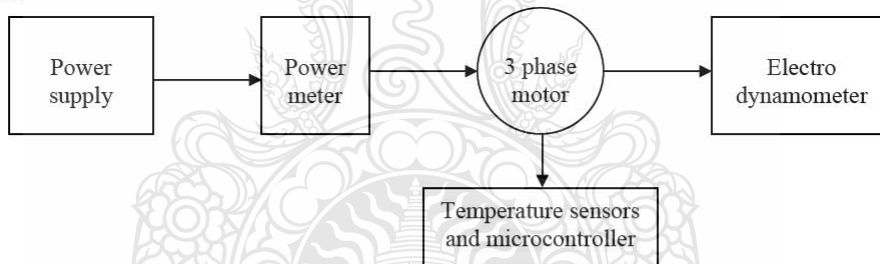
จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าเมื่อมอเตอร์ทำงาน อุณหภูมิที่ผิวของมอเตอร์จะสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดสมดุลทางความร้อน (มอเตอร์ทำงานอย่างต่อเนื่อง หรือชนิด S1) [4] และแผ่รังสีความร้อนออกด้านรอบตัวของมอเตอร์ ทำให้ลมระบายความร้อนเกิดการเปลี่ยนทิศทางลู่ออกไป ทำให้มอเตอร์ได้รับการระบายความร้อนได้ไม่เต็มที่ เนื่องจากลมเย็นถูกพากระจายออกจาก โครงมอเตอร์ จึงมีความร้อนสะสมที่คั้วมอเตอร์สูงขึ้น



รูปที่ 5 แสดงการติดตั้งชุดเซนเซอร์อุณหภูมิ และอุปกรณ์บังคับทิศทางลมระบายความร้อน

3. ผลการทดลอง วิจารณ์การทดลอง และสรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ทำการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 4 ขั้วแม่เหล็ก 50 เฮิร์ตซ์ ขนาด 0.25 แรงม้า และ 0.5 แรงม้า โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมดุลเท่ากันทั้ง 3 เฟส และมีการจำลองภาระทางกลหรือโหลดเทียบจาก Electrodynamometer มีการเปลี่ยนแปลง power output ที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ของพิกัด ซึ่งวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งในแบบบังคับทิศทาง และแบบไม่บังคับทิศทาง ผังการทดสอบในรูปแบบที่ 6



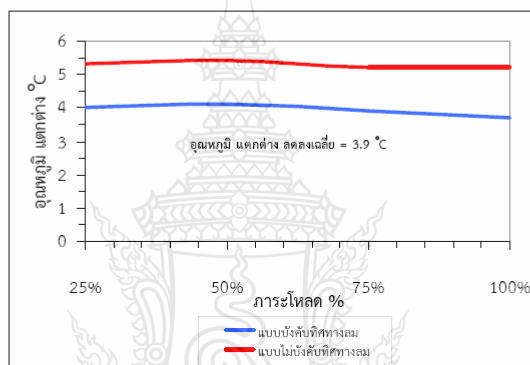
รูปที่ 6 แสดงผังการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 0.25 แรงม้า

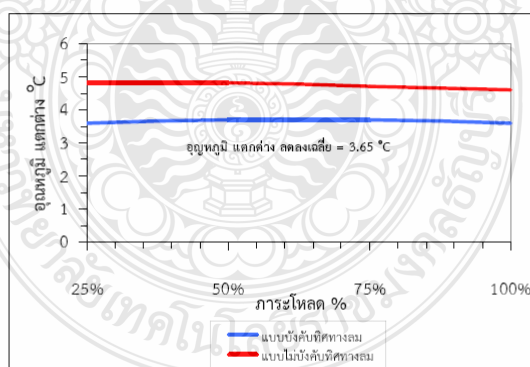
พารามิเตอร์มอเตอร์	แบบไม่บังคับทิศทาง				แบบบังคับทิศทาง			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
θ_m (°C)	23.2	23.2	23.3	23.0	23.5	23.5	23.6	23.5
θ_{out} (°C)	28.5	28.6	28.5	28.2	27.5	27.6	27.5	27.2
I (A)	0.492	0.524	0.569	0.635	0.478	0.517	0.568	0.637
S (VA)	330	352	383	422	323	343	377	423
PF	0.353	0.479	0.596	0.685	0.366	0.500	0.616	0.699

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 0.5 แรงม้า

พารามิเตอร์มอเตอร์	แบบไม่บังคับทิศทาง				แบบบังคับทิศทาง			
	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
ภาระขับโหลด	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
θ_m ($^{\circ}\text{C}$)	23.5	23.6	23.7	23.7	23.3	23.3	23.3	23.2
θ_{out} ($^{\circ}\text{C}$)	28.3	28.4	28.4	28.3	26.9	27.0	27.0	26.8
I (A)	0.809	0.873	0.968	1.099	0.812	0.870	0.965	1.097
S (VA)	544	583	647	734	545	583	646	733
PF	0.346	0.499	0.625	0.717	0.348	0.501	0.626	0.720



รูปที่ 7 แสดงอุณหภูมิแตกต่างของมอเตอร์ขนาด 0.25 แรงม้า



รูปที่ 8 แสดงอุณหภูมิแตกต่างของมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า

จากรูปที่ 7 และ รูปที่ 8 อุณหภูมิแตกต่างกัน จะเปรียบเทียบอุณหภูมิระบายความร้อน (G_{out}) กับ อุณหภูมิ สมัยต้นด้านท้ายของมอเตอร์ (G_m) จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ผิวโครงของมอเตอร์ ในแบบไม่มีการบังคับทิศทางลม จะมีอุณหภูมิสูงกว่า แบบบังคับทิศทางลม ซึ่งแบบบังคับทิศทางลมสามารถลดอุณหภูมิระบายความร้อนลงได้ 25% สำหรับมอเตอร์ขนาด 0.25 แรงม้า และ 22% สำหรับมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า

สรุปงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงการลดอุณหภูมิระบายความร้อนของมอเตอร์ โดยการบังคับทิศทาง ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในการขับภาระที่โหลดต่างๆ สามารถลดอุณหภูมิการทำงานของมอเตอร์ได้ ลดลงเฉลี่ย 3.9 °C สำหรับมอเตอร์ขนาด 0.25 แรงม้า และ 3.65 °C สำหรับมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า ซึ่งสามารถช่วยให้มอเตอร์มีอายุการทำงานยาวนานขึ้น และลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา เพียงแค่ติดตั้งอุปกรณ์ซึ่งอาจเป็นแผ่นอลูมิเนียมผิวเรียบ หรือวัสดุผิวเรียบที่สามารถโค้งตาม โครงของมอเตอร์ เพื่อบังคับทิศทางลมระบายความร้อน ซึ่งงานวิจัยนี้จะเหมาะสมกับมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีชั่วโมงการทำงานยาวนานหรือแบบต่อเนื่อง เพราะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมอเตอร์จะสมดุลตลอดเวลา

เอกสารอ้างอิง

- [1] เปรมศักดิ์ ปรีชา, การคำนวณหาความเร็วลมระบายความร้อนจากภายนอก ในการลดอุณหภูมิของมอเตอร์, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมทางไฟฟ้า ครั้งที่ 30 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2550, หน้า 21 – 24.
- [2] เปรมศักดิ์ ปรีชา, เทคนิคการหาค่าสูญเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมทางไฟฟ้า ครั้งที่ 29 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 2549, หน้า 141 – 144.
- [3] พีรพงศ์ ลิมประสิทธิ์วงศ์, ข้อควรคำนึงในการนำมอเตอร์ NEMA 60Hz มาใช้กับ 50Hz, บริษัท ไทนามิก จำกัด 2003.
- [4] พีรพงศ์ ลิมประสิทธิ์วงศ์, มาตรฐานการใช้งานมอเตอร์ Standard Motor duty, บริษัท ไทนามิก จำกัด 2003.
- [5] พีรพงศ์ ลิมประสิทธิ์วงศ์, การทดสอบมอเตอร์ Induction Motor Testing, บริษัท ไทนามิก จำกัด 2003.
- [6] พีรพงศ์ ลิมประสิทธิ์วงศ์, อุณหภูมิกับการใช้งานมอเตอร์ Motor with Temperature Utilization, บริษัท ไทนามิก จำกัด 2005.
- [7] พีรพงศ์ ลิมประสิทธิ์วงศ์, มาตรฐานการระบายความร้อนมอเตอร์ Standard Type of Motor Cooling (IC), บริษัท ไทนามิก จำกัด 2003.
- [8] นคร ภัคดีชาติ และชัชวรินทร์ ลิ้มพรจิตรวิไล, คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller เบื้องต้นด้วยภาษา C กับ MPLAB C 30, บริษัท อิน โนว์ทีฟ เอ็กเพอริเมนส์ จำกัด.

คำสำคัญ : อินดักชันมอเตอร์, เซนเซอร์อุณหภูมิแบบเชิงเส้น, การบังคับทิศทาง, การระบายความร้อน



“พลังงานและนวัตกรรมสีเขียวเพื่ออนาคตอาเซียน”

Green Energy and Innovations for ASEAN's future

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8
The 8th Conference on Energy Network of Thailand; E-NETT 8
วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2555 โรงแรมดิกลีลา จังหวัดมหาสารคาม






เป็นเวทีนำเสนอผลงานวิจัยทางด้านพลังงานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเปิดโอกาสให้นักวิชาการได้มีโอกาสนำเสนอผลงานแลกเปลี่ยนความรู้ ระดมความคิดเห็นและประสบการณ์ระหว่างนักวิชาการ นักวิจัย ผู้เชี่ยวชาญทางด้านพลังงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน อันจะนำไปสู่ข้อเสนอแนะแนวทางในการกำหนดทิศทาง นโยบาย การวิจัยและพัฒนาทางด้านพลังงานของประเทศไทย

หัวข้อบทความ

Renewable Energy
 Biofuels, Hydropower, Wind Energy, Solar Cell and Applications
 Fuel Cell and Hydrogen, Solar Energy and Applications,
 Geothermal energy, and Others.

Energy Conservation and Management
 Energy Conservation and Management for Buildings,
 Energy Conservation and Management for Industrial Plants,
 Energy Conservation and Management for Transportation,
 and Others

Applied Energy
 Thermal Processing, Energy Storage, Heat and Mass Transfer,
 and Others

Energy Policy

Energy Materials

Environmental Management

กำหนดการที่สำคัญ

วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับสมบูรณ์	31 มกราคม 2555
แจ้งผลการพิจารณาบทความฉบับสมบูรณ์	28 กุมภาพันธ์ 2555
วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับแก้ไข	31 มีนาคม 2555
แจ้งผลการตอบรับอย่างเป็นทางการ	2 เมษายน 2555
วันสุดท้ายของการลงทะเบียนเข้าร่วมประชุมล่วงหน้า	10 เมษายน 2555
การประชุมวิชาการ	2-4 พฤษภาคม 2555

อัตราค่าลงทะเบียน

บุคคลทั่วไป

ภายในวันที่ 10 เมษายน 2555:	2,500 บาท
หลังวันที่ 10 เมษายน 2555:	3,500 บาท

นักศึกษา

ภายในวันที่ 10 เมษายน 2555:	1,500 บาท
หลังวันที่ 10 เมษายน 2555:	1,800 บาท

รายละเอียดเพิ่มเติม

Website : www.engineer.msu.ac.th
 หรือ www.e-nett.org

ติดต่อ ผศ.ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด
 โทร : 089 - 9445285
 Email : enett8@gmail.com




มหาวิทยาลัยมหาสารคาม คณะวิศวกรรมศาสตร์



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รศ.ดร. กุลเชษฐ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร. ฐานิตย์ เมธิยานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รศ.ดร. ธีรวัชร กาศยปำนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. นรินทร์ วัฒนกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร. มานะ อมรกิจบำรุง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. สมเกียรติ ปรัชญาวารการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. อติศักดิ์ นาดกรณกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. สัมพันธ์ ฤทธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร. เสริม จันทร์ฉาย	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร. จินดา เจริญพรพาณิชย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร. กิตติ สถาพรประสาธน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร. จุฬารภรณ์ เบญจปิยะพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. ธนรัฐ ศรีวีระกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. อำไพศักดิ์ ทิบุญญา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร. นริส ประทีนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. จีรวรรณ เตียรต์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ธนิต สวัสดิ์เสวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ. สมบูรณ์ เวชกามา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. วันชัย ฉิมฉวี	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
ผศ.ดร. ศักดิ์ระวี ระวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผศ.ดร. ศิริ ดวงพร	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ผศ.ดร. สมชาย มณีไวยรรณ	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผศ.ดร. นิพนธ์ เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผศ.ดร. จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. เจริญพร เลิศสถิตชนกร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. บพิช บุปผโชติ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. ธีรพล ภูมิสะอาด	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ(ต่อ)

ผศ.ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. มณีรัตน์ องค์กรวรรดิ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อนุสรณ์ แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร. อภินันท์ อรุโสภาณ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร. กันย์ วงศ์เกษม	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร. ดาเรศน์ กิตติโยภาส	กรมส่งเสริมการเกษตร และสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
อ.ดร. ชลิดา เนียมมัญญ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร. ชัยยันต์ จันทร์ศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อ.ดร. ณรงค์ อังกิมบัวน	มหาวิทยาลัยบูรพา
อ.ดร. เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. จักรมาส เลหาวนิช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. ณัฐวุฒิ สุวรรณเทา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นเรศ มีโส	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นิวัตร อังควศิษฐพันธ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. นุชิดา สุขแพทย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. พลภุชณ์ จิตตโต	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. ละมุล วิเศษ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. สุนันทา เลาว์ถัยศิริ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. สุพรรณ ยั่งยืน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. อรุมา ลาสุนนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ. ปรีชา ศรีประภาคาร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ. ศิริลักษณ์ วงศ์เกษม	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.ดร. วทีญญ รอดประพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร. กิตติศักดิ์ วิธินเทกิตต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร. ระวี พรหมหลวงศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี



สารบัญ

รหัสบทความ	ชื่อบทความ	หน้า
RE	Renewable Energy	1
RE01	การศึกษาสมรรถนะของเครื่องกลั่นน้ำทะเลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีแผ่นสะท้อนรังสี <u>บัญญัติ นิยมवास</u>	3
RE02	การออกแบบระบบเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าย่อยแบบประหยัด <u>สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ และ เลิศพันธ์ เพียรสร้างสรร</u>	4
RE03	การคำนวณการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์โดยไอโซนในบรรยากาศของประเทศไทย <u>สายันต์ โพธิ์เกิด</u>	5
RE04	การพยากรณ์แนวโน้มของการผลิตกำลังไฟฟ้าจากโฟโตโวลตาอิกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม <u>บัณฑิต ปานท้วม, สมชัย หิริญวโรดม และ วันชัย ทริพย์สิงห์</u>	6
RE05	เครื่องตัดหญ้าไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ <u>สังคม สัพโส, จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และอดิศักดิ์ บัดดียะ</u>	7
RE06	หลักการออกแบบระบบการจัดการแบตเตอรี่ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน <u>อภิวัฒน์ อัครเมฆิน และ บุญยัง ปลั่งกลาง</u>	8
RE07	การทดสอบระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์สำหรับอุปกรณ์สะสมความร้อนแบบรวมรังสีชนิดรางพาราโบลา <u>ประกาศิพย์ บุญหล้า, นุชิตา สุวแพทย์, สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ และอนุสรณ์ แสงประจักษ์</u>	9
RE09	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบทันเวลา <u>เดชนิตธร อิมปริดา และ วันชัย ทริพย์สิงห์</u>	10
RE10	การศึกษาการวัดความเร็วลม ด้วยพัดลมระบายความร้อน <u>ณัฐพล แจ่มจดี และ วันชัย ทริพย์สิงห์</u>	11
RE11	การออกแบบเครื่องให้อาหารสัตว์เลี้ยงแบบอัตโนมัติระบบพลังงานแสงอาทิตย์ <u>พลวุฒิ อังกาทิพย์ ชัยยุทธ์ ทริพย์ประเสริฐ อดอาจ แสดใหม่ และ สมชัย หิริญวโรดม</u>	12
RE12	การออกแบบและทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรสำหรับกังหันน้ำระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก <u>ฉัตรชัย งามสม, ชีระศักดิ์ สมศักดิ์, วรจักร เมืองใจ, วัชร พิงภิบาล, เอกภรณ์ กระจ่างธิมมาพร และ บวรศักดิ์ เพชรานนท์</u>	13
RE13	แบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีรวมของดวงอาทิตย์จากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมสำหรับประเทศไทย <u>เสริม จันทร์ฉาย และเพ็ญพร นิ่มนวล</u>	14
RE14	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ เพื่อการสูบน้ำ <u>ศิลาชัย เพิ่มพูล และ วิรัชย์ ไรยนรินทร์</u>	15



การศึกษาการวัดความเร็วลม ด้วยพัดลมระบายความร้อน Study of Wind Speed Measurement by Using the Cooling Fans

ณัฐพล แจ่มจติ¹ และวันชัย ทรัพย์สิงห์²

¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ด.เพชรเกษม ต.หนองแก อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110

² มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

*E-mail: zalamandera@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 032-618500 ต่อ 4037 โทรสาร 032-618570

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นนำเสนอการศึกษาการวัดความเร็วลม ด้วยพัดลมระบายความร้อน เพื่อประเมินความสามารถของพัดลมระบายความร้อนในการใช้แทนเซนเซอร์การวัดความเร็วลม โดยพัดลมระบายความร้อนที่ทดสอบนี้ เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน มีการจัดสร้างชุดอุปกรณ์เพื่อไว้เปรียบเทียบกับความเร็วลมมาตรฐานที่สามารถควบคุมความเร็วลมได้ ตั้งแต่ 0.4 m/s ถึง 20 m/s ได้โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับสัญญาณ PWM จากชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ และมีการติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมจำนวน 2 ชุด ผลการทดสอบพัดลมระบายความร้อนจำนวน 6 ยี่ห้อ เบื้องต้นพบว่า พัดลมระบายความร้อนได้รับพลังงานลมจะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีความเป็นเชิงเส้นเทียบกับความเร็วลมระหว่าง 3.2 ถึง 15.7 m/s และนำค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลผลและแสดงผลผ่านทางจอ LCD ทั้งในหน่วย m/s และ km/h ผลจากการทดสอบพบว่า พัดลมระบายความร้อนสามารถนำมาประยุกต์ใช้แทนเซนเซอร์วัดความเร็วลมร่วมกับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยที่ ± 0.14 m/s หรือ ± 1.12 % ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

คำหลัก: การวัดความเร็วลม, พัดลมระบายความร้อน, ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

This paper presents the study of measuring wind speed by using the cooling fans in order to evaluate the ability of the fans to be utilized as substitutes for the sensor ones. The result when cooling fans are used is compared with that of a handmade wind tunnel which can create the Standard Wind Speed Meter, controlling wind speed from 0.4 m/s to 20 m/s. Inside the tunnel, there is not only a dc motor that receives the PWM signal from microcontroller, but there are also 2 Anemometers. The primary result shows six different brand fans that get wind energy provide dc voltage in linear relationship at the wind speed interval between 3.2 to 15.7 m/s only. The signal of that dc voltage is sent to microcontroller for being interpreted on LCD screen both in m/s and in km/h unit. The final result indicates that the fan with the microcontroller can be substituted for a wind speed measurement sensor. The average error value is approximately ± 0.14 m/s or ± 1.12 % which is an acceptable value.



1. บทนำ

ลมเป็นพลังงานที่สามารถพบได้ทุกแห่งทุกที่ทั่วโลก การนำพลังงานลมมาใช้ให้เกิดประโยชน์มีมากมายหลายอย่างเช่น กังหันลมผลิตไฟฟ้า, กังหันลมเพื่อการเกษตร, การแล่นเรือใบ, เครื่องบิน เป็นต้น ซึ่งก่อนที่จะนำพลังงานลมมาใช้ให้เกิดประโยชน์นั้นอย่างหนึ่งที่จะต้องมีการศึกษาคือ ความเร็วลม ซึ่งความเร็วลมสามารถวัดได้โดยเครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) โดยแสดงผลของความเร็วในหน่วยต่างๆ เช่น m/s, km/h, knots, miles/h ฯลฯ [1] เครื่องวัดความเร็วลมมีหลากหลาย ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางมากที่สุดคือ นำการหมุนของระบบแม่เหล็กที่ได้รับความเร็วลมมาเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1.1 แบบแนวแกนนอน (Horizontal)

แบบแกนแนวนอนมีแกนหมุนวางตัวอยู่ในทิศทางขนานกับทิศทางลม มีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากกับแรงลมมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูง พบมากในเครื่องมือวัดความเร็วลมทั่วไป

1.1 แบบแนวแกนตั้ง (Vertical)

แบบแนวแกนตั้งมีแกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางของลม สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง ติดตั้งในระดับต่ำได้มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานต่ำกว่าแบบแกนแนวนอน จึงมีการใช้งานอยู่น้อย

เครื่องมือวัดความเร็วลมทั้งสองแบบจะใช้หลักการรับพลังงานลมเข้ามากระทบกับส่วนของกังหัน หรือใบพัด เพื่อเปลี่ยนความเร็วลมเป็นแรงดันไฟฟ้า หรือความถี่ในการหมุน เป็นสัญญาณเข้าสู่วงจรภายในเครื่องวัด และประมวลผลพร้อมแสดงผลของความเร็วลมผ่านทางจอ LCD หรือ 7 segment ข้อเสียของเครื่องมือวัดความเร็วลมส่วนใหญ่ที่มีจำหน่ายตามบริษัทชั้นนำทั่วไปยังคงมีราคาที่สูง

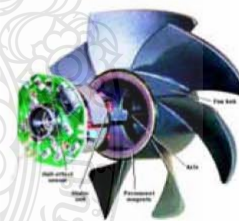
ปัจจุบันได้มีการสร้างเครื่องมือวัดความเร็วลมได้โดยง่าย เช่น เครื่องวัดความเร็วลมและทิศทางลม [2] มีข้อเสียที่ระบบกลไกต่างๆ มีความยุ่งยาก ซับซ้อน มีการสูญเสียเกิดขึ้นที่แปรงถ่าน เพราะเป็นเครื่องกำเนิด

แบบขดลวดเป็นตัวหมุน การบำรุงรักษาค่อนข้างยาก, เครื่องวัดความเร็วลมแบบโซลิตสแตต [3] มีข้อเสียที่เซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดมีขนาดยาวไม่สะดวกในการพกพา การตั้งค่าต่างๆ มีความซับซ้อน, การพัฒนาชุดเครื่องมือวัดความเร็วลม ที่ระดับความสูง 10 - 15 เมตรพร้อมประมวลผลผ่านทางอินเตอร์เน็ตและการเก็บข้อมูลผ่าน USB flash drive [4] มีข้อเสียที่ระบบกลไกมีประสิทธิภาพต่ำ ราคาสูง

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการศึกษาการวัดความเร็วลมด้วยพัดลมระบายความร้อน เพื่อประเมินความสามารถของพัดลมระบายความร้อนในการใช้แทนเซนเซอร์การวัดความเร็วลม โดยนำสัญญาณจากแรงดันไฟฟ้า เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลผลและแสดงผลผ่านทางจอ LCD โดยมีความละเอียด ผิดพลาดต่ำ และต้นทุนของพัดลมระบายความร้อนไม่สูง

2. พัดลมระบายความร้อน

พัดลมระบายความร้อนส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดไร้แปรงถ่าน (Brushless Motor) ซึ่งมีทั้งชนิดไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับ ในที่นี้จะกล่าวถึงชนิดไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น



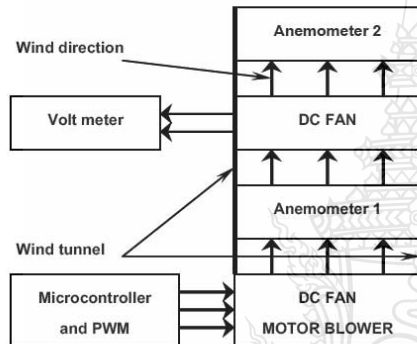
รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างภายในของพัดลมระบายความร้อน

โครงสร้างภายในของพัดลมระบายความร้อนจะประกอบด้วยใบพัด, แม่เหล็กถาวร, แกนเหล็กโรเตอร์, ขดลวดโรเตอร์ และวงจรถับ [5] เมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่มอเตอร์พัดลมระบายความร้อนก็จะได้รับพลังงานลม กลับกันหากจ่ายพลังงานลมเข้าสู่ใบพัดของพัดลมระบายความร้อนก็จะได้รับพลังงานไฟฟ้าออกมาเช่นเดียวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง



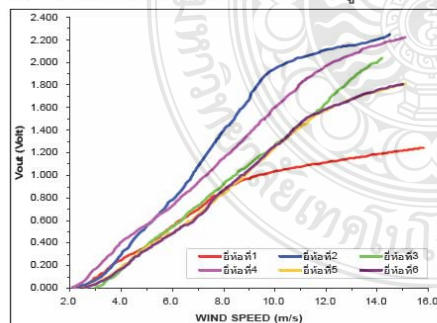
3. การทดสอบแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากพัดลมระบายความร้อนทำโดยการติดตั้งบริเวณกึ่งกลางภายในอุโมงค์ลม ที่ใช้มอเตอร์พัดลมไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด 300 W ควบคุมความเร็วลมด้วยสัญญาณ PWM จากชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ มีการติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมจำนวน 2 ชุด ซึ่งมีความผิดพลาดอยู่ที่ ± 0.1 m/s (DIGICON ANEMOMETER รุ่น DA-43) ทั้งด้านลมเข้าและด้านลมออกดังรูปที่ 2



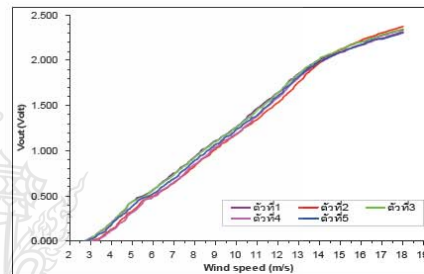
รูปที่ 2 แสดงผังการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของพัดลมระบายความร้อน

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าของพัดลมระบายความร้อนจำนวน 6 ยี่ห้อ ทดสอบด้วยการปรับความเร็วลมของมอเตอร์พัดลมไฟฟ้ากระแสตรงได้ตั้งแต่ 2.0 m/s ถึง 16.0 m/s โดยได้ระดับแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 3



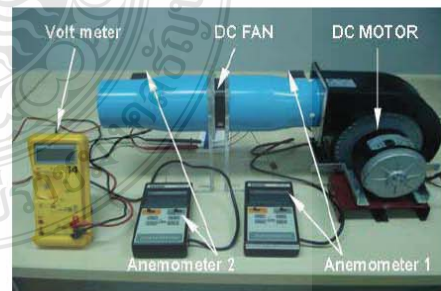
รูปที่ 3 แสดงแรงดันไฟฟ้าของพัดลมระบายความร้อนจำนวน 6 ยี่ห้อ

จากรูปที่ 3 ยี่ห้อที่ 1 มีช่วงความเป็นเชิงเส้นที่ 6.2 m/s ยี่ห้อที่ 2 มีช่วงความเป็นเชิงเส้นที่ 6.8 m/s ยี่ห้อที่ 3 มีช่วงความเป็นเชิงเส้นที่ 11.2 m/s ยี่ห้อที่ 4 มีช่วงความเป็นเชิงเส้นที่ 9.8 m/s ยี่ห้อที่ 5 มีช่วงความเป็นเชิงเส้นที่ 9.6 m/s ยี่ห้อที่ 6 มีช่วงความเป็นเชิงเส้นที่ 8.8 m/s จากทั้ง 6 ยี่ห้อ ยี่ห้อที่มีช่วงความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดคือยี่ห้อที่ 3 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกยี่ห้อที่ 3 มาทำการทดสอบเพิ่มขึ้นอีก 5 ตัว และมีผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของพัดลมระบายความร้อนดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงแรงดันไฟฟ้าของพัดลมระบายความร้อนของยี่ห้อที่ 3 จำนวน 5 ตัว

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าของพัดลมระบายความร้อนยี่ห้อที่ 3 ตัวที่ 1 มีช่วงความเป็นเชิงเส้น 11.2 m/s ตัวที่ 2 มีช่วงความเป็นเชิงเส้น 12.5 m/s ตัวที่ 3 มีช่วงความเป็นเชิงเส้น 12.0 m/s ตัวที่ 4 มีช่วงความเป็นเชิงเส้น 11.1 m/s ตัวที่ 5 มีช่วงความเป็นเชิงเส้น 11.8 m/s



รูปที่ 5 แสดงการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนและทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้า



จากจำนวนทั้ง 5 ตัวที่ทดสอบจะเห็นว่าพัดลมระบายความร้อนตัวที่ 2 มีช่วงความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด ตั้งแต่ 3.2 m/s ถึง 15.7 m/s ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ข้อที่ 3 ตัวที่ 2 มาเป็นเซนเซอร์ในการวัดความเร็วลมต่อไป

4. การออกแบบชุดเซนเซอร์วัดความเร็วลม

พัดลมระบายความร้อนที่เลือกใช้เป็นเซนเซอร์ในการวัดความเร็วลมมีแรงดันไฟฟ้าที่ 0.011V (3.2 m/s) ถึง 2.194V (15.7 m/s) ซึ่งเพียงพอต่อการวัดและมีความแม่นยำ โดยนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากช่วงนี้มาเข้าวงจรบัฟเฟอร์ เพื่อกรองสัญญาณให้ชัดเจนน้อยที่สุด และนำมาขยายสัญญาณให้ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0 – 5V [6] โดยสมการที่ (1), (2), (3), (4) ตามลำดับ

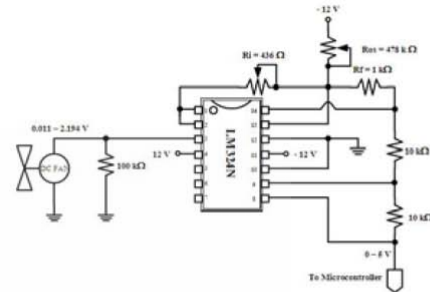
$$m = \frac{V_{out}(M) - V_{in}(M)}{V_{out}(F) - V_{in}(F)} \tag{1}$$

$$m = \frac{R_f}{R_i} \tag{2}$$

$$V_{in} = mV_{in}(F) + b \tag{3}$$

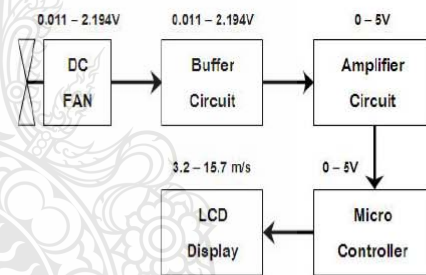
$$R_{os} = \frac{R_f}{b} (\pm V) \tag{4}$$

- เมื่อ m คือ ความชันของกราฟ
- $V_{out}(M)$ คือ แรงดันไฟฟ้าด้านสูงของชุดไมโครคอนโทรลเลอร์, Volt
- $V_{in}(M)$ คือ แรงดันไฟฟ้าด้านต่ำของชุดไมโครคอนโทรลเลอร์, Volt
- $V_{out}(F)$ คือ แรงดันไฟฟ้าด้านสูงของพัดลมระบายความร้อน, Volt
- $V_{in}(F)$ คือ แรงดันไฟฟ้าด้านต่ำของพัดลมระบายความร้อน, Volt
- R_f คือ ความต้านทานที่เลือกใช้, Ω
- R_i คือ ความต้านทานที่จะขยาย, Ω
- b คือ ค่าเริ่มต้น
- R_{os} คือ ความต้านทานที่ตำแหน่งศูนย์, Ω
- $\pm V$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ R_{os} , Volt



รูปที่ 6 แสดงวงจรของพัดลมระบายความร้อน, วงจรบัฟเฟอร์ และวงจรขยายสัญญาณ

จากนั้นนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาเข้าขาอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์โดยเขียนโปรแกรมการทำงานด้วยภาษาซี สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ [7] และแสดงผลของความเร็วลมผ่านทางจอ LCD ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงผังการออกแบบชุดเซนเซอร์วัดความเร็วลมร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์

5. การทดสอบ

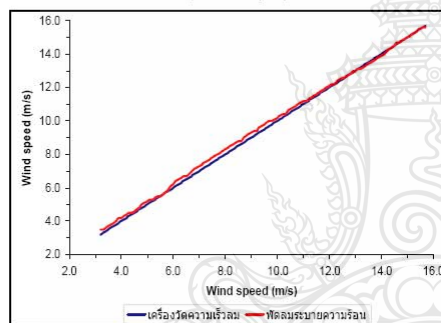
การทดสอบพัดลมระบายความร้อนจะมีขั้นตอนเช่นเดียวกับการทดสอบแรงดันไฟฟ้าแต่จะเปลี่ยนจากโวลต์มิเตอร์ เป็นชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ (dsPIC30F4011) ที่มีการแสดงผลผ่านจอ LCD โดยจะปรับความเร็วของมอเตอร์พัดลมไฟฟ้าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 m/s และเปรียบเทียบระหว่างการแสดงผลของจอ LCD จากการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์กับเครื่องวัดความเร็วลมจำนวน 2 ชุด ดังรูปที่ 8



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8
วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม

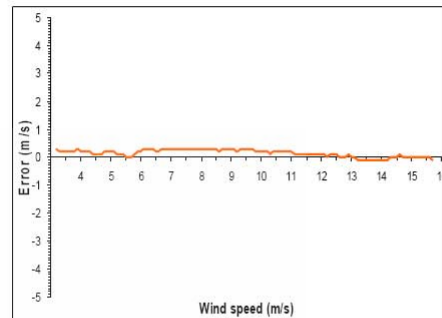


รูปที่ 8 แสดงการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการแสดงผลของจอ LCD จากการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์กับเครื่องวัดความเร็วลมจำนวน 2 ชุด ด้วยชุดอุปกรณ์



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วลมที่ได้จากเครื่องวัดความเร็วลม กับ ความเร็วลมที่ได้จากพัดลมระบายความร้อน

จากรูปที่ 9 ได้ทำการเพิ่มระดับความเร็วลมขึ้นครั้งละ 0.1 m/s โดยเริ่มที่ความเร็วลม 3.2 m/s ถึง 15.7 m/s ซึ่งในช่วงความเร็วลมที่ 3.2 m/s ถึง 11.0 m/s ความเร็วลมที่ได้จากพัดลมระบายความร้อน จะแสดงผลออกมามากกว่าเครื่องวัดความเร็วลม 0.1 m/s ถึง 0.3 m/s และความเร็วลมที่ 11.1 m/s เป็นต้นไป ความเร็วลมที่ได้จากพัดลมระบายความร้อน จะแสดงผลออกมาในช่วง -0.1 m/s ถึง +0.1 m/s ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากปริมาณลมในอุโมงค์ลมอาจมีลมรบกวนเล็กน้อย และความคลาดเคลื่อนของพัดลมระบายความร้อนด้วย



รูปที่ 10 แสดงความผิดพลาดเฉลี่ยของพัดลมระบายความร้อนในการประมวลผลและแสดงผลผ่านจอ LCD ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าความผิดพลาดของการวัดความเร็วลมที่ได้จากพัดลมระบายความร้อน เทียบกับเครื่องมือวัดความเร็วลม จะมีค่าสูงสุดที่ +0.3 m/s ต่ำสุดที่ -0.1 m/s และมีความผิดพลาดเฉลี่ยที่ ± 0.14 m/s หรือคิดเป็น ± 1.12 %

6. สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบพัดลมระบายความร้อนนั้นจะเริ่มแสดงค่าของการวัดจากเครื่องวัดความเร็วลมทั้ง 2 ชุด พร้อมกับในส่วนของการแสดงผลผ่านจอ LCD ในไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในระดับความเร็วลมตั้งแต่ 3.2 m/s ถึง 15.7 m/s มีความผิดพลาดสูงสุดที่ +0.3 m/s ต่ำสุดที่ -0.1 m/s และมีความผิดพลาดเฉลี่ยที่ ± 0.14 m/s หรือ ± 1.12 % ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของพัดลมระบายความร้อนที่สามารถนำมาประยุกต์เป็นเซนเซอร์ในการวัดความเร็วลมได้ ทั้งยังมีราคาถูกหาซื้อได้ง่ายมีความแข็งแรงทนทาน และมีมาตรฐานในการผลิตจากบริษัทผู้ผลิต

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการแนะนำในการเขียนโปรแกรมภาษาซี สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC โดยอาจารย์ทรงกลด ศรีปรางค์ อาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล



8. เอกสารอ้างอิง

- [1] พิสิทธ์ราชมงคล, พลังงานลม, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.rmutphysics.com/>, เข้าดูเมื่อวันที่ 17/12/2554.
- [2] ดุสิต งานรุ่งโรจน์, ชวัชชัย จิตต์สนธิ์ และสันติ หวังนิพนานโต, เครื่องวัดความเร็วลมและทิศทางลม, การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, จังหวัดนนทบุรี.
- [3] อภิรักษ์ นามแต่ง, เครื่องวัดความเร็วลมแบบโซลิตสเตต, THE BEST OF PROJECTS เขมิข ปี 2552 ฉบับที่ 325 – 338, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), หน้า 158 – 166.
- [4] กิตติศักดิ์ ดีพิน, คมสันต์ ภูทัตสวน และสราเดช กลัดทอง, การพัฒนาชุดเครื่องมือวัดความเร็วลม ที่ระดับความสูง 10 – 15 เมตรพร้อมประมวลผลผ่านทางอินเทอร์เน็ตและการเก็บข้อมูลผ่าน USB flash drive, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2551.
- [5] Brushless dc fan motor, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.mechatronic-design.com/>, เข้าดูเมื่อวันที่ 7/01/2555.
- [6] ผศ.รพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, ออปแอมป์และการประมวลผลสัญญาณalog, 2545, ส.ส.ท.เยาวชน
- [7] นคร ภัคติชาติ และชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตร์วิไล, คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller เบื้องต้นด้วยภาษา C กับ MPLAB C30, บริษัท อินโนไวท์ฟ อี็กเพอร์ิเม้นต์ จำกัด.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายณัฐพล แจ่มจดี
วัน เดือน ปีเกิด	30 สิงหาคม 2524
ที่อยู่	78 / 1 หมู่ 8 ซอยกรุงเทพฯ-นนท์ 11 ถนนกรุงเทพนนท์ ตำบลบางเขน อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000
การศึกษา	
พ.ศ. 2547	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า แขนง ไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี
พ.ศ. 2555	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนง ไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2548 – ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า หัวหน้างานกิจกรรมนักศึกษา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี หัวหน้างานแนะแนวการศึกษาและอาชีพ ฝ่ายงานบริการการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล