

## ระบบการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ไฟฟ้าระยะไกลที่มีต้นทุนต่ำโดยใช้อาร์ดูโน

ปิติณัฐ ตริวงศ์\*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

จิรศักดิ์ ส่งบุญแก้ว

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

เฉลิมชาติ มานพ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 7921 5516 อีเมล: peeteenutt@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.10.004

รับเมื่อ 8 กุมภาพันธ์ 2562 แก้ไขเมื่อ 24 เมษายน 2562 ตอรับเมื่อ 28 พฤษภาคม 2562 เผยแพร่ออนไลน์ 7 ตุลาคม 2562

© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการออกแบบระบบสมองกลฝังตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้สำหรับการวัดและการเฝ้าตรวจสอบสถานะของแรงดันไฟฟ้า กระแสสแตเตอร์ และอุณหภูมิขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ภายใต้การทำงานในสถานะต่างๆ ด้วยการใช้อาร์ดูโน ยูโน (Arduino UNO) และการโปรแกรมโดยใช้ภาษาซีเพื่อคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความสมดุลของแรงดันเฟส ตรวจสอบแรงดันเฟสที่ต่ำและเกินกว่าปกติและค่าอุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกเก็บไว้ในฐานข้อมูลของเซิร์ฟเวอร์ผ่านทางอินเทอร์เน็ตด้วยบอร์ด 3G-UC15 ข้อมูลนี้สามารถแสดงได้อีกครั้งผ่านทางเว็บไซต์ด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่หรือคอมพิวเตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำยังสามารถถูกปลดออกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้วยคอนแทคเตอร์ได้จากกรณีค่าเปอร์เซ็นต์ความสมดุลของแรงดันเฟสเกิน 5% แรงดันเฟสเกินหรือต่ำกว่า 10% ของพิกัดแรงดันไฟฟ้าใช้งาน และค่าอุณหภูมิเกินค่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีใดๆ นี้ จะถูกแสดงเพื่อบอกสถานะความผิดปกติผ่านทางเว็บไซต์ในเวลาจริง ทำให้สามารถเฝ้าตรวจสอบสถานะและการป้องกันบนพื้นฐานการพัฒนาอาร์ดูโนได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่า

**คำสำคัญ:** อาร์ดูโนไมโครคอนโทรลเลอร์ การเฝ้าตรวจสอบสถานะ มอเตอร์เหนี่ยวนำ การป้องกัน ระบบอินเทอร์เน็ต



## Low-cost-remote Condition Monitoring System of Electric Motors Using Arduino

Peeteenut Triwong\*

Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Chanwit Tangsiriworakul

Department of Electronic Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Jirasak Songboonkaew

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University, Bangkok, Thailand

Chalermchat Manop

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Lardkrabang, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 09 7921 5516, E-mail: peeteenutt@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.10.004

Received 8 February 2019; Revised 24 April 2019; Accepted 28 May 2019; Published online: 7 October 2019

© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

In this paper, microcontroller-based embedded system is designed for measuring and monitoring voltage condition, stator current and winding temperature of a three-phase induction motor under various operations. Thus, the system was designed using Arduino UNO and C programming language to calculate the phase voltage unbalance rate, the under phase voltage, the over phase voltage and the temperature of a three-phase induction motor. These data are stored in the database of the server via the internet with the 3G-UC15 board which can be displayed again via the website by mobile phone or computer. The induction motor can be isolated from the supply with contactor in case of the faults from the phase voltage unbalance rate over 5%, the phase voltage exceeding or below 10% of the rated voltage and over temperature. The faults of induction motor are displayed via the website in real time for monitoring the condition and protection based on the development of the Arduino UNO with efficiency at a lower cost.

**Keywords:** Arduino Microcontroller, Condition Monitoring, Induction Motor, Protection, Internet System

Please cite this article as: P. Triwong, C. Tangsiriworakul, J. Songboonkaew, and C. Manop, "Low-cost-remote condition monitoring system of electric motors using arduino," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 4, pp. 585-596, Oct.-Dec. 2019 (in Thai).

## 1. บทนำ

อาร์ดูโน (Arduino) เป็นอุปกรณ์โอเพนซอร์ส (Open Source) [1], [2] คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software) บอร์ดอาร์ดูโน มีราคาอยู่ที่ประมาณ \$24 สำหรับ Arduino UNO ถึง ประมาณ \$44 สำหรับ Arduino Mega ที่สำคัญมีตัวอย่าง และแหล่งข้อมูลให้สืบค้นมากมายจึงเป็นมิตรกับผู้ใช้งาน นอกจากนี้เป็นที่นิยมในหมู่ผู้เริ่มต้นสำหรับเลือกนำมาใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถทำการโปรแกรมโดยใช้ภาษาการเขียนที่ง่ายอย่าง C/C++ และสามารถเชื่อมต่อได้ง่ายกับสภาพแวดล้อมที่ใช้การคำนวณขั้นสูงอื่นๆ อย่างเช่น MATLAB และ LABVIEW สรุปได้ว่าบอร์ดอาร์ดูโนถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ที่สำคัญคือความง่ายของ บอร์ดอาร์ดูโนในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือสามารถต่อ วงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามายังขา I/O ของบอร์ด หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ เช่น Arduino xBee Shield, Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, Arduino GPRS Shield เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ด หรือโปรแกรมได้อย่างกว้างขวางอีกด้วย

ตารางที่ 1 มูลค่าความเสียหายในแต่ละอุตสาหกรรมที่เป็น ผลมาจากปัญหาของมอเตอร์

มูลค่า ความเสียหาย ในหน่วย \$	ผลิตภัณฑ์ จากไม้	กระบวนการ ผลิตอาหาร	ปิโตรเลียม และเคมี	โรงงาน ท่อเหล็ก	ยานยนต์
	7,000	30,000	87,000	100,000	200,000

ความผิดปกติใดๆ ในระบบอุตสาหกรรมจะส่งผลทำให้ ประสิทธิภาพการทำงานลดลงหรือนำไปสู่การเปลี่ยนแปลง ที่ไม่สามารถยอมรับได้ ซึ่งความผิดพลาดในกระบวนการ อัตโนมัติ มักจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์ เช่น ความเสียหายของอุปกรณ์ การสูญเสียทางการเงิน การบาดเจ็บ ที่ร้ายแรงต่อบุคคล และหากเกิดขึ้นบ่อยครั้ง อาจนำไปสู่ การหยุดเพื่อปรับปรุงซ่อมแซมครั้งใหญ่ ทั้งนี้ใน [3] ซึ่งได้มีการ

สำรวจมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมที่แตกต่างกัน 5 ประเภท สรุปได้ดังตารางที่ 1

ปัญหาความไม่สมดุลของระดับแรงดัน 3 เฟส ที่จ่าย ให้กับมอเตอร์ ยังคงเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัย อย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน เพราะมันเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ เกิดปัญหาของการสั่นสะเทือน (Motor Vibration) ในมอเตอร์ ตามมา [4] ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า หากปล่อยให้ปัญหาการ สั่นสะเทือนนี้เกิดขึ้นอาจนำไปสู่การล้มเหลวของมอเตอร์ได้ ในที่สุด โดยจุดเริ่มต้นของความเสียหายที่รุนแรง ที่บ่อยครั้ง เป็นเพียงผลกระทบที่มีสาเหตุมาจากปัญหาเพียงเล็กน้อย ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เท่านั้น การตรวจสอบสภาพของมอเตอร์ ไฟฟ้าที่กำลังทำงานอยู่นั้นจึงเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและ การคงสภาพของมอเตอร์ไว้ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหาย ทางด้านธุรกิจที่ร้ายแรงที่มีสาเหตุมาจากความเสียหายของ มอเตอร์ที่อาจจะเกิดขึ้น และเพื่อให้สอดคล้องกับการทำให้เกิด ประสิทธิภาพสูงสุด หลายองค์กรจึงได้ใช้การวางแผน ทรัพยากรองค์กร (Enterprise Resource Planing; ERP) โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตที่ต้องการให้เกิดเสถียรภาพในการ ทำงานได้ตลอดเวลาโดยไม่มีการหยุดพัก (7/24 Production หรือ 7/24 Machines) [5] นำไปสู่ความเชื่อถือได้ใน กระบวนการผลิตตามที่ต้องการ

ในบทความวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการเฝ้าตรวจสอบภาวะ มอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำผ่านทางอินเทอร์เน็ต โดยได้มีการ ตรวจสอบติดตามสถานะมอเตอร์ใน 2 ลักษณะ คือ ทางกายภาพ ของมอเตอร์ และทางระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยทาง กายภาพได้ทำการเฝ้าตรวจสอบสถานะในส่วนของอุณหภูมิ มอเตอร์ (อุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์) และความเร็วรอบของ มอเตอร์ สำหรับระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ทำการเฝ้าตรวจสอบภาวะ ในส่วนของระดับแรงดันไฟฟ้าเกินกว่ามาตรฐาน ต่ำกว่า มาตรฐาน และในสถานะแรงดันไม่สมดุล โดยการพัฒนาระบบการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ระยะไกลนี้ ได้เลือกใช้ จากอุปกรณ์ที่มีคุณภาพสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด และมีราคาถูก แล้วนำมาออกแบบประยุกต์ใช้สร้างเป็นระบบ ดังกล่าว เพื่อให้สามารถทำการเฝ้าตรวจสอบสถานะติดตามการ ทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ได้อย่างถูกต้อง

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการออกแบบ

### 2.1 ระบบเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น

ในการออกแบบระบบเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ไฟฟ้าต้นแบบนี้แสดงในรูปแบบที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยภาคส่วนต่างๆ ดังนี้

2.1.1 ภาคกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วยระบบไฟฟ้า 3 เฟส อุปกรณ์ป้องกัน และชุดตัดต่อวงจรมอเตอร์ด้วยคอนแทคเตอร์ (Contactor) ที่มีขายในท้องตลาดโดยทั่วไปและมีราคาไม่สูงมาก ตามขนาดพิกัดกระแสของมอเตอร์ที่นำมาใช้งาน

#### 2.1.2 ภาควัดสัญญาณประกอบด้วย

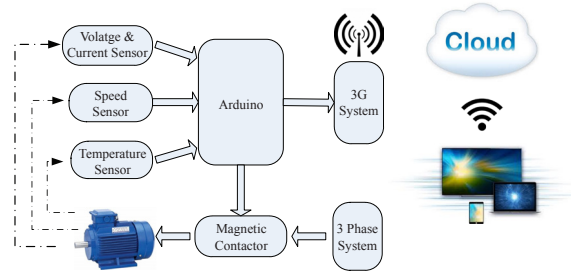
ชุดวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส (Voltage Sensor) ชุดวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟส (Current Sensor) ชุดวัดค่าอุณหภูมิ (Temperature Sensor) และชุดความเร็วรอบ (Speed Sensor)

2.1.3 ภาคประมวลผลสัญญาณประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลอาร์ดูโน ยูโน (Arduino UNO) ซึ่งเป็นบอร์ดที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย และมีราคาถูก

2.1.4 ภาคส่งสัญญาณผ่านอินเทอร์เน็ต ประกอบด้วยชุดส่งสัญญาณระบบ 3G ที่เป็นโมดูลสำเร็จรูปในการส่งสัญญาณให้แก่ชุดเซิร์ฟเวอร์และฐานข้อมูล

2.1.5 ภาคแสดงผลประกอบด้วย เว็บไซต์ที่ได้พัฒนาขึ้น ([www.motormonitoring.com](http://www.motormonitoring.com)) และส่วนแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)

ในการทำงานโดยรวมของระบบการเฝ้าตรวจสอบสถานะและการป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าตามรูปที่ 1 เริ่มจากการจ่ายระบบไฟฟ้า 3 เฟส (3-phase System) ผ่านชุดตัดต่อมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถทำให้มอเตอร์ทำงานได้ตามความต้องการ ซึ่งในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าทำงานชุดวัดสัญญาณที่ประกอบด้วย ชุดวัดแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จะทำการวัดสัญญาณแรงดันในแต่ละเฟสผ่านวงจรแปลงแรงดันกระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับจ่ายเป็นอินพุตให้กับบอร์ดอาร์ดูโน ชุดวัดสัญญาณกระแส 3 เฟส จะทำการวัดสัญญาณกระแสในแต่ละเฟสผ่านหม้อแปลงกระแส (Current Transformer; CT) เพื่อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับจ่ายเป็นอินพุตให้กับบอร์ดอาร์ดูโน ชุดวัดค่าอุณหภูมิ จะทำการวัดค่าอุณหภูมิด้วยเทอร์มิสเตอร์ชนิด K ผ่านโมดูล



รูปที่ 1 ระบบการเฝ้าตรวจสอบสถานะและการป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าโดยใช้บอร์ดอาร์ดูโนที่ได้พัฒนาขึ้น

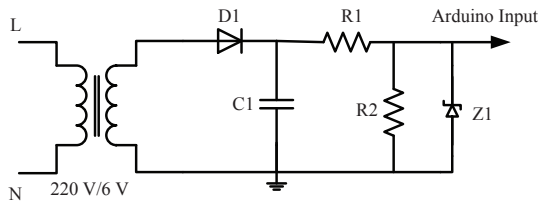
เพื่อสร้างสัญญาณอินพุตให้กับบอร์ดอาร์ดูโน และสำหรับชุดตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ จะทำงานโดยลักษณะของการกำเนิดแสงอินฟราเรดเพื่อกำหนดเป็นสัญญาณพัลส์ผ่านโมดูลสำเร็จรูป MAX6675 เพื่อจ่ายเป็นอินพุตให้กับบอร์ดอาร์ดูโน และเมื่อบอร์ดอาร์ดูโนได้รับสัญญาณจากชุดวัดสัญญาณทั้งหมดแล้วตัวบอร์ดอาร์ดูโน จะทำการประมวลผลค่าของสัญญาณที่วัดได้จากค่าอ้างอิงที่ออกแบบไว้ในโปรแกรมสำหรับตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์ แล้วส่งค่าสถานะของมอเตอร์ที่ตรวจพบผ่านอินเทอร์เน็ตด้วยโมดูลสำเร็จรูป 3G ซึ่งสามารถทำการเก็บค่าต่างๆ ในฐานข้อมูลพร้อมด้วยเว็บไซต์ที่ได้พัฒนาขึ้น

### 2.2 การออกแบบอุปกรณ์ของระบบ

ในการออกแบบระบบเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ไฟฟ้าเหินยวนาได้แบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

#### 2.2.1 ภาคการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้า

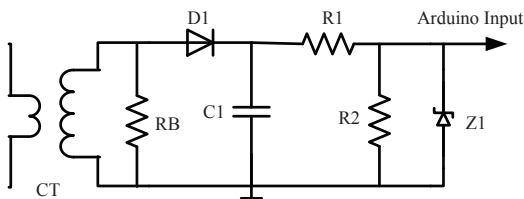
ในส่วนของภาคการตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้านี้เป็นการวัดในแต่ละเฟส ในรูปที่ 2 ได้แสดงวงจรการตรวจวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ของระบบไฟฟ้าในแต่ละเฟส โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า (Potential Transformer; PT) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ ให้ลดลงมาอยู่ที่ 6 โวลต์ เพื่อจ่ายให้กับวงจรเรกติไฟเลอร์ (Rectifier) สำหรับการเปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นได้ใช้ตัวต้านทาน R1 และ R2 ต่อในลักษณะแบ่งแรงดันเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขาอินพุตของอาร์ดูโน ที่ขา A0, A1, A2 ตามลำดับ ไมให้เกิน 5.1 โวลต์



รูปที่ 2 วงจรการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส



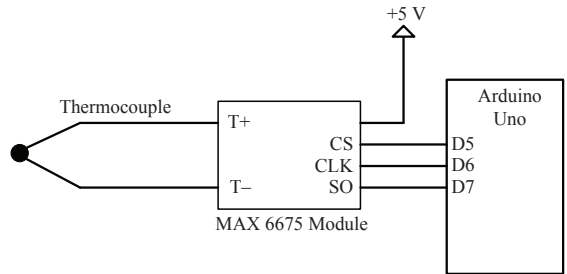
รูปที่ 3 ทหรานสดิวเซอร์กระแสที่ถูกนำมาใช้ตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส



รูปที่ 4 วงจรการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า

### 2.2.2 ภาคการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า

การตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส ได้ใช้หม้อแปลงกระแส (Current Transformer; CT) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเปลี่ยนสัญญาณกระแสไฟฟ้าไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวต้านทาน Burden (RB) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยสามารถหาค่าความต้านทาน RB ได้ เมื่อทราบค่ากระแสสูงสุดของ CT ซึ่งค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมตัวต้านทาน RB จะต้องไม่เกินระดับแรงดันอ้างอิงของพอร์ต ADC (Analog Reference Voltage; AREF) ของอาร์ดูโน ในการออกแบบนี้ค่าแรงดัน AREF ของบอร์ดอาร์ดูโนคือ 5 โวลต์ ดังนั้น AREF/2 มีค่าเท่ากับ 2.5 โวลต์ ก็จะสามารถหาค่าความต้านทาน RB ได้จากสมการที่ (1) ต่อไป



รูปที่ 5 วงจรการต่อโมดูล MAX6675

$$R_B = \frac{AREF / 2}{\text{secondary peak - current}} \quad (1)$$

โดยกำหนดให้ค่า Secondary Peak-current เป็นค่ากระแสสูงสุดตามคุณสมบัติของ CT ที่นำมาใช้งาน

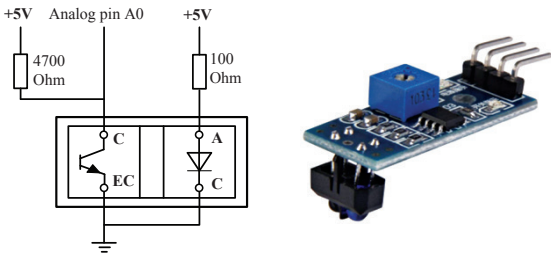
เมื่อทราบค่าความต้านทาน  $R_B$  แล้วจะทำให้ทราบค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_B$  ซึ่งค่าแรงดันตกคร่อมนี้ได้จ่ายให้กับวงจรเรกติไฟล์ เพื่อเปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับตัวต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  มีหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขาอินพุตของอาร์ดูโนที่ขา A3, A4, A5 ตามลำดับ ไม่ให้เกิน 5.1 โวลต์

### 2.2.3 ภาคการตรวจวัดค่าอุณหภูมิ

การตรวจวัดค่าอุณหภูมิได้ใช้โมดูล MAX6675 โดยมีเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เป็นตัววัดค่าอุณหภูมิเพื่อส่งค่ามายังโมดูล MAX6675 ที่ใช้ระบบการสื่อสารกับบอร์ดอาร์ดูโนในลักษณะ SPI (Serial Peripheral Interface) ที่เป็นวิธีการสื่อสารรูปแบบหนึ่ง ซึ่งทำงานในลักษณะที่ให้อุปกรณ์ตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็น Master ในขณะที่อีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็น Slave และสามารถส่งข้อมูลในโหมด Full-duplex ที่สามารถส่งสัญญาณถึงกันได้ระหว่าง Master และ Slave ได้อย่างต่อเนื่อง วงจรการต่อโมดูล MAX6675 แสดงในรูปที่ 5

### 2.2.4 ภาคการตรวจวัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์

สำหรับการวัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ใช้โมดูล TCRT5000 ที่รวมเอา LED อินฟราเรดและโฟโต้ทรานซิสเตอร์ไว้ภายในแสดงในรูปที่ 6 กล่าวคือเมื่อจ่ายไฟให้แก่วงจร LED จะส่งแสงอินฟราเรดไปยังวัตถุ ซึ่งถ้ามีวัตถุอยู่ด้านหน้า



รูปที่ 6 โมดูล TCRT5000

โฟโต้ทรานซิสเตอร์จะได้รับแสงสะท้อนกลับมา ทำให้สามารถนำกระแสได้และเกิดแรงดันตกคร่อมขึ้น ซึ่งในการวัดค่าความเร็วรอบนี้จะต้องทำการติดแถบตะกั่วเพื่อให้เกิดการสะท้อนกลับมา แล้วนำค่ามาคำนวณหาความเร็วรอบต่อไป

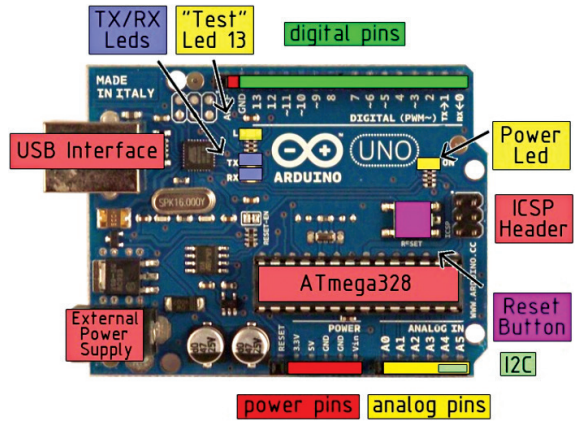
2.2.5 ภาคประมวลผลสัญญาณ

ภาคประมวลผลสัญญาณในการออกแบบชุดต้นแบบนี้ ได้ใช้บอร์ดอาร์ดูโน ซึ่งเป็นบอร์ดที่ได้รับความนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานบอร์ดหนึ่งที่ใช้โอซีชนิด ATmega328 เป็นตัวประมวลผล ที่ความถี่ 16 MHz โดยที่บอร์ดอาร์ดูโนมีอินพุต/เอาต์พุต 14 ขา คือ ขาสัญญาณ D0-D13 โดยแต่ละขาสัญญาณจะทำหน้าที่แตกต่างกันออกไป เช่น ขาสัญญาณ D0, D1 จะใช้เป็นขาสัญญาณที่ติดต่อทางพอร์ตอนุกรม (Serial Port, Rx, Tx) นอกจากนั้นจะเป็นขาสัญญาณที่ใช้ติดต่อกับขาสัญญาณอินพุต/เอาต์พุตและบางขาสัญญาณยังทำหน้าที่เป็นขาสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) บอร์ดอาร์ดูโนยังมีขาสัญญาณอินพุตแบบแอนาล็อกอีก 6 ขา คือขาสัญญาณ A0-A5 อีกด้วย รูปที่ 7 แสดงบอร์ดอาร์ดูโนที่นำมาใช้งานดังกล่าว

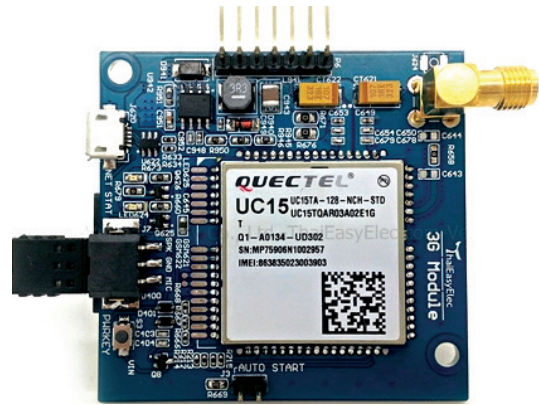
สำหรับการรับสัญญาณค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าจากวงจรตรวจวัดค่าแรงดันและวงจรตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้านั้น จะต่อเข้ากับขาสัญญาณอินพุตแบบแอนาล็อกทั้ง 6 ขาสัญญาณ ส่วนการวัดค่าอุณหภูมิจะใช้ระบบการสื่อสารในลักษณะ SPI โดยต่อเข้ากับขาสัญญาณ D5- D7

2.2.6 ภาคส่งสัญญาณผ่านอินเทอร์เน็ต

ในส่วนของภาคส่งสัญญาณอินเทอร์เน็ตได้ใช้อุปกรณ์การส่งสัญญาณ 3G ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นระบบการสื่อสารทางโทรศัพท์มือถือที่ใช้โมดูล UMTS/HSDPA รุ่น UC15-T



รูปที่ 7 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลอาร์ดูโน ยูโน [6]



รูปที่ 8 บอร์ดการสื่อสาร 3G [7]

ของบริษัท Quectel เป็นอุปกรณ์หลัก ทั้งนี้ UC15 เป็นโมดูลสื่อสาร ระบบ UMTS/HSPA รองรับระบบสื่อสาร GSM ความถี่ 850/900/1,800/1,900 MHz และ UMTS (3G) ความถี่ 850/2,100 MHz โดยการสั่งงานของโมดูล UC15 จะสั่งงานผ่านทางพอร์ตสื่อสารอนุกรม Rx, Tx และพอร์ต USB ด้วยชุดคำสั่ง AT Command สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นการรับส่งสัญญาณแบบ Voice, SMS และ Data

นอกจากนี้ยังรวมถึงการสื่อสารด้วย Protocol TCP/IP ทั้งนี้ในการส่งสัญญาณและการเก็บข้อมูลในฐานข้อมูลนั้นจะใช้รูปแบบ JSON (Java-Script Object Notation) ที่เป็นรูปแบบของข้อมูลที่ใช้สำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลที่มีขนาดเล็ก

ซึ่งสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายและสามารถสร้างและอ่านโดยเครื่องได้ง่าย ด้วยการกำหนดภายใต้ภาษา JavaScript (Java-Script Programming Language, Standard ECMA-262 3rd Edition-December 1999) โดย JSON ซึ่งเป็นรูปแบบข้อมูลตัวอักษรที่มีความเป็นอิสระ แต่จะมีหลักการเขียนที่คุ้นเคยกับผู้เขียนโปรแกรมในภาษาต่างๆ ได้ดี เช่น ภาษา C, C++, C#, Java, Javascript, Perl, Python และอื่นๆ คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ JSON เป็นภาษาที่ใช้สำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลที่มีความสมบูรณ์แบบ

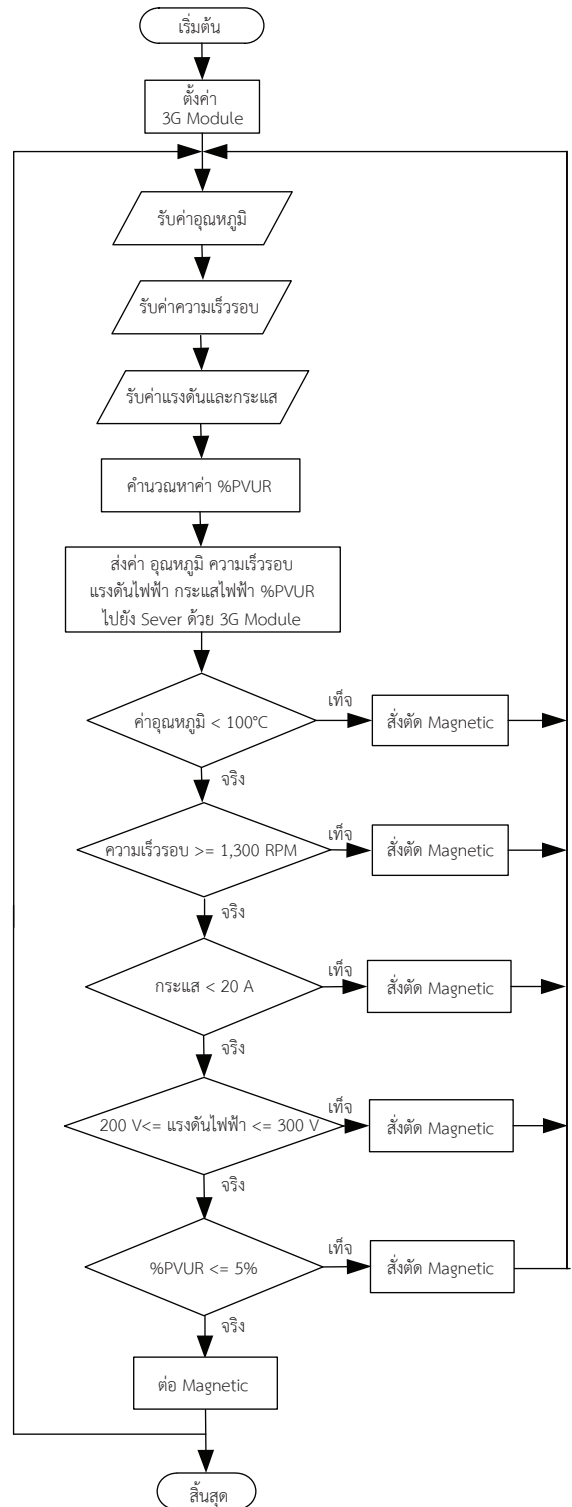
### 3. ระบบการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น

การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบนั้นสามารถอธิบายการทำงานได้ดังโฟลว์ชาร์ต (Flowchart) ในรูปที่ 9 โดยกระบวนการจะเริ่มจากตัวประมวลผลด้วยอาร์ดูโน จะทำการตั้งค่าบอร์ดการสื่อสาร 3G (3G UC15) และตรวจสอบการเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เนตที่อาศัยซิมการ์ด (Sim Card) ของเครือข่ายโทรศัพท์ เมื่อการตั้งค่าบอร์ดการสื่อสาร 3G สมบูรณ์ก็จะเริ่มต้นการรับค่าจากเซ็นเซอร์ โดยที่เริ่มจากค่าอุณหภูมิ ค่าความเร็วรอบ ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส เพื่อนำมาเก็บในตัวแปรที่ได้มีการกำหนดไว้ก่อนแล้ว จากนั้นจะนำเอาค่าแรงดันไฟฟ้าเฟส ( $V_R$ ,  $V_S$ ,  $V_T$ ) มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความสมดุลของแรงดันไฟฟ้า PVUR (Phase Voltage Unbalance Rate) ดังสมการที่ (2)

$$PVUR(\%) = \frac{\text{Max} [(V_R - V_{avg}), (V_S - V_{avg}), (V_T - V_{avg})]}{V_{avg}} \quad (2)$$

โดยที่ค่าแรงดันเฉลี่ย  $V_{avg} = \frac{V_R + V_S + V_T}{3}$

เมื่อโปรแกรมได้ทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าตามสมการที่ (2) แล้ว ระบบจะทำการส่งข้อมูลค่าอุณหภูมิ ค่าความเร็วรอบ ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าเปอร์เซ็นต์ความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าไปยังเซิร์ฟเวอร์ และเก็บข้อมูลนี้ไว้ในฐานข้อมูลเพื่อนำมาแสดงผล



รูปที่ 9 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของระบบเฝ้าตรวจสอบมอเตอร์

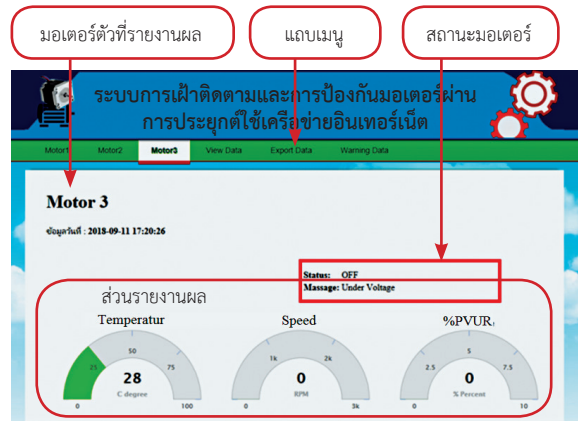
ผ่านเว็บไซต์ ซึ่งในขณะที่ระบบกำลังส่งข้อมูลต่างๆ นี้ ระบบก็จะทำการตรวจสอบค่าอุณหภูมิ ค่าความเร็วรอบ ตลอดจน %PVUR ดังลำดับการประมวลผลในรูปที่ 9 พร้อมด้วยค่าเกณฑ์สำหรับการป้องกันมอเตอร์ในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 นี้ เป็นเกณฑ์สำหรับการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ไฟฟ้า โดยมีค่าที่ทำการตรวจสอบอยู่ 5 สถานะด้วยกัน ประกอบด้วย ค่าอุณหภูมิในการออกแบบระบบจะทำการออกแบบอุณหภูมิของมอเตอร์ไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส โดยที่การกระจายของอุณหภูมิของมอเตอร์ในส่วนต่างๆ นั้น จะสามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด 150 องศาเซลเซียส ค่าแรงดันเฟสของมอเตอร์ไม่ควรต่ำกว่าและสูงกว่า 10% ของพิกัด และเปอร์เซ็นต์ความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 5%

ตารางที่ 2 การกำหนดค่าเกณฑ์สำหรับการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์

ค่าข้อมูล	เกณฑ์การตรวจสอบ	การตรวจสอบและสถานะคอนแทคเตอร์
อุณหภูมิ	ค่าอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C	Normal Contactor ON
	ค่าอุณหภูมิสูงกว่า 100°C	Over Temperature Contactor OFF
ความเร็วรอบ	ค่าความเร็วรอบมากกว่า 1,300 RPM	Normal Contactor ON
กระแสเฟสของมอเตอร์	ค่ากระแสไม่น้อยกว่า 20 Arms	Normal Contactor ON
แรงดันเฟสที่ตกคร่อมมอเตอร์	ค่าแรงดัน 200-300 Vrms	Normal Contactor ON
	ค่าแรงดันน้อยกว่า 200 Vrms	Under Voltage Contactor OFF
	ค่าแรงดันมากกว่า 300 Vrms	Over Voltage Contactor OFF
เปอร์เซ็นต์ความสมดุลของแรงดันไฟฟ้า %PVUR	ค่าเปอร์เซ็นต์ความสมดุลน้อยกว่า 5%	Normal Contactor ON
	ค่าเปอร์เซ็นต์ความสมดุลมากกว่า 5%	%PVUR Contactor OFF

จากตารางที่ 2 เป็นเกณฑ์ที่ได้กำหนดขึ้นสำหรับการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ไฟฟ้า ได้แก่ ค่าอุณหภูมิ ซึ่ง



รูปที่ 10 หน้าจอแสดงผลที่ได้ออกแบบสำหรับรายงานผลการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์

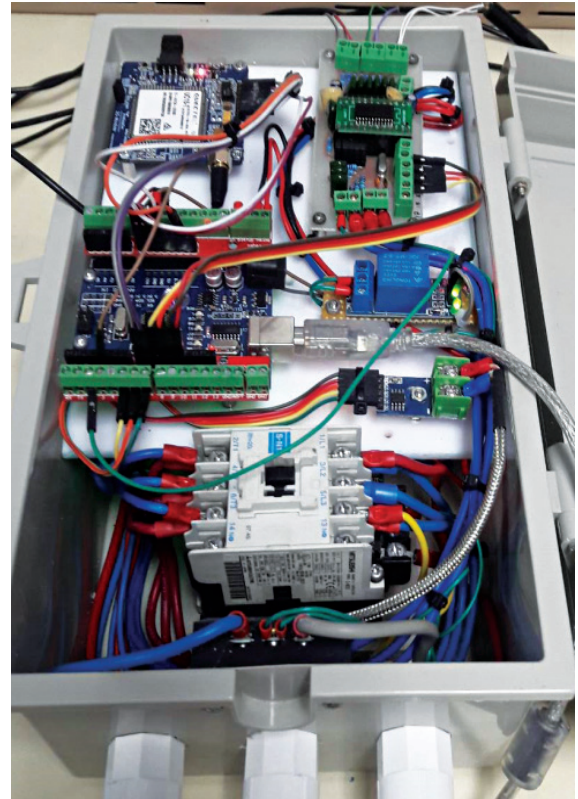
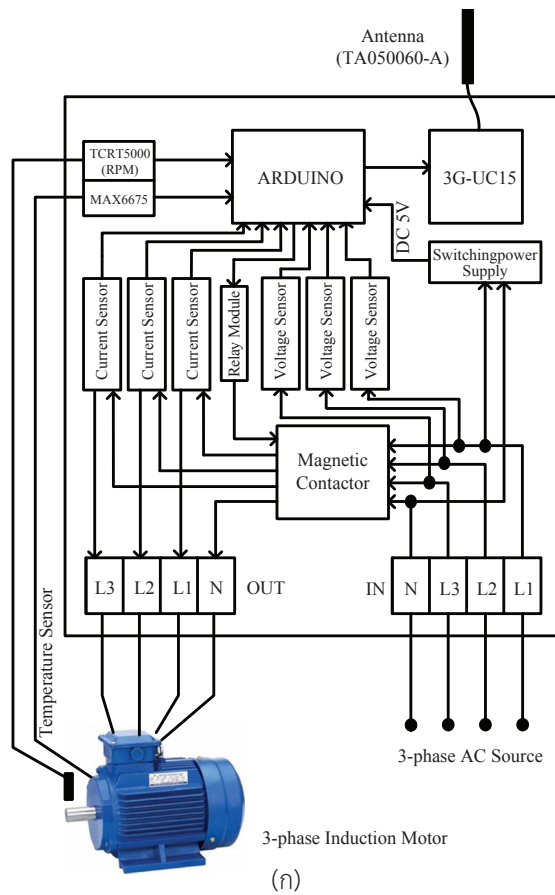
ในการเฝ้าตรวจนี้ได้กำหนดค่าอุณหภูมิของมอเตอร์ไว้ที่ 100 องศาเซลเซียส (โดยที่การกระจายของอุณหภูมิของมอเตอร์ในส่วนต่างๆ นั้นจะสามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุดที่ 150 องศาเซลเซียส [8]) สำหรับค่าแรงดันเฟสของมอเตอร์ไม่ควรต่ำกว่าและสูงกว่า 10% ของค่าพิกัด และค่าเปอร์เซ็นต์ความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าจะถูกกำหนดไว้ที่ไม่เกิน 5% [9]

โดยหากพบวาในเงื่อนไขใดเป็นเท็จและเกินกว่าช่วงเวลาที่ได้ปรับตั้งไว้ ก็จะส่งสัญญาณออกเอาต์พุตเพื่อทำการสั่งให้คอนแทคเตอร์ปลดวงจรเพื่อหยุดการทำงานของมอเตอร์ ในส่วนของซอฟต์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ได้ใช้ภาษา PHP ซึ่งจัดอยู่ในประเภทการเขียนโปรแกรมบนเว็บ (Web-based Programming) เพราะจะเก็บโค้ดคำสั่ง หรือสคริปต์ทั้งหมดที่เขียนขึ้นมาไว้บนเครื่องเซิร์ฟเวอร์ที่เดียว (Web Server) และให้ผู้ใช้งาน (Client) เรียกใช้งานโปรแกรมผ่านเว็บเบราว์เซอร์ เพื่อนำข้อมูลมาแสดงผลที่หน้าจอ ในการพัฒนาเบื้องต้นนี้ หน้าแรกได้แสดงผลการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วรอบ %PVUR และแถบเมนูดังแสดงในรูปที่ 10

#### 4. ผลการทดลอง

ในการทดลอง ระบบการเฝ้าตรวจสอบสถานะและการป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าระยะไกล โดยใช้ฮาร์ดแวร์ที่ได้พัฒนา





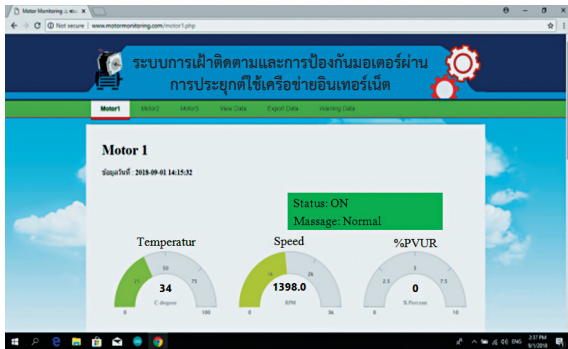
รูปที่ 11 (ก) บล็อกไดอะแกรมการต่อวงจร และ (ข) รูปจริงของระบบเฝ้าตรวจสอบสถานะและป้องกันมอเตอร์ตามที่ได้ออกแบบ

ขั้นนี้ ได้ทำการทดลองกับมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 กิโลวัตต์ โดยได้กำหนดสถานะสำหรับการทดสอบตามตารางที่ 2 ซึ่งบล็อกไดอะแกรมการต่อวงจรของระบบที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 11 พร้อมทั้งได้แสดงรูปจริงของชุดต้นแบบไว้ด้วย สำหรับในส่วนของ การแสดงผลการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ได้ใช้คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (Notebook Computer) ในการทดสอบขั้นต้นของระบบ เฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ ได้ทดสอบกรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ที่แตกต่างกัน 3 สถานะ ได้แก่ สถานะแรงดันสมดุล สถานะแรงดันสูงกว่าปกติ และสถานะแรงดันต่ำกว่าปกติ ได้ผลการเฝ้าตรวจสอบแสดงในรูปที่ 12 ในรูปที่ 12 (ก) เป็นสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟสสมดุล พร้อมด้วยการแสดงสถานะของมอเตอร์ไฟฟ้า

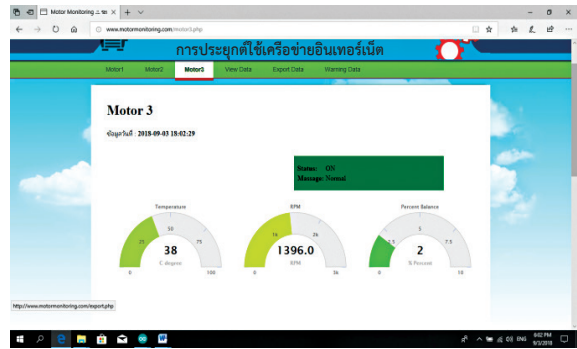
ด้วยแถบสีเขียว

พร้อมด้วยข้อความเพื่อบอกสถานะการทำงานของมอเตอร์ด้วยคำว่า “ON” และสถานะของมอเตอร์ด้วยคำว่า “Normal” นอกจากนี้ยังแสดงผลค่าอุณหภูมิ (Temperature) ในหน่วยองศาเซลเซียส ค่าความเร็วรอบ (Speed) ของมอเตอร์ในหน่วยรอบต่อนาที และค่าเปอร์เซ็นต์ความสมดุลของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (%PVUR) สำหรับผลการทดลองในรูปที่ 12 (ข) เป็นการแสดงผลด้วยค่าที่ละเอียดขึ้น ได้แก่ แถบค่าของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส โดยค่าที่ได้แสดงทั้งหมดนี้จะแสดงในลักษณะเวลาจริง (Real Time) ในทุกๆ 7 วินาที

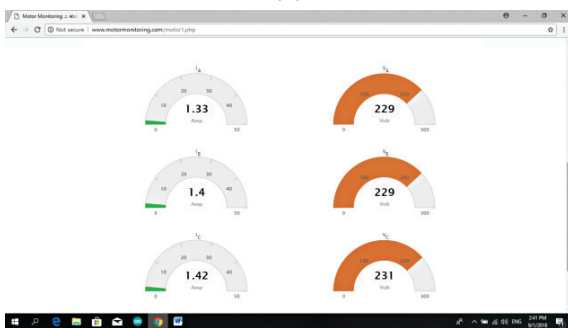
สำหรับการทดสอบกรณีแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส มีสถานะแรงดันเกิน (Over Voltage) ที่หน้าจอแสดงผล



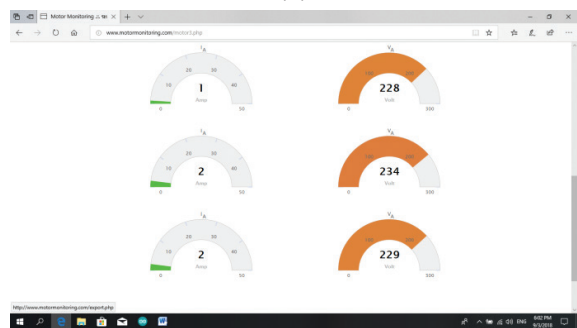
(ก)



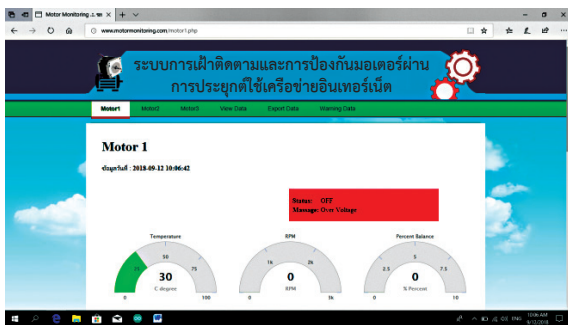
(ก)



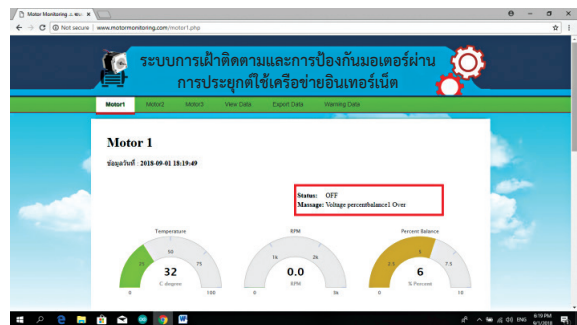
(ข)



(ข)



(ค)



(ค)

รูปที่ 12 (ก)-(ข) ผลการเฝ้าตรวจสอบสถานะแหล่งจ่ายแรงดันสมดุลง และ (ค) กรณีมีสถานะแรงดันเกิน

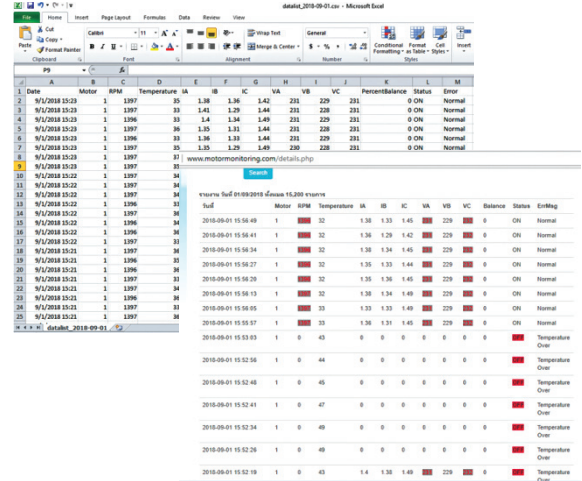
รูปที่ 13 (ก)-(ข) ผลการเฝ้าตรวจสอบสถานะแหล่งจ่ายแรงดันมีค่า 2%PVUR และ (ค) กรณีมีค่า 6%PVUR

จะปรากฏดังรูปที่ 12 (ค) โดยจะได้แสดงสถานะของมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยแถบสีแดงที่มีข้อความบอกสถานะการทำงานของมอเตอร์ด้วยคำว่า “OFF” และสถานะของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เกิดความผิดปกติจากแรงดันเกินด้วยคำว่า “Over Voltage” ทั้งนี้การแสดงผลค่าของอุณหภูมิ ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า และค่า %PVUR จะยังคงแสดงข้อมูลด้วยเวลาจริงต่อไป

การทดลองต่อมาได้ทดสอบกรณีสถานะแรงดันแหล่งจ่าย 3 เฟส ไม่สมดุลที่ระดับ 2%PVUR ซึ่งมอเตอร์ยังทำงานได้ตามปกติ โดยแถบสีเขียวแสดงข้อความบอกสถานะการทำงานของมอเตอร์ด้วยคำว่า “ON” แสดงผลการทดลองในรูปที่ 13 (ก) พร้อมทั้งแสดงค่าอุณหภูมิ ค่าความเร็วรอบ และค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าด้วยค่า 2%PVUR ในรูปที่ 13 (ข) ได้แสดงค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดัน

ไฟฟ้าของมอเตอร์ในแต่ละเฟส สำหรับในรูปที่ 13 (ค) เป็นการรายงานผลการรันแหล่งจ่ายมีสภาวะแรงดันไม่สมดุล 6%PVUR ทำให้ระบบส่งสัญญาณสั่งหยุดการทำงานของมอเตอร์ ทั้งนี้ ค่าอุณหภูมิ และความเร็วของมอเตอร์ยังคงปรากฏค่าปัจจุบัน ยกเว้นค่า %PVUR

นอกจากการแสดงผลเป็นเวลารจริงแล้ว ยังสามารถเรียกดูข้อมูลสภาวะการทำงานของมอเตอร์ย้อนหลังได้ และส่งออกข้อมูลเป็นไฟล์ Excel ได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 14



### 5. สรุป

ชุดต้นแบบเพื่อการเฝ้าตรวจสอบสภาวะมอเตอร์ระยะไกล โดยใช้ฮาร์ดแวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ สามารถรายงานผลการทำงานของมอเตอร์ได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้จากการทดลองทั้งในส่วนของการออกแบบชุดต้นแบบ และการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อการรับส่งข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต พบว่าสามารถทำงานสัมพันธ์กันได้อย่างถูกต้องด้วยค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ โดยในส่วนของชุดต้นแบบนี้ เมื่อมอเตอร์เกิดสภาวะผิดปกติอย่างใดอย่างหนึ่งแล้วจะทำการสั่งให้มอเตอร์หยุดการทำงาน

รูปที่ 14 ตัวอย่างข้อมูลการทำงานของมอเตอร์ย้อนหลัง

การพัฒนาระบบเฝ้าตรวจสอบสภาวะด้วยระบบสมองกลฝังตัวได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 3 ทั้งนี้ระบบการเฝ้าตรวจสอบสภาวะมอเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าเนื่องจากใช้อุปกรณ์ที่มีขายในท้องตลาดนำมาประยุกต์ใช้ การพัฒนาขึ้นได้เองนี้ สามารถทดแทนการนำเข้า

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบเทคโนโลยีการพัฒนา ระบบเฝ้าตรวจสอบสภาวะที่ผ่านมากับระบบที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ [10]

Related Work, Year	Application	Communication System	Type of Sensors	Microcontroller	Monitoring System	Cost
Gill <i>et al.</i> , 2012	Smart Power Monitoring	ZigBee	Voltage, Current	PC	PC	Hight
Aurilio <i>et al.</i> , 2014	Smart Meters	----	Voltage, Current	Arduino Shield	Ordinary	Low
Tamkittikhun <i>et al.</i> , 2015	Power Meter Design	Ethernet Shield	Voltage, Current	Arduino Mega 2560	PC	Hight
Salamone <i>et al.</i> , 2016	Smart Lamp	Bluetooth	Temperature, Humidity	Arduino Mega 2560	Smartphone	Low
Sung <i>et al.</i> , 2013	Smart LED	Wi-Fi + ZigBee	Light Sensor	XP-8000	Smartphone	Hight
Di Gennaro <i>et al.</i> , 2014	Monitoring System	ZigBee	pH Probe	Raspberry Pi	PC	Very Hight
Calderón <i>et al.</i> , 2016	Monitoring System	Cable	Temperature	Arduino Mega and PC	PC	Very Hight
Kim <i>et al.</i> , 2015	Monitoring System	Wi-Fi	Webcam	Embedded Linux and Arduino	Smartphone	Very Hight
This Work, 2019	Monitoring System	3G Module	Voltage, Current, Temperature, Speed	Arduino Uno	PC	Low



จากต่างประเทศ รวมถึงเป็นการพัฒนาองค์ความรู้สู่การพัฒนาที่สูงขึ้น การนำไปติดตั้งที่ต้องใช้กับมอเตอร์จำนวนมาก รวมถึงการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในอนาคตแบบพึ่งตนเองได้ เช่น การพัฒนาต่อยอดเพื่อประเมินการใช้พลังงานของมอเตอร์ เพื่อนำมาวิเคราะห์การใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า เป็นต้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ ด้วยทุนงบประมาณ ประจำปี 2557

## เอกสารอ้างอิง

- [1] A. C. Lima-Filho, R. D. Gomes, M. O. Adissi, T. A. B. Silva, F. A. Belo, and M. A. Spohn, "Embedded system integrated into a wireless sensor network for online dynamic torque and efficiency monitoring in induction motors," *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, vol. 17, no. 3, pp. 404–414, 2012.
- [2] T. H. Nasution, M. A. Muchtar, I. Siregar, U. Andayani, E. Christian, and E. P. Sinulingga, "Electrical appliances control prototype by using GSM module and arduino," in *Proceedings 4th International conf. on Industrial Engineering and Applications*, pp. 355–358, 2017.
- [3] S. Grubic, J. M. Aller, B. Lu, and T. G. Habetler, "A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4136, 2008.
- [4] M. Campbell and G. Arce Jr., "Effect of motor voltage unbalance on motor vibration: test and evaluation," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 54, no. 1, pp. 905–911, Jan./Feb. 2018.
- [5] M. Sen and B. Kul, "IoT-based wireless induction motor monitoring," in *Proceedings XXVI International Scientific Conference Electronics (ET2017)*, Sozopol, Bulgaria, pp. 1–5, Sep. 13–15, 2017.
- [6] Arduino. (2016, April). Pulse width modulation or PWM LED Program. Arduino [Online]. Available: <http://elec2web.blogspot.com>
- [7] Thaieasyelec. (2015). 3G Module (UC15-T). Thaieasyelec. Bangkok, Thailand [Online]. Available: <https://www.thaieasyelec.com/3g-module-uc15-t.html>
- [8] M. Memon, A. K. Junejo, M. Siyal, and A. Ali, "Performance analysis of induction motor operating at unbalanced under and overvoltage supply-a comparative approach," *Engineering Science and Technology International Research Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 32–37, 2017.
- [9] C. A. Reineri, J. C. Gómez, E. B. Balaguer, and M. M. Morcos, "Experimental study of induction motor performance with unbalanced supply," *Electric Power Components and Systems*, vol. 34, no. 7, pp. 817–829, 2006.
- [10] M. J. Mnati, A. V. Bossche, and R. F. Chisab, "A smart voltage and current monitoring system for three phase inverters using an android smartphone application," *MDPI, Sensors*, no. 17, pp. 1–16, 2017.