



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส
โดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา

โดย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สัญญาเลขที่ RDG61D0012

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส
โดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา

คณะผู้วิจัย

- รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ
- รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา กอเจริญ
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เพชร นันทวิวัฒนา

สังกัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา
สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา

ชุดโครงการร่วมสนับสนุนทุนวิจัยและพัฒนา กฟผ.-สกว.
สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สัญญาเลขที่ RDG61D0012

โครงการ “การพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา”

- ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา
(ภาษาอังกฤษ) Development of Portable Non-Intrusive On-Service Three Phases Induction Motor Efficiency Tester

คำสำคัญ มอเตอร์เหนี่ยวนำ การประเมินประสิทธิภาพ การอนุรักษ์พลังงาน
การตรวจวัดโดยไม่รบกวนการทำงาน

Keywords: Three Phases Induction Motor, Efficiency Assessment, Energy Conservation,
Non-Intrusive Measurement

- หัวหน้าโครงการ

ชื่อ-สกุล รองศาสตราจารย์ ดร. กิรติ ชยะกุลศิริ

หน่วยงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ที่อยู่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์/โทรสาร 044-224699/081-8206483 E-mail: keerati.ch@sut.ac.th

- นักวิจัย

ชื่อ-สกุล รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา กอเจริญ

หน่วยงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชา -

ที่อยู่ สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา สำนักพระราชวัง สนามเสือป่า ถ.ศรีอยุธยา ดุสิต กรุงเทพฯ 10300

โทรศัพท์/โทรสาร 081-2063717 E-mail: drpreecha@gmail.com

- นักวิจัย

ชื่อ-สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เพชร นันทิวัฒนา

หน่วยงาน คณะเทคโนโลยีดิจิทัล ภาควิชา -

ที่อยู่ สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา สำนักพระราชวัง สนามเสือป่า ถ.ศรีอยุธยา ดุสิต กรุงเทพฯ 10300

โทรศัพท์/โทรสาร 081-4415466 E-mail: petch.nant@gmail.com

สารบัญ

สารบัญ.....	i
สารบัญภาพ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vi
บทสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)	viii
1. ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง	viii
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย	x
3. ผลการดำเนินงานโครงการ	x
บทคัดย่อ.....	xiii
Abstract.....	xiv
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมติฐาน	2
1.4 กิจกรรมต่างๆ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการวิจัยแต่ละข้อ	2
1.6 สถานที่.....	6
1.7 แนวทาง/ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	6
1.8 ผลที่คาดว่าจะได้รับเมื่อการดำเนินงานเสร็จสิ้นที่เป็นรูปธรรม และตัวชี้วัดความสำเร็จของโครงการ	7
1.9 กระบวนการผลักดันผลงานดังกล่าวออกสู่การใช้ประโยชน์.....	10
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	11
2.1 วิธีประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์	12
2.1.1 วิธีประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้า (Input Power Method).....	14
2.1.2 วิธีประเมินจากค่าไทด (Slip Method).....	15
2.1.3 วิธีประเมินจากค่ากระแส (Current Method)	16
2.1.4 วิธีประเมินจากวงจรสมมูล (Equivalent Circuit Method).....	17
2.1.5 วิธีประเมินจากค่ากำลังงานสูญเสีย (Segregated Loss Method).....	19
2.1.6 วิธีประเมินจากค่าแรงบิดช่องว่างอากาศ (Air-Gap Torque Method).....	20
2.2 เปรียบเทียบความแม่นยำและระดับในการรวบรวมการทำงานของมอเตอร์ของแต่ละวิธีการ	21
2.3 แนวทางการดำเนินงานของบริษัทจัดการพลังงาน (ESCO)	22
2.4 มาตรฐานประสิทธิภาพมอเตอร์ (Efficiency Classes)	31
2.5 การตรวจวัดและอินเทอร์เฟซสัญญาณ.....	34
2.6 การประมวลผลสัญญาณด้วยวิธีการกรองค่าสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์.....	40

2.7 การหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization)	41
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	43
3.1 การออกแบบชุดตรวจวัดและอินเตอร์เฟซ	44
3.2 การออกแบบโปรแกรมส่วนติดต่อผู้ใช้	46
3.3 การประกอบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบ พกพา.....	47
3.4 การทดสอบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา	50
3.4.1 เทคนิคในการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่หน้างานจริง	51
3.4.1.1 วิธีการค่ากำลังไฟฟ้า (Input Power Method).....	51
3.4.1.2 วิธีการค่าไคล (Slip Method).....	55
3.4.1.3 วิธีการค่ากระแส (Current Method).....	56
3.4.1.4 วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีการวงจรมุมล	56
3.4.1.5 ซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีการวงจรมุมลที่ได้พัฒนาขึ้น	58
บทที่ 4 ผลลัพธ์ของการวิจัย	60
4.1 ผลลัพธ์เครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา..	60
4.1.1 การออกแบบส่วนตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและความเร็วรอบ	60
4.1.2 การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้	63
4.1.3 โครงสร้างเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบ พกพา	68
4.2 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการ ทำงานแบบพกพา (MEEPI)	70
4.2.1 ผลการทดสอบกับมอเตอร์ที่ตรวจวัดในห้องปฏิบัติการจากโครงการ RDG57D0004	70
4.2.2 ผลการทดสอบกับมอเตอร์ที่ตรวจวัดในห้องปฏิบัติการเพิ่มเติม	72
4.3 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	73
4.4 สรุปต้นทุนในการจัดสร้างเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการ ทำงานแบบพกพา	75
4.5 สรุปผลการจัดสัมมนา	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	85
เอกสารอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก	90
ผลการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีที่นำเสนอจากโครงการ การพัฒนารูปแบบการทดสอบ ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะทำงานจริงสำหรับการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์ พลังงาน (RDG57D0004).....	90

ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ใช้งานจริงด้วยวิธีที่นำเสนอจากโครงการ การประเมินผลการประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะทำงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม (RDG59D0010)	101
"เครื่องตรวจประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา" ได้รับรางวัลประดิษฐ์คิดค้นจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.).....	107

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1.1	ซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่พัฒนาขึ้น	2
ภาพที่ 2.1	การทดสอบเพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์	13
ภาพที่ 2.2	การตรวจวัดค่ากำลังงานของมอเตอร์โดยใช้เครื่องวัดกำลังงานแบบคล่องวัด	15
ภาพที่ 2.3	การตรวจวัดความเร็วรอบเพื่อใช้หาค่าไถลของมอเตอร์	16
ภาพที่ 2.4	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	17
ภาพที่ 2.5	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามวิธี ORMEL96	18
ภาพที่ 2.6	การเปรียบเทียบความแม่นยำของการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์แต่ละวิธี [3]	22
ภาพที่ 2.7	รูปแบบการรับประกันผลประหยัดพลังงาน [28]	24
ภาพที่ 2.8	รูปแบบการแบ่งปันผลประหยัดพลังงาน [28]	25
ภาพที่ 2.9	รูปแบบการประกันค่าพลังงานหรือต้นทุนสาธารณูปโภค [28]	26
ภาพที่ 2.10	ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้า 4 ขั้ว, 50Hz แต่ละระดับตามมาตรฐาน IEC 60034-30-1 [36] ...	33
ภาพที่ 2.11	ประสิทธิภาพมอเตอร์ 4 ขั้ว, 50Hz ของระดับ IE3-IE5 ตามมาตรฐาน IEC 60034-30, 2nd edition [34]	34
ภาพที่ 2.12	การอินเตอร์เฟสสัญญาณดิจิทัล	35
ภาพที่ 2.13	การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส	35
ภาพที่ 2.14	ระดับแรงดันสำหรับการอินเตอร์เฟสตามมาตรฐาน RS232	36
ภาพที่ 2.15	หัวต่อสายชนิด sub-D สำหรับ RS232	36
ภาพที่ 2.16	หัวต่อสายชนิด sub-D สำหรับ RS485	37
ภาพที่ 2.17	ระบบบัสสายสัญญาณการอินเตอร์เฟส RS485	38
ภาพที่ 2.18	เฟรมมอดบัส	39
ภาพที่ 2.19	เฟรมการร้องขอ และการตอบกลับบนมอดบัส	39
ภาพที่ 2.20	เฟรมมอดบัสในโหมดอาร์ทียู	40
ภาพที่ 3.1	ขั้นตอนการดำเนินโครงการวิจัย	43
ภาพที่ 3.2	การพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา	44
ภาพที่ 3.3	บล็อกไดอะแกรมของเครื่องมือตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา	45
ภาพที่ 3.4	ตัวอย่างหน้าต่างติดต่อผู้ใช้ของซอฟต์แวร์ที่ได้ทำการปรับปรุง	46
ภาพที่ 3.5	ภาพเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา	48
ภาพที่ 3.6	คุณลักษณะของหน่วยประมวลผลพร้อมหน้าจอแสดงผลติดต่อกับผู้ใช้	48
ภาพที่ 3.7	คุณลักษณะของหน่วยวัดผลทางไฟฟ้า Power Meter	49
ภาพที่ 3.8	คุณลักษณะของหม้อแปลงกระแสในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า	49
ภาพที่ 3.9	คุณลักษณะของปากคีบวัดแรงดันไฟฟ้า	49
ภาพที่ 3.10	คุณลักษณะของอุปกรณ์วัดความเร็วรอบแบบอินเตอร์เฟสได้	50
ภาพที่ 3.3	การตรวจวัดค่ากำลังงานของมอเตอร์โดยใช้เครื่องวัดกำลังงานแบบคล่องวัด	51
ภาพที่ 3.4	การตรวจวัดค่ากำลังงานของมอเตอร์จากการวัดค่ากระแส แรงดัน และตัวประกอบกำลัง	53
ภาพที่ 3.5	การตรวจวัดค่ากำลังงานของมอเตอร์โดยใช้เครื่องวัดกำลังงานแบบคล่องวัด	54

ภาพที่ 3.6 การตรวจวัดความเร็วรอบเพื่อใช้หาค่าไถลของมอเตอร์	56
ภาพที่ 3.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์	57
ภาพที่ 3.8 กระบวนการคำนวณค่าตัวแปรในวงจรสมมูลของมอเตอร์ด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงาน	59
ภาพที่ 3.9 อินโฟกราฟฟิกแสดงวิธีการคำนวณของโปรแกรม	58
ภาพที่ 4.2. หน้าต่างเมนูหลัก (Home)	64
ภาพที่ 4.3 หน้าต่างเมนูรับค่าคุณลักษณะของมอเตอร์ (Name Plate Information)	64
ภาพที่ 4.4 เมนูประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการกรอกข้อมูลจากเครื่องวัดอื่น (Off Line Measurment).....	65
ภาพที่ 4.5 เมนูประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการตัวเครื่องวัด (On Line Measurement) ยืนยันการติดตั้งสารเคเบิลเครื่องวัดกระแส แรงดัน และเซนเซอร์วัดความเร็วรอบที่ระบบไฟฟ้าและมอเตอร์ (Cable Connection to Equipment)	65
ภาพที่ 4.6 เมนูประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการตัวเครื่องวัด (On Line Measurement) ยืนยันการติดตั้งสารเคเบิลเครื่องวัดกระแส แรงดัน และเซนเซอร์วัดความเร็วรอบที่ตัวเครื่องวัด (Cable Connection to Instrument).....	66
ภาพที่ 4.7 เมนูการรับค่าจากเครื่องวัด (On Line Measurement)	66
ภาพที่ 4.8 เมนูประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ (Estimated Efficiency)	67
ภาพที่ 4.9 เมนูช่วยคำนวณความคุ้มค่าในการลงทุนเปลี่ยนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง (Saving Calculation)...67	
ภาพที่ 4.10 หน้าต่างเมนูปรับตั้งการอินเตอร์เฟสของระบบ (Set Up)	68
ภาพที่ 4.11 หน้าต่างเมนูแสดงข้อมูลเกี่ยวกับโครงการวิจัยและตัวเครื่องวัด (About).....	68

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	เปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและกิจกรรมที่ทำจริง	3
ตารางที่ 1.2	เปรียบเทียบผลที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละช่วงระยะเวลา (แบ่งเป็นราย 6 เดือน)	4
ตารางที่ 2.1	สรุปการตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละวิธี.....	21
ตารางที่ 2.2	ขอบเขตการให้บริการแบบครบวงจรของบริษัทจัดการพลังงาน	23
ตารางที่ 2.3	เปรียบเทียบประสิทธิภาพมอเตอร์มาตรฐานกับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง [29]	29
ตารางที่ 2.4	การเทียบเคียงมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีระดับประสิทธิภาพต่างๆ [34]	32
ตารางที่ 2.5	ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ของระดับต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60034-30 [35]	33
ตารางที่ 2.6	ความหมายของขั้วต่อสายชนิด sub-D สำหรับ RS232.....	36
ตารางที่ 2.7	ความหมายของขั้วต่อสายชนิด sub-D สำหรับ RS485.....	37
ตารางที่ 4.1	การทดสอบผลการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพากับข้อมูลของมอเตอร์ขนาด 1.5 kW จากโครงการ RDG57D0004	71
ตารางที่ 4.2	การทดสอบผลการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพากับข้อมูลของมอเตอร์ขนาด 11 kW จากโครงการ RDG57D0004	71
ตารางที่ 4.3	ผลการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1.5 kW 2.2 kW และ 7.5 kW ในห้องปฏิบัติการ.....	72
ตารางที่ 4.4	การทดสอบผลการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพากับข้อมูลการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1.5 kW 2.2 kW และ 7.5 kW	73
ตารางที่ 4.5	การใช้พลังงาน.....	73
ตารางที่ 4.6	ระยะเวลาคืนทุน	73
ตารางที่ 4.7	การคำนวณผลประโยชน์จากมอเตอร์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาของนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้น.....	74
ตารางที่ 4.8	การคำนวณระยะเวลาคืนทุนจากมอเตอร์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาของนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้น.....	74
ตารางที่ 4.9	ประมาณการงบประมาณในการจัดสร้างเครื่อง MEEPI.....	75
ตารางที่ A1	ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ขนาด 1.5 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่	91
ตารางที่ A2	ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ขนาด 1.5 kW ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี.....	92
ตารางที่ A3	ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ขนาด 1.5 kW ที่ผ่านการซ่อมบำรุงโดยพันธมิตรใหม่	93
ตารางที่ A4	ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ขนาด 11 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่	94
ตารางที่ A5	ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ขนาด 11 kW ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี.....	95
ตารางที่ A6	ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ขนาด 11 kW ที่ผ่านการซ่อมบำรุงโดยพันธมิตรใหม่	96
ตารางที่ A7	ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ขนาด 30 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่	97

ตารางที่ A8 ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ ขนาด 30 kW ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี.....	98
ตารางที่ A9 ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ ขนาด 30 kW ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี.....	99
ตารางที่ A10 ค่าเฉลี่ยรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเป็นจุดเปอร์เซ็นต์ (%point) จากผลการ ทดสอบแต่ละวิธี.....	100
ตารางที่ B1 มอเตอร์ได้รับการคัดเลือกเข้าศึกษาความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนใหม่	102
ตารางที่ B2 คุณลักษณะของมอเตอร์ขนาด 3.7 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	102
ตารางที่ B3 สรุปผลการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 3.7 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	102
ตารางที่ B4 ผลประหยัดจากการประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับผลประหยัดจริงที่ทำการตรวจวัด.....	103
ตารางที่ B5 คุณลักษณะของมอเตอร์ขนาด 7.5 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	103
ตารางที่ B6 สรุปผลการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 11 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	103
ตารางที่ B7 ผลประหยัดจากการประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับผลประหยัดจริงที่ทำการตรวจวัด.....	104
ตารางที่ B8 คุณลักษณะของมอเตอร์ขนาด 11 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	104
ตารางที่ B9 สรุปผลการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 11 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	104
ตารางที่ B10 ผลประหยัดจากการประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับผลประหยัดจริงที่ทำการตรวจวัด	104
ตารางที่ B11 คุณลักษณะของมอเตอร์ขนาด 22 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	105
ตารางที่ B12 สรุปผลการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 22 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	105
ตารางที่ B13 ผลประหยัดจากการประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับผลประหยัดจริงที่ทำการตรวจวัด	105
ตารางที่ B14 คุณลักษณะของมอเตอร์ขนาด 37 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	106
ตารางที่ B15 สรุปผลการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 37 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	106
ตารางที่ B16 ผลประหยัดจากการประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับผลประหยัดจริงที่ทำการตรวจวัด	106

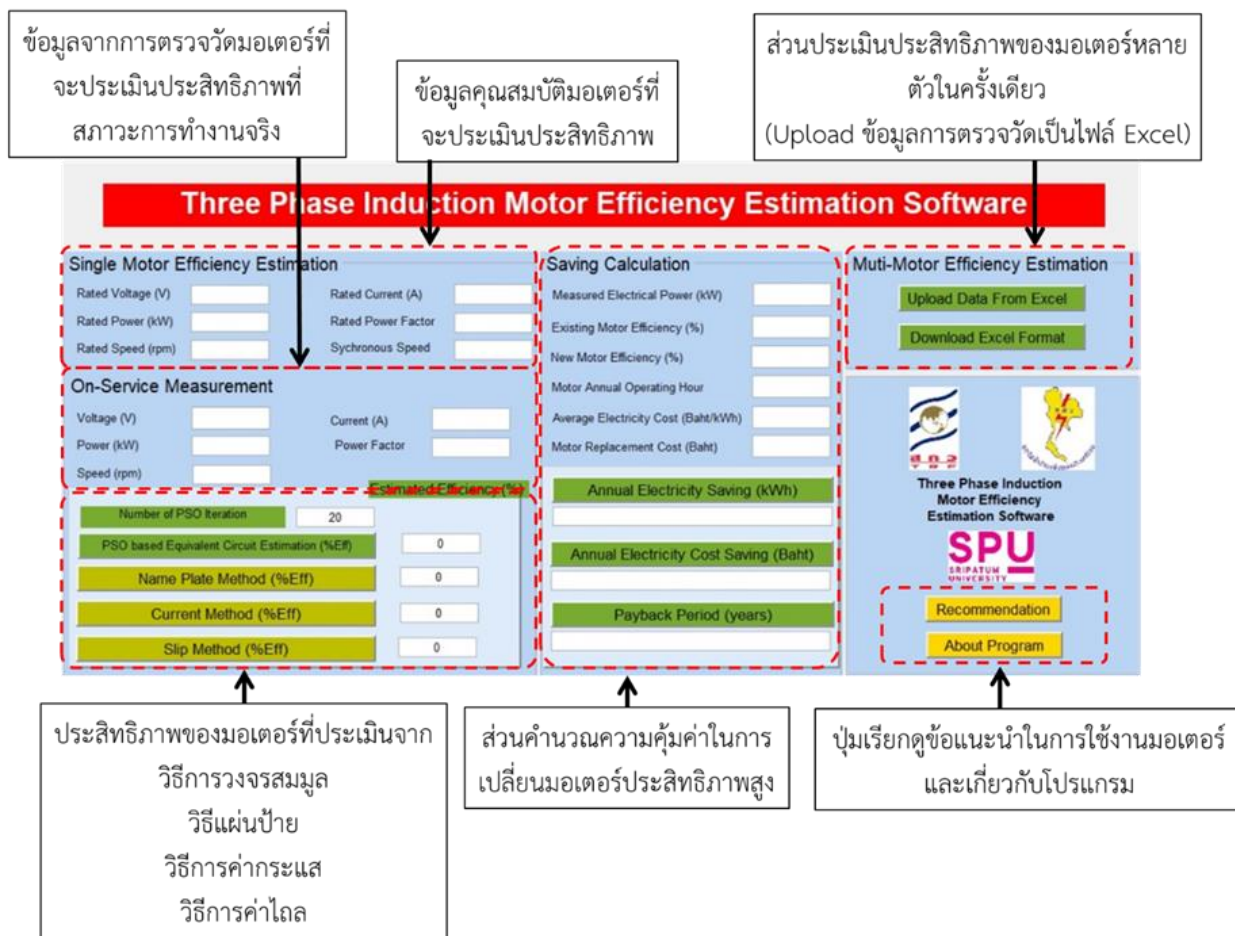
สัญญาเลขที่ RDG61D0012
โครงการ “การพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดย
ไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา”

บทสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสในสภาวะการทำงานจริงโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา โดยใช้วิธีการที่ได้พัฒนาและทดสอบกับมอเตอร์จริงในโครงการ RDG57D0004 และ RDG59D0010 ซึ่งได้พัฒนาซอฟต์แวร์ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสจากการตรวจวัดค่าตัวแปรที่ไม่รบกวนการทำงานของมอเตอร์ที่ใช้งานอยู่ โดยโครงการวิจัยนี้จะนำซอฟต์แวร์ดังกล่าวมาพัฒนาร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดและหน่วยประมวลผลที่มีหน้าจอแสดงผลที่เครื่องตรวจวัดแทนการบันทึกข้อมูลสำหรับซอฟต์แวร์ ทำให้สามารถใช้งานได้สะดวกมากขึ้น ขอบเขตหลักของโครงการนี้ประกอบด้วยการพัฒนาซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้สามารถประมวลผลบนหน่วยประมวลผลที่เชื่อมต่อกับชุดตรวจวัดและแสดงผลแบบสัมผัสได้และพัฒนาชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและชุดเชื่อมต่อสัญญาณกับหน่วยประมวลผลที่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด โดยต้นแบบที่พัฒนาขึ้นจะทดสอบกับมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส โดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพานี้จะเป็นประโยชน์ในการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ให้มีความชัดเจนและเป็นแนวทางที่เป็นที่ยอมรับในการคำนวณ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

จากปัญหาในการตรวจประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสในสภาวะการทำงานจริงที่สามารถทำได้ยากแต่เป็นค่าตัวแปรที่สำคัญมากโดยหากสามารถตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงานจริงที่หน้างานได้แม่นยำก็จะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการสร้างความชัดเจนในการวิเคราะห์การลงทุนมาตรการอนุรักษ์พลังงานของมอเตอร์ ดังนั้นชุดโครงการร่วมสนับสนุนทุนวิจัยและพัฒนา กฟผ. - สกв. ในประเด็น/กรอบงานวิจัยด้านประสิทธิภาพพลังงาน จึงได้อนุมัติโครงการวิจัยที่ผ่านมาก็คือโครงการวิจัย “การพัฒนารูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงสำหรับการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงาน” ซึ่งได้มีการพัฒนาโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงด้วยวิธีวงจรสมมูลขึ้นซึ่งได้มีการเปรียบเทียบความแม่นยำของวิธีการที่พัฒนากับผลการตรวจสอบในห้องปฏิบัติการ และได้ผลลัพธ์ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่แม่นยำกว่าวิธีการดั้งเดิมคือวิธีกระแสและวิธีค่าสลิป โดยอ้างอิงกับผลการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1.5 kW 11 kW และ 30 kW รวมจำนวน 9 ตัวในห้องปฏิบัติการ และได้พัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานให้มีความสะดวกในการใช้งานซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นได้นำไปขยายผลการใช้งานจริงในโครงการวิจัย “การประเมินผลการประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม” โดยทดสอบกับมอเตอร์ที่ใช้งานจริงจำนวน 5 ตัวและพบว่าซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำกว่าการประเมินด้วยวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในปัจจุบัน ทั้งนี้ซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่พัฒนาขึ้นแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1. ซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่พัฒนาขึ้น

ทั้งนี้ในการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาได้มีการดำเนินการปรับปรุงส่วนติดต่อผู้ใช้ใหม่โดยสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.

นอกจากนี้จากการจัดสัมมนาเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและรับฟังความคิดเห็นแนวทางในการพัฒนาผลงานวิจัยให้เกิดประโยชน์ในงานวิจัยทั้ง 2 โครงการที่ผ่านมา ซึ่งได้เชิญผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เข้าร่วมทั้งจากภาคอุตสาหกรรมและภาครัฐที่เกี่ยวข้องนั้น ได้รับความสนใจในการนำซอฟต์แวร์ที่พัฒนาไปใช้งานเป็นอย่างมากและได้รับการยอมรับว่าซอฟต์แวร์มีประโยชน์ในการช่วยประเมินและวิเคราะห์ประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสได้ ทั้งนี้หากนำกระบวนการคำนวณมาใช้ในอุปกรณ์เครื่องมือวัดเพื่อการประเมินประสิทธิภาพและสมรรถนะของมอเตอร์ที่หน้างานแบบทันทีก็จะมีประโยชน์และจะช่วยให้ผู้ใช้มีความสะดวกมากขึ้น



ภาพที่ 2. ตัวอย่างหน้าต่างติดต่อผู้ใช้ของซอฟต์แวร์ที่ได้ทำการปรับปรุง

โครงการวิจัยนี้จึงได้เสนอการวิจัยที่พัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาโดยใช้กระบวนการคำนวณที่ได้พัฒนาขึ้น ให้ได้เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ที่สามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่ทำงานโดยตรงจากหน้าจอของเครื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ให้มีความชัดเจนและเป็นแนวทางที่เป็นที่ยอมรับในการคำนวณที่มีความสะดวกมากขึ้นและเป็นการลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการประกอบด้วย

- เพื่อการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา ที่สามารถตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะทำงานจริงโดยแสดงผลที่หน้าจอได้
- เพื่อเผยแพร่วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงให้เกิดการใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์พลังงานของมอเตอร์จากวิธีการคำนวณด้วยที่แม่นยำขึ้น และเผยแพร่ให้เกิดการใช้งานมอเตอร์อย่างอนุรักษ์พลังงาน

3. ผลการดำเนินงานโครงการ

โครงการวิจัยนี้ได้เสนอการวิจัยที่พัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาโดยใช้กระบวนการคำนวณที่ได้พัฒนาขึ้น ให้ได้เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ที่สามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่ทำงานโดยตรงจากหน้าจอของเครื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ให้มีความชัดเจนและเป็น

แนวทางที่เป็นที่ยอมรับในการคำนวณที่มีความสะดวกมากขึ้นและเป็นการลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศวัตถุประสงค์ของโครงการประกอบด้วย

โดยโครงการวิจัยได้ได้มีการจัดทำ Fanpage: MEEPI สำหรับเผยแพร่ความก้าวหน้าและผลลัพธ์ของโครงการวิจัย รวมทั้งเป็นช่องทางในการเผยแพร่ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นในโครงการ ซึ่งสามารถเข้าถึง Fanpage ได้ทาง link: <http://bit.ly/MEEPfanpage> สำหรับโปรแกรม MEEP ที่ใช้งานบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล สามารถ download ใช้งานได้จาก link: <http://bit.ly/MEEPalpha>

ในส่วนของการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพานั้นได้มีการพัฒนาให้มีรูปแบบที่สะดวกต่อการใช้งานและเคลื่อนย้ายดังแสดงในภาพที่ 3 โดยใช้อุปกรณ์ดังนี้

- หน้าจอแสดงผลและติดต่อกับผู้ใช้พร้อมหน่วยประมวลผล Fanless PC Touch-Screen Panel
- หน่วยวัดผลทางไฟฟ้า Power Meter สามารถวัดค่า V(Line), V(Phase), A(Phase), kW, kVA, kVar, kWh, kVarh, PF, Hz (ในกรณีเชื่อมต่อกับ Software)
- อุปกรณ์วัดความเร็วรอบแบบอินเตอร์เฟสได้
- เซนเซอร์วัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดัน

ผลลัพธ์การทดสอบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาพบว่าสามารถส่งผ่านสัญญาณจากเซนเซอร์ไปยังหน่วยประมวลผลได้ตรงกับตัวอุปกรณ์วัดที่มีความแม่นยำระดับอุตสาหกรรมและสามารถประมวลผลผลลัพธ์ค่าประสิทธิภาพได้ตรงกับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในโครงการ RDG57D0004 โดยตัวเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะเป็นกระเป๋าถือลากที่สามารถเคลื่อนย้ายไปยังหน้างานได้สะดวก

นอกจากนี้โครงการวิจัยยังได้ได้จัดสัมมนาเผยแพร่ผลลัพธ์โครงการและรับฟังความคิดเห็นจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และได้นำผลลัพธ์และข้อเสนอแนะจากการจัดสัมมนาและการทดสอบมาปรับปรุงเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาให้สามารถใช้ในการตรวจประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ที่หน้างานได้จริงและมีความแม่นยำตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย





ภาพที่ 3. ภาพเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส
โดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา

โครงการวิจัยยังได้มีการขยายผลการใช้งานซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะทำงานจริงที่พัฒนาขึ้นโดยมีผู้เข้าร่วมการสัมมนาส่วนใหญ่เป็นวิศวกรจากภาครัฐและเอกชน และมีความเห็นว่าซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะช่วยในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์สำหรับการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ ช่วยประกอบการตัดสินใจในการเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ และช่วยวิเคราะห์ความคุ้มค่าในโครงการการเปลี่ยนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงได้ นอกจากนี้ยังเสนอให้มีการส่งเสริมให้มีซอฟต์แวร์การจัดการมอเตอร์ในอุตสาหกรรมแบบนี้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากผลการดำเนินการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการประเมินประสิทธิภาพด้วยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ลักษณะตามมาตรฐานได้มีความแม่นยำมากพอสำหรับการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ และมีประโยชน์ต่อการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของมอเตอร์

สัญญาเลขที่ RDG61D0012

โครงการ “การพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดย ไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา”

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสในสภาวะการทำงานจริงโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา โดยใช้วิธีการที่ได้พัฒนาและทดสอบกับมอเตอร์จริงในโครงการ RDG57D0004 และ RDG59D0010 ซึ่งได้พัฒนาซอฟต์แวร์ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสจากการตรวจวัดค่าตัวแปรที่ไม่รบกวนการทำงานของมอเตอร์ที่ใช้งานอยู่ โดยโครงการวิจัยนี้จะนำซอฟต์แวร์ดังกล่าวมาพัฒนาร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดและหน่วยประมวลผลที่มีหน้าจอแสดงผลที่เครื่องตรวจวัดแทนการบันทึกข้อมูลสำหรับซอฟต์แวร์ ทำให้สามารถใช้งานได้สะดวกมากขึ้น ขอบเขตหลักของโครงการนี้ประกอบด้วยการพัฒนาซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้สามารถประมวลผลบนหน่วยประมวลผลที่เชื่อมต่อกับชุดตรวจวัดและแสดงผลแบบสัมผัสได้และพัฒนาชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและชุดเชื่อมต่อสัญญาณกับหน่วยประมวลผลที่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้าและความเร็วรอบของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด ทั้งนี้วัตถุประสงค์หลักของโครงการคือเพื่อให้สามารถตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงโดยแสดงผลที่หน้าจอได้โดยไม่ต้องบันทึกผลจากเครื่องวัดมาบันทึกค่าเข้าโปรแกรมคอมพิวเตอร์อีกครั้ง รวมทั้งเพื่อเผยแพร่วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงให้เกิดการใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์พลังงานของมอเตอร์จากวิธีการคำนวณด้วยที่แม่นยำขึ้น และเผยแพร่ให้เกิดการใช้งานมอเตอร์อย่างอนุรักษ์พลังงาน

ผลลัพธ์การทดสอบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาพบว่าสามารถส่งผ่านสัญญาณจากเซนเซอร์ไปยังหน่วยประมวลผลได้ตรงกับตัวอุปกรณ์วัดที่มีความแม่นยำระดับอุตสาหกรรมและสามารถประมวลผลผลลัพธ์ค่าประสิทธิภาพได้ตรงกับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในโครงการ RDG57D0004 โดยตัวเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะเป็นกระเป๋าถือลากที่สามารถเคลื่อนย้ายไปยังหน้าจอได้สะดวก นอกจากนี้โครงการวิจัยยังได้มีการขยายผลการใช้งานซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะการทำงานจริงที่พัฒนาขึ้นโดยมีผู้เข้าร่วมการสัมมนาส่วนใหญ่เป็นวิศวกรจากภาครัฐและเอกชน และมีความเห็นว่าซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะช่วยในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์สำหรับการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ ช่วยประกอบการตัดสินใจในการเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ และช่วยวิเคราะห์ความคุ้มค่าในโครงการการเปลี่ยนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงได้

คำสำคัญ ซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส การทดสอบประสิทธิภาพมอเตอร์ วิธี
วงจรสมมูล วิธีการค่าโกล และวิธีการค่ากระแส

Contract Number RDG61D0012
Development of Portable Non-Intrusive On-Service Three Phases
Induction Motor Efficiency Tester

Abstract

This research aimed at development of non-intrusive three phases induction motor efficiency estimation portable instrument (MEEPI) by using the methodology developed and tested in the researches RDG57D0004 and RDG59D0010, which include non-intrusive three phases induction motor efficiency estimation software. In this research, the developed software had been applied to use with instrumentation devices and touch screen processing unit, instead of using measurement process to input to software computer. As a result, the method can be more conveniently used. The main scope of this project includes, software modification for operating on touch screen processing unit and interface to measurement unit that can measure voltage current power and motor speed under motor operating condition. The objectives of the project are to measure the motor efficiency with on-site display without data record from measurement unit to input to computer software and to promote the motor efficiency estimation to energy conservation program that enhance energy saving by ensuring the energy saving calculation of motor with higher efficiency.

The MEEPI test result shown that the measuring data can be interfaced from the sensors to the touch screen processing unit with acceptable industrial accuracy and the efficiency can be estimated in accordance to the results of the research RDG57D0004. The MEEPI devices are the one portable case with rolling wheels that can be conveniently carried. In addition, this research promoted the developed software by arranging seminar for both government and private sectors. The participants agree that the developed software can be used for motor efficiency estimation for preventive maintenance, decision support to motor replacement and economic evaluation for motor replacement program.

Keyword: three-phase induction motor efficiency estimation software, motor efficiency testing, equivalent circuit, slip method, current method.

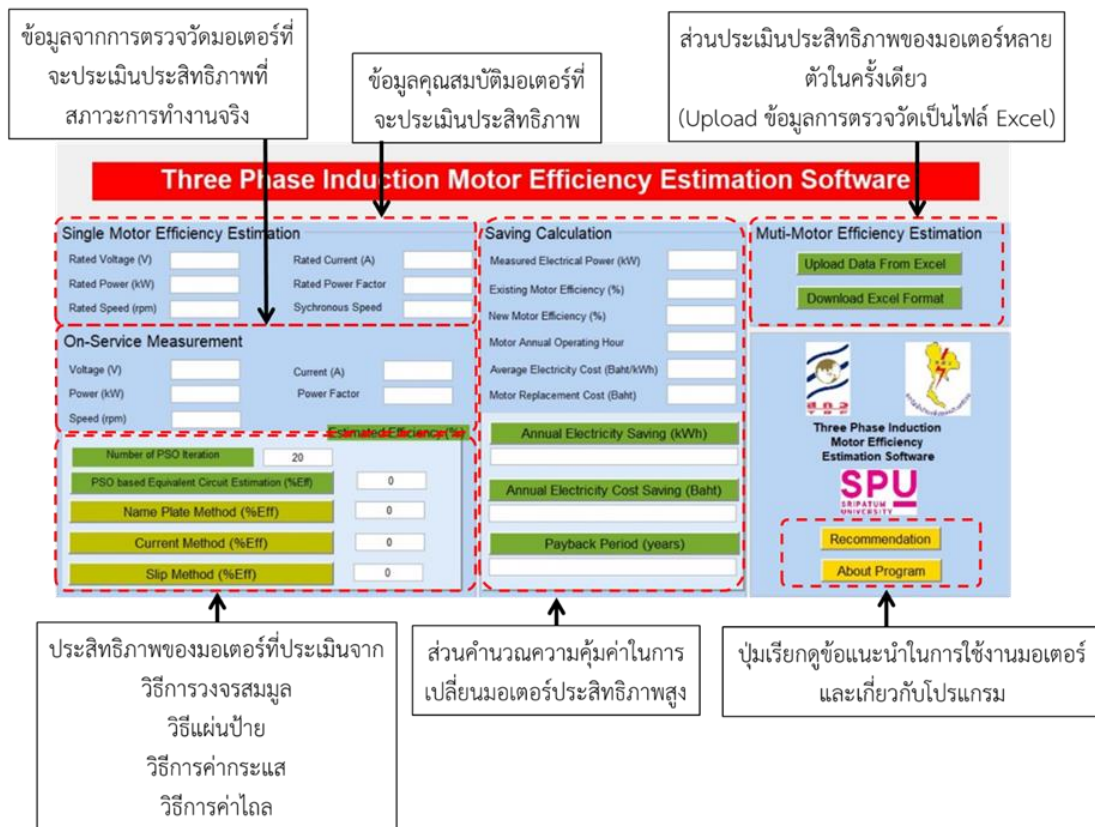
บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

จากปัญหาในการตรวจประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสในสภาวะการทำงานจริงที่สามารถทำได้ยากแต่เป็นค่าตัวแปรที่สำคัญมากโดยหากสามารถตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงานจริงที่หน้างานได้แม่นยำก็จะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการสร้างความชัดเจนในการวิเคราะห์การลงทุนมาตรการอนุรักษ์พลังงานของมอเตอร์ ดังนั้นชุดโครงการร่วมสนับสนุนวิจัยและพัฒนา กฟผ. - สกว. ในประเด็น/กรอบงานวิจัยด้านประสิทธิภาพพลังงาน จึงได้อนุมัติโครงการวิจัยที่ผ่านมาก็คือโครงการวิจัย “การพัฒนาแบบจำลองการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงสำหรับการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงาน” ซึ่งได้มีการพัฒนาโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงด้วยวิธีวงจรสมมูลซึ่งได้มีการเปรียบเทียบความแม่นยำของวิธีการที่พัฒนากับผลการตรวจสอบในห้องปฏิบัติการ และได้ผลลัพธ์ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่แม่นยำกว่าวิธีการดั้งเดิมคือวิธีกระแสและวิธีค่าสลิป โดยอ้างอิงกับผลการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1.5 kW 11 kW และ 30 kW รวมจำนวน 9 ตัวในห้องปฏิบัติการ และได้พัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานให้มีความสะดวกในการใช้งานซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นได้นำไปขยายผลการใช้งานจริงในโครงการวิจัย “การประเมินผลการประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม” โดยทดสอบกับมอเตอร์ที่ใช้งานจริงจำนวน 5 ตัวและพบว่าซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำกว่าการประเมินด้วยวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในปัจจุบัน ทั้งนี้ซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่พัฒนาขึ้นแสดงดังภาพที่ 1.1

นอกจากนี้จากการจัดสัมมนาเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและรับฟังความคิดเห็นแนวทางในการพัฒนาผลงานวิจัยให้เกิดประโยชน์ในงานวิจัยทั้ง 2 โครงการที่ผ่านมา ซึ่งได้เชิญผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เข้าร่วมทั้งจากภาคอุตสาหกรรมและภาครัฐที่เกี่ยวข้องนั้น ได้รับความสนใจในการนำซอฟต์แวร์ที่พัฒนาไปใช้งานเป็นอย่างมากและได้รับการยอมรับว่าซอฟต์แวร์มีประโยชน์ในการช่วยประเมินและวิเคราะห์ประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสได้ ทั้งนี้หากนำกระบวนการคำนวณมาใช้ในอุปกรณ์เครื่องมือวัดเพื่อการประเมินประสิทธิภาพและสมรรถนะของมอเตอร์ที่หน้างานแบบทันทีก็จะมีประโยชน์และจะช่วยให้ผู้ใช้มีความสะดวกมากขึ้น

โครงการวิจัยนี้จึงได้เสนอการวิจัยที่พัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาโดยใช้กระบวนการคำนวณที่ได้พัฒนาขึ้น ให้ได้เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ที่สามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่หน้างานโดยตรงจากหน้าจอของเครื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ให้มีความชัดเจนและเป็นแนวทางที่เป็นที่ยอมรับในการคำนวณที่มีความสะดวกมากขึ้นและเป็นการลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ



ภาพที่ 1.1 ซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่พัฒนาขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการประกอบด้วย

1. เพื่อการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา ที่สามารถตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สถานะการทำงานจริงโดยแสดงผลที่หน้าจอได้
2. เพื่อเผยแพร่วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สถานะการทำงานจริงให้เกิดการใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์พลังงานของมอเตอร์จากวิธีการคำนวณด้วยที่แม่นยำขึ้น และเผยแพร่ให้เกิดการใช้งานมอเตอร์อย่างอนุรักษ์พลังงาน

1.3 สมมติฐาน

สมมติฐานของโครงการวิจัยคาดว่าเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาจะมีความแม่นยำเทียบเท่าการคำนวณด้วยโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สถานะการทำงานจริงหน้าจอที่ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานกับมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการและจะสามารถใช้ในการประเมินผลการประหยัดพลังงานในมาตรการเปลี่ยนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงได้

1.4 กิจกรรมต่างๆ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการวิจัยแต่ละข้อ

ในหัวข้อนี้ได้แสดงการเปรียบเทียบแผนกิจกรรมหลักตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ รวมทั้งผลลัพธ์ (Output) ที่คาดว่าจะได้รับสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและกิจกรรมที่ทำจริง

วัตถุประสงค์	กิจกรรมหลัก	กิจกรรมรอง	ช่วงระยะเวลาดำเนินการ	ผลการดำเนินงาน
1. เพื่อการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา	1.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา	1.1.1 ออกแบบและพัฒนาชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและชุดเชื่อมต่อสัญญาณกับหน่วยประมวลผลที่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด	เดือนที่ 1-4	ได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาแล้วเสร็จ <i>ผลการดำเนินงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์</i>
		1.1.2. พัฒนาซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้สามารถประมวลผลบนหน่วยประมวลผลที่เชื่อมต่อกับชุดตรวจวัดและแสดงผลแบบสัมผัสได้ และเพิ่มส่วนการประมวลผลประหยัดในการเปลี่ยนมอเตอร์ รวมทั้งการปรับตั้งช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลแบบต่อเนื่อง	เดือนที่ 1-4	ได้ดำเนินการพัฒนาซอฟต์แวร์ให้สามารถทำงานบนหน่วยประมวลผลที่จะใช้ในเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาที่พัฒนาขึ้นได้ และประมวลผลบนหน่วยประมวลผลที่เชื่อมต่อกับชุดตรวจวัดได้แล้วเสร็จ <i>ผลการดำเนินงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์</i>
		1.1.3. ทำการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาจากชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น	เดือนที่ 1-4	ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาจากชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นแล้วเสร็จ <i>ผลการดำเนินงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์</i>
	1.2 การทดสอบและปรับปรุงเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา	1.2.1. ทดสอบและปรับปรุงซอฟต์แวร์ของหน่วยประมวลผลที่พัฒนาขึ้นจากผลการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการและในโรงงานอุตสาหกรรมในโครงการที่ผ่านมา	เดือนที่ 2-7	ได้ทำการทดสอบในส่วนของซอฟต์แวร์ที่ได้ปรับปรุงในการทำงานบนหน่วยประมวลผลและส่วนติดต่อผู้ใช้แบบ Touch-Screen และทดสอบกับผลการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการและในโรงงานอุตสาหกรรมในโครงการที่ผ่านมา <i>ผลการดำเนินงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์</i>

วัตถุประสงค์	กิจกรรมหลัก	กิจกรรมรอง	ช่วงระยะเวลาดำเนินการ	ผลการดำเนินงาน
		1.2.2. ทดสอบและปรับปรุงการทำงานของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา กับมอเตอร์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการขนาดไม่เกิน 30 kW จำนวน 3 ตัว โดยเปรียบเทียบกับการวัดกำลังงานที่เพลลา (Shaft Torque)	เดือนที่ 6-8	ได้ทำการทดสอบและปรับปรุงการทำงานของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา กับมอเตอร์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการขนาดไม่เกิน 30 kW จำนวน 3 ตัว โดยเปรียบเทียบกับการวัดกำลังงานที่เพลลา (Shaft Torque) <i>ผลการดำเนินงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์</i>
2. เพื่อเผยแพร่วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงให้เกิดการใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์พลังงานของมอเตอร์จากวิธีการคำนวณด้วยที่แม่นยำขึ้น และเผยแพร่ให้เกิดการใช้งานมอเตอร์อย่างอนุรักษ์พลังงาน	2.1 จัดโครงการสัมมนาแนวทางการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงหน้างาน โดยเชิญผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เข้าร่วมทั้งจากภาคอุตสาหกรรมและภาครัฐที่เกี่ยวข้อง เพื่อเผยแพร่ข้อมูลผลการศึกษาของโครงการวิจัยและรับฟังความคิดเห็น เมื่อวันที่ 30 สิงหาคม 2562 ณ โรงแรมรามารการ์เด็น กรุงเทพมหานคร <i>ผลการดำเนินงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์</i>	2.1.1 จัดเตรียมประสานงานเชิญผู้มีเกียรติจากภาครัฐและเอกชน ผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เชี่ยวชาญ 2.2.2 ติดต่อสถานที่จัดโครงการสัมมนา 2.2.3 จัดเตรียมเอกสารที่เกี่ยวข้อง 2.2.4 ประชาสัมพันธ์และเชิญผู้ที่เกี่ยวข้องมาร่วมในงานสัมมนา	เดือนที่ 6-8	ได้จัดโครงการสัมมนาแนวทางการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงหน้างาน โดยเชิญผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เข้าร่วมทั้งจากภาคอุตสาหกรรมและภาครัฐที่เกี่ยวข้อง เพื่อเผยแพร่ข้อมูลผลการศึกษาของโครงการวิจัยและรับฟังความคิดเห็น เมื่อวันที่ 30 สิงหาคม 2562 ณ โรงแรมรามารการ์เด็น กรุงเทพมหานคร <i>ผลการดำเนินงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์</i>
	2.2 ทำการวิเคราะห์สรุปเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส		เดือนที่ 11-12	ได้ดำเนินการวิเคราะห์สรุปเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส โดยอยู่ระหว่างการวิเคราะห์ศึกษาในรายละเอียดเพิ่มเติม <i>ผลการดำเนินงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์</i>

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบผลที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละช่วงระยะเวลา (แบ่งเป็นราย 6 เดือน)

เดือนที่	กิจกรรม (activities)	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (expected outputs)	ผลงานที่ได้รับ (outputs)
6 เดือนที่ 1	1. ศึกษาเทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่เหมาะสมในการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่	1. ได้ทราบถึงแนวทางและเทคโนโลยีที่ยอมรับในการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่	1. ได้ออกแบบและกำหนดคุณสมบัติอุปกรณ์และเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพของ

เดือนที่	กิจกรรม (activities)	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (expected outputs)	ผลงานที่ได้รับ (outputs)
	รบกวนการทำงานแบบพกพา 2. พัฒนาชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้า และชุดเชื่อมต่อสัญญาณกับหน่วยประมวลผลที่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด 3. พัฒนาซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้สามารถประมวลผลบนหน่วยประมวลผลที่เชื่อมต่อกับชุดตรวจวัดและจอแสดงผลแบบสัมผัสได้ และเพิ่มส่วนการประมวลผลประหยัดในการเปลี่ยนมอเตอร์ รวมทั้งการปรับตั้งช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลแบบต่อเนื่อง 4. ทดสอบและปรับปรุงซอฟต์แวร์ของหน่วยประมวลผลที่พัฒนาขึ้นจากผลการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการและในโรงงานอุตสาหกรรมในโครงการที่ผ่านมา	หน้างาน 2. ได้ชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและชุดเชื่อมต่อสัญญาณกับหน่วยประมวลผลที่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด สำหรับใช้ในการทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส 3. ได้ซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้สามารถประมวลผลบนหน่วยประมวลผลที่เชื่อมต่อกับชุดตรวจวัดและจอแสดงผลแบบสัมผัสได้ 4. มีการทดสอบปรับปรุงซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้เกิดความมั่นใจในการประมวลผล	มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่หน้างาน คิดเป็นความก้าวหน้า 100% (แล้วเสร็จ) 2. ได้จัดหาอุปกรณ์หลักในการสร้างเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส โดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา ประกอบด้วยชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและชุดเชื่อมต่อสัญญาณกับหน่วยประมวลผลที่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด สำหรับใช้ในการทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส คิดเป็นความก้าวหน้า 100% (แล้วเสร็จ) 3. ได้ปรับปรุงซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้สามารถประมวลผลบนหน่วยประมวลผลและจอแสดงผลแบบสัมผัสได้แล้วเสร็จ คิดเป็นความก้าวหน้า 100% (แล้วเสร็จ) 4. ได้ทำการทดสอบปรับปรุงซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้เกิดความมั่นใจในการประมวลผล คิดเป็นความก้าวหน้า 100% (แล้วเสร็จ)
6 เดือนที่ 2	1. ทำการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์	1. ได้ต้นแบบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ	1. ได้ดำเนินการออกแบบในรายละเอียดต้นแบบเครื่อง

เดือนที่	กิจกรรม (activities)	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (expected outputs)	ผลงานที่ได้รับ (outputs)
	เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพาจากชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น 2. ทดสอบและปรับปรุงการทำงานของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพากับมอเตอร์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการขนาดไม่เกิน 30 kW จำนวน 3 ตัว โดยเปรียบเทียบกับการวัดกำลังงานที่เพลา 3. จัดโครงการสัมมนาเผยแพร่ผลงานวิจัย 4. สรุปผลโครงการวิจัยและรายงานผลการวิจัย	แบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพา 2. ได้มีการทดสอบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพาที่ออกแบบและสร้างขึ้นกับมอเตอร์จริงในห้องปฏิบัติการ 3. ได้มีการเผยแพร่ผลการวิจัยและนำไปใช้ประโยชน์รวมทั้งได้ขอเสนอแนะในการพัฒนาผลการวิจัย 4. ได้ข้อสรุปของการพัฒนาเครื่องตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสแบบพกพา	ตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพาได้แล้วเสร็จ คิดเป็นความก้าวหน้า 100% (แล้วเสร็จ) 2. ได้มีการทดสอบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพาที่ออกแบบและสร้างขึ้นกับมอเตอร์จริงในห้องปฏิบัติการ คิดเป็นความก้าวหน้า 100% (แล้วเสร็จ) 3. ได้มีการเผยแพร่ผลการวิจัยและนำไปใช้ประโยชน์รวมทั้งได้ขอเสนอแนะในการพัฒนาผลการวิจัย คิดเป็นความก้าวหน้า 100% (แล้วเสร็จ) 4. ได้ข้อสรุปของการพัฒนาเครื่องตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสแบบพกพา คิดเป็นความก้าวหน้า 100% (แล้วเสร็จ)

1.6 สถานที่

สถานที่ทำการวิจัยคือ

- อาคารเครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา
- ศูนย์ทดสอบประสิทธิภาพมอเตอร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

1.7 แนวทาง/ขั้นตอนการดำเนินงาน

แนวทาง/ขั้นตอนการดำเนินงาน มีดังต่อไปนี้

1. พัฒนาชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและชุดเชื่อมต่อสัญญาณกับหน่วยประมวลผลที่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด
2. พัฒนาซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้สามารถประมวลผลบนหน่วยประมวลผลที่เชื่อมต่อกับชุดตรวจวัดและแสดงผลแบบสัมผัสได้และเพิ่มส่วนการประมวลผลประหยัดในการเปลี่ยนมอเตอร์และการประเมินผลประหยัดในกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ รวมทั้งการปรับตั้งช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลแบบต่อเนื่อง
3. ทดสอบและปรับปรุงซอฟต์แวร์ของหน่วยประมวลผลที่พัฒนาขึ้นจากผลการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการและในโรงงานอุตสาหกรรมในโครงการที่ผ่านมา
4. ทำการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาจากชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น
5. ทดสอบและปรับปรุงการทำงานของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพากับมอเตอร์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการขนาดไม่เกิน 30 kW จำนวน 3 ตัว โดยเปรียบเทียบกับการวัดกำลังงานที่เพลา (Shaft Torque)
6. จัดโครงการสัมมนาเผยแพร่ผลงานวิจัย
7. สรุปผลงานวิจัย

1.8 ผลที่คาดว่าจะได้รับเมื่อการดำเนินงานเสร็จสิ้นที่เป็นรูปธรรม และตัวชี้วัดความสำเร็จของโครงการ

1.8.1 ผลผลิต (Output) ที่คาดว่าจะได้ตลอดระยะเวลาโครงการ

เดือนที่	กิจกรรม (activities)	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (outputs)
6 เดือนที่ 1	1. ศึกษาเทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่เหมาะสมในการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา 2. พัฒนาชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและชุดเชื่อมต่อสัญญาณกับหน่วยประมวลผลที่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด 3. พัฒนาซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้สามารถ	1. ได้ทราบถึงแนวทางและเทคโนโลยีที่ยอมรับในการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่หน่วยงาน 2. ได้ชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและชุดเชื่อมต่อสัญญาณกับหน่วยประมวลผลที่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลดสำหรับใช้ในการทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส 3. ได้ซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้สามารถ

เดือนที่	กิจกรรม (activities)	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (outputs)
	ประมวลผลบนหน่วยประมวลผลที่เชื่อมต่อกับชุดตรวจวัดและจอแสดงผลแบบสัมผัสได้ และเพิ่มส่วนการประมวลผลประหยัดในการเปลี่ยนมอเตอร์และการประเมินผลประหยัดในกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ รวมทั้งการปรับตั้งช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลแบบต่อเนื่อง 4. ทดสอบและปรับปรุงซอฟต์แวร์ของหน่วยประมวลผลที่พัฒนาขึ้นจากผลการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการและในโรงงานอุตสาหกรรมในโครงการที่ผ่านมา	ประมวลผลบนหน่วยประมวลผลที่เชื่อมต่อกับชุดตรวจวัดและจอแสดงผลแบบสัมผัสได้ 4. ได้มีการทดสอบปรับปรุงซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้เกิดความมั่นใจในการประมวลผล
6 เดือนที่ 2	1. ทำการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพาจากชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น 2. ทดสอบและปรับปรุงการทำงานของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพากับมอเตอร์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการขนาดไม่เกิน 30 kW จำนวน 3 ตัว โดยเปรียบเทียบกับการวัดกำลังงานที่เพลลา 3. จัดโครงการสัมมนาเผยแพร่ผลงานวิจัย 4. สรุปผลโครงการวิจัยและรายงานผลการวิจัย	1. ได้ต้นแบบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพา 2. ได้มีการทดสอบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพาที่ออกแบบและสร้างขึ้นกับมอเตอร์จริงในห้องปฏิบัติการ 3. ได้มีการเผยแพร่ผลการวิจัยและนำไปใช้ประโยชน์รวมทั้งได้ขอเสนอแนะในการพัฒนาผลการวิจัย 4. ได้ข้อสรุปของการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสแบบพกพา

1.8.2 ผลลัพธ์ (Outcome) ที่คาดว่าจะได้ตลอดระยะเวลาโครงการ

ผลลัพธ์	รายละเอียด
ได้วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงบนงานที่เหมาะสม	ได้ทราบถึงความเหมาะสมของวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงบนงานในประเด็นของความแม่นยำ ความสะดวกในการตรวจวัด ข้อดี และข้อเสีย สำหรับผู้ประกอบการจำนวนมากทั้งในและต่างประเทศที่ใช้ขานมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส รวมทั้งภาครัฐที่สนับสนุนการอนุรักษ์พลังงานในมอเตอร์
ได้เครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงาน	ได้เครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงาน โดย

ทำงาน	สามารถตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสได้โดยไม่รบกวนการทำงานและมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับวิธีการอื่นและจะสามารถใช้ในการประเมินผลการประหยัดพลังงานในมาตรการที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้ ยังผลให้ผู้ประกอบการทั้งในและต่างประเทศจำนวนมากสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ รวมทั้งเกิดประโยชน์ต่อภาครัฐที่สนับสนุนการอนุรักษ์พลังงานในมอเตอร์ในการผลักดันนโยบายอนุรักษ์พลังงาน
-------	--

1.8.3 ผลกระทบ (Impact) ที่คาดว่าจะได้รับระหว่างดำเนินโครงการหรือหลังสิ้นสุดโครงการแล้ว

ผลกระทบ	รายละเอียด
เกิดความสนใจในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ไม่ต้องรบกวนการทำงานที่แม่นยำมากขึ้นในผู้ประกอบการและบริษัทจัดการพลังงาน (Energy Service Company; ESCO)	ระหว่างดำเนินการโครงการ จะทำการประชาสัมพันธ์โครงการผ่านเว็บไซต์ แพนเพจ ที่ได้จัดทำไว้และมีช่องทางสำหรับผู้สนใจได้ดาวน์โหลดไปใช้งาน และดำเนินงานจัดโครงการสัมมนาเผยแพร่ผลลัพธ์ของโครงการวิจัย เพื่อเผยแพร่ข้อมูลผลการศึกษาของโครงการวิจัยและรับฟังความคิดเห็นจากผู้ทรงคุณวุฒิและผู้ใช้
เกิดความสนใจและเกิดความมั่นใจมากขึ้นในการดำเนินมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์มากขึ้นในผู้ประกอบการ หน่วยงานภาครัฐ รวมทั้งบริษัทจัดการพลังงาน	เมื่อสิ้นสุดโครงการ การผลักดันไปสู่การใช้ประโยชน์จริงจะดำเนินการโดยเผยแพร่ผลงานวิจัยสู่สาธารณะและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เผยแพร่ซอฟต์แวร์และเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นให้หน่วยงานต่าง ๆ รวมทั้งเสนอแนวทางแก่หน่วยงานภาครัฐในการนำผลการวิจัยไปประกอบการพิจารณากำหนดเป็นรูปแบบในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงหน้างาน และนำต้นแบบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาเสนอให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป
ประเทศไทยสามารถลดปริมาณการนำเข้าพลังงานได้อย่างมหาศาลเมื่อผู้ประกอบการจำนวนมากสามารถตรวจสอบและแทนที่มอเตอร์ประสิทธิภาพต่ำที่ใช้งานอยู่เดิมเป็นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง รวมทั้งโครงการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส	เมื่อเกิดการขยายผลลัพธ์ของโครงการวิจัยอย่างต่อเนื่อง ผู้ประกอบการจำนวนมากทั้งในและต่างประเทศที่ใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส สามารถลดการใช้พลังงานจำนวนมากเมื่อสามารถตรวจสอบและแทนที่มอเตอร์ประสิทธิภาพต่ำที่ใช้งานอยู่เดิมเป็นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ซึ่งส่งผลทำให้ประเทศไทยสามารถลดปริมาณการนำเข้าพลังงานได้อย่างมหาศาล

1.9 กระบวนการผลักดันผลงานดังกล่าวออกสู่การใช้ประโยชน์

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นกลุ่มเป้าหมายที่จะนำไปใช้ประโยชน์ คือ

ประเภทของการใช้ประโยชน์	โดยใคร (หน่วยงาน / บุคคล)	รายละเอียดการใช้ประโยชน์
1. ด้านนโยบาย	หน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องกับการสนับสนุนการอนุรักษ์พลังงาน ประกอบด้วย สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	มีแนวทางในการกำหนดวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์แบบสามเฟส ให้เป็นแนวทางเดียวกันที่แม่นยำชัดเจนและเกิดความเป็นธรรมแก่ทุกฝ่าย
2. ด้านสาธารณะ	ผู้ประกอบการที่ใช้มอเตอร์	ได้ประโยชน์ในการได้ทราบถึงแนวทางในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนมาตรการอนุรักษ์พลังงานในมอเตอร์ได้ชัดเจน และเป็น การลดการใช้พลังงานในภาพรวมของประเทศ
3. ด้านพาณิชย์	บริษัทจัดการพลังงาน	มีแนวทางในการตรวจประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์แบบสามเฟส สำหรับประเมินการสนับสนุนการลงทุนมาตรการอนุรักษ์พลังงานในมอเตอร์
4. ด้านชุมชนและพื้นที่	-	-
5. ด้านวิชาการ	นักศึกษา วิศวกร นักวิชาการ และนักวิจัย	ผลลัพธ์ของการวิจัยจะดำเนินการตีพิมพ์เผยแพร่ในวงการวิชาการเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่องานวิจัยในด้านการพัฒนาวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะการทำงานจริงหน้างานใน ประเด็นของ ความแม่นยำ ความสะดวกในการตรวจวัด ข้อดี และข้อเสีย และการศึกษาต่อยอดงานวิจัยต่อไป

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงภาพรวมวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีผู้นำเสนอวิธีการประเมินหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลากหลายวิธี โดยจะคำนึงระดับการรบกวนของผู้ใช้งานและราคาค่าใช้จ่ายในการประเมิน รวมถึงความถูกต้องของค่าประสิทธิภาพที่ยอมรับได้เป็นสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากยังไม่มีวิธีการประเมินใดที่จะไม่รบกวนต่อผู้ใช้งานหรือระบบได้เลย โดยเฉพาะการประเมินในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่ โดยทั่วไปการประเมินหาประสิทธิภาพของมอเตอร์จำเป็นต้องมีการวัดค่าปริมาณต่างๆ ซึ่งอาจแตกต่างกันได้ในแต่ละวิธี แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลพื้นฐานที่จะต้องทำการวัดค่าได้แก่ ค่าแรงดันและค่ากระแสที่สาย บางวิธีอาจต้องการข้อมูลจากแผ่นป้ายของมอเตอร์ เช่น ค่าพิกัดของแรงดัน กระแส กำลังงาน และความเร็วรอบ เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจต้องการทราบค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และความเร็วของโรเตอร์ด้วย ซึ่งในอดีตถือว่าเป็นอุปสรรคค่อนข้างมากสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองตัวนี้ในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่ แต่ในปัจจุบันด้วยวิธีการที่ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องรวมถึงการมีอุปกรณ์เครื่องวัดที่ทันสมัย ทำให้ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้

นอกจากนี้ จะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการศึกษาเกี่ยวกับมาตรการเปลี่ยนมอเตอร์ของกลุ่มบริษัทจัดการพลังงาน (ESCO) ในประเทศไทยเพื่อใช้อ้างอิงในการศึกษาผลของการใช้ซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะการทำงานจริงที่พัฒนาขึ้นกับวิธีที่ใช้แพร่หลายในปัจจุบัน และในตอนท้ายได้กล่าวถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานสากลของประสิทธิภาพมอเตอร์

จากโครงการวิจัย RDG48R0001 เรื่อง “การวิจัยเชิงนโยบายเพื่อสนับสนุนการพัฒนาและการใช้พลังงานหมุนเวียนและการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานในประเทศไทย” โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย เสนอต่อสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ได้มีการกล่าวถึงศักยภาพการประหยัดพลังงานในอุปกรณ์หลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปในปี 2554 ประกอบด้วยอุปกรณ์ 7 ประเภท ซึ่งมอเตอร์เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่มีศักยภาพในการประหยัดพลังงานดังกล่าว

ทั้งนี้ ในรายงานวิจัยได้ระบุว่า ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เป็นระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในอุตสาหกรรม (ประมาณ 60-75%) ระบบดังกล่าวประกอบด้วยตัวมอเตอร์และอุปกรณ์อื่นที่ถูกขับเคลื่อน เช่น คอมเพรสเซอร์ ปั๊ม หรือพัดลม ระบบเหล่านี้อาจแบ่งได้เป็น 5 ส่วน ได้แก่ ตัวควบคุมการขับเคลื่อน (Speed drive) มอเตอร์ ระบบส่งกำลัง (Transmission) และอุปกรณ์ที่ถูกขับเคลื่อน (เช่น ปั๊ม พัดลม สายพาน คอมเพรสเซอร์ ฯลฯ) ระบบท่อลำเลียง และอุปกรณ์ใช้งาน (End use) (เช่น เครื่องมือ เครื่องจักร เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น) การวิเคราะห์และ Optimize ระบบมอเตอร์ทั้งระบบก่อให้เกิดการประหยัดพลังงานได้มากมาย หรืออย่างน้อย 15-20% โดยแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของระบบมอเตอร์แบ่งได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

- การปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวมอเตอร์
- การปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ถูกขับเคลื่อน เช่น ปั๊มและ คอมเพรสเซอร์
- การปรับปรุงระบบควบคุม

ดังนั้น การพัฒนาวิธีการและเครื่องมือที่จะทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จึงมีความสำคัญและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการสนับสนุนและผลักดันให้ผู้ประกอบการได้เห็นความสำคัญและเกิดความมั่นใจในมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของมอเตอร์

นอกจากนี้ในโครงการวิจัย RDG57D0004 เรื่อง “การพัฒนารูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่สภาวะทำงานจริงสำหรับการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงาน” ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนจากชุดโครงการร่วมสนับสนุนทุนวิจัย กฟผ.-สกว. ได้ทำการศึกษาแนวทางในการตรวจวัดและประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงานจริงหน้างานแต่ละรูปแบบซึ่งประกอบด้วย การทดสอบด้วยวิธีการค่ากำลังไฟฟ้า (Input Power Method) วิธีการค่าโวล (Slip Method) วิธีการค่ากระแส (Current Method) และวิธีการวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) โดยทำการทดลองและวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสมาตรฐาน รวมทั้งจัดโครงการสัมมนาเผยแพร่ข้อมูลผลการศึกษาของโครงการวิจัยและรับฟังความคิดเห็นจากผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เกี่ยวข้องทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาครัฐ เพื่อสรุปและเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี สำหรับการพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมถึงข้อเสนอแนะแนวทางในการตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่หน้างานจริงที่มีความเหมาะสม สามารถปฏิบัติได้จริงโดยใช้เครื่องมือวัดพื้นฐาน และเป็นที่ยอมรับของทุกฝ่าย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ให้มีความชัดเจนและเป็นแนวทางที่เป็นที่ยอมรับในการคำนวณ โดยผู้ประกอบการที่ใช้มอเตอร์จะได้ประโยชน์ในการได้ทราบถึงแนวทางในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนมาตรการอนุรักษ์พลังงานในมอเตอร์ได้ชัดเจน รวมทั้งบริษัทจัดการพลังงาน (Energy Service Company; ESCO) จะได้มีแนวทางในการตรวจประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์แบบสามเฟส สำหรับประเมินการสนับสนุนการลงทุนมาตรการอนุรักษ์พลังงานในมอเตอร์

ทั้งนี้ ขอฟแวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสได้โดยใช้ตัวแปรที่ได้จากการวัดทางไฟฟ้าโดยไม่รบกวนการทำงานของมอเตอร์ โดยมีความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบกับมอเตอร์ที่ใช้ในโครงการที่จุดทำงาน 50% ขึ้นไปโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยแล้วไม่เกิน 2% ซึ่งมีสะดวกในการใช้งานวิเคราะห์มอเตอร์ที่หน้างานจริงและความแม่นยำกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม

ดังนั้น หากมีการพัฒนาต่อยอดในการนำกระบวนการวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาเป็นซอฟต์แวร์ดังกล่าวให้เป็นเครื่องมือตรวจวัดที่สามารถตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สภาวะทำงานโดยไม่รบกวนการทำงานก็จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินการในด้านการอนุรักษ์พลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1 วิธีประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์

วิธีทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์ตามมาตรฐานที่ยอมรับกันแพร่หลายคือ มาตรฐาน IEEE-112 [1] และ IEC60034 [2] โดยตามทฤษฎีแล้วการตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ถือว่าตรงกับความเป็นจริงที่สุดคือการตรวจวัดกำลังงานที่เพลา (Shaft Power Output) ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE-112 จะใช้วิธีการตรวจวัดและคำนวณจากสมการที่ (2.1)

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100\% \quad (2.1)$$

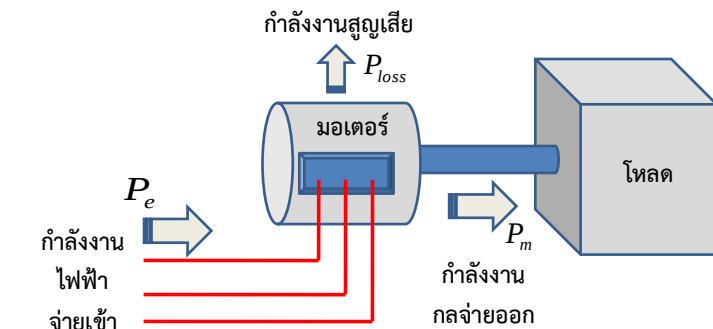
โดยที่ η ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%)

ทั้งนี้กำลังงานด้านออกที่แกนเพลลาของมอเตอร์ (P_{out}) จะถูกคำนวณจากค่าแรงบิดที่แกนและความเร็วรอบขณะมอเตอร์ขับโหลดขนาดใดๆ ตามสมการที่ (2.2)

$$P_{out} = T_{shaft} \times \omega_m \quad (2.2)$$

โดยที่ T_{shaft} แรงบิดที่แกนมอเตอร์ (Nm)
 ω_m ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของมอเตอร์ (rad/s)

การทดสอบเพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพแสดงไว้ในภาพที่ 2.1 ทั้งนี้การวัดความเร็วสามารถทำได้โดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบซึ่งมีแบบที่ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับเพลลามอเตอร์ได้ ในขณะที่การวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์สามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่องวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าแบบคล่องวัด โดยปกติแล้วการวัดแรงบิดของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ได้ถูกติดตั้งไปแล้วจะกระทำได้ค่อนข้างลำบาก



ภาพที่ 2.1 การทดสอบเพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์

สำหรับวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน IEC60034 ได้มีการปรับปรุงเพิ่มเติมโดยแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือการทดสอบทางตรง (Direct method) และการทดสอบทางอ้อม (Indirect method) ซึ่งการทดสอบทางตรงจะมีขั้นตอนและรายละเอียดแบบเดียวกับวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE-112 สำหรับการทดสอบทางอ้อมจะใช้วิธีการคำนวณจากค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดของมอเตอร์ (P_{losses}) แทนการคำนวณกำลังงานด้านออกจากการวัดค่าแรงบิดตามสมการที่ (2.3)

$$\eta = \frac{(P_{in} - P_{losses})}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.3)$$

จะเห็นได้ว่าการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีทางอ้อมตามมาตรฐาน IEC60034 จะต้องมีการวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียรวมในมอเตอร์ซึ่งประกอบด้วยหลายส่วนตามที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยกำลังงานสูญเสียบางส่วนต้องใช้วิธีการทดสอบขณะไม่มีโหลดและหรือขณะยึดโรเตอร์ ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพแบบนี้มักจะทำในห้องทดลองและเป็นไปได้ยากในการประเมินหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่หน้างานจริง

นอกจากการทดสอบมอเตอร์ที่มาตรฐานแนะนำไว้จะกระทำได้ยากในกรณีที่มีมอเตอร์ได้ติดตั้งไปแล้ว ยังมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานในการตรวจวัดได้ด้วย เป็นต้นว่า แรงดันต้องมีความสมดุลและอยู่ในช่วงที่

กำหนด อีกทั้งมาตรฐานแต่ละมาตรฐานยังให้ผลลัพธ์ค่าประสิทธิภาพที่แตกต่างกันอีกด้วย ดังนั้นวิธีการประเมินเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่หน้างานหรือขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่นั้นจึงมีความสำคัญ โดยวิธีการส่วนใหญ่ที่ถูกนำเสนอจะคำนึงถึงระดับการรบกวนต่อระบบหรือผู้ใช้งานและความถูกต้องของค่าที่ประเมินได้เป็นหลัก ปกติแล้วระดับการรบกวนมักถูกกำหนดจากประเภทของข้อมูลที่ต้องการวัดค่าในแต่ละวิธี รวมถึงค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งในกระบวนการและแผนดำเนินการทำงานของมอเตอร์ ทั้งนี้ผลตอบความแม่นยำของค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้จะถูกเปรียบเทียบกับวิธีการหาประสิทธิภาพโดยตรงตามมาตรฐานหรือวิธีการประเมินจากค่าแรงบิดที่แกนนั่นเอง

การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ติดตั้งไปแล้วที่หน้างานได้มีผู้เสนอไว้หลายวิธี [3-14] ซึ่งแต่ละวิธีมีความคลาดเคลื่อนและความสะดวกในการตรวจวัดรวมถึงการวิเคราะห์แตกต่างกัน อาทิ วิธีประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้า วิธีประเมินจากค่าไหล และวิธีประเมินจากค่ากระแส ทั้งนี้หลักการของแต่ละวิธีโดยพื้นฐานสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 วิธีประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้า (Input Power Method)

วิธีการประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้าเป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวกและจะได้ผลลัพธ์ที่ดีในกรณีที่มอเตอร์มีกราฟประสิทธิภาพเทียบกับโหลดที่ค่อนข้างคงที่ แต่โดยทั่วไปมอเตอร์จะถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่โหลดประมาณ 75% ซึ่งหากมอเตอร์ทำงานที่จุดต่างออกไปก็จะมีประสิทธิภาพที่ต่างออกไปทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ได้ นอกจากนี้หากมอเตอร์มีการซ่อมบำรุงโดยการพันขดลวดใหม่ วิธีการนี้ก็จะมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้สูงเช่นกัน ทั้งนี้วิธีประเมินหาประสิทธิภาพของมอเตอร์อย่างง่ายโดยทั่วไปที่หน้างาน จะใช้การอ่านข้อมูลจากแผ่นป้าย เนื่องจากอาจมีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์และการเข้าถึงในการตรวจวัดค่าที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ โดยจะประเมินค่าประสิทธิภาพจากสมการที่ (2.4)

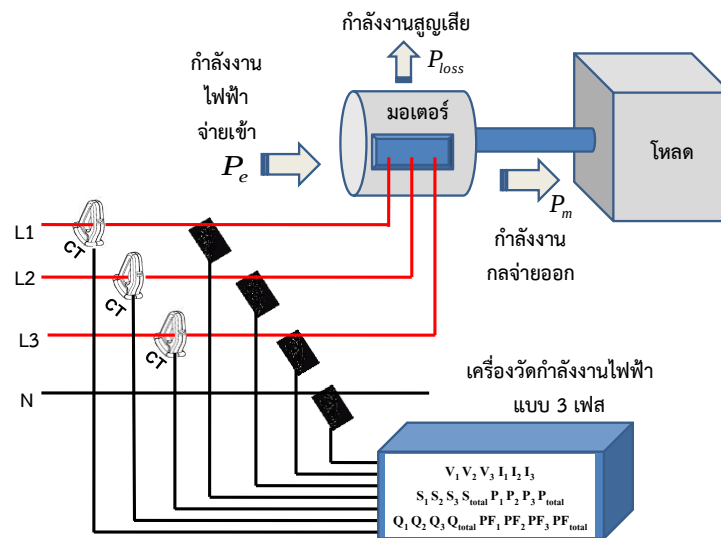
$$\eta = \frac{(P_{rated} \times LF)}{P_{in}} \quad (2.4)$$

โดยที่ LF คือค่าตัวประกอบโหลด (Load Factor) ที่แสดงร้อยละในการทำงานจริงของมอเตอร์ต่อพิกัด ซึ่งในทางปฏิบัติมักจะได้จากการประเมินและมีโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้สูง โดยค่าตัวประกอบโหลดสามารถหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$LF = \left(\frac{P_{in}}{P_{rated}} \right) \times 100 \quad (2.5)$$

เมื่อ P_{rated} กำลังงานไฟฟ้าพิกัดของมอเตอร์ (W,kW)

แผนภาพการตรวจวัดค่าดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.2 คือการใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power Meter) ทำการตรวจวัดค่ากำลังงานโดยตรง หรือสำหรับการตรวจวัดด้วยวิธีนี้หากผู้ควบคุมมอเตอร์มีการติดตั้งเครื่องมือวัดไว้แล้วก็จะสามารถอ่านค่าจากตัวควบคุมได้โดยตรง ทั้งนี้ระดับการรบกวนการทำงานของมอเตอร์ถือว่าไม่มากนัก เนื่องจากสามารถต่อวงจรเพื่อวัดแรงดันและกระแสแบบคล่องตัวได้ ในขณะที่มอเตอร์ยังคงเดินเครื่องอยู่ได้



ภาพที่ 2.2 การตรวจวัดค่ากำลังงานของมอเตอร์โดยใช้เครื่องวัดกำลังงานแบบคลั่งวัต

2.1.2 วิธีประเมินจากค่าไถล (Slip Method)

วิธีประเมินจากค่าไถลเป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวกอีกวิธีหนึ่งเนื่องจากสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์จากการวัดความเร็วรอบได้ และตามทฤษฎีแล้วจะสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้แม่นยำกว่าวิธีการแผ่นป้าย อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้มากจากความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและค่าไถลที่ไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงความจำเป็นในการใช้เครื่องวัดความเร็วรอบที่มีความแม่นยำสูงด้วย การหาประสิทธิภาพด้วยวิธีการนี้จะทำการประเมินค่ากำลังงานด้านออกที่เพลาจากสมการที่ (2.6)

$$P_{out} = \left(\frac{s}{s_{rated}} \right) \times P_{rated} \quad (2.6)$$

โดยที่

$$s = \frac{(n_s - n_r)}{n_s} \quad (2.7)$$

และ

$$s_{rated} = \frac{(n_s - n_r^{rated})}{n_s} \quad (2.8)$$

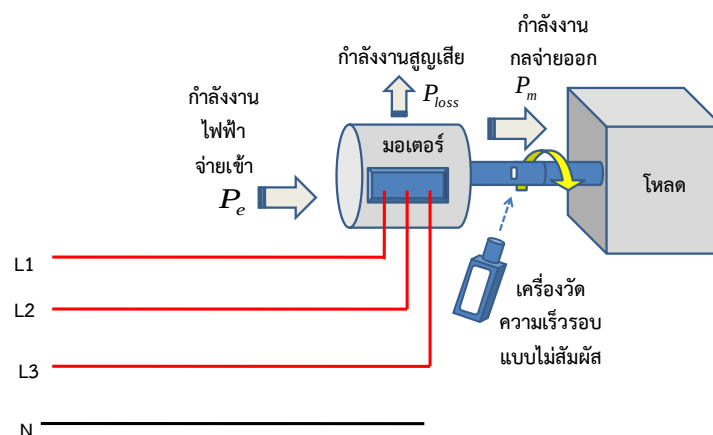
เมื่อ	s	ค่าไถลที่วัดได้
	s_{rated}	ค่าไถลที่พิกัดของมอเตอร์
	P_{rated}	กำลังงานพิกัดของมอเตอร์ (W, kW)
	n_s	ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์เป็นรอบต่อนาที (rpm)
	n_r	ความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะทำงานเป็นรอบต่อนาที (rpm)
	n_r^{rated}	ความเร็วรอบพิกัดของมอเตอร์เป็นรอบต่อนาที (rpm)

อย่างไรก็ตาม การคำนวณค่ากำลังงานด้านออกด้วยวิธีประเมินจากค่าโวลตาจถูกปรับปรุงให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นได้จากกรณีที่มอเตอร์ได้รับแรงดันแปรเปลี่ยนไปจากค่าพิกัดตามสมการที่ (2.9) และสามารถหาค่าประสิทธิภาพได้จากสมการที่ (2.3)

$$P_{out} = \left(\frac{s}{s_{rated}} \right) \times P_{rated} \times \left(\frac{V_L}{V_{rated}} \right)^2 \quad (2.9)$$

โดยที่ V_{rated} คือค่าแรงดันสายพิกัดของมอเตอร์ (V)

วิธีการตรวจวัดค่าโวล (s) จะกระทำได้โดยการวัดความเร็วรอบด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส (Non-Contact Tachometer) ที่สามารถวัดได้ในขณะที่มอเตอร์ยังคงทำงานตามปกติดังแสดงในภาพที่ 2.3 อย่างไรก็ตาม การวัดด้วยวิธีนี้จะมีระดับการรบกวนการทำงานของมอเตอร์เฉพาะในกรณีที่มอเตอร์ไม่ได้ทำการติดแถบหรือป้ายสีสะท้อนแสงไว้ จึงจำเป็นต้องหยุดเดินเครื่องหรือหาช่วงเวลาที่ยอดมอเตอร์หยุดเดินเครื่องเพื่อติดแถบหรือป้ายสีสะท้อนแสง



ภาพที่ 2.3 การตรวจวัดความเร็วรอบเพื่อใช้หาค่าโวลของมอเตอร์

2.1.3 วิธีประเมินจากค่ากระแส (Current Method)

ในทำนองเดียวกับการประเมินด้วยวิธีโวล การประเมินจากค่ากระแสนี้ยังคงเป็นการใช้ข้อมูลไม่มากนักจากการวัดเพื่อประมาณค่ากำลังงานด้านออกของมอเตอร์ ซึ่งข้อมูลที่ต้องการวัดได้แก่ ค่ากระแสและกำลังงานด้านเข้าของมอเตอร์ โดยสามารถประเมินค่ากำลังงานด้านออกได้จากสมการที่ (2.10)

$$P_{out} = \left(\frac{I_L}{I_{rated}} \right) \times P_{rated} \quad (2.10)$$

เมื่อ I_{rated} ค่ากระแสพิกัดของมอเตอร์ (A)

ทั้งนี้การวัดค่ากระแสสามารถทำได้โดยใช้เครื่องวัดกระแสแบบคล้องวัดตามภาพที่ 2.3 ซึ่งมีระดับของการรบกวนการทำงานของมอเตอร์ที่ต่ำ และสามารถทำได้ในขณะที่มอเตอร์ยังทำงานอยู่ตามปกติ

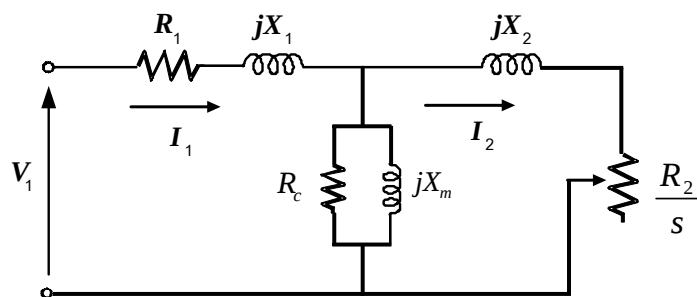
อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังคงมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้มากกว่าความสัมพันธ์ระหว่างโหลดกับค่ากระแสที่ไม่เป็นเชิงเส้น

วิธีการประเมินค่าประสิทธิภาพทั้ง 3 วิธีตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ค่อนข้างมีความเหมาะสมและสะดวกในการเลือกใช้สำหรับการประเมินในสถานะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่ เนื่องจากมีระดับการรบกวนต่อระบบและผู้ทำงานค่อนข้างต่ำอีกทั้งข้อมูลที่ต้องการวัดค่าเพื่อประกอบการคำนวณก็มีไม่มาก ซึ่งสามารถใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าแบบทั่วไปได้ อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญที่ต้องยอมรับคือความถูกต้องของค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้จากทั้ง 3 วิธีการนี้ จะค่อนข้างมีความคลาดเคลื่อนสูงจากค่าจริงที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีการวัดค่าแรงบิดที่แกนมอเตอร์ นอกจากนี้วิธีการประเมินดังกล่าวแล้วยังมีวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบอื่นอีกที่มีความแม่นยำมากขึ้น แต่อาจไม่เหมาะสมกับการประเมินที่สถานะการทำงานจริง เนื่องจากข้อมูลบางอย่างจะได้จากการทดสอบมอเตอร์ซึ่งส่งผลกระทบต่อตรงกับผู้ปฏิบัติงานค่อนข้างมาก อาทิ วิธีประเมินจากวงจรสมมูล วิธีประเมินจากค่ากำลังงานสูญเสีย และวิธีประเมินจากแรงบิดช่องว่างอากาศ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม หากนำวิธีการเหล่านี้มาประยุกต์ก็อาจสามารถนำมาใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ที่สถานะการทำงานจริงได้เช่นกัน

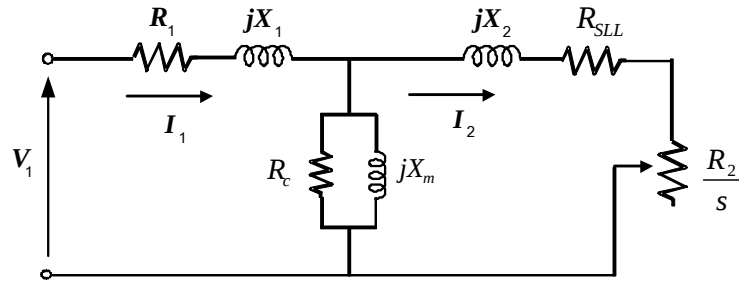
2.1.4 วิธีประเมินจากวงจรสมมูล (Equivalent Circuit Method)

มาตรฐาน IEEE-112 กล่าวถึงวิธีประเมินประสิทธิภาพจากวงจรสมมูลว่ามีการรบกวนต่อระบบและผู้ปฏิบัติงานมากและไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในสถานะการทำงานจริง ถึงแม้ค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้จะมีความแม่นยำค่อนข้างสูง เนื่องจากวิธีนี้ต้องทำการทดสอบขณะที่มอเตอร์ถูกยึดเพลาและขณะที่เดินตัวเปล่า เพื่อนำมาคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ตามวงจรสมมูลดังภาพที่ 2.4 เพื่อนำมาใช้เป็นแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าประสิทธิภาพตามทฤษฎีการทำงานต่อไป

นอกจากนี้ยังมีผู้นำเสนอวิธีประยุกต์จากการประเมินด้วยวงจรสมมูล โดยการหาค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์จากข้อมูลที่แผ่นป้าย (Nameplate Data) ซึ่งจะมีเฉพาะความเร็วรอบโรเตอร์เท่านั้นที่ต้องทำการวัดค่า วิธีการนี้มีชื่อเรียกว่าการประเมินด้วยวงจรสมมูลจากข้อมูลแผ่นป้าย (Nameplate Equivalent-Circuit) หรือ ORMEL96 [14] สิ่งสำคัญที่ผู้นำเสนอในวิธีการนี้คือ การเพิ่มความต้านทานเพื่อใช้เป็นแบบจำลองของค่ากำลังงานสูญเสียแบบสเตรย์ (Stray Load Loss Resistance) โดยต่ออนุกรมอยู่ในส่วนของวงจรโรเตอร์ตามภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 2.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามวิธี ORMEL96

ด้วยวิธีการนี้ค่าความต้านทานของสเตเตอร์ (R_1) อาจหาได้จากการวัดโดยตรง ณ อุณหภูมิขณะขับโหลดเต็มพิกัด หรืออาจประเมินได้จากความสัมพันธ์ของข้อมูลพิกัดต่างๆ จากแผ่นป้ายข้อมูลตามมาตรฐาน NEMA [25] ดังแสดงในสมการที่ (2.11)

$$R_1 = (1.1 \times 10^{-4}) \times (N_p)^{0.52} \times (HP_{rated})^{-1.26} \times (V_L)^2 \quad (2.11)$$

โดยที่	R_1	ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (Ω)
	N_p	จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์
	HP_{rated}	ค่าพิกัดแรงม้าของมอเตอร์ (hp)
	V_L	ค่าพิกัดแรงดันสายของมอเตอร์ (V)

สังเกตเห็นชัดว่าการประเมินค่าความต้านทานสเตเตอร์จากการพิกัดต่างๆ ตามข้อมูลแผ่นป้ายนี้อาจเหมาะสมกับการนำไปใช้ประเมินกับมอเตอร์ใหม่ซึ่งยังคงมีสภาพการทำงานเป็นไปตามค่าพิกัดที่ระบุไว้ แต่หากเป็นมอเตอร์ที่มีอายุการใช้งานแล้วหลายปีหรือมอเตอร์ที่ได้รับการพันขดลวดใหม่จากการชำรุด การประเมินค่าความต้านทานแบบนี้อาจไม่เหมาะสมเนื่องจากไม่อาจมั่นใจได้ว่ามอเตอร์จะยังคงทำงานตามค่าพิกัดข้อมูลได้อยู่

ตามมาตรฐาน IEEE-112 ค่าความต้านทานสูญเสียแบบสเตอริย์ (R_{SLL}) สามารถพิจารณาจากค่าร้อยละของค่ากำลังงานสูญเสียแบบสเตอริย์ (%SL) เทียบค่าพิกัดกำลังงานด้านออกของมอเตอร์โดยจะถูกปรับสัดส่วนตามอัตราส่วนของกระแสโรเตอร์ที่พิกัดตามสมการที่ (2.12)

$$R_{SLL} = \%SL \times \frac{(P_{rated}/3)}{(I_r^{rated})^2} \quad (2.12)$$

โดยที่	R_{SLL}	ค่าความต้านทานสูญเสียแบบสเตอริย์อ้างอิงด้านสเตเตอร์ (Ω)
	$\%SL$	ค่าร้อยละของกำลังงานสูญเสียแบบสเตอริย์เทียบกับค่าพิกัดกำลังงานของมอเตอร์
	P_{rated}	ค่าพิกัดกำลังงานของมอเตอร์ (W, kW)
	I_r^{rated}	ค่ากระแสพิกัดของโรเตอร์ (A)

สำหรับมอเตอร์ที่มีขนาดพิกัดต่ำกว่า 125 แรงม้า หรือ 93.25 kW สามารถกำหนดค่า $\%SL = 1.8\%$ ได้ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง $0.2 < \%SL < 1.8$ [1] โดยค่าพิกัดกระแสโรเตอร์สามารถ

กำหนดค่าเริ่มต้นเป็น 80% ของค่าพิกัดกระแสเตเตอร์จากแผ่นป้ายข้อมูลได้ อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานสูญเสียแบบสเตรีในสมการที่ (2.12) สามารถเขียนได้ใหม่โดยอาศัยหลักทฤษฎีในการทำงานดังสมการที่ (2.13)

$$R_{SLL} = \frac{\%SL(1 - s_{rated})R_2}{100 \times s_{rated}} \quad (2.13)$$

โดยที่ s_{rated} ค่าโกลที่พิกัดมอเตอร์
 R_2 ค่าความต้านทานโรเตอร์อ้างอิงด้านสเตเตอร์ (Ω)

แม้ว่าการประเมินหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีการ ORMEL96 นี้จะมีระดับการรบกวนต่อระบบและผู้ปฏิบัติงานค่อนข้างต่ำ แต่ด้วยวิธีการหาค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรสมมูลจากข้อมูลแผ่นป้ายจึงทำให้มีความคลาดเคลื่อนของค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้ในช่วง $\pm 4\%$ [3] อย่างไรก็ตาม ยังถือว่ามีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าวิธีอื่นที่กล่าวมาในตอนต้น ในปัจจุบันยังได้มีแนวทางในการศึกษาใหม่ที่จะหาค่าตัวแปรในวงจรสมมูลขณะที่มอเตอร์ทำงานอยู่โดยไม่ต้องปลดโหลดด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ [15]

ตัวอย่างเกณฑ์ที่ใช้สำหรับการเลือกคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะพิจารณาจากฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) สามารถแสดงได้ตามสมการที่ (2.14) ซึ่งเป็นการดูจากค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของตัวประกอบกำลังและกระแสต้านเข้าของมอเตอร์ขณะทำงานที่สภาวะใดๆ โดยจะต้องมีค่าต่ำที่สุด

$$F_{objective} = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{PF_{i,cal}}{PF_{i,mea}} - 1 \right)^2 + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{I_{1i,cal}}{I_{1i,mea}} - 1 \right)^2 \quad (2.14)$$

โดยที่ $I_{1i,cal}$ และ $I_{1i,mea}$ ค่ากระแสต้านเข้าของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณและการวัดตามลำดับ
 $PF_{i,cal}$ และ $PF_{i,mea}$ ตัวประกอบกำลังที่ได้จากการคำนวณและการวัดตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของผลตอบจากการใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์นั้น จะขึ้นอยู่กับจำนวนจุดทำงานของมอเตอร์ที่ขนาดโหลดต่างๆ กล่าวคือ การหาค่าตัวแปรในวงจรสมมูลจะมีความแม่นยำมากขึ้นโดยอาจมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 3% ได้ หากทำการจำลองจากจุดทำงานของมอเตอร์หลายจุด [17] หรือในกรณีที่สามารถวัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ได้ (R_1) ก็จะทำให้กระบวนการหาผลตอบมีความเร็วและแม่นยำมากขึ้นด้วย

2.1.5 วิธีประเมินจากค่ากำลังงานสูญเสีย (Segregated Loss Method)

รูปแบบการประเมินของวิธีการนี้คล้ายกับการประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ทางอ้อมตามมาตรฐาน IEC60034 และมาตรฐาน IEEE-112 (วิธี F1) กล่าวคือจะต้องประเมินหาค่ากำลังงานสูญเสียต่างๆ ของมอเตอร์ทั้งหมด โดยถ้าไม่คำนึงถึงการรบกวนต่อระบบและผู้ปฏิบัติงาน กำลังงานสูญเสียบางส่วนจะถูกประเมินจากการทดสอบมอเตอร์แบบไม่มีโหลดและ/หรือการทดสอบแบบยัดโรเตอร์ รวมถึงการทดสอบแบบ

แปรเปลี่ยนค่าแรงดันและการทดสอบแบบกลับทางหมุน เป็นต้น วิธีการประเมินประสิทธิภาพแบบนี้ค่อนข้างแม่นยำมีความคลาดเคลื่อนในช่วง $\pm 2\%$ [3] อย่างไรก็ตาม หากคำนึงถึงระดับการรบกวนต่อระบบและผู้ปฏิบัติงาน ค่ากำลังงานสูญเสียบางส่วนอาจใช้วิธีประเมินจากค่าที่มาตรฐานแนะนำ เช่น มาตรฐาน IEEE-112 (วิธี E1) ได้ประมาณค่ากำลังงานสูญเสียแบบสเตอริย์ของมอเตอร์ขนาดต่างๆ โดยคิดเป็นร้อยละของค่าพิกัดกำลังงานของมอเตอร์

นอกจากนี้ยังมีผู้เสนอวิธีการ OHME (Ontario Hydro Modified Method E) [26] ได้ประเมินให้ค่ากำลังงานสูญเสียจากแกนรวมถึงความผิดและแรงต้านลมรวมกันมีค่าประมาณ 3.5% ถึง 4.2% ของค่าพิกัดกำลังงานด้านเข้าของมอเตอร์ซึ่งได้มาจากการทดสอบกลุ่มตัวอย่างของมอเตอร์หลายขนาด โดยค่ากำลังงานสูญเสียแบบสเตอริย์ยังคงใช้จากตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานสเตเตอร์ของวิธีการนี้ถูกประเมินจากค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามค่ากระแสของมอเตอร์ ผลตอบค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้ด้วยวิธีการนี้ค่อนข้างดีโดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 2\%$ ถึง $\pm 3\%$ [3]

2.1.6 วิธีประเมินจากค่าแรงบิดช่องว่างอากาศ (Air-Gap Torque Method)

วิธีการนี้อาศัยการตรวจวัดค่าแรงดันและกระแสเป็นช่วงเวลา รวมถึงจำเป็นต้องทราบค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ แล้วจึงนำมาคำนวณหาค่าแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ (T_{ag}) ตามสมการที่ (2.15) [8]

$$T_{ag} = \frac{N_p}{2\sqrt{3}} \left\{ (i_A - i_B) \int [v_{CA} - R_s(i_C - i_A)] dt - (i_C - i_A) \int [v_{AB} - R_s(i_A - i_B)] dt \right\} \quad (2.15)$$

เมื่อ	T_{ag}	ค่าแรงบิดช่องว่างอากาศ (Nm)
	N_p	จำนวนขั้วแม่เหล็ก
	i_A, i_B, i_C	กระแสที่สายแต่ละเฟส (A)
	v_{AB}	แรงดันระหว่างเฟส A กับเฟส B (V)
	R_s	ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (Ω)

ค่าประสิทธิภาพจะถูกประเมินจากค่ากำลังงานด้านออกของมอเตอร์ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยค่าแรงบิดที่แกนเพลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.16)

$$T_{shaft} = T_{ag} - \left(\frac{P_{fw}}{\omega_m} \right) - \left(\frac{P_{stray}}{\omega_m} \right) \quad (2.16)$$

ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ในสภาวะได้รับแรงดันหรือกระแสที่ไม่สมดุลได้ ซึ่งจะสะท้อนกับสภาพความเป็นจริงของโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ยังมีความลำบากในการทดสอบมอเตอร์แบบไม่มีโหลดเพื่อหาค่ากำลังงานสูญเสียทางกล (ความผิดและแรงต้านลม) และกำลังงานสูญเสียแบบสเตอริย์ ผลตอบค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้ด้วยวิธีการนี้ค่อนข้างดีกว่าทุกวิธีที่กล่าวมา โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 0.5\%$ [3]

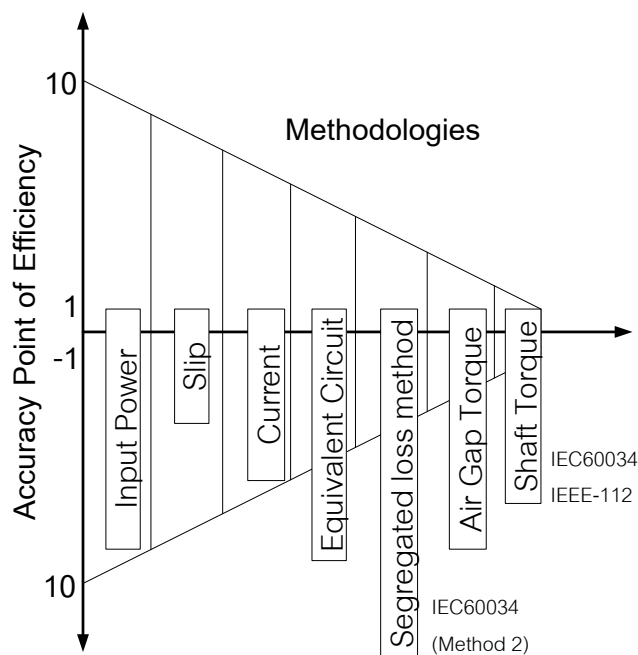
จากการศึกษาแนวทางในการตรวจวัดและประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงานจริง หน่วยงานในรูปแบบต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวไป รวมถึงการศึกษาข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธี และการค้นคว้าหาแนวทางการปรับปรุงวิธีการตรวจประเมินให้เหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อสรุปเป็นข้อเสนอแนะแนวทางในการตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่หน่วยงานจริง จึงเป็นการศึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ให้มีความชัดเจนและเป็นแนวทางที่เป็นที่ยอมรับในการคำนวณ

2.2 เปรียบเทียบความแม่นยำและระดับในการรบกวนการทำงานของมอเตอร์ของแต่ละวิธีการ

ผลเปรียบเทียบความแม่นยำในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละวิธี สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.5 [3] สำหรับระดับในการรบกวนการทำงานขณะที่ตรวจวัดของแต่ละวิธีการ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปการตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละวิธี

วิธีการ	ตัวแปรที่ต้องวัด	เครื่องมือที่ต้องใช้	แนวทาง
วิธีประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้า (Input Power Method)	กำลังงานที่มอเตอร์ใช้	เครื่องวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าแบบคล่องวัด	การวิเคราะห์ถือว่าค่าประสิทธิภาพคงที่ตามค่าบนแผ่นป้าย
วิธีประเมินจากค่าไทดล (Slip Method)	กำลังงานที่มอเตอร์ใช้ ค่าไทดล (Slip)	เครื่องวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าแบบคล่องวัด เครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส	ตรวจวัดความเร็วรอบเพื่อนำมาคำนวณค่าไทดลเพื่อนำมาประมาณค่ากำลังงานที่มอเตอร์จ่าย โดยประมาณว่ากำลังงานที่มอเตอร์จ่ายแปรผันโดยตรงกับค่าไทดล ตรวจวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้
วิธีประเมินจากค่ากระแส (Current Method)	กำลังงานที่มอเตอร์ใช้ กระแสที่มอเตอร์ใช้	เครื่องวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าแบบคล่องวัด (ปกติจะวัดค่ากระแสได้ด้วย)	ตรวจวัดค่ากระแสของมอเตอร์เพื่อนำมาประมาณค่ากำลังงานที่มอเตอร์จ่าย โดยประมาณว่ากำลังงานที่มอเตอร์จ่ายแปรผันโดยตรงกับกระแสที่ใช้ ตรวจวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้
วิธีประเมินจากวงจรสมมูล (Equivalent Circuit Method)	กำลังงานที่มอเตอร์ใช้ กระแสที่มอเตอร์ใช้ ค่าไทดล (Slip)	เครื่องวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าแบบคล่องวัด เครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส	ใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ หากต้องการความแม่นยำที่สูงขึ้น ต้องวัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งต้องทำขณะที่มอเตอร์หยุดเดินเครื่อง
วิธีประเมินจากแรงบิดที่ช่องว่างอากาศ (Air gap torque Method)	กำลังงานที่มอเตอร์ใช้ แรงดันและกระแสที่มอเตอร์ใช้ แบบต่อเนื่อง ค่าไทดล (Slip)	เครื่องบันทึกค่ากำลังงานไฟฟ้าแบบคล่องวัด	ต้องมีการบันทึกค่าแรงดันและกระแสต่อเนื่องในช่วงเวลาหนึ่ง ต้องวัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งต้องทำขณะที่มอเตอร์หยุดเดินเครื่อง



ภาพที่ 2.6 การเปรียบเทียบความแม่นยำของการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์แต่ละวิธี [3]

จากภาพที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า วิธีประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้า วิธีประเมินจากค่ากระแส และวิธีประเมินจากค่าสลลิป ถึงแม้จะสามารถทำได้ค่อนข้างสะดวกแต่จะต้องยอมรับค่าความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพที่ประเมินได้ในระดับที่ค่อนข้างสูง ส่วนวิธีที่มีความแม่นยำมากจะเป็นการตรวจวิเคราะห์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ในลักษณะเดียวกัน จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าวิธีประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้า วิธีประเมินจากค่ากระแส และวิธีประเมินจากค่าสลลิป จะเป็นวิธีที่ได้จริงค่อนข้างสะดวกกว่าวิธีอื่นๆ ดังนั้นหากมีความจำเป็นต้องประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหี้ยวนำที่หน้างานด้วยเครื่องมือวัดที่มีเงื่อนไขจำกัดอาจพิจารณาประเมินด้วยวิธีดังกล่าวโดยต้องยอมรับความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง และหากต้องการความแม่นยำที่สูงขึ้นก็จะต้องใช้วิธีการอื่น เช่น วิธีการประเมินค่าตัวแปรในวงจรสมมูลหรือวิธีการประเมินจากแรงบิดที่ช่องว่างอากาศซึ่งต้องใช้การตรวจวัดและวิธีวิเคราะห์ที่ซับซ้อนขึ้น

2.3 แนวทางการดำเนินงานของบริษัทจัดการพลังงาน (ESCO)

จากสถานการณ์การใช้พลังงานของประเทศไทยช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายน พ.ศ.2560 พบว่าการใช้พลังงานยังคงเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจ ซึ่งน้ำมันยังคงเป็นพลังงานที่ถูกใช้มากที่สุดคิดเป็น 50.9% [27] ของพลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด โดยการใช้พลังงานแยกตามสาขาเศรษฐกิจจะเห็นว่าในสาขาส่งมีการใช้พลังงานมากเป็นอันดับหนึ่งและพบการใช้พลังงานมากขึ้นจาก 2 ปีที่ผ่านมา ในขณะที่สาขาอุตสาหกรรมถึงแม้จะมีการใช้พลังงานลดลงจากปีก่อน แต่ยังคงมีการใช้พลังงานมากเป็นอันดับสองซึ่งคิดเป็น 35% ของสัดส่วนการใช้พลังงานแยกตามสาขา

การใช้พลังงานในสาขาอุตสาหกรรมจากโรงงานที่ประกอบธุรกิจด้านต่างๆ จะเกิดจากเครื่องจักรกลทุกชนิดซึ่งส่วนใหญ่พลังงานมักถูกใช้เป็นจำนวนมากจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหี้ยวนำ 3 เฟส กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ได้ตระหนักถึงความสำคัญดังกล่าว จึงมีโครงการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานอย่างต่อเนื่องทั้งการพัฒนาเทคนิคการจัดการพลังงานและการตรวจสอบ การใช้พลังงาน รวมถึง

การแก้ไขจุดสูญเสียพลังงานของเครื่องจักรกลด้วย ทั้งนี้เพื่อให้การอนุรักษ์พลังงานสัมฤทธิ์ผล โรงงานจะต้องมีการตรวจวัดการใช้พลังงานพร้อมทั้งประเมินและหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน

กลไกหนึ่งภายใต้โครงการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน คือการจัดให้มีบริษัทจัดการพลังงาน (Energy Service Company: ESCO) เพื่อทำหน้าที่ให้บริการแบบครบวงจรทั้งการให้คำปรึกษา การเสนอโครงการ การวางแผนดำเนินการด้านพลังงาน การบริหารโครงการ การออกแบบทางวิศวกรรม การวิเคราะห์การใช้พลังงาน การตรวจวัดและการรับประกันผลประหยัด รวมถึงการจัดหาแหล่งเงินทุนให้กับโครงการด้านอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งบทบาทการทำงานของ ESCO นี้จะอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐานที่ทางสถาบันพลังงานเพื่ออุตสาหกรรม สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ร่วมกับสมาคมบริษัทจัดการพลังงานไทยเป็นผู้กำหนด

นอกเหนือจากการบริการที่ครอบคลุมแบบครบวงจรแล้ว สิ่งสำคัญที่สุดของการดำเนินธุรกิจบริษัทจัดการพลังงานคือ การมีสัญญารับประกันผลการดำเนินงานที่มีกระบวนการตรวจวัดและพิสูจน์ผลอย่างชัดเจน [2] ทั้งนี้เพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจว่าความเสี่ยงด้านเทคนิคของโครงการพลังงานจะถูกรับประกันโดย ESCO อย่างเต็มที่ตลอดระยะเวลาสัญญา โดยมีขอบเขตการให้บริการของ ESCO แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 และมีผู้ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานด้านพลังงานประกอบด้วย 3 ฝ่ายคือ

1. ผู้ให้บริการซึ่งก็คือบริษัทจัดการพลังงาน
2. ผู้รับบริการซึ่งก็คือผู้ประกอบการที่ต้องการใช้บริการด้านอนุรักษ์พลังงานจาก ESCO
3. แหล่งทุนซึ่งหมายถึงผู้ให้การสนับสนุนเงินลงทุนเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ได้แก่ สถาบันการเงิน ธนาคารหรือ ESCO เป็นต้น

ทั้งนี้การให้บริการอาจเป็นไปในลักษณะที่มีการรวมหรือไม่รวมด้านการเงินและการบริหารโครงการก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความพร้อมของสถานประกอบการด้านการเงินและบุคลากร โดยอาจยกภาระความรับผิดชอบให้กับ ESCO ทั้งหมดหรือช่วยจัดการเพียงแค่บางส่วนก็ได้

ตารางที่ 2.2 ขอบเขตการให้บริการแบบครบวงจรของบริษัทจัดการพลังงาน

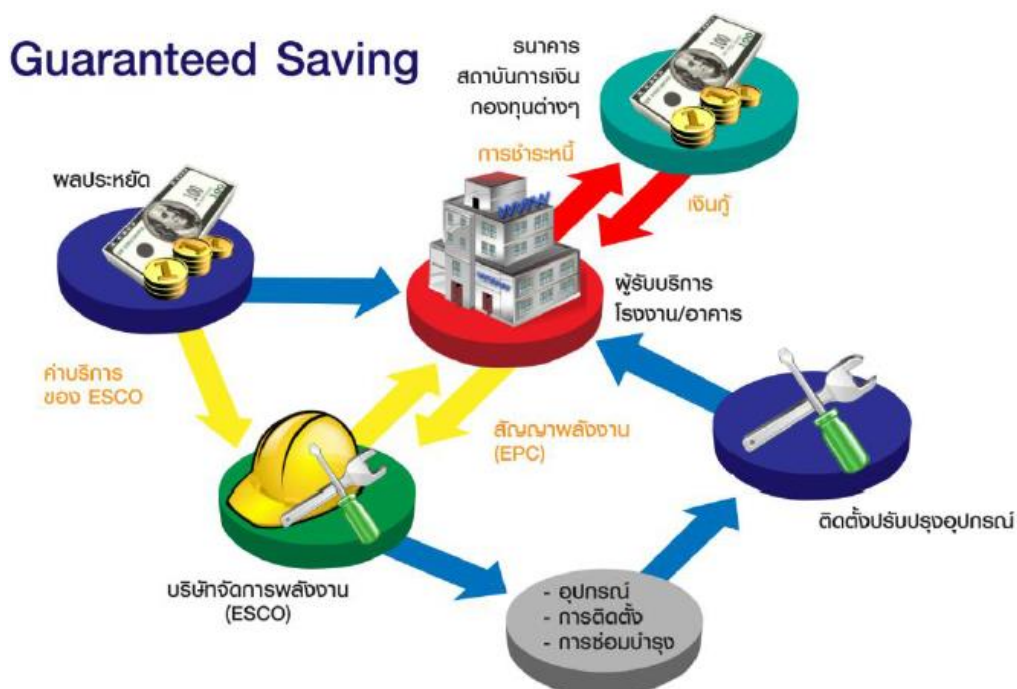
ลักษณะการให้บริการของ ESCO
- ตรวจสอบ ตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงาน
- จัดเตรียมเอกสารเสนอโครงการและการออกแบบด้านวิศวกรรม
- การจัดหาเงินทุนสนับสนุนสำหรับค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการ
- จัดหาหรือช่วยจัดหาอุปกรณ์ การติดตั้ง การก่อสร้าง การควบคุม และการซ่อมบำรุง
- การบริหารโครงการ
- ตรวจสอบและประเมินผลการประหยัดพลังงานของโครงการ
- ฝึกอบรมและให้บริการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์พลังงาน
- รับประกันผลการประหยัดพลังงาน
- ชดเชยส่วนต่างกรณีผลการประหยัดไม่เป็นตามข้อตกลง

ในการจัดการพลังงานของบริษัทจัดการพลังงานจะมีสัญญาพลังงานที่มีการลงนามระหว่างบริษัทจัดการพลังงานและสถานประกอบการ ซึ่งจะมีผลบังคับใช้ตั้งแต่การติดตั้งเครื่องจักรอุปกรณ์ ไปจนถึงระยะเวลาสิ้นสุดโครงการ โดยต้องระบุรายงานการตรวจวัดและพิสูจน์ผลประหยัด (Measurement and Verification: M&V) ในสัญญาพลังงาน และมีชดเชยส่วนต่างในกรณีที่ผลประโยชน์ที่ได้รับไม่เป็นไปตามข้อตกลงในสัญญาพลังงาน อีกทั้งมีการกำหนดปริมาณของพลังงานที่สามารถประหยัดได้เมื่อเทียบกับระดับ

การใช้พลังงานปกติ (Baseline Energy Use) ของกระบวนการผลิต เครื่องจักร อุปกรณ์ หรือระบบอื่นๆ ที่ จะดำเนินการ โดยจะระบุระดับการใช้พลังงานปกติไว้ในสัญญาพลังงานด้วย ซึ่งลักษณะของสัญญาพลังงาน จะแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

1. การรับประกันผลประหยัดพลังงาน (Guaranteed Saving)

เป็นลักษณะรูปแบบที่ผู้รับบริการเป็นผู้ลงทุนและทำการกู้เงินจากแหล่งทุนโดยตรง พร้อมกับการ จัดทำสัญญาพลังงานระหว่างผู้กู้กับแหล่งทุนโดยมี ESCO เป็นผู้รับประกันผลประหยัดพลังงานว่า ค่า พลังงานที่สามารถประหยัดได้ของโครงการจะเท่ากับหรือมากกว่าค่าใช้จ่ายที่ผู้รับบริการจะต้องจ่ายในการ ลงทุน ทั้งนี้หากค่าพลังงานที่ประหยัดได้จริงต่ำกว่าผลประหยัดที่กำหนดในสัญญาแล้ว ESCO จะเป็นผู้ออก เงินส่วนที่ขาดให้กับผู้รับบริการ แต่ในทางตรงข้ามหากผลประหยัดสูงกว่าที่กำหนด ผู้รับบริการจะต้องแบ่ง เงินส่วนที่ประหยัดให้กับ ESCO ลักษณะการลงทุนแบบนี้แสดงได้ดังภาพที่ 2.7

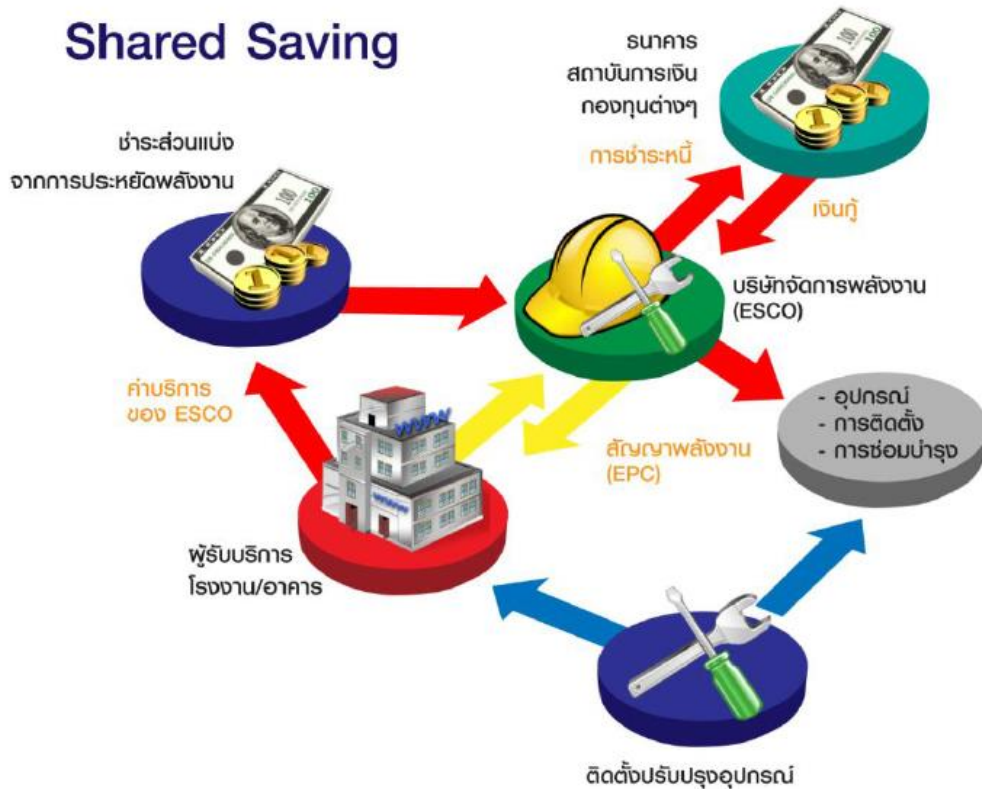


ภาพที่ 2.7 รูปแบบการรับประกันผลประหยัดพลังงาน [28]

2. การแบ่งปันผลประหยัดพลังงาน (Shared Saving)

เป็นลักษณะรูปแบบที่ ESCO เป็นผู้กู้หรือหาแหล่งเงินทุนให้และดำเนินการตามแผนประหยัด พลังงาน โดยผู้รับบริการมีหน้าที่จ่ายเงินตอบแทนเป็นค่าบริการและนำเอาค่าพลังงานที่ประหยัดได้มาแบ่ง ผลประโยชน์กัน ลักษณะการลงทุนแบบนี้แสดงได้ดังภาพที่ 2.8 ทั้งนี้สัดส่วนของจำนวนเงินตอบแทนจากการ ประหยัดพลังงานที่ต้องแบ่งให้ ESCO จะมากกว่ารูปแบบแรกเพราะ ESCO ต้องแบกรับความเสี่ยงและ ค่าใช้จ่ายที่ได้ลงทุนให้ก่อน

Shared Saving

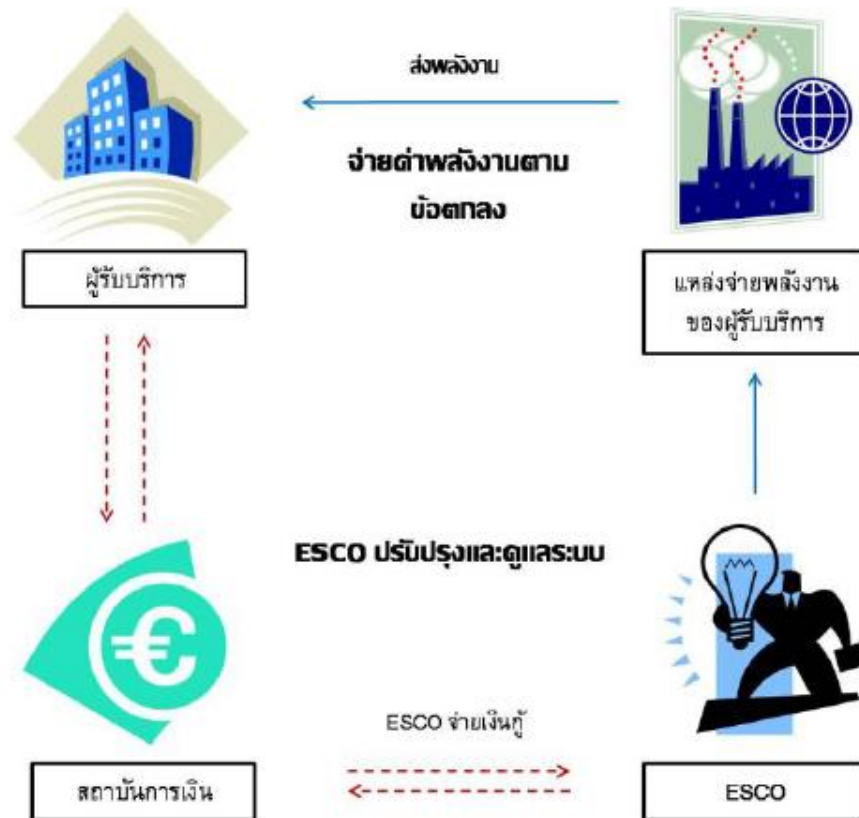


ภาพที่ 2.8 รูปแบบการแบ่งปันผลประโยชน์พลังงาน [28]

3. การประกันส่วนต่างค่าพลังงาน (Guaranteed Rebate/Chauffage)

รูปแบบนี้ ESCO จะเป็นผู้รับสัมปทานและจะเข้าปรับปรุงอุปกรณ์จ่ายพลังงานรวมถึงเป็นผู้ปฏิบัติการจ่ายพลังงาน โดยผู้รับบริการมีหน้าที่จ่ายเงินตอบแทนเป็นค่าพลังงานต่อหน่วยที่ต่ำกว่าเดิม เรียกว่า Guaranteed Rebate สัญญาแบบนี้มักจะมีระยะเวลานานกว่าสัญญาการประหยัดพลังงานทั้ง 2 แบบที่กล่าวข้างต้น โดยการประหยัดพลังงานจะมีมากกว่าเพราะว่า ESCO ต้องลงทุนและดูแลระบบพร้อมทั้งแบกรับความเสี่ยงและค่าใช้จ่ายที่ได้ลงทุนให้ก่อน ลักษณะการลงทุนแบบนี้แสดงได้ดังภาพที่ 2.9

ในการประเมินเพื่อรับรองมาตรฐานการทำงานสำหรับบริษัทจัดการพลังงานไทย บริษัทฯจะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดใน 2 ส่วนใหญ่ๆ คือส่วนมาตรฐานบริษัทจัดการพลังงานไทย ว่าด้วยเรื่องการกำหนดคุณสมบัติของ ESCO และส่วนมาตรฐานการดำเนินงานของ ESCO ซึ่งเป็นเรื่องการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการดำเนินงานของ ESCO ในโครงการอนุรักษ์พลังงานซึ่งดำเนินการภายใต้สัญญาพลังงาน สำหรับเกณฑ์มาตรฐานคุณสมบัติของ ESCO จะประกอบด้วย



ภาพที่ 2.9 รูปแบบการประกันค่าพลังงานหรือต้นทุนสาธารณูปโภค [28]

คุณสมบัติหลัก ได้แก่ สัญญาพลังงาน (Energy Performance Contracting: EPC) รายงานการตรวจวัดและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการเพื่อการตัดสินใจลงทุน (IGA Report) รวมถึงการตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงาน (M&V) ของบริษัทจัดการพลังงาน ทั้งนี้สัญญารับประกันผลประหยัดจะต้องมีความชัดเจนในสัญญาครบทั้ง 9 ข้อดังนี้

1. วัตถุประสงค์ของสัญญา
2. วิธีการดำเนินงานตามโครงการ
3. การรับประกันผลประหยัด/แบ่งผลประหยัด/เงื่อนไขในการรับประกัน
4. การจัดการพลังงานตามโครงการ
5. ขอบเขตความรับผิดชอบของผู้รับบริการและผู้ให้บริการ (ESCO)
6. ระยะเวลาการรับประกันผลตอบแทน/ผลประโยชน์
7. การวางหลักประกันการปฏิบัติตามสัญญา
8. เงื่อนไขการบอกเลิกสัญญา/การแก้ไขสัญญา/ค่าปรับ
9. การรับผิดชอบค่าเสียหาย/การขยายเวลาการรับประกัน

ในการตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงาน ESCO จะต้องมีความรู้ความสามารถในการออกแบบและดำเนินการในกระบวนการ M&V ที่ได้มาตรฐานชัดเจนซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ระหว่างคู่สัญญาโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. จัดทำข้อตกลงการตรวจวัดและพิสูจน์ผลประหยัดโดยแนบท้ายสัญญาพลังงาน เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของสัญญา

2. แสดงข้อมูลพลังงานและรายละเอียดมาตรการและของสถานประกอบการในรายงานการตรวจวัดฯ
3. เลือกแนวทางการตรวจวัดและพิสูจน์ผลประหยัดที่เหมาะสม และจัดทำแผน M&V
4. แสดงวิธีการตรวจวัดฯ และเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดฯ ที่ได้มาตรฐานสากล
5. ตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงานก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง
6. จัดทำรายงานการตรวจวัดและพิสูจน์ผลประหยัด พร้อมกับรับรองรายงานการตรวจวัดและพิสูจน์ผลการใช้พลังงาน

คุณสมบัติรอง ได้แก่ ความสามารถด้านเทคนิค ความสามารถทางการเงิน ความสามารถในการจัดหาแหล่งเงินทุน ความสามารถของบุคลากร โดยตรวจสอบจากคุณสมบัติและประสบการณ์ของบริษัทจัดการพลังงาน ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

1. ต้องมีประสบการณ์ในด้านการอนุรักษ์พลังงาน และมีความเชี่ยวชาญด้านพลังงานโดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านมาตรการที่สถานประกอบการต้องการอนุรักษ์พลังงาน
2. ระยะเวลาการดำเนินการของบริษัท (ปี) ในด้านที่เกี่ยวข้องกับพลังงานอย่างน้อย 1 ปี ขึ้นไป
3. จำนวนเทคโนโลยีด้านพลังงานที่บริษัทจัดการพลังงานสามารถดำเนินการอนุรักษ์พลังงานให้กับสถานประกอบการ
4. ความเชี่ยวชาญเฉพาะทางของบริษัท รางวัล/ประกาศเกียรติคุณที่เกี่ยวข้องในระยะเวลา 3 ปีที่ผ่านมา
5. ผลประหยัดพลังงานเทียบกับสัญญาพลังงาน

การตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงาน คือการตรวจสอบว่ามาตรการอนุรักษ์พลังงานที่ดำเนินการอยู่ยังคงทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน โดยคำนวณผลการประหยัดพลังงานที่ได้รับจากการตรวจวัดปริมาณการใช้พลังงานก่อนและหลังการดำเนินมาตรการอนุรักษ์พลังงานดังแสดงตามสมการ (2.17)

$$\text{ผลประหยัดพลังงาน} = (\text{ระดับการใช้พลังงานก่อนการดำเนินการ}) - (\text{ระดับการใช้พลังงานหลังการดำเนินการ}) \quad (2.17)$$

ทั้งนี้การตรวจสอบว่ามาตรการอนุรักษ์พลังงานนั้นยังคงประหยัดพลังงานอยู่ จำเป็นต้องพิจารณาหาวิธีวัดระดับการใช้พลังงานปกติก่อนการดำเนินการที่มีความเที่ยงตรงถูกต้องแม่นยำ รวมถึงยังต้องพิจารณาว่าระบบหรือเครื่องจักรที่ติดตั้งเข้าไบนั้นสามารถทำงานได้ตามคุณสมบัติที่กำหนดและทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่ากระบวนการทำ M&V ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดเพราะอาจส่งผลกระทบต่อความเสี่ยง หรือความน่าสนใจในผลประหยัดที่ได้เพื่อเป็นการกระตุ้นให้มีการลงทุนทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานมากขึ้น ซึ่งตามระเบียบวิธีการของ IPMVP (International Performance Measurement and Verification Protocol) ได้กำหนดรูปแบบของการตรวจวัดและพิสูจน์ผลประหยัดพลังงานไว้ 4 รูปแบบคือ รูปแบบ A, B, C และ D ดังนี้

รูปแบบ A การตรวจวัดเฉพาะตัวแปรหลักแยกรายมาตรการ

การตรวจวัดรูปแบบนี้จะใช้การประเมินการอนุรักษ์พลังงานระดับอุปกรณ์หรือระบบโดยตรวจวัดตัวแปรหลักของระบบหรืออุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดได้ เช่น ความสามารถในการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็น กำลังไฟฟ้าที่ใช้ของเครื่องทำความเย็น ชั่วโมงทำงานของระบบแสงสว่าง ชั่วโมงการทำงานของเครื่องทำความเย็น เป็นต้น โดยอาจวัดเป็นจุดในช่วงระยะเวลาสั้นๆ หรือบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่อง ขึ้นอยู่กับความผันผวนของข้อมูลที่ต้องการตรวจวัด

รูปแบบ B การตรวจวัดตัวแปรทุกตัวแยกรายมาตรการ

รูปแบบนี้เหมาะสำหรับการตรวจวัดและประเมินผลการประหยัดพลังงานที่มุ่งเน้นการหาประสิทธิภาพ และปัจจัยการทำงานของอุปกรณ์และระบบที่สามารถตรวจวัดได้โดยตรง โดยใช้วิธีการตรวจวัดช่วงสั้นๆ หรือตรวจวัดแบบต่อเนื่องโดยจะมีลักษณะคล้ายกับรูปแบบ A แต่จะมีการตรวจวัดข้อมูลมากกว่าและใช้ระยะเวลานานกว่า เพื่อให้เข้าใจถึงผลการประหยัดพลังงานที่เกิดขึ้นจริง ตามปกติการตรวจวัดจะทำเพียงช่วงระยะเวลาสั้นๆ ยกเว้นในกรณีที่ตัวแปรหลายตัวมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ อาจจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจวัดอย่างต่อเนื่อง

รูปแบบ C การวิเคราะห์จากปริมาณการใช้พลังงานโดยรวม

ลักษณะการตรวจวัดรูปแบบนี้จะใช้มิเตอร์วัดการใช้ไฟฟ้ารวมของการไฟฟ้าหรือมิเตอร์วัดการใช้พลังงานรวมของผู้จำหน่ายพลังงาน หรือใช้มิเตอร์ย่อยทั้งหมดที่ติดตั้งในระบบหรืออาคารต่างๆ ของสถานประกอบการการตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงานตามรูปแบบนี้จะไม่ประเมินผลการประหยัดพลังงานแยกตามมาตรการ แต่จะประเมินผลการประหยัดพลังงานโดยรวมสำหรับมาตรการทั้งหมด ซึ่งผลการประหยัดพลังงานที่ประเมินได้จากรูปแบบ C นี้จะรวมถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานของสถานประกอบการด้วย

รูปแบบ D การจำลองผลด้วยแบบจำลองซึ่งผ่านการสอบเทียบ

รูปแบบนี้จะใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์จำลองการใช้พลังงานก่อนและหลังการดำเนินมาตรการของสถานประกอบการสามารถใช้ได้ทั้งแบบรายมาตรการหรือหลายมาตรการรวมกัน แบบจำลองในการคำนวณจะต้องมีการสอบเทียบเพื่อที่จะสามารถใช้ทำนายการใช้พลังงานและความต้องการพลังไฟฟ้าได้ใกล้เคียงความเป็นจริงไม่ว่าจะเป็นช่วงก่อนหรือหลังการปรับปรุง

การตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงานทั้ง 4 รูปแบบนี้ อาจไม่สามารถบอกได้ว่ารูปแบบใดจะมีค่าใช้จ่ายมากหรือน้อยกว่ากัน อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้วการดำเนินการตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงานไม่ว่ารูปแบบใดก็ตามไม่ควรมีค่าใช้จ่ายเกิน 10% ของผลการประหยัดพลังงาน ทั้งนี้เพื่อให้เป็นมาตรฐานของบริษัทจัดการพลังงาน การตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงานควรประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1) แต่งตั้งคณะทำงานตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงาน

สถานประกอบการและบริษัทจัดการพลังงานพิจารณาเลือกและแต่งตั้งหน่วยงานที่จะมาทำงานเป็นคณะทำงานตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงาน (M&V Unit)

2) สำรวจพื้นที่ตามมาตรการอนุรักษ์พลังงาน

ตัวแทน M&V Unit สำรวจพื้นที่และเครื่องจักรที่จะทำการเปลี่ยนหรือปรับปรุงเพื่อประเมินค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงานรวมถึงค่าใช้จ่ายในการจัดทำรายงาน

3) จัดทำข้อตกลงการตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงาน

M&V Unit จัดทำข้อตกลงการตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงานส่งผ่านบริษัทจัดการพลังงาน เพื่อแนบท้ายสัญญาพลังงาน (Energy Performance Contract: EPC)

4) เตรียมพื้นที่และเครื่องจักรสำหรับการตรวจวัดก่อนปรับปรุง

สถานประกอบการจัดเตรียมพื้นที่และนัดหมาย M&V Unit เพื่อเข้าปฏิบัติการ ตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงานก่อนการปรับปรุง

5) ตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงานก่อนปรับปรุง

M&V Unit เข้าปฏิบัติการ ตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงานก่อนการปรับปรุง เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานปีฐาน (Baseline) และส่งมอบรายงานให้กับคู่สัญญาพิจารณา

6) เตรียมพื้นที่และเครื่องจักรสำหรับการตรวจวัดหลังปรับปรุง

บริษัทจัดการพลังงานดำเนินการปรับปรุง/เปลี่ยน เครื่องจักร อุปกรณ์หรือกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพพลังงานสูงขึ้นพร้อมทำการปรับตั้งให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุดแล้วจึงนัดหมาย M&V Unit เข้าปฏิบัติการ ตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงานหลังการปรับปรุง

7) ตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงานหลังปรับปรุง

M&V Unit เข้าปฏิบัติการ ตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงานหลังการปรับปรุง

8) จัดทำรายงานการตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงาน

M&V Unit จัดส่งรายงานการตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงานให้สถานประกอบการลงนามในรายงานและเบิกค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดและพิสูจน์ผลการประหยัดพลังงาน และรายงานจากผู้ว่าจ้าง (กรณี M&V Unit ที่มาจากหน่วยงานภายนอก)

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพมอเตอร์มาตรฐานกับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง [29]

ขนาด พิกัด (แรงม้า)	2ขั้ว (3,000 รอบ/นาที)		4ขั้ว (1,500 รอบ/นาที)	
	มอเตอร์มาตรฐาน	มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง	มอเตอร์มาตรฐาน	มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง
3	80.0	84.0	81.5	86.5
5	82.5	86.5	82.5	86.5
7.5	82.5	87.5	85.5	88.5
10	85.5	88.5	85.5	88.5
15	85.5	89.5	86.5	90.2
20	86.5	89.5	88.5	90.2
25	87.5	90.2	89.5	91.7
30	87.5	90.2	89.5	91.7
40	88.5	91.0	90.2	92.4
50	88.5	91.7	91.0	92.4
60	90.2	92.4	91.7	93.0
75	91.0	92.4	91.7	93.6
100	91.7	93.0	92.4	94.1
125	91.7	94.1	92.4	94.1
150	93.0	94.1	93.0	94.5
200	93.5	94.5	93.6	94.5
250	93.5	95.0	93.8	95.0
300	93.5	95.0	93.8	95.0
400	93.5	95.0	93.8	95.0
500	93.5	95.0	94.0	95.4

โดยทั่วไปมาตรการอนุรักษ์พลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส กรณีเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ที่มีประสิทธิภาพเท่าเดิมหรือสูงกว่า (มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง) การคำนวณผลประโยชน์ก่อนการลงทุนมักใช้ค่าประสิทธิภาพที่ระบุไว้บนแผ่นป้าย (Nameplate) ของมอเตอร์เดิมในการพิจารณา ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ผลประโยชน์ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริงเนื่องจากสภาพของมอเตอร์เดิมที่อาจมีการใช้งานมาเป็นเวลาหลายปี หรืออาจเคยผ่านการซ่อมด้วยการพันขดลวดใหม่จะทำให้ค่าประสิทธิภาพเปลี่ยนไปจากบนแผ่นป้าย (ลดลง) ดังนั้นเมื่อมีการจัดทำแผนโครงการอาจไม่ได้รับความสนใจจากผู้รับบริการ เพราะเห็นผลประโยชน์ที่น้อยและมีระยะเวลาคืนทุนในการลงทุนนานเกินไป ดังนั้นหากไม่สามารถหาค่าประสิทธิภาพที่แท้จริงของมอเตอร์ตัวเดิมได้ หรือไม่สามารถประเมินภาระการทำงานในการขับโหลดได้อย่างแม่นยำ ก็จะทำให้ผลการคำนวณผลประโยชน์มีความคลาดเคลื่อนสูง ดังแสดงเป็นตัวอย่างข้างล่างนี้

ตัวอย่าง การคำนวณผลประโยชน์กรณีเปลี่ยนมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพมาตรฐานเป็นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง โดยการใช้ค่าประสิทธิภาพที่ระบุไว้บนแผ่นป้ายมอเตอร์อาจใช้ข้อมูลในตารางที่ 2.3 เป็นค่าอ้างอิงในการคำนวณผลประโยชน์ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้ [29]

$$P_{save} = P_{out} \times \left(\frac{100}{\eta_{std}} - \frac{100}{\eta_{high}} \right) \quad (2.17)$$

โดยที่	P_{save}	ผลประโยชน์ที่เกิดขึ้น
	P_{out}	กำลังงานด้านออกของมอเตอร์
	η_{std}	ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์มาตรฐาน
	η_{high}	ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

กำหนดข้อมูล:	ขนาดฟกัดมอเตอร์ 60 แรงม้า (4 ขั้ว)	=	45	kW
	ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์มาตรฐาน	=	91.7%	(ทำงานที่ฟกัด)
	ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง	=	93.0%	(ทำงานที่ฟกัด)
	ราคาที่สูงกว่าของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง	=	20,000	บาท
	ชั่วโมงการใช้งาน	=	2,000	ชั่วโมง/ปี
	ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย	=	4	บาท/kWh

ผลการประหยัดพลังงานและระยะเวลาในการคืนทุนอย่างง่ายเมื่อทำการซื้อมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงแทนมอเตอร์มาตรฐานที่ขนาดมอเตอร์ 45kW จะมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

$$\text{ผลประโยชน์ที่เกิดขึ้น } (P_{save}) = 45\text{kW} \times \left(\frac{100}{91.7} - \frac{100}{93.0} \right) = 0.686\text{kW}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานที่ประหยัดได้} &= 0.686 \text{ kW} \times 2,000 \text{ ชั่วโมง} \times 4 \text{ บาท/kWh} \\ &= 5,488 \text{ บาท} \end{aligned}$$

$$\text{กำลังงานที่ประหยัดได้ตลอดอายุการใช้งาน (20 ปี)} = 5,488 \times 20 = 109,760 \text{ บาท}$$

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาคืนทุนแบบเชิงเดียว} &= \frac{20,000}{109,760} \\ &= 0.18 \text{ ปีหรือประมาณ 2 เดือน} \end{aligned}$$

หมายเหตุ ความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นในตัวอย่างการคำนวณนี้ คือการกำหนดค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์มาตรฐานซึ่งใช้ตามทีละบุนแผ่นป้ายและเป็นค่าที่ภาวะทำงานเต็มพิกัด ทั้งนี้ในสภาวะทำงานจริง มอเตอร์แต่ละตัวอาจไม่ได้ทำงานเต็มที่และด้วยอายุการใช้งานนานหลายปีรวมถึงการเคยพันขดลวดใหม่เป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไม่เป็นตามค่าที่ระบุไว้บนแผ่นป้าย ดังนั้นเพื่อให้การประเมินผลประหยัดมีค่าที่ถูกต้องแม่นยำ สิ่งสำคัญคือการหาค่าประสิทธิภาพที่แท้จริงของมอเตอร์เดิมรวมถึงสภาพการขับโหลดที่ถูกต้อง

จะเห็นได้ว่าธุรกิจ ESCO เป็นระบบที่ต้องทำสัญญาตกลงกันระหว่างผู้ประกอบการกับบริษัทจัดการพลังงาน โดยในสัญญามีการกำหนดเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้แล้วประหยัดพลังงานได้, เงินลงทุน, พลังงาน และตัวเงินที่จะประหยัดได้ตลอดจนระยะเวลาคืนทุนที่ชัดเจน ที่สำคัญที่สุดคือ ESCO ต้องรับประกันผลประหยัด ถ้าประหยัดไม่ได้ตามที่ตกลงไว้ ESCO ต้องจ่ายเงินชดเชยส่วนต่าง ระบบนี้จึงเป็นที่ยอมรับกันทั่วโลกเพราะให้ความเป็นธรรมทั้ง 2 ฝ่าย ดังนั้นบริษัทจัดการพลังงานจึงต้องมีความรู้ความเชี่ยวชาญจริงถึงทำธุรกิจนี้ได้ และต้องมีจรรยาบรรณจึงสามารถสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ประกอบการหันมาใช้บริการได้อย่างไรก็ตามการประกอบธุรกิจ ESCO ในประเทศไทยยังคงพบปัญหาและอุปสรรคที่พอสรุปเป็นสังเขปได้ดังนี้

- ผู้ประกอบการไม่เชื่อมั่นการให้บริการของ ESCO
- ผู้ประกอบการพึ่ง ESCO แล้วไม่จ้าง ESCO แต่ไปทำเองหรือให้ที่ปรึกษาคนอื่นทำ
- ธนาคารไม่กล้าปล่อยกู้ให้ผู้ประกอบการไปซื้ออุปกรณ์เพราะกลัวว่าจะประหยัดไม่ได้จริง จึงไม่สามารถจ่ายเงินคืน (ในกรณีของ Guaranteed Saving)
- ธนาคารไม่กล้าให้ ESCO กู้เงินซื้ออุปกรณ์มาติดตั้งให้ผู้ประกอบการ (ในกรณีของ Shared Saving)

ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาในระดับหนึ่งและการสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ประกอบการ จึงได้มีการจัดตั้งศูนย์ ESCO Information Center เพื่อให้เป็นแหล่งข้อมูลประกอบการตัดสินใจเลือกบริษัท ESCO ของผู้ประกอบการ อีกทั้งยังเป็นศูนย์กลางในการกระจายข่าวสาร ตลอดจนการประสานงานระหว่างบริษัทจัดการพลังงาน สถาบันการเงิน และผู้ประกอบการ อีกทั้งยังเป็นส่วนที่รับปรึกษา แนะนำ ให้ความรู้ และข้อมูลเพิ่มเติมแก่ผู้สนใจที่มีข้อสงสัยและต้องการซักถามรายละเอียดด้านพลังงานด้วย โดยได้ดำเนินการบริหารและปรับปรุงอย่างต่อเนื่องทุกปี

2.4 มาตรฐานประสิทธิภาพมอเตอร์ (Efficiency Classes)

ไม่ใช่เฉพาะประเทศไทยเท่านั้น แต่อาจกล่าวได้ว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าทั่วโลกประมาณ 30-40% นั้นมาจากมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม และอาจคิดเป็นปริมาณ 70% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากกลุ่มมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสของแต่ละธุรกิจอุตสาหกรรม [30] ทำให้หลายประเทศเริ่มให้ความสนใจและให้ความสำคัญกับการเพิ่มค่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อทำให้การใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมและภาพรวมของประเทศที่มีค่าลดลง ทั้งนี้เพื่อเป็นการส่งเสริมและสนับสนุนทำให้ปัจจุบัน IEC (International Electrotechnical Commission) มีการกำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอก (Squirrel cage induction motor) ได้แก่มาตรฐาน IEC 60034-30 [31] ตั้งแต่ปี 2008 ด้วยการแบ่งกลุ่มมอเตอร์ที่มีระดับประสิทธิภาพต่างกันออกเป็น 4 ระดับใหญ่โดยแทนด้วยรหัส IE ได้แก่

- IE1 (Standard efficiency)
- IE2 (High efficiency)
- IE3 (Premium efficiency)
- IE4 (Super premium efficiency)

อย่างไรก็ตาม ในช่วงเริ่มต้นของการกำหนดมาตรฐาน IEC ได้มีการนิยามและกล่าวถึงอย่างชัดเจนเกี่ยวกับกฎเกณฑ์อย่างเป็นทางการบรรทัดฐานเฉพาะมอเตอร์ใน 3 ระดับแรก เนื่องจากมอเตอร์ระดับ IE4 ยังไม่มีการใช้งานในตลาดภาคอุตสาหกรรมมากนักทำให้ไม่มีข้อมูลมากพอในการกำหนดมาตรฐาน [32] แต่ในปี 2010 IEC ได้มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำและมอเตอร์ซิงโครนัสระดับ IE4 อย่างชัดเจน ได้แก่ IEC 60034-31 (2010) รวมถึงได้มีการแก้ไขมาตรฐาน IEC 60034-30 เป็นฉบับที่สอง (2nd edition) โดยการเพิ่มข้อกำหนดมาตรฐานของมอเตอร์ระดับ IE4 เฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว ที่ความถี่ 50Hz และ 60Hz นอกจากนี้ยังได้มีการกล่าวถึงมอเตอร์ระดับ IE5 (Ultra-Premium Efficiency) แต่ยังไม่มีการกำหนดรายละเอียดและคาดว่าจะถูกระบุไว้ในมาตรฐานฉบับแก้ไขต่อไป [33] สำหรับมาตรฐานอื่นก็มีการกำหนดคุณสมบัติระดับประสิทธิภาพของมอเตอร์เช่นกัน โดยตารางที่ 2.4 แสดงการเทียบเคียงมอเตอร์ที่มีระดับประสิทธิภาพต่างๆ ของมาตรฐาน IEC, NEMA Premium Standard และมาตรฐานของ EU

ตารางที่ 2.4 การเทียบเคียงมาตรฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีระดับประสิทธิภาพต่างๆ [34]

Type	IEC 60034-30	US	EU (past)
Super premium efficiency	IE4	NEMA Premium Plus	-
Premium efficiency	IE3	NEMA Premium	-
High efficiency	IE2	EPAct	Eff1
Standard efficiency	IE1	-	Eff2
Below standard efficiency			Eff3

EPAct = The United States Energy Policy Act of 1992

ขนาดพิกัดของมอเตอร์ซึ่งอยู่ในขอบเขตการกำหนดค่าประสิทธิภาพในแต่ละระดับของมาตรฐาน IEC 60034-30 มีคุณสมบัติดังนี้ [35]

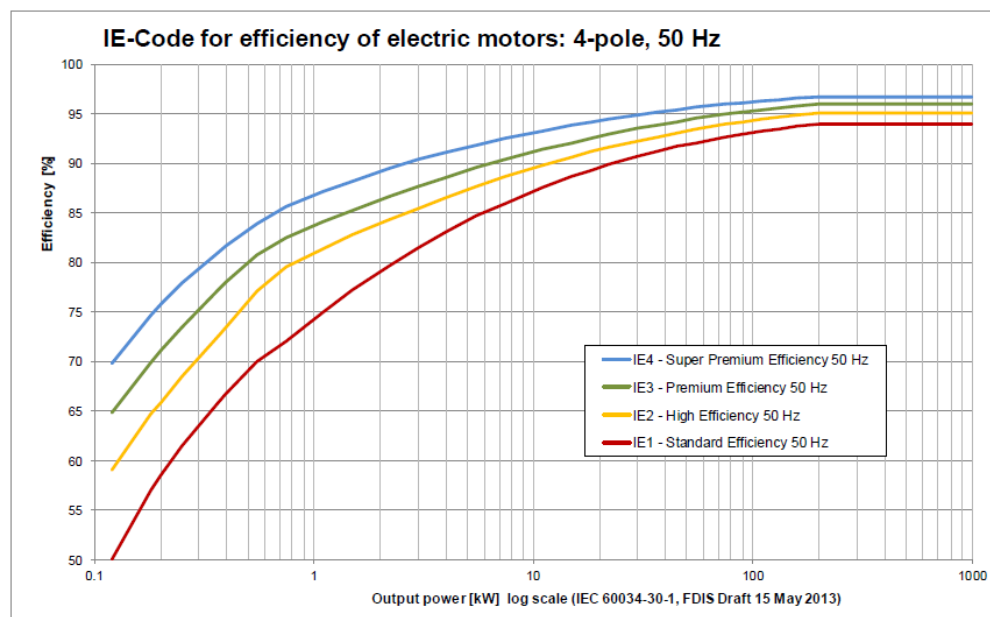
- มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟสความเร็วเดียว ความถี่ 50 และ 60Hz
- จำนวนขั้วแม่เหล็กเป็น 2, 4 หรือ 6
- ขนาดพิกัดกำลังตั้งแต่ 0.75 ถึง 375 kW
- พิกัดแรงดันมากถึง 1000 V
- ช่วงเวลาทำงานแบบต่อเนื่อง (Duty type S1) และแบบหยุดพักเป็นช่วง (Duty type S3)
- สามารถสตาร์ทโดยตรงได้ที่ความถี่ 50 หรือ 60Hz (Direct online starting)

ทั้งนี้การหาค่าประสิทธิภาพมอเตอร์จะได้จากการทดสอบซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60034-2-1: 2007 (Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests) ดังแสดงค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่มีระดับ IE1, IE2 และ IE3 ในตารางที่ 2.5 สำหรับภาพที่ 2.10 แสดงตัวอย่างเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพแต่ละระดับของมอเตอร์ 4 ขั้ว ความถี่ 50Hz ตามมาตรฐาน IEC 60034-30-1 ซึ่งมีการเพิ่มระดับ IE4 เข้ามาด้วย

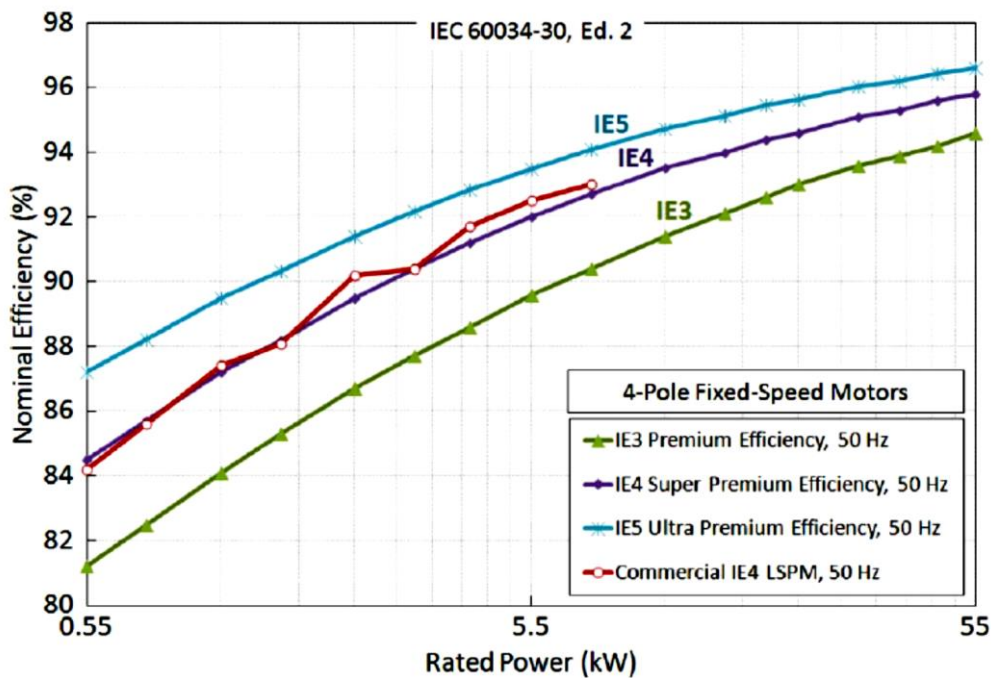
ถึงแม้มอเตอร์ที่มีระดับประสิทธิภาพ IE5 จะยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานอย่างชัดเจนในมาตรฐาน IEC 60034-30 , 2nd edition แต่อย่างไรก็ตาม IEC ได้ร่างค่ามาตรฐานของมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพระดับ IE5 ไว้พอสังเขปดังตัวอย่างในภาพที่ 2.11 สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า 4 ขั้ว ความถี่ 50Hz โดยเปรียบเทียบกับมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพในระดับ IE3 และ IE4 [34]

ตารางที่ 2.5 ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ของระดับต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60034-30 [35]

kW	HP	IE-1 - Standard efficiency						IE2 - High efficiency						IE3 - Premium efficiency					
		2 pole		4 pole		6 pole		2 pole		4 pole		6 pole		2 pole		4 pole		6 pole	
		50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
0.75	1	72.1	77.0	72.1	78.0	70.0	73.0	77.4	75.5	79.6	82.5	75.9	80.0	80.7	77.0	82.5	85.5	78.9	82.5
1.1	1.5	75.0	78.5	75.0	79.0	72.9	75.0	79.6	82.5	81.4	84.0	78.1	85.5	82.7	84.0	84.1	86.5	81.0	87.5
1.5	2	77.2	81.0	77.2	81.5	75.2	77.0	81.3	84.0	82.8	84.0	79.8	86.5	84.2	85.5	85.3	86.5	82.5	88.5
2.2	3	79.7	81.5	79.7	83.0	77.7	78.5	83.2	85.5	84.3	87.5	81.8	87.5	85.9	86.5	86.7	89.5	84.3	89.5
3	4	81.5	—	81.5	—	79.7	—	84.6	—	85.5	—	83.3	—	87.1	—	87.7	—	85.6	—
3.7	5	—	84.5	—	85.0	—	83.5	—	87.5	—	87.5	—	87.5	—	88.5	—	89.5	—	89.5
4	5.5	83.1	—	83.1	—	81.4	—	85.8	—	86.6	—	84.6	—	88.1	—	88.6	—	86.8	—
5.5	7.5	84.7	86.0	84.7	87.0	83.1	85.0	87.0	88.5	87.7	89.5	86.0	89.5	89.2	89.5	89.6	91.7	88.0	91.0
7.5	10	86.0	87.5	86.0	87.5	84.7	86.0	88.1	89.5	88.7	89.5	87.2	89.5	90.1	90.2	90.4	91.7	89.1	91.0
11	15	87.6	87.5	87.6	88.5	86.4	89.0	89.4	90.2	89.8	91.0	88.7	90.2	91.2	91.0	91.4	92.4	90.3	91.7
15	20	88.7	88.5	88.7	89.5	87.7	89.5	90.3	90.2	90.6	91.0	89.7	90.2	91.9	91.0	92.1	93.0	91.2	91.7
18.5	25	89.3	89.5	89.3	90.5	88.6	90.2	90.9	91.0	91.2	92.4	90.4	91.7	92.4	91.7	92.6	93.6	91.7	93.0
22	30	89.9	89.5	89.9	91.0	89.2	91.0	91.3	91.0	91.6	92.4	90.9	91.7	92.7	91.7	93.0	93.6	92.2	93.0
30	40	90.7	90.2	90.7	91.7	90.2	91.7	92.0	91.7	92.3	93.0	91.7	93.0	93.3	92.4	93.6	94.1	92.9	94.1
37	50	91.2	91.5	91.2	92.4	90.8	91.7	92.5	92.4	92.7	93.0	92.2	93.0	93.7	93.0	93.9	94.5	93.3	94.1
45	60	91.7	91.7	91.7	93.0	91.4	91.7	92.9	93.0	93.1	93.6	92.7	93.6	94.0	93.6	94.2	95.0	93.7	94.5
55	75	92.1	92.4	92.1	93.0	91.9	92.1	93.2	93.0	93.5	94.1	93.1	93.6	94.3	93.6	94.6	95.4	94.1	94.5
75	100	92.7	93.0	92.7	93.2	92.6	93.0	93.8	93.6	94.0	94.5	93.7	94.1	94.7	94.1	95.0	95.4	94.6	95.0
90	125	93.0	93.0	93.0	93.2	92.9	93.0	94.1	94.5	94.2	94.5	94.0	94.1	95.0	95.0	95.2	95.4	94.9	95.0
110	150	93.3	93.0	93.3	93.5	93.3	94.1	94.3	94.5	94.5	95.0	94.3	95.0	95.2	95.0	95.4	95.8	95.1	95.8
132	185	93.5	—	93.5	—	93.5	—	94.6	—	94.7	—	94.6	—	95.4	—	95.6	—	95.4	—
150	200	—	94.1	—	94.5	—	94.1	—	95.0	—	95.0	—	95.0	—	95.4	—	96.2	—	95.8
160	—	93.8	—	93.8	—	93.8	—	94.8	—	94.9	—	94.8	—	95.6	—	95.8	—	95.6	—
185	250	—	94.1	—	94.5	—	94.1	—	95.4	—	95.4	—	95.0	—	95.8	—	96.2	—	95.8
200	—	94.0	—	94.0	—	94.0	—	95.0	—	95.1	—	95.0	—	95.8	—	96.0	—	95.8	—
220	300	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
250	350	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
300	400	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
330	450	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
375	500	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8



ภาพที่ 2.10 ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้า 4 ขั้ว, 50Hz แต่ละระดับตามมาตรฐาน IEC 60034-30-1 [36]



ภาพที่ 2.11 ประสิทธิภาพมอเตอร์ 4 ขั้ว, 50Hz ของระดับ IE3-IE5
ตามมาตรฐาน IEC 60034-30, 2nd edition [34]

2.5 การตรวจวัดและอินเทอร์เฟซสัญญาณ

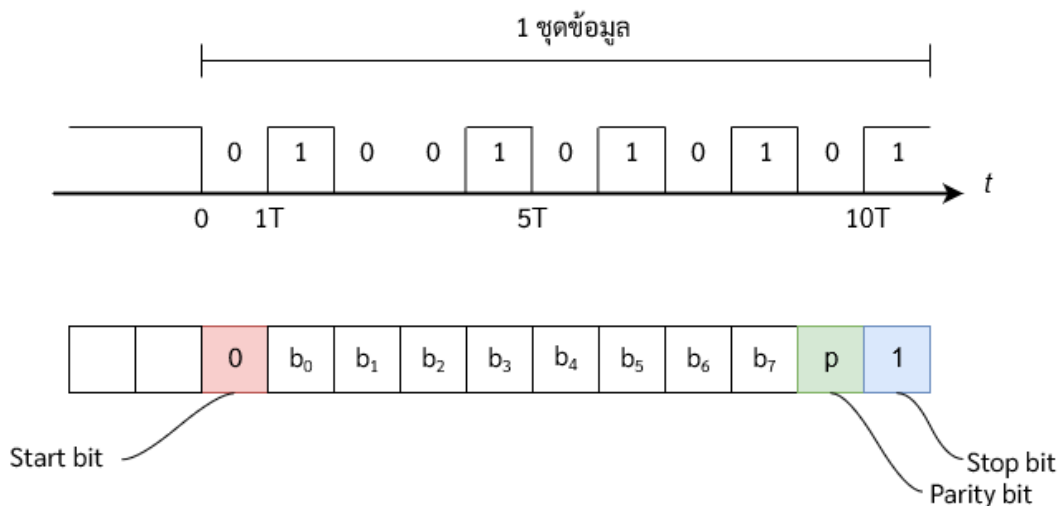
ในการตรวจวัดและอินเทอร์เฟซสัญญาณในโครงการวิจัยนี้จะใช้สัญญาณดิจิทัลในการติดต่อสื่อสารเพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้น โดยสัญญาณดิจิทัลมีปริมาณเพียงสองค่าคือ ค่าลอจิกสูงและค่าลอจิกต่ำ ที่สามารถเขียนในรูปเลขฐานสองคือ ค่าลอจิกสูงเท่ากับ “1” และค่าลอจิกต่ำเท่ากับ “0” ตัวอย่างรูปแบบการอินเทอร์เฟซสัญญาณดิจิทัลแบบอนุกรมแสดงดังภาพที่ 2.12 โดยอุปกรณ์เซนเซอร์หรืออุปกรณ์การสื่อสารที่จะส่งผ่านข้อมูลไปยังอุปกรณ์ตัวอื่นจำเป็นต้องส่งข้อมูลดิจิทัลในรูปแบบของชุดข้อมูล (data packet) ซึ่งชุดข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถส่งผ่านหรือทำการอินเทอร์เฟซได้หลายวิธี เช่น การอินเทอร์เฟซด้วยการสื่อสารแบบอนุกรม หรือการอินเทอร์เฟซด้วยการสื่อสารแบบขนาน ทั้งยังสามารถแบ่งการสื่อสารออกได้เป็นการสื่อสารทางเดียว หรือการสื่อสารสองทิศทาง ในการสื่อสารดิจิทัลระหว่างอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีการกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของการอินเทอร์เฟซและทำการเข้ารหัสในอุปกรณ์ฝั่งส่งสัญญาณไว้ ทางด้านอุปกรณ์ฝั่งรับสัญญาณจำเป็นต้องทำการถอดรหัสสัญญาณและแปลงเป็นชุดข้อมูลเพื่อจะนำข้อมูลที่ถูกส่งผ่านไปใช้ต่อไป การกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของการอินเทอร์เฟซมีการกำหนดในหลายตัวแปร เช่น ระดับแรงดันของค่าลอจิกสูงและค่าลอจิกต่ำ ค่าความเร็วของอัตราการสื่อสารหรือคาบิตเรต หรือลักษณะการเข้ารหัสสาย (Line coding) เป็นต้น ซึ่งหากอุปกรณ์ฝั่งส่งและฝั่งรับสัญญาณมีค่าคุณลักษณะเฉพาะของการอินเทอร์เฟซแตกต่างกันแม้เพียงเล็กน้อย การสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้น การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์จึงมีการกำหนดมาตรฐานของการอินเทอร์เฟซสัญญาณเพื่อให้การส่งผ่านข้อมูลเป็นไปด้วยความเรียบร้อย มาตรฐานการอินเทอร์เฟซสัญญาณแบบอนุกรมที่ได้รับความนิยมมีหลายมาตรฐาน ในรายงานนี้จะกล่าวถึงมาตรฐานที่ได้รับความนิยมจำนวนสามมาตรฐานคือ การอินเทอร์เฟซสัญญาณด้วยการสื่อสารอนุกรม RS232 การอินเทอร์เฟซสัญญาณด้วยการสื่อสารอนุกรม RS485 และการอินเทอร์เฟซสัญญาณด้วยการสื่อสาร Modbus ที่จะถูกใช้ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 2.12 การอินเตอร์เฟสสัญญาณดิจิทัล

การอินเตอร์เฟสสัญญาณด้วยการสื่อสารอนุกรม RS232 [37-40]

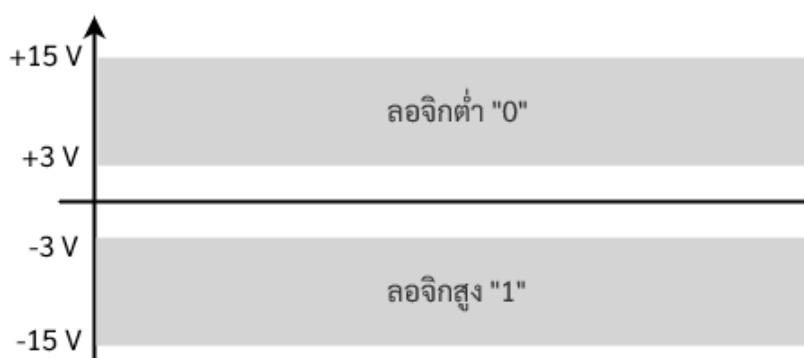
การอินเตอร์เฟสสัญญาณด้วยการสื่อสารอนุกรมตามมาตรฐาน RS232 ใช้หลักการสื่อสารแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous) ที่ใช้การรวมจำนวนข้อมูลหลายบิตส่งต่อกันไปในชุดข้อมูลแบบอนุกรม โดยจะมีการซิงโครไนส์ (Synchronization) เวลาของแต่ละบิตในชุดข้อมูลให้มีค่าฐานเวลาเท่ากันเพื่อให้เมื่อส่งข้อมูลถึงฝั่งรับ การถอดรหัสข้อมูลที่ถูกส่งมาจะสามารถถอดรับได้อย่างถูกต้องทุกบิตหากค่าฐานเวลาของฝั่งรับในการสุ่มข้อมูลบิตสามารถทำให้มีค่าฐานเวลาสอดคล้องกับฐานเวลาของฝั่งส่ง นอกจากนี้ในชุดข้อมูลที่จะมีการกำหนดบิตที่ทำหน้าที่เป็นบิตเริ่มต้นและบิตสุดท้าย เพื่อให้ทราบถึงขอบเขตของชุดข้อมูลที่ถูกส่งออกมา และฝั่งรับจะสามารถถอดรหัสชุดข้อมูลออกมาเป็นข้อมูลข่าวสารในแต่ละไบต์ (Byte) ที่นำข้อมูลบิตในชุดข้อมูลนั้น ๆ มาต่อเรียงกันได้ นอกจากนี้ในชุดข้อมูลอาจสามารถเพิ่มบิตเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ถูกส่งมาได้ด้วยการเพิ่มพริตตี้บิต (Parity bit) ที่ตำแหน่งด้านท้ายของชุดข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ชุดข้อมูลที่ถูกส่งผ่านในการสื่อสารอนุกรมนี้สามารถส่งข้อมูลที่ความเร็วแตกต่างกัน เรียกอัตราความเร็วในการส่งผ่านชุดข้อมูลว่าบอดเรต (Baud rate) นั่นคืออัตราการส่งผ่านจำนวนชุดข้อมูลต่อหนึ่งหน่วยเวลา แต่หากการส่งผ่านข้อมูลที่ทำกรนับจำนวนบิตต่อหนึ่งหน่วยเวลา เราจะเรียกอัตราความเร็วนี้ว่าบิตเรต (Bit rate)



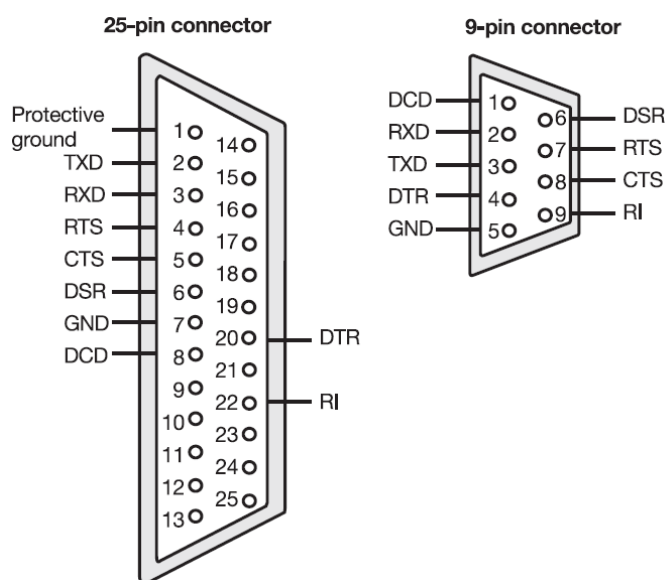
ภาพที่ 2.13 การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส

ในการอินเตอร์เฟสสัญญาณด้วยการสื่อสารอนุกรม RS232 นั้นได้รับความนิยมอย่างสูงในการใช้งานกับอุปกรณ์ระบบงานอัตโนมัติ และเครื่องมือวัดอุตสาหกรรมชนิดต่าง ๆ โหมดการส่งข้อมูลที่ใช้เป็นโหมดฟูลดูเพล็กซ์ อะซิงโครนัส (Asynchronous full-duplex) โดยมีการกำหนดค่าแรงดันสำหรับค่าลอจิกต่ำ “0”

ในช่วงระดับแรงดัน +3 V ถึง +15 V และกำหนดค่าแรงดันสำหรับค่าลอจิกสูง “1” ในช่วงระดับแรงดัน -3 V ถึง -15 V ดังแสดงในภาพที่ 2.14 มีอัตราความเร็วในการสื่อสารในระดับกิโลบิตต่อวินาที ที่สามารถใช้เชื่อมต่อสื่อสารได้ในระยะประมาณ 30 เมตร ขั้วต่อสายที่ได้รับความนิยมคือขั้วต่อสายชนิด sub-D มีสองแบบคือ แบบ 9 พิน และแบบ 25 พิน โดยแบบ 25 พินถูกออกแบบสำหรับการใช้งานในลักษณะโมเด็ม (modem) ที่จำเป็นต้องมีสายสำหรับการสื่อสารบางกรณี เช่น การส่งข้อมูลตอบรับ (Acknowledgement) และสัญญาณตรวจสอบความพร้อมก่อนส่ง เป็นต้น ซึ่งหากลดทอนส่วนการส่งข้อมูลตอบรับ และการส่งข้อมูลอื่นที่ไม่จำเป็นออกจะสามารถใช้ขั้วต่อสายชนิด 9 พินได้ดังแสดงในภาพที่ 2.15 และแสดงความหมายพินของขั้วต่อในตารางที่ 2.6 โดยการอินเตอร์เฟซอุปกรณ์การสื่อสารเข้ากับระบบโดยใช้มาตรฐาน RS232 นี้จะสามารถทำได้ในลักษณะสายนำสัญญาณหนึ่งเส้นต่ออุปกรณ์การสื่อสารเพียงหนึ่งอุปกรณ์เท่านั้น



ภาพที่ 2.14 ระดับแรงดันสำหรับการอินเตอร์เฟซตามมาตรฐาน RS232



ภาพที่ 2.15 ขั้วต่อสายชนิด sub-D สำหรับ RS232

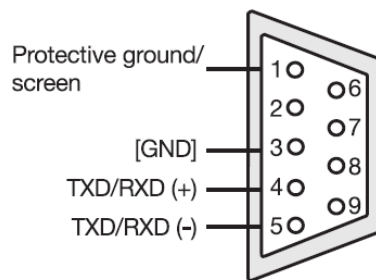
ตารางที่ 2.6 ความหมายของขั้วต่อสายชนิด sub-D สำหรับ RS232

Pin num.	Abbrev.	Function	Direction
1	DCD	Data carrier detect	In
2	RXD	Received data	In

3	TXD	Transmitted data	Out
4	DTR	Data terminal ready	Out
5	GND	Signal ground	
6	DSR	Data set ready	In
7	RTS	Request to send	Out
8	CTS	Clear to send	In
9	RI	Ring indicator	In

การอินเทอร์เฟซสัญญาณด้วยการสื่อสารอนุกรม RS485

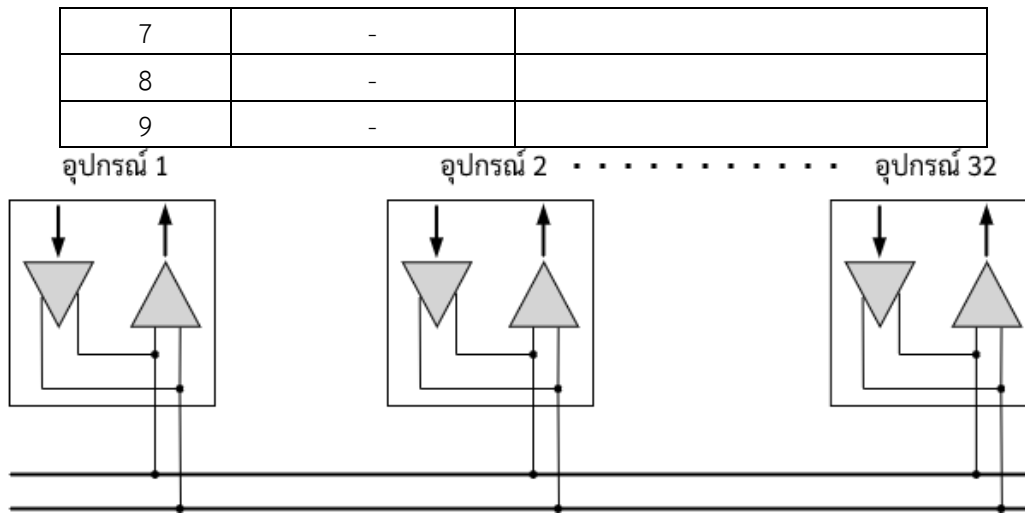
การอินเทอร์เฟซสัญญาณด้วยการสื่อสารอนุกรม RS485 มีโหมดการส่งข้อมูลที่ใช้เป็นโหมดฮาร์ฟดูเพล็กซ์ อะซิงโครนัส (Asynchronous half-duplex) ซึ่งจะสามารถส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์สื่อสารได้ทั้งสองทาง แต่จะไม่สามารถส่งและรับได้พร้อมกัน ต้องทำเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้นในเวลาหนึ่ง ๆ โดยมีการกำหนดค่าแรงดันสำหรับค่าลอจิกนั้นทำการกำหนดด้วยค่าความแตกต่างของแรงดันที่ 5 V โดยจะมีการกำหนดได้สองลักษณะคือแบบการตอปกติ (L+) จะมีค่าลอจิกต่ำ “0” ในที่ระดับแรงดัน +5 V และกำหนดค่าแรงดันสำหรับค่าลอจิกสูง “1” ในที่ระดับแรงดัน -5 V ในขณะที่การตอแบบอินเวอร์ต (L-) จะมีค่าลอจิกต่ำ “0” ในที่ระดับแรงดัน -5 V และกำหนดค่าแรงดันสำหรับค่าลอจิกสูง “1” ในที่ระดับแรงดัน +5 V โดยสามารถรองรับระดับแรงดันในช่วงระหว่าง -7 V ถึง +12 V มีอัตราความเร็วในการสื่อสารในระดับสิบเมกะบิตต่อวินาที หากใช้หัวต่อสายชนิด 9 พินในการเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสารจะกำหนดการต่อสายดังแสดงในภาพที่ 2.16 และแสดงความหมายพินของหัวต่อ ดังตารางที่ 2.7 การอินเทอร์เฟซสัญญาณด้วยการสื่อสารอนุกรม RS485 สามารถใช้เชื่อมต่อการสื่อสารได้ในระยะประมาณ 1,200 เมตร และสามารถอินเทอร์เฟซอุปกรณ์การสื่อสารได้มากถึง 32 อุปกรณ์ในสายนำสัญญาณหนึ่งเส้นโดยการต่ออุปกรณ์ขนานกันในลักษณะบัสสายนำสัญญาณ ดังแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.16 หัวต่อสายชนิด sub-D สำหรับ RS485

ตารางที่ 2.7 ความหมายของหัวต่อสายชนิด sub-D สำหรับ RS485

Pin num.	Abbrev.	Function
1	Protective ground	the connection is not essential
2	-	Received data
3	GND/Signal ground	the connection is not essential
4	TXD/RXD (+)	Transmitted/received data (+)
5	TXD/RXD (-)	Transmitted/received data (-)
6	-	



ภาพที่ 2.17 ระบบบัสสายสัญญาณการอินเตอร์เฟส RS485

ระบบการอินเตอร์เฟสสัญญาณด้วยการสื่อสารอนุกรม RS232 และ RS485 แม้จะเป็นการอินเตอร์เฟสสัญญาณด้วยการสื่อสารอนุกรมเหมือนกัน แต่จะไม่สามารถเชื่อมต่อกันได้โดยตรง เนื่องจากมีความแตกต่างกันในค่าระดับแรงดันของลอจิกที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นการอินเตอร์เฟสสัญญาณของอุปกรณ์ที่ใช้มาตรฐานการสื่อสารที่ต่างกันนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เสริมในการแปลงสัญญาณในการสื่อสารระหว่างกันด้วย

การอินเตอร์เฟสสัญญาณด้วยการสื่อสาร Modbus

บริษัทโมดิคอน (Modicon) พัฒนาโปรโตคอลมอดบัสให้เป็นโปรโตคอลการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ที่มีความฉลาด มีความสามารถตอบโต้และเรียกดูข้อมูลจากอุปกรณ์ลูกข่ายได้ ในปี ค.ศ. 1979 ซึ่งต่อมาดูแลโดยบริษัทไซเนเดอร์อิเล็กทริก (Schneider Electric) มอดบัสเป็นโปรโตคอลที่ใช้มาตรฐานเปิดและได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมเป็นอย่างสูง มีผู้ผลิตจำนวนมากให้การรองรับโปรโตคอลมอดบัส และใช้สำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ของตน เมื่อมอดบัสเป็นที่นิยม อุปกรณ์จำนวนมากจึงสามารถติดต่อสื่อสารระหว่างกันได้แม้จะต่างผู้ผลิตกัน อุปกรณ์ที่นิยมใช้โปรโตคอลมอดบัส เช่น อุปกรณ์ที่ใช้การตรวจวัดและแสดงผล อุปกรณ์เซนเซอร์ และตัวกระตุ้น การแสดงผลการควบคุมและการตรวจวัดบนเครื่องคอมพิวเตอร์ รวมถึงโรงงานอุตสาหกรรม โรงจักรต่างๆ อาคารสำนักงานอัจฉริยะ ระบบขนส่งมวลชน เป็นต้น

สำหรับการใช้งานควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือเครื่องมือวัด มอดบัสมีโปรโตคอลการควบคุมอุปกรณ์ด้วยการส่งคำร้องจากอุปกรณ์ควบคุมไปยังอุปกรณ์ลูกข่าย เมื่ออุปกรณ์ลูกข่ายได้รับสัญญาณก็จะส่งคำตอบรับกลับมายังอุปกรณ์ควบคุม หรือใช้หลักการสื่อสารแบบมาสเตอร์-สเลฟ (master-slaves protocol) ซึ่งจะไม่มีการส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ลูกข่ายไปยังอุปกรณ์ควบคุมหากไม่ได้รับคำร้อง การส่งข้อมูลใดๆจะเป็นการส่งคำร้องขอจากอุปกรณ์ควบคุมไปยังอุปกรณ์ตัวอื่น ๆ เท่านั้น รวมถึงอุปกรณ์ลูกข่ายจะไม่มี การติดต่อสื่อสารระหว่างกัน อุปกรณ์ควบคุมหรืออุปกรณ์มาสเตอร์จะมีเพียงตัวเดียวเท่านั้นในเครือข่ายและไม่จำเป็นต้องมีการระบุแอดเดรส ส่วนอุปกรณ์ลูกข่ายหรืออุปกรณ์สเลฟจะมีได้มากที่สุด 247 ตัว กำหนดแอดเดรสระหว่าง “1” – “247” มีการกำหนดแอดเดรส “248” – “255” สงวนไว้ สำหรับแอดเดรส “0” ถูกกำหนดไว้สำหรับการกระจายข้อมูลจากอุปกรณ์ควบคุมไปสู่อุปกรณ์ลูกข่ายทุกตัวในลักษณะการ broadcast (Broadcasting) อุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์ลูกข่ายทุกตัวมีการเชื่อมต่อผ่านบัสการสื่อสารอนุกรม (serial bus) การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ในเครือข่ายสามารถทำได้สองโทโพโลยีคือ 1) โทโพโลยียูนิคาส

(unicast) อุปกรณ์ควบคุมจะทำการส่งเฟรมพิดียู (Protocol Data Unit, PDU) ไปที่อุปกรณ์ลูกข่ายที่ถูกระบุแอดเดรสไว้ โดยหากส่งข้อมูลด้วยการสื่อสารอนุกรม เฟรมพิดียูจะถูกเพิ่มด้วยแอดเดรสของอุปกรณ์ลูกข่ายในช่วงต้นเฟรม และเพิ่มรหัสตรวจจับผิดพลาดที่ท้ายเฟรมดังแสดงในภาพที่ 2.18 และ 2) โทโพโลยีกระจายหรือบรอดคาสต์ อุปกรณ์ควบคุมจะส่งข้อมูลคำสั่งไปยังอุปกรณ์ลูกข่ายทุกตัวพร้อมกัน ซึ่งอุปกรณ์ลูกข่ายจะไม่มีกรตอบกลับคำสั่ง นอกจากนี้ความยาวของเฟรมสื่อสารโดยรวมของโปรโตคอลมอดบัสจะต้องไม่มากกว่า 256 ไบต์



ภาพที่ 2.18 เฟรมมอดบัส

ในโปรโตคอลการสื่อสารมอดบัส อุปกรณ์ควบคุมจะเป็นผู้เริ่มต้นการสื่อสารด้วยการส่งเฟรมร้องขอไปยังอุปกรณ์ลูกข่าย ในเฟรมจะทำการระบุแอดเดรสของอุปกรณ์ลูกข่ายที่จะสื่อสารด้วย รหัสคำสั่ง ข้อมูลที่จำเป็นในการทำตามคำสั่งการร้องขอ และรหัสตรวจจับผิดพลาด เมื่ออุปกรณ์ลูกข่ายได้รับเฟรมร้องขอที่มีคำสั่ง ก็จะตรวจสอบความถูกต้องของเฟรม โดยหากข้อมูลที่ได้รับจากอุปกรณ์ควบคุมมีความผิดพลาดและตรวจจับได้จากการรหัสตรวจจับผิดพลาด รหัสคำสั่งที่ถูกส่งกลับด้วยค่าที่แสดงว่าเฟรมที่อุปกรณ์ลูกข่ายได้รับมีความผิดพลาด แต่หากตรวจสอบแล้วไม่ผิดพลาดก็จะดำเนินการตามคำสั่งร้องขอนั้น เช่น การอ่านค่ารีจิสเตอร์ภายในอุปกรณ์ลูกข่าย เป็นต้น และเมื่อดำเนินการให้ได้ค่าตามคำสั่งแล้วอุปกรณ์ลูกข่ายจะทำการจัดเฟรมตอบกลับไปยังอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งจะประกอบด้วยแอดเดรส รหัสคำสั่ง ข้อมูล และรหัสตรวจจับผิดพลาด เช่นเดียวกันกับเฟรมข้อมูลที่ได้รับมา โดยที่เฟรมมอดบัสที่ถูกส่งกลับเป็นการนำแอดเดรสของอุปกรณ์ลูกข่ายประกอบลงในเฟรมเพื่ออุปกรณ์ควบคุมทราบว่าเฟรมที่ได้รับนั้นมาจากอุปกรณ์ตัวใด ส่วนรหัสที่ถูกส่งกลับคือรหัสคำสั่งที่ปฏิบัติเสร็จสิ้น ตามด้วยข้อมูลที่ถูกร้องขอ และรหัสตรวจจับผิดพลาด กระบวนการสื่อสารตามโปรโตคอลในลักษณะมาสเตอร์-สเลฟ มีการวนรอบซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 เฟรมการร้องขอ และการตอบกลับบนมอดบัส

โปรโตคอลมอดบัสสามารถส่งข้อมูลการสื่อสารอนุกรมได้สองรูปแบบคือ 1) ทำการส่งข้อมูลโดยจัดให้อยู่ในโหมดแอสกี (ASCII) ซึ่งทำการส่งข้อมูลแปดบิตด้วยรหัสแอสกีจำนวนสองตัว และ 2) จัดข้อมูลให้อยู่ในโหมดอาร์ทียู (Remote Terminal Unit : RTU) ซึ่งทำการส่งข้อมูลแปดบิตด้วยการส่งรหัสฐานสิบหกจำนวนสองตัว ความแตกต่างคือการส่งข้อมูลในโหมดอาร์ทียูจะได้จำนวนรหัสในการส่งมากกว่าเมื่อใช้แบนด์วิทเท่ากันกับโหมดแอสกี หรือโหมดอาร์ทียูจะมีความเร็วในการสื่อสารมากกว่าโหมดแอสกีประมาณสองเท่า เฟรมข้อมูลมอดบัสในโหมดอาร์ทียูแสดงดังภาพที่ 2.20 การเริ่มต้นเฟรมจะบ่งชี้ด้วยบิตเริ่ม ทำได้ด้วยการหยุดส่งสัญญาณใดๆในบัสเป็นระยะเวลามากกว่าหรือเท่ากับ 3.5 เท่าของระยะเวลาในการส่งรหัสฐานสิบหก

หนึ่งตัว ตามด้วยแอดเดรส รหัสคำสั่ง ข้อมูล และรหัสตรวจจับผิดพลาดปิดท้ายเฟรมด้วยบิตจบเพื่อให้ทราบว่ามีเฟรมมอดบัสนี้ครบถ้วนแล้ว ด้วยการหยุดส่งสัญญาณใดๆในบัสเป็นระยะเวลามากกว่าหรือเท่ากับ 3.5 เท่าของระยะเวลาในการส่งรหัสฐานสิบหกหนึ่งตัวเช่นเดิม ซึ่งบิตจบของเฟรมนี้สามารถใช้เป็นบิตเริ่มของเฟรมถัดไปได้ด้วย

≥ 3.5ตัวอักษร	8 บิต	8 บิต	n × 8 บิต	16 บิต	≥ 3.5ตัวอักษร
บิตเริ่ม	แอดเดรส	รหัสคำสั่ง	ข้อมูล	รหัสตรวจจับบิต	บิตจบ

ภาพที่ 2.20 เฟรมมอดบัสในไมโครอาร์ทียู

2.6 การประมวลผลสัญญาณด้วยวิธีการกรองค่าสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์

การอินเตอร์เฟสการวัดค่าสัญญาณจากเครื่องมือวัดสู่อุปกรณ์ประมวลผลกลางเพื่อวิเคราะห์ค่าสัญญาณขณะเวลาจริงมีวัตถุประสงค์เพื่อรับค่าจากการวัดมาประมวลผลอย่างต่อเนื่อง [41-42] การรับค่าสัญญาณอย่างต่อเนื่องจากการสุ่มสัญญาณบางครั้งจะได้รับผลกระทบจากสัญญาณอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น สัญญาณรบกวน สัญญาณสไปซ์ชั่วขณะ เป็นต้น เมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณที่รับมาจะแบ่งได้เป็นสองส่วน คือ ส่วนสัญญาณข้อมูลที่ต้องการใช้งาน และสัญญาณส่วนที่ไม่ต้องการแต่ปะปนมาด้วยกันกับสัญญาณที่รับมา ในส่วนที่มีข้อมูลที่เราต้องการจะเรียกว่าเป็น สัญญาณ (Signal) แต่สำหรับในส่วนที่ไม่ต้องการนั้นจะเรียกว่าเป็น สัญญาณรบกวน (Noise) การพิจารณาวิเคราะห์สัญญาณทั้งสองส่วนนี้ต้องใช้คณิตศาสตร์ที่แตกต่างกันในการวิเคราะห์ โดยสัญญาณรบกวนนั้นจัดอยู่ในกลุ่มสัญญาณสุ่ม (Random signal) ซึ่งจำเป็นต้องใช้ค่าทางสถิติ (Statistical parameters) มาใช้ในการอธิบาย กำหนด และแสดงแทนค่าสัญญาณรบกวน ส่วนสัญญาณข่าวสารที่เราทราบถึงพฤติกรรมของสัญญาณนั้นอาจเรียกได้ว่าเป็นสัญญาณเชิงกำหนด (Deterministic signal) ซึ่งสามารถจะแสดงแทนสัญญาณข่าวสารได้ด้วยการนิยามสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์หรือสัญญาณรบกวนนั้นที่จัดอยู่ในกลุ่มสัญญาณสุ่มหากถูกนำมาประมวลผลสัญญาณขณะเวลาจริงโดยไม่มีกระบวนการจัดการ จะทำให้ค่าผลลัพธ์มีค่าผิดพลาดและจะส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นของเครื่องมือวัดดังนั้นการประมวลผลสัญญาณเพื่อทำการกรองสัญญาณอื่นที่ไม่พึงประสงค์ออกไปจึงมีความจำเป็นต่อการอินเตอร์เฟสเพื่อวัดค่าสัญญาณขณะเวลาจริง

การกรองสัญญาณอื่นที่ไม่พึงประสงค์ด้วยการประมวลผลสัญญาณสามารถทำได้โดยการพิจารณาสัญญาณที่ได้รับมาเป็นสัญญาณที่มีขนาดแปรเปลี่ยนตามเวลาที่เปลี่ยนไป ค่าขนาดของสัญญาณระบุบนแกนตั้ง (แกน Y) และค่าเวลาระบุบนแกนนอน (แกน X) เมื่อสัญญาณการวัดดำเนินตามปกติค่าสัญญาณในแกนนั่งจะแปรเปลี่ยน และจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากอย่างฉับพลันหากมีสัญญาณรบกวนเข้ามาปะปน หากพล็อตสัญญาณที่ได้รับมาอย่างต่อเนื่องจะได้กราฟสัญญาณที่มีค่าบนแกนตั้งเปลี่ยนแปลงในลักษณะผิดปกติไปจากสัญญาณในช่วงเวลาอื่น ๆ กระบวนการอย่างง่ายที่สุดในการประมวลผลสัญญาณเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนคือการทำให้สัญญาณราบเรียบ (Smoothing algorithm) ด้วยการเฉลี่ยค่าสัญญาณที่ได้รับในช่วงเวลาต่าง ๆ ดังแสดงในสมการ (2.18) หรือเรียกกระบวนการนี้ว่าการประมวลผลสัญญาณราบเรียบแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular smoothing) ที่กำหนดให้ประมวลผลการเฉลี่ยจากจำนวนค่าทั้งหมดสามค่า ($m = 3$) และไม่มีการปรับค่าค่าน้ำหนักสำหรับตัวคูณ และหากต้องการให้สัญญาณราบเรียบมากขึ้นสามารถเพิ่มจำนวนค่าที่ใช้สำหรับการประมวลผลเพิ่มมากขึ้นได้โดยเพิ่มจำนวนค่าสัญญาณในการประมวลผลเป็นห้าค่า ($m = 5$) และมีการปรับค่าค่าน้ำหนักสำหรับตัวคูณ (Weighted coefficient) ในบางตำแหน่ง โดยเรียกการประมวลผลสัญญาณราบเรียบนี้ว่าประมวลผลสัญญาณราบเรียบแบบสามเหลี่ยม (Triangular smoothing)

ดังแสดงในสมการ (2.19) โดยการปรับเปลี่ยนค่าคงที่น้ำหนักสำหรับตัวคูณและจำนวนค่าสัญญาณในการประมวลผล จะทำให้เกิดวิธีการประมวลสัญญาณแบบอื่น ๆ อีก เช่น แบบ Pseudo-Gaussian smoothing หรือแบบ Savitzky-Golay smoothing เป็นต้น

$$S_j = \frac{Y_{j-1} + Y_j + Y_{j+1}}{3} \quad (2.18)$$

โดย j ค่าตำแหน่งที่ทำการเฉลี่ยสัญญาณ และให้ผลลัพธ์เป็นค่า S_j และ j มีค่าเท่ากับ 2 ถึง $n-1$

Y_j ค่าตำแหน่งของสัญญาณที่จะนำมาเฉลี่ยสัญญาณให้ราบเรียบ

$$S_j = \frac{Y_{j-2} + 2Y_{j-1} + 3Y_j + 2Y_{j+1} + Y_{j+2}}{9} \quad (2.19)$$

ในกระบวนการประมวลสัญญาณแบบที่กล่าวในข้างต้นเป็นการรับค่าสัญญาณจากการสุ่มมาบันทึกไว้ก่อนที่จะทำการประมวลผล ซึ่งหากทำการสุ่มสัญญาณและบันทึกไว้ก่อนประมวลผลจะทำให้ค่าผลลัพธ์ที่ได้ถูกหวนเวลาออกไประยะหนึ่งที่แตกต่างกันระยะเวลาที่สุ่มค่าสัญญาณเข้ามา จึงไม่เหมาะสมสำหรับการวัดสัญญาณในเวลาจริง จึงต้องเลือกใช้การประมวลสัญญาณแบบที่สามารถทำการเฉลี่ยสัญญาณที่สุ่มมาได้พร้อมให้ค่าผลลัพธ์ในเวลาจริง ซึ่งสามารถทำการปรับเปลี่ยนจากสมการ (2.18) ให้สามารถประมวลผลสัญญาณได้อย่างต่อเนื่อง และเรียกวิธีการนี้ว่าการประมวลสัญญาณแบบแบบเคลื่อนที่ (Moving average smoothing) ดังแสดงค่าผลลัพธ์จากการประมวลผลได้ดังสมการ (2.20)

$$S_j = \sum_{i=-n}^{i=n} \frac{Y_{j+1}}{2n-1} \quad (2.20)$$

โดย n ค่าจำนวนเต็มในการประมวลผล ($n = 1, 2, 3, \dots$)

j ค่าตำแหน่งที่ทำการเฉลี่ยสัญญาณ และให้ผลลัพธ์เป็นค่า S_j

i ค่าตำแหน่งในการประมวลผล

2.7 การหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization)

วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของตัวแปร (Optimization) เป็นการวิเคราะห์ตัวแปรของปัญหาที่วิเคราะห์ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) และขอบเขตเงื่อนไขข้อจำกัด ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปแบบดังนี้

หาค่าต่ำสุด (หรือสูงสุด) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

โดยเป็นไปตามเงื่อนไข

$$f(\mathbf{x})$$

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, \dots, s. \quad (2.21)$$

$$h_t(\mathbf{x}) = 0, t = 1, \dots, t.$$

โดยที่ $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ตัวแปรที่เป็นคำตอบของปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดจำนวน n ตัวแปร
 $g_i(\mathbf{x}) \leq 0$ ขอบเขตแบบไม่เท่ากับจำนวน s ขอบเขต
 $h_i(\mathbf{x}) = 0$ ขอบเขตแบบเท่ากับจำนวน t ขอบเขต

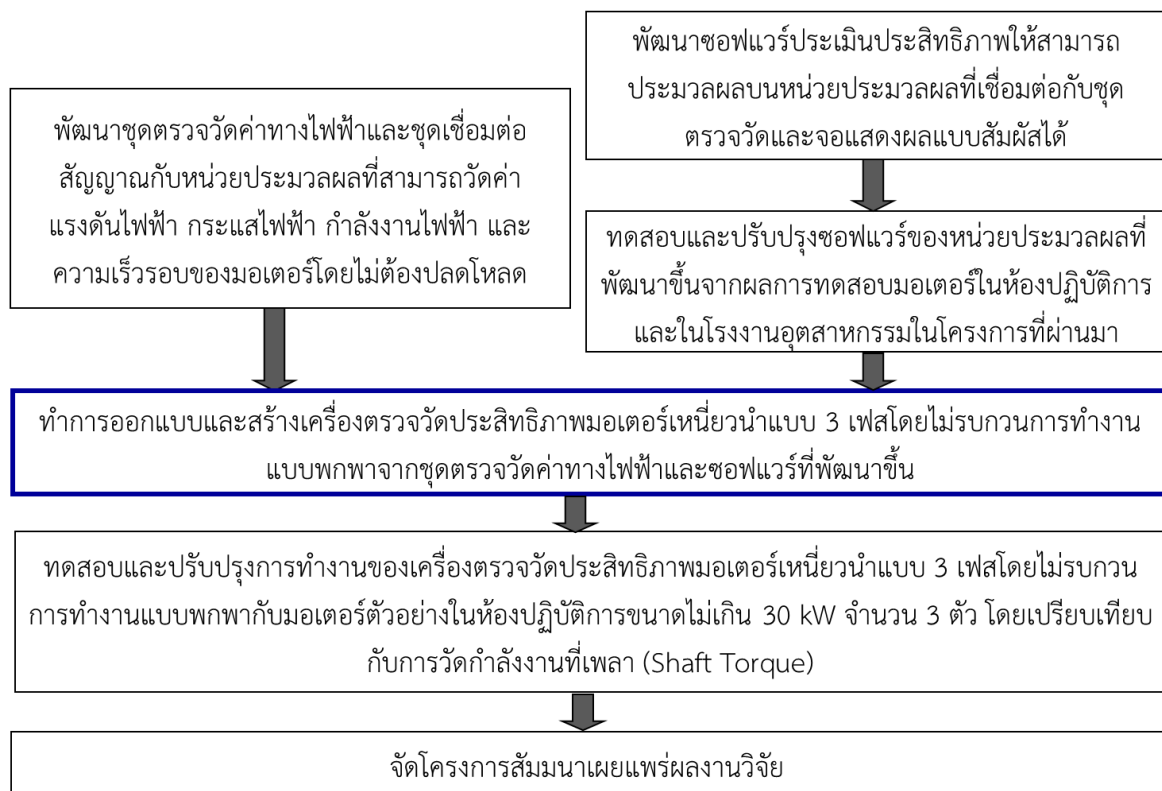
ทั้งนี้การแก้ปัญหาดังกล่าวมีวิธีการหลากหลายตามลักษณะของปัญหาโดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 แนวทางใหญ่คือ

- วิธีการแบบดีเทอร์มินิสติก (Deterministic) เป็นวิธีที่เหมาะสมกับปัญหาที่มีความเป็นเชิงเส้น (Linear) หรือเป็นสมการยกกำลังสอง (Quadratic) และมีเงื่อนไขขอบเขตที่เป็นเชิงเส้น โดยหากปัญหามีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงแล้วจะทำให้การหาคำตอบลู่ออกไปสู่ค่าที่ไม่ใช่ค่าเหมาะที่สุดอย่างแท้จริงได้ เรียกว่า (Local Optimal) แต่หากปัญหามีลักษณะเป็นเชิงเส้นหรือมีขอบเขตที่ชัดเจน วิธีการนี้จะทำให้ได้คำตอบที่เหมาะสมได้ การแก้ปัญหาแบบนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) โปรแกรมควอดราติก (Quadratic Programming) วิธีนิวตัน (Newton Method) เป็นต้น
- วิธีการแบบสโตคาสติก (Stochastic) หรือเรียกว่า การหาค่าเหมาะที่สุดแบบฟั่นสุ่ม เป็นวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดโดยการสร้างและใช้ตัวแปรสุ่ม สำหรับปัญหาในกลุ่มนี้ จะใช้ตัวแปรสุ่มในขั้นตอนการคำนวณหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับปัญหานั้นๆ ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกเสนอมาภายหลังวิธีการแบบดีเทอร์มินิสติกเพื่อแก้ปัญหาที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นสูง และมีตำแหน่งค่าสูงสุดหรือต่ำสุดที่ไม่แท้จริงหลายค่า โดยสามารถแก้ปัญหาได้หลากหลายรูปแบบที่ซับซ้อน การแก้ปัญหาแบบนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) การหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) การขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะที่สุดด้วยระบบอาณาจักรมด (Ant colony optimization) ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะที่สุดด้วยระบบอาณาจักรผึ้ง (Bee colony optimization) เป็นต้น

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้เสนอการวิจัยที่พัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส โดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาโดยใช้กระบวนการคำนวณที่ได้พัฒนาขึ้น ให้ได้เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ที่สามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่ทำงานโดยตรงจากหน้าจอของเครื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ให้มีความชัดเจนและเป็นแนวทางที่เป็นที่ยอมรับในการคำนวณที่มีความสะดวกมากขึ้นและเป็นการลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศวัตถุประสงค์ของโครงการประกอบด้วย

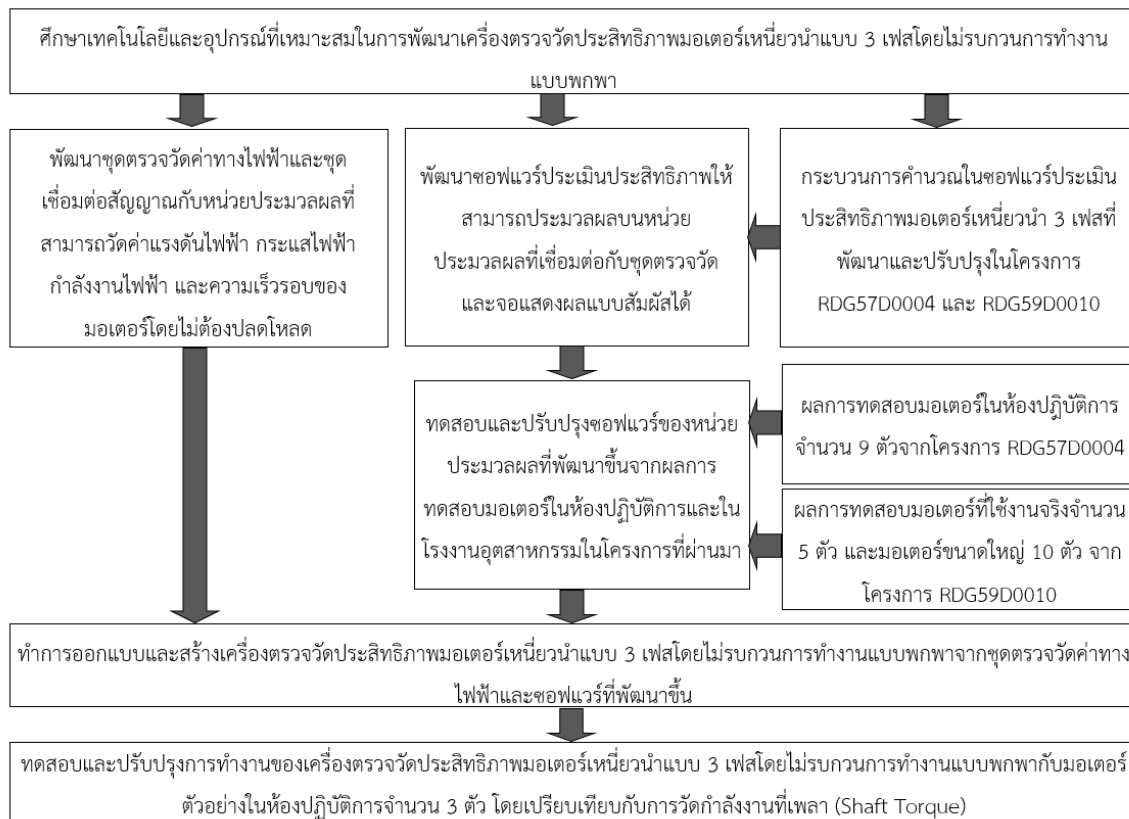
โดยโครงการวิจัยได้ได้มีการจัดทำ Fanpage: MEEPI สำหรับเผยแพร่ความก้าวหน้าและผลลัพธ์ของโครงการวิจัย รวมทั้งเป็นช่องทางในการเผยแพร่ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นในโครงการ ซึ่งสามารถเข้าถึง Fanpage ได้ทาง link: <http://bit.ly/MEEPfanpage> สำหรับโปรแกรม MEEP ที่ใช้งานบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลสามารถ download ใช้งานได้จาก link: <http://bit.ly/MEEPalpha>



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการวิจัย

นอกจากนี้จากการจัดสัมมนาเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและรับฟังความคิดเห็นแนวทางในการพัฒนาผลงานวิจัยให้เกิดประโยชน์ในงานวิจัยทั้ง 2 โครงการที่ผ่านมา ซึ่งได้เชิญผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เข้าร่วมทั้งจากภาคอุตสาหกรรมและภาครัฐที่เกี่ยวข้องนั้น ได้รับความสนใจในการนำซอฟต์แวร์ที่พัฒนาไปใช้งานเป็นอย่างมากและได้รับการยอมรับว่าซอฟต์แวร์มีประโยชน์ในการช่วยประเมินและวิเคราะห์ประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสได้ ทั้งนี้หากนำกระบวนการคำนวณมาใช้ในอุปกรณ์เครื่องมือวัดเพื่อการประเมินประสิทธิภาพและสมรรถนะของมอเตอร์ที่ทำงานแบบทันทีก็จะมีประโยชน์และจะช่วยให้ผู้ใช้มีความสะดวก

มากขึ้น ทั้งนี้ขั้นตอนในการทำวิจัยและวิธีการเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้สามารถแสดงโดยสรุปได้ดังภาพที่ 3.1 และในส่วนของการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพาซึ่งเป็นเป้าหมายหลักของโครงการนั้นมีขั้นตอนในการพัฒนาดังแสดงในภาพที่ 3.2

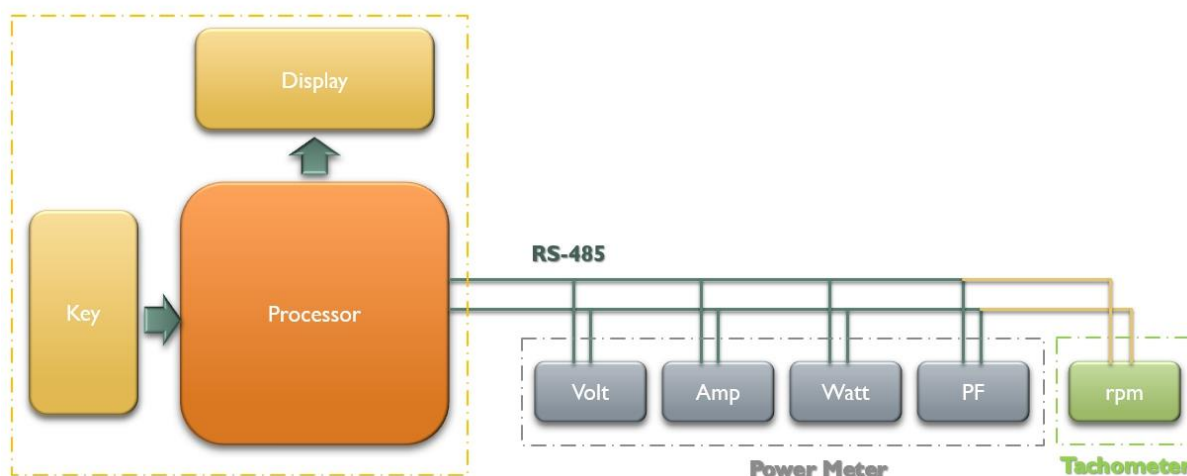


ภาพที่ 3.2 การพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพา

3.1 การออกแบบชุดตรวจวัดและอินเตอร์เฟส

การตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานสามารถดำเนินการตรวจวัดได้ด้วยการใช้โปรแกรม MEEP จากผลงานวิจัย RDG61D0010 โดยการใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าได้แก่ การวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้า เพาเวอร์แฟกเตอร์ และใช้เครื่องมือวัดความเร็วมอเตอร์ขณะทำงานจริง การวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ เหล่านี้หากจะให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ จะต้องทำการวัดทั้งหมดพร้อมกันเพื่อให้ได้ข้อมูลในเวลาเดียวกันทั้งหมด ซึ่งหากทำการตรวจวัดแยกกัน ข้อมูลพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าจะเป็นค่าที่ได้จากต่างช่วงเวลาซึ่งอาจจะทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ไม่พึงประสงค์ขึ้นได้ อีกทั้งการตรวจวัดและบันทึกค่าเพื่อนำมาป้อนสู่โปรแกรม MEEP อาจต้องทำการตรวจวัดหลาย ๆ ครั้ง และนำค่ามาเฉลี่ย ในกระบวนการนี้อาจเกิดความผิดพลาดจากการคำนวณหรือความผิดพลาดจากมนุษย์ขึ้นได้ ดังนั้นการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่จำเป็นด้วยเครื่องมือวัดที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับการประมวลผลการตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะทำงาน และส่งผลการวัดเพื่อการประมวลผลเข้าสู่โปรแกรม MEEP โดยอัตโนมัติ ซึ่งจะสามารถทำการสุ่มค่าการวัดหลายค่าพร้อมทำการประมวล

สัญญาณรบกวนแบบเฉื่อยเคลื่อนที่ จะทำให้ลดค่าความผิดพลาดทั้งจากการวัด การคำนวณ หรือความผิดพลาดจากมนุษย์ลงได้ เครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์ที่จะสามารถทำงานได้ตามโปรแกรม MEEP จึงต้องถูกออกแบบเฉพาะเพื่อให้รองรับการทำงานของโปรแกรมตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์อย่างเหมาะสม มีความถูกต้องของการวัด มีขอบเขตการวัดที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มมอเตอร์เป้าหมายที่จะทำการประเมินประสิทธิภาพ และสามารถเคลื่อนย้ายเพื่อนำไปตรวจวัดในสถานที่ต่าง ๆ ได้อย่างสะดวก บล็อกไดอะแกรมของเครื่องมือตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์ ฯ แสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องมือตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส โดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพา

การเลือกอุปกรณ์และเครื่องมือวัดสำหรับการสร้างเครื่องมือตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์ ฯ สามารถพิจารณาจากขอบเขตความสามารถในการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเครื่องมือวัดที่ครอบคลุมอยู่ในย่านการวัดที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์กลุ่มเป้าหมายและค่าความถูกต้องแม่นยำในการวัด ซึ่งจะต้องพิจารณาในส่วนของการวัดเพาเวอร์มิเตอร์ และโพรบวัดกระแสไฟฟ้า อีกส่วนหนึ่งของการวัดคือค่าความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ที่ต้องทำการวัดและส่งข้อมูลเข้าสู่การประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์พร้อมแสดงค่าผลลัพธ์การประมวลผลทางหน้าจอ การนำข้อมูลที่ได้จากการวัดของมิเตอร์ชนิดต่าง ๆ เข้าสู่การประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์สามารถทำได้โดยการอินเตอร์เฟสสัญญาณด้วยการสื่อสาร Modbus และ RS485 ดังนั้นเครื่องมือวัดที่จะถูกนำมาใช้ต้องมีความสามารถในการอินเตอร์เฟสสัญญาณด้วยการสื่อสารอนุกรมดังกล่าว

เพาเวอร์มิเตอร์ที่เลือกใช้ในการสร้างเครื่องมือวัดประสิทธิภาพมอเตอร์ ฯ มีขอบเขตความสามารถดังนี้

- สามารถอินเตอร์เฟสสัญญาณด้วยการสื่อสาร Modbus ที่ความเร็วการสื่อสารอย่างน้อย 9,600 bps
- สามารถวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบ true rms ในย่านการวัด 380 V มีค่าความถูกต้องการวัดในช่วง ± 0.2 %FS.
- สามารถวัดกระแสไฟฟ้ากระแสสลับแบบ true rms รองรับสัญญาณการวัดจาก Current transformer, CT ในย่านการวัดไม่น้อยกว่า 10 A มีค่าความถูกต้องการวัดในช่วง ± 0.2 %FS.
- สามารถวัดค่ากำลังงานไฟฟ้ามีค่าความถูกต้องการวัดในช่วง ± 0.5 %FS.

- สามารถวัดค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์มีค่าความถูกต้องการวัดในช่วง ± 0.2 %FS.
- สามารถทำการวัดในย่านความถี่ระหว่าง 45 ถึง 65 Hz มีค่าความถูกต้องการวัดในช่วง ± 0.1 Hz

โพรบวัดกระแสไฟฟ้าที่เลือกใช้มีคุณสมบัติคือเป็นโพรบการวัดแบบคล้องวัดที่สามารถเปิดอ้าโพรบได้ สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้สูงสุดไม่ต่ำกว่า 500 A มีค่าความถูกต้องการวัดในช่วง ± 1 %FS.

เครื่องมือวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ต้องสามารถอินเทอร์เฟสสัญญาณด้วยการสื่อสาร Modbus หรือ RS485 ที่ความเร็วการสื่อสารอย่างน้อย 9,600 bps สามารถทำการวัดได้โดยไม่ต้องสัมผัส มีย่านการวัดความเร็วรอบได้ไม่ต่ำกว่า 9,999 rpm มีค่าความถูกต้องการวัดในช่วง ± 0.25 %FS.

หน่วยประมวลผลกลางเลือกใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเกรดอุตสาหกรรม หน้าจอแสดงผลแบบสัมผัสขนาดไม่น้อยกว่า 10 นิ้ว ประมวลผลด้วยซีพียู Intel Celeron N2930 1.83 GHz หน่วยความจำ 8 GB DDR3L รองรับ Windows 10 และโปรแกรม Matlab

3.2 การออกแบบโปรแกรมส่วนติดต่อผู้ใช้

ทั้งนี้ในการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาได้มีการดำเนินการปรับปรุงส่วนติดต่อผู้ใช้ใหม่โดยสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.4 โดยรายละเอียดของส่วนนี้จะแสดงในบทที่ 4



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างหน้าต่างติดต่อผู้ใช้ของซอฟต์แวร์ที่ได้ทำการปรับปรุง

3.3 การประกอบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา

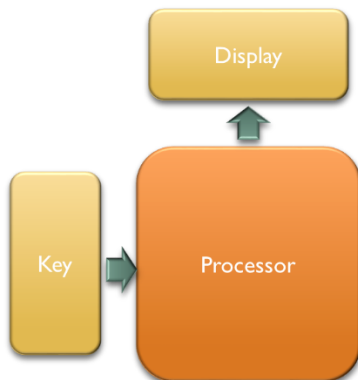
จากอุปกรณ์ที่เลือกใช้ทั้งหมดนำมาประกอบและเชื่อมต่อ รวมถึงทำการอินเตอร์เฟสสัญญาณการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ และทำการปรับปรุงการประมวลผลโปรแกรม MEEP ในส่วนการอินเตอร์เฟสเพื่อให้สามารถรองรับการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เข้าสู่โปรแกรมเพื่อประมวลผลโดยอัตโนมัติ และได้เครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาดังแสดงในภาพที่ 3.5 ที่ถูกบรรจุอยู่ในกล่องป้องกันเพื่อป้องกันการกระแทกระหว่างการขนย้ายไปยังสถานประกอบการหรือโรงงานเพื่อทำการวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยในส่วนของคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้มีคุณสมบัติดังนี้

- หน่วยประมวลผลพร้อมหน้าจอแสดงผลติดต่อกับผู้ใช้ Fanless PC Touch-Screen Panel Intel Atom D525 1.8 GHz, supports DDR3 default 2 GB, Chipset Intel ICH8M, 4xUSB, LAN port, RS-232 COM1/COM2, RS-422/485 COM3 มีคุณสมบัติตามภาพที่ 3.6
- หน่วยวัดผลทางไฟฟ้า Power Meter สามารถวัดค่า V(Line), V(Phase), A(Phase), kW, kVA, kVar, kWh, kVarh, PF, Hz, มีคุณสมบัติตามภาพที่ 3.7
- เซนเซอร์วัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแบบอุตสาหกรรม มีคุณสมบัติตามภาพที่ 3.8 และ 3.9
- อุปกรณ์วัดความเร็วรอบแบบอินเตอร์เฟสได้เป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณอนาล็อกมาตรฐานแบบดิจิทัลที่มี Display การใช้งาน รับอินพุตจาก sensor สามารถสื่อสารกับ Computer โดยผ่านพอร์ท RS-485 MODBUS RTU Protocol มีคุณสมบัติตามภาพที่ 3.9



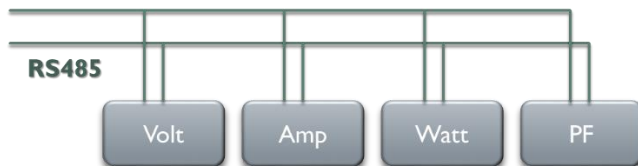


ภาพที่ 3.5 ภาพเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส
โดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา



- Industrial-grade 10.4" SVGA/XGA TFT LCD with 30K backlight lifetime □
- Durable true-flat touchscreen with 5-wire resistive/projected capacitive touch control □
- Intel® Celeron® N2930 quad-core, 1.83 GHz, processor □
- Up to 8 GB DDR3L SDRAM □
- 1 x RS-232, 1 x RS-232/422/485, 2 x USB 2.0, and 1 x USB 3.0 □
- Compact, fanless design with solid aluminum alloy enclosure and IP65-rated front panel □
- Supports E-Eye monitoring and protection □
- Supports expansion via full-size mini PCIe □
- Supports Windows Embedded and Android OS □
- Microsoft® Windows 7 32bit&64bit/Windows 8.1 32bit&64bit/
Windows 10 32bit&64bit/WES7/WEC 7/Linux/Android
- Supports VESA 75 x 75 mounting holes

ภาพที่ 3.6 คุณลักษณะของหน่วยประมวลผลพร้อมหน้าจอแสดงผลติดต่อกับผู้ใช้



Communication	Protocol	MODBUS RTU
	Baud Rate	2400, 4800, 9600, 19200
	Parity	None, Even, Odd
	Stop Bits	1, 2
	Data Bits	8 Bits
	Support Device Node	128
Ambient Operation	Temperature	-10°C to 60°C
	Humidity	85 % RH Non-Condensing
Ambient Storage	Temperature	-20°C to 80°C
	Humidity	85 % RH Non-Condensing
Protection Degree	Front Protection Rating	IP52
	Case Protection Rating	IP30

Input	Type	Voltage (TRUE RMS)
	Direct Phase and Neutral	10 to 290 VAC
	Direct Between Phase	10 to 500 VAC
	Primary Voltage	Up to 72000 VAC
	Secondary Voltage	60, 100, 110, 173, 190, 240 VAC
	PT Ratio	1-300
	Accuracy	± 0.2 % FS.
	Type	Current (TRUE RMS)
	Direct	20 mA to 10 A
	Primary Current	Up to 10000 A
	Secondary Current	20 mA to 5 A
	Accuracy	± 0.2 % FS.
	Type	Power
	Accuracy	± 0.5 % (FS)
	Type	Power Factor
	Accuracy	± 0.2 % (FS)
	Type	Frequency
	Accuracy	45 to 65 Hz ± 0.1Hz
	Active Energy Accuracy	Class 0.5
	Reactive Energy Accuracy	Class 1.0
	THD	Volt, Current

ภาพที่ 3.7 คุณลักษณะของหน่วยวัดผลทางไฟฟ้า Power Meter



รุ่น	วัสดุ	Class	Related Load (VA)	Rated Current
Q50	ABS Plastic	1.0	2.5VA	200/5A
		0.5	2.5VA	300/5A
		0.5	2.5VA	500/5A

ภาพที่ 3.8 คุณลักษณะของหม้อแปลงกระแสในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า



Multi-Contact 4mm Stackable Test Leads PVC Insulation CAT II

Multi-Contact CAT II 4mm stackable test leads with PVC insulation are highly flexible test leads especially suited for connecting electrical apparatus not currently equipped with safety sockets. These Multi-Contact PVC test leads feature stackable 4 mm diameter multilam plugs on both ends with protective collar and retractable sleeve to prevent accidental touching, rated at 32A 600V.

Part of the 4mm safety system

Retractable sleeves to prevent accidental touching of probes

PVC insulation CAT II 32A 600V

Standards IEC/EN 61010-031

Dolphin Test Clips, CAT II, CAT III, and CAT IV, XDK Series

Multi-purpose clips that meet safety requirements IEC/EN 61010

Dolphin clips have all round insulation and mate with 4mm safety plugs and probes

Toothed jaws open to hold diameters up to 30mm, yet also grip fine wires

The standard type accepts 4mm shrouded plugs

The probe extension type will take both plugs and probes with 4mm plug tip

ภาพที่ 3.9 คุณลักษณะของปากคีบวัดแรงดันไฟฟ้า

Digital Signal Transmitter



Model	IM-A	IM-B	IM-C	IM-D	IM-F
Power Supply	100 ~ 240 VAC 50-60 Hz				
	24VAC/VDC				
Power Consumption	3.5 VA				
Display	7-Segment size 0.4 inch 4 Digit				
Input	Thermocouple	Type : K, J, R, T, N, S, E	-	-	-
	RTD	PT100	-	-	-
	DC Current	0-20mA, 4-20mA	-	-	-
	AC Current	-	-	0-5A AC	-
	DC Voltage	0-75 mVDC, 0-150 mVDC, 0-1 VDC, 0-5 VDC, 1-5 VDC, 0-10 VDC	0-500VDC	-	-
	AC Voltage	-	0-500VAC	-	-
	Frequency	-	-	-	0-10kHz
	RPM	-	-	-	0-9999 RPM
	Accuracy	±0.25% FS @ 25 °C			
	Sampling Time	0.25 Sec			

Photoelectric Sensor "OPTEX" Type ZD-L40N

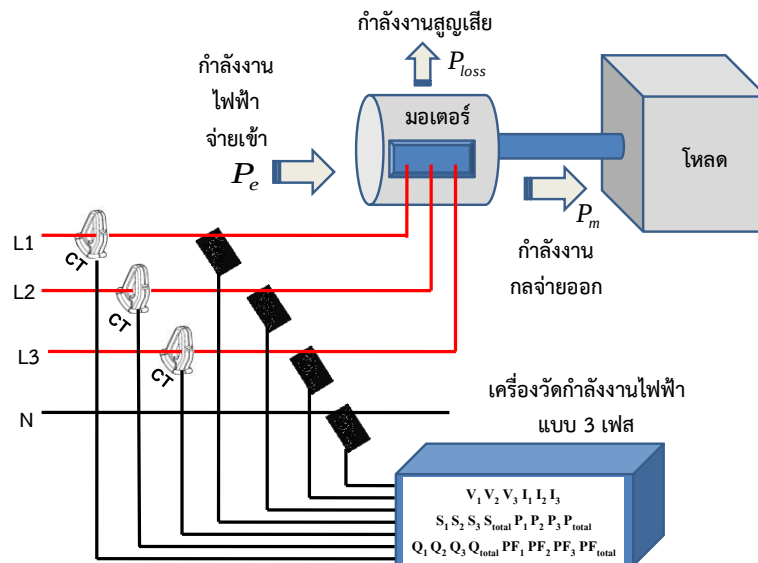


Model	Retro ref. type	Diffuse ref. type	Through beam type
Cable	ZR-L1000N/P	ZD-L40N/P	ZT-L3000N/P (Emitter ZT-DL)
M8 Connector	ZR-L1000CN/CP	ZD-L40CN/CP	ZT-L3000CN/CP (Emitter ZT-DLC)
Light source	Visible light semiconductor laser 650nm		
Peak power	3mW max.	390 μW max.	
IEC/JIS CLASS	CLASS 2		CLASS 1
FDA CLASS	Class II		
Supply voltage	10 ~ 30VDC Including 10% ripple		
Current consumption	20mA max.	Emitter :15mA max./Receiver:15mA max.	
Sensing range	0.08 ~ 10m *1	400mm *2	30m
Response time	0.25ms max.		
Hysteresis	-	20% max. /400mm	-
Spot size	φ 12mm/10m	φ 2mm/400mm	φ 30mm/30m
Operation mode	Light ON/ Dark ON selectable		
Sensitivity adjustment	1-turn trimmer		
Control output	NPN/PNP open collector 100mA max. /30V DC		
Indicator light	Laser radiation indicator light(Receiver of Through beam type Stable indicator) Green Output indicator light Orange		
Operating temp./humidity	-10 ~ +50°C/35 ~ 85%RH (No condensation or freezing)		
Storage temp./humidity	-25 ~ +70°C/35 ~ 95%RH (No condensation or freezing)		
Ambient light	3,000 lx (Incandescent light) 10,000 lx (Sunlight)		
Protection category	IP67		
Material	ABS (Case) PMMA (front window)		
Weight	approx. 10g (cable is not included) approx. 20g (cable is not included)		

ภาพที่ 3.10 คุณสมบัติของอุปกรณ์วัดความเร็วรอบแบบอินเทอร์เฟซได้

3.4 การทดสอบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา

การทดสอบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาสามารถแสดงเป็นแผนผังได้ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 การตรวจวัดค่ากำลังงานของมอเตอร์โดยใช้เครื่องวัดกำลังงานแบบคล้องวัด

3.4.1 เทคนิคในการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่หน้างานจริง

การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ติดตั้งไปแล้วที่หน้างานได้มีผู้เสนอไว้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีความคลาดเคลื่อนและความสะดวกในการตรวจวัดและการวิเคราะห์แตกต่างกัน เป็นต้นว่า วิธีการค่ากำลังไฟฟ้า (Input Power Method) วิธีการค่าไถล (Slip Method) และวิธีการค่ากระแส (Current Method) ทั้งนี้วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะการทำงานจริงหน้างานที่ศึกษาในโครงการวิจัยนี้ประกอบด้วย

- วิธีการค่ากำลังไฟฟ้า (Input Power Method)
- วิธีการค่าไถล (Slip Method) และ
- วิธีการค่ากระแส (Current Method)
- วิธีการวงจรสมมูล (Equivalent Circuit)

3.4.1.1 วิธีการค่ากำลังไฟฟ้า (Input Power Method)

วิธีการค่ากำลังไฟฟ้าเป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวกในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่หน้างาน วิธีการนี้จะได้ผลลัพธ์ที่ดีในกรณีที่มอเตอร์มีกราฟประสิทธิภาพเทียบกับโหลดที่ค่อนข้างคงที่ แต่โดยทั่วไปมอเตอร์จะถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่โหลดประมาณ 75-80% ซึ่งหากมอเตอร์ทำงานที่จุดต่างออกไปก็จะมีประสิทธิภาพที่ต่างออกไปทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ได้ นอกจากนี้หากมอเตอร์มีการซ่อมบำรุงที่มีการพันขดลวดใหม่วิธีการนี้ก็จะมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้สูงมาก

ทั้งนี้วิธีประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยคร่าวที่หน้างานในการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงานที่นิยมใช้มักจะเป็นการใช้ค่าจากแผ่นป้าย เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์และการเข้าถึงในการตรวจวัดค่าที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ โดยจะใช้สมการเป็น

$$P_e = \frac{P_m \times LF}{\eta} \quad (3.1)$$

เมื่อ LF ตัวประกอบโหลด (Load Factor) ที่แสดงถึงร้อยละในการทำงานจริงของมอเตอร์ต่อพิกัด (%)

ค่าตัวประกอบโหลดในทางปฏิบัติมักจะได้จากการประเมินซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีนี้มีโอกาสที่จะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้สูงและอาจเป็นผลให้การวิเคราะห์การลงทุนมาตรการประหยัดพลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์มีโอกาสที่จะผิดพลาดได้ ค่าตัวประกอบโหลด (LF) จะสามารถหาได้จาก

$$LF = \frac{P_e}{P_{er}} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ P_{er} กำลังงานไฟฟ้าพิกัดของมอเตอร์ เป็นวัตต์หรือกิโลวัตต์ (W, kW)

โดยการตรวจวัดค่ากำลังงานออกของมอเตอร์จะสามารถตรวจวัดด้วยวิธีการดังนี้

- วิธีที่ 1 ตรวจวัดค่ากระแส แรงดัน และตัวประกอบกำลัง และนำมาคำนวณตามสมการ

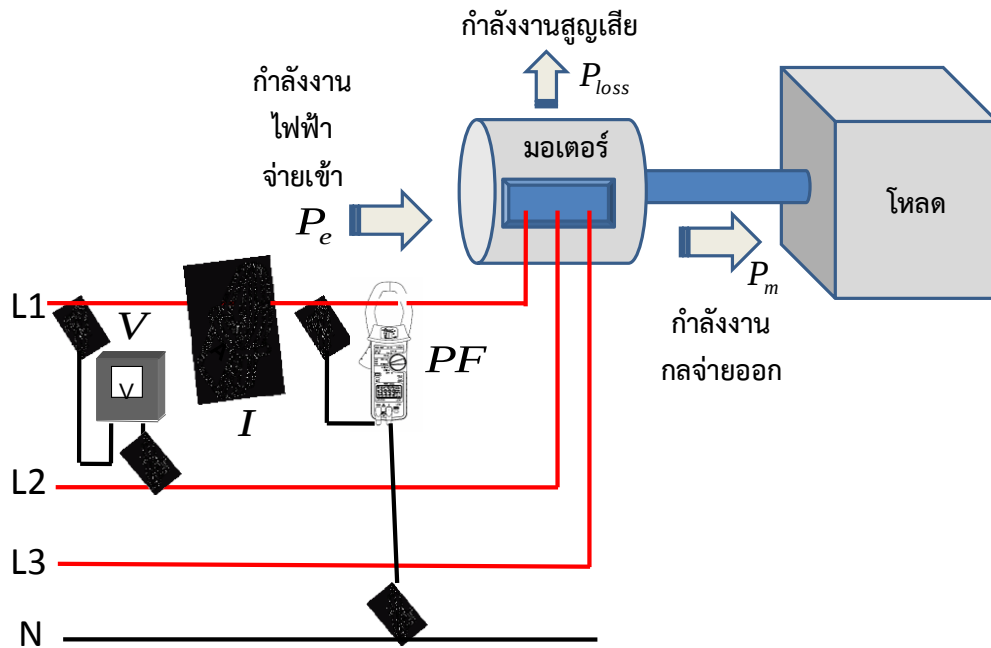
$$P_e = \sqrt{3} \times V \times I \times PF \quad (3.3)$$

เมื่อ I ค่ากระแสที่วัดได้ของมอเตอร์ เป็นแอมป์ (A)

V ค่าแรงดันที่วัดได้ของมอเตอร์ เป็นโวลต์ (V)

PF ค่าตัวประกอบกำลังที่วัดได้ของมอเตอร์

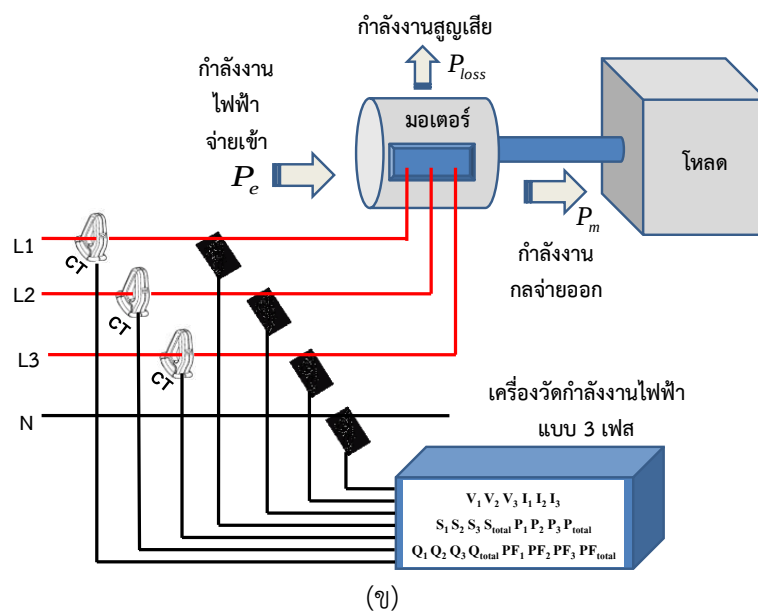
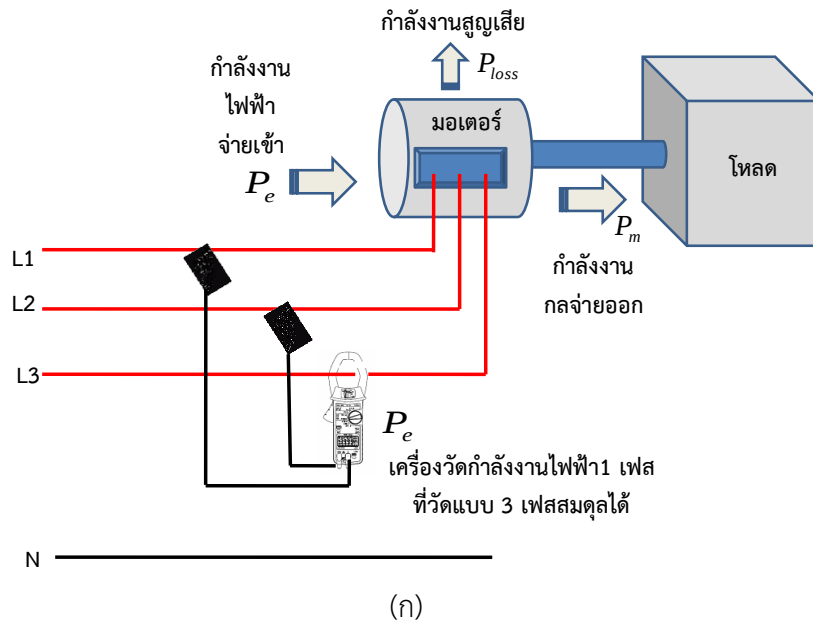
ในทางปฏิบัติจะวัดค่าของกระแส (I) ของทั้ง 3 เฟส แรงดัน (V) แต่ละคู่เฟส และตัวประกอบกำลัง (PF) ทั้ง 3 เฟส แล้วนำค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวแปรมาใช้ในการคำนวณตามสมการที่ (3.3) การตรวจวัดค่าดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.4 สำหรับการตรวจวัดด้วยวิธีดังกล่าวหากตู้ควบคุมมอเตอร์มีการติดตั้งเครื่องมือวัดไว้แล้วก็จะสามารถอ่านค่าจากตู้ควบคุมได้ หรือหากไม่ได้มีเครื่องมือวัดติดตั้งไว้ก็จะสามารถทำได้โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดัน เครื่องมือวัดกระแสแบบคล้อง และตัวประกอบกำลัง ในขณะที่มอเตอร์ยังคงเดินเครื่องอยู่ได้



ภาพที่ 3.4 การตรวจวัดค่ากำลังงานของมอเตอร์จากการวัดค่ากระแส แรงดัน และตัวประกอบกำลัง

- วิธีที่ 2 ตรวจวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าโดยตรง ในกรณีที่ใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power Meter) การตรวจวัดค่ากำลังงาน (P_e) จะสามารถทำได้โดยตรง ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ทั้งนี้ระดับของการรบกวนการทำงานของมอเตอร์ไม่มากนัก เนื่องจากสามารถต่อวงจรเพื่อวัดแรงดันและวัดกระแสแบบคล่องวัดได้ รวมทั้งในการวัดค่าตัวประกอบกำลังและกำลังไฟฟ้าก็สามารถใช้เครื่องมือวัดแบบคล่องวัดได้เช่นกัน และนอกจากนี้ยังสามารถใช้เครื่องมือวัดติดตั้งผ่านทางหม้อแปลงแรงดันหรือหม้อแปลงกระแสได้อีกทางหนึ่ง

การวัดกำลังงานไฟฟ้ารวมสามารถทำได้หลายวิธี โดยสามารถใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบ 1 เฟสทำการวัดทีละเฟสแล้วนำผลลัพธ์มารวมกัน หรือทำการวัดโดยจับคู่ครั้งละ 2 เฟสและนำผลลัพธ์มารวมกัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบ 1 เฟสที่มีฟังก์ชันในการวัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟสสมมูลดังแสดงในภาพที่ 3.5(ก) หรือใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟสซึ่งมักจะเป็นแบบที่บันทึกข้อมูลได้ในการวัดค่าทั้ง 3 เฟสและค่ากำลังไฟฟ้ารวมพร้อมกันดังแสดงในภาพที่ 3.5(ข)



ภาพที่ 3.5 การตรวจวัดค่ากำลังงานของมอเตอร์โดยใช้เครื่องวัดกำลังงานแบบคล่องวัด

ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

$$\%Eff = \frac{P_m}{P_e} \times 100\% \quad (3.4)$$

3.4.1.2 วิธีการค่าไถล (Slip Method)

วิธีการค่าไถลเป็นอีกวิธีที่ค่อนข้างสะดวกเนื่องจากสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์จากการวัดความเร็วรอบได้ และตามทฤษฎีแล้วจะสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้แม่นยำกว่าวิธีการแผ่นป้าย โดยจะเป็นการประเมินค่ากำลังงานกลที่เพลาจากสมการ

$$P_m = \frac{S}{S^{rated}} \times P_m^{rated} \quad (3.5)$$

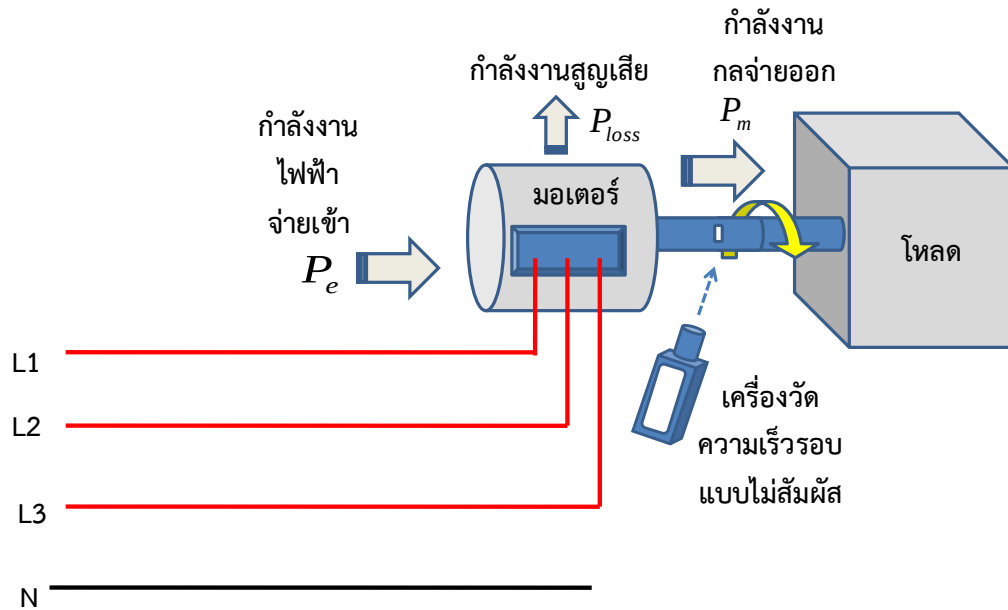
โดยที่
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.6)$$

และ
$$S^{rated} = \frac{n_s - n_r^{rated}}{n_s} \quad (3.7)$$

เมื่อ	S	ค่าไถลที่วัดได้
	S^{rated}	ค่าไถลที่พิกัดของมอเตอร์
	P_m^{rated}	กำลังงานพิกัดของมอเตอร์ เป็นวัตต์หรือกิโลวัตต์ (W, kW)
	n_s	ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์ เป็นรอบต่อนาที (rpm)
	n_r	ความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะทำงาน เป็นรอบต่อนาที (rpm)
	n_r^{rated}	ความเร็วรอบพิกัดของมอเตอร์ เป็นรอบต่อนาที (rpm)

อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้มากจากความสัมพันธ์ระหว่างโหลดกับค่าไถลที่ไม่เป็นเชิงเส้นตามสมการที่คำนวณ

ในการตรวจวัดค่าไถล (Slip) จะสามารถทำได้โดยการวัดความเร็วรอบด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส (Non-Contact Tachometer) ที่สามารถวัดได้โดยมอเตอร์ยังคงทำงานได้ตามปกติดังแสดงในภาพที่ 3.6 ทั้งนี้การวัดด้วยวิธีนี้มีระดับของการรบกวนการทำงานของมอเตอร์เฉพาะในกรณีที่มอเตอร์ไม่ทำการติดแถบหรือป้ายสีสะท้อนแสงไว้ จะต้องหยุดเดินเครื่องหรือหาช่วงเวลาที่มอเตอร์หยุดเดินเครื่องเพื่อติดแถบหรือป้ายสีสะท้อนแสง และเมื่อทราบค่ากำลังงานขาออกแล้วจะสามารถคำนวณประสิทธิภาพได้ตามสมการที่ (3.4)



ภาพที่ 3.6 การตรวจวัดความเร็วรอบเพื่อใช้หาค่าไถลของมอเตอร์

3.4.1.3 วิธีการค่ากระแส (Current Method)

วิธีการค่ากระแสเป็นการประมาณกำลังงานกลของมอเตอร์จากการตรวจวัดค่ากระแสตามสมการ

$$P_m = \frac{I}{I^{rated}} \times P_m^{rated} \quad (3.8)$$

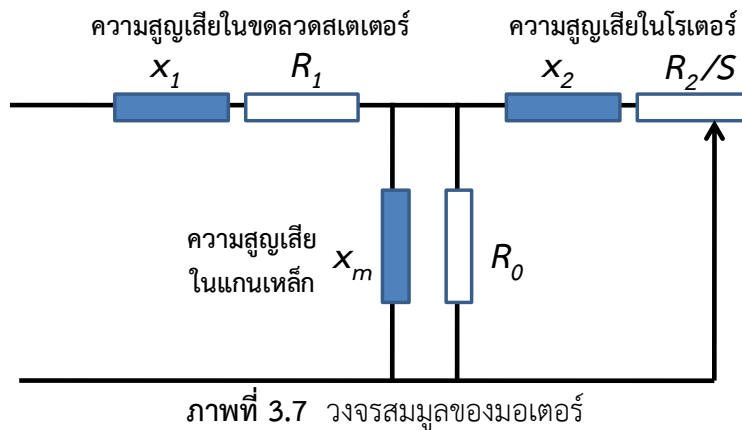
เมื่อ I^{rated} ค่ากระแสพิกัดของมอเตอร์ เป็นแอมป์ (A)

โดยการวัดค่ากระแสจะสามารถวัดโดยใช้เครื่องวัดกระแสแบบคล่องวัดได้ ซึ่งมีระดับของการรบกวนการทำงานของมอเตอร์ที่ต่ำ โดยสามารถทำได้ในขณะที่มอเตอร์ทำงานตามปกติ ซึ่งวิธีนี้ยังคงมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้มากจากความสัมพันธ์ระหว่างโหลดกับค่ากระแสที่ไม่เป็นเชิงเส้นตามสมการที่คำนวณเช่นกัน

การศึกษาแนวทางในการตรวจวัดและประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงานจริง หน่วยงานในรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไป พร้อมทั้งศึกษาข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี รวมทั้งการค้นคว้าหาวิธีการปรับปรุงวิธีการตรวจประเมินให้เหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อสรุปเป็นข้อเสนอแนะแนวทางในการตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่หน่วยงานจริง จึงเป็นการศึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ให้มีความชัดเจนและเป็นแนวทางที่เป็นที่ยอมรับในการคำนวณ และเมื่อทราบค่ากำลังงานขาออกแล้วจะสามารถคำนวณประสิทธิภาพได้ตามสมการที่ (3.4)

3.4.1.4 วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีการวงจรมูล

จากทฤษฎีวงจรมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เราจะสามารถสร้างวงจรมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส จากค่าพารามิเตอร์ 6 ตัว ซึ่งเกิดจากความสูญเสียและการส่งกำลังงานผ่านช่องว่างอากาศจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ได้ดังภาพที่ 3.7



จากวงจรสมมูลของมอเตอร์จะสามารถคำนวณกำลังงานที่ส่งผ่านจากสเตเตอร์มายังโรเตอร์ได้ดังสมการที่ (3.9)

$$P_{ag} = I_2^2 \left(\frac{R_2}{s} \right) \quad (3.9)$$

โดยที่	P_{ag}	ค่ากำลังงานที่ส่งผ่านจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ (air-gap power)
	I_2	ค่ากระแสที่ไหลผ่านวงจรสมมูลในส่วนของโรเตอร์
	R_2	ค่าความต้านทานของโรเตอร์
	s	ค่าไถล (Slip) ของมอเตอร์

เมื่อคำนวณค่ากำลังงานที่ส่งผ่านจากสเตเตอร์มายังโรเตอร์แล้วจะสามารถคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้ดังสมการที่ (3.10)

$$\%Eff = \frac{P_{ag} - P_{msloss}}{P_e} \times 100\% \quad (3.10)$$

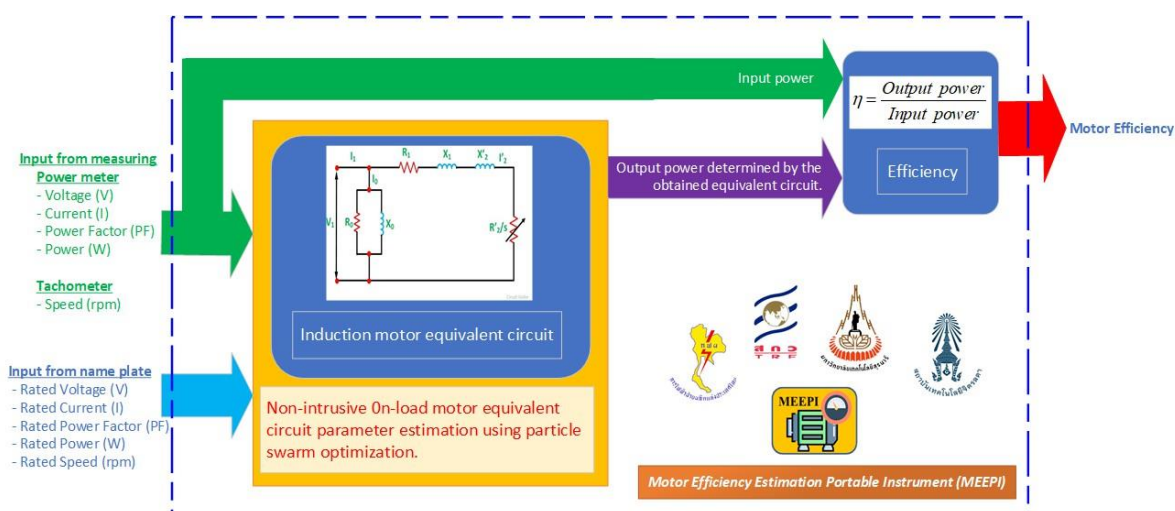
โดยที่	P_{msloss}	ผลรวมของกำลังงานสูญเสียทางกลและกำลังงานสูญเสียเสียดของมอเตอร์ (Mechanical loss and stray loss)
	I_2	ค่ากระแสที่ไหลผ่านวงจรสมมูลในส่วนของโรเตอร์
	R_2	ค่าความต้านทานของโรเตอร์
	s	ค่าไถล (Slip) ของมอเตอร์

ในทางปฏิบัตินั้นค่า P_{msloss} จะได้จากการทดสอบและจะเป็นค่าที่เฉพาะตัวมอเตอร์ที่แต่ละสภาวะการทำงานทำให้การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในส่วนนี้ทำได้ยาก อย่างไรก็ตามค่าความสูญเสียในส่วนนี้จะ เป็นกำลังสูญเสียส่วนน้อยเมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียส่วนอื่นและสามารถใช้ค่าที่กำหนดในมาตรฐานได้

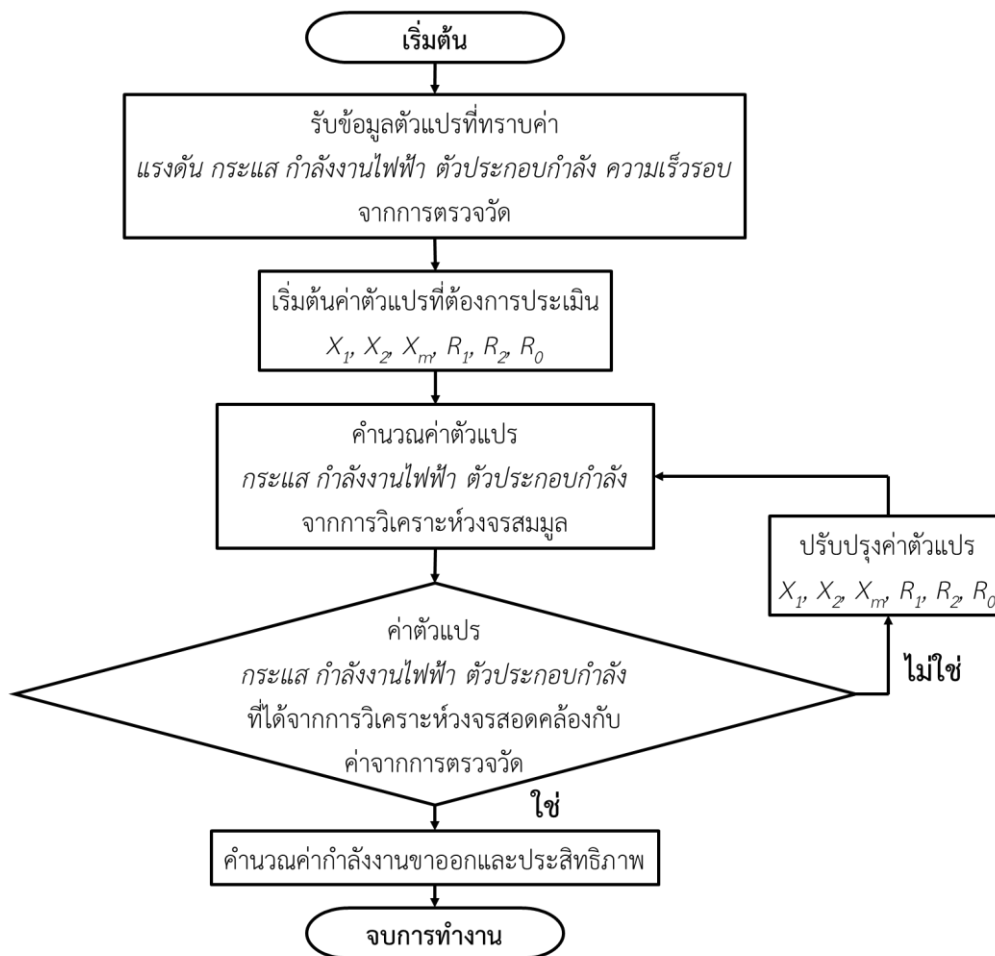
3.4.1.5 ซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีการวงจรมุมที่ได้พัฒนาขึ้น

จากการพัฒนาซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วยวิธีการวงจรมุมในโครงการวิจัยการพัฒนารูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะทำงานจริงสำหรับการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงาน ได้ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์คือวิธีการการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด (Particle Swarm Optimization, PSO) ในการหาค่าตัวแปรจากการตรวจวัดมอเตอร์ที่หน้างานและนำไปคำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ทั้งนี้กระบวนการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการวิเคราะห์ค่าตัวแปรในวงจรมุมด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.9 และในภาพที่ 3.8 เป็นวิธีการคำนวณของโปรแกรมที่แสดงในรูปแบบของอินโฟกราฟฟิก



ภาพที่ 3.8 อินโฟกราฟฟิกแสดงวิธีการคำนวณของโปรแกรม



ภาพที่ 3.9 กระบวนการคำนวณค่าตัวแปรในวงจรสมมูลของมอเตอร์ด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประเมินค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่สภาวะการทำงาน

บทที่ 4 ผลลัพธ์ของการวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการดำเนินการในส่วนของการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา รวมทั้งการทดสอบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา และการจัดสัมมนาเพื่อขยายผลการใช้งานและรับข้อเสนอแนะจากผู้ใช้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ผลลัพธ์เครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา

ผลลัพธ์การออกแบบตัวเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา ได้มีการพัฒนาเป็นลำดับดังนี้

4.1.1 การออกแบบส่วนตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและความเร็วรอบ

ในการอินเตอร์เฟสสัญญาณตรวจวัดทางไฟฟ้าไปที่โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสนั้น เป็นการตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้าอันประกอบด้วย แรงดัน กระแส กำลังงานไฟฟ้าปรากฏจริง กำลังงานไฟฟ้าจริง กำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟ ผ่านทาง Prot COM4 ของหน่วยประมวลผล โดยใช้อุปกรณ์ที่ได้แสดงในบทที่ 3 ซึ่งในการตรวจวัดจะเป็นการวัดค่าเป็นระยะเวลา 10 วินาทีแล้วนำมาเฉลี่ยโดยมีส่วนของรหัสโปรแกรมของกระบวนการติดต่อดังต่อไปนี้

ส่วนตรวจวัดค่าทางไฟฟ้า

```
m4_h = msgbox('This will take a few minute...Please close this window and do not push any button')
```

```
m = modbus('serialrtu','COM4','Timeout',10);
```

```
for i=1:10
```

```
    m4_PF1(i,:) = read(m,'inputregs',0+1,2)/1000; %add0 ==> 1 PF=PF/1000
```

```
    m4_PF2(i,:) = read(m,'inputregs',1+1,2)/1000;
```

```
    m4_PF3(i,:) = read(m,'inputregs',2+1,2)/1000;
```

```
    m4_PFavg(i,:) = read(m,'inputregs',3+1,2)/1000;
```

```
    m4_HZ(i,:) = read(m,'inputregs',4+1,2)/10; %HZ=HZ/10
```

```
    m4_VL_L1(i,:) = read(m,'inputregs',262+1,2)/10; %V=V/10
```

```
    m4_VL_L2(i,:) = read(m,'inputregs',264+1,2)/10;
```

```
    m4_VL_L3(i,:) = read(m,'inputregs',266+1,2)/10;
```

```
    m4_I1(i,:) = read(m,'inputregs',268+1,2)/1000; %I=I/1000
```

```
    m4_I2(i,:) = read(m,'inputregs',270+1,2)/1000;
```

```
    m4_I3(i,:) = read(m,'inputregs',272+1,2)/1000;
```

```
    m4_KW1(i,:) = read(m,'inputregs',276+1,2)/10000; %KW=KW/10000 unit Kilo
```

```
    m4_KW2(i,:) = read(m,'inputregs',278+1,2)/10000;
```

```
    m4_KW3(i,:) = read(m,'inputregs',280+1,2)/10000;
```

```
    m4_Kvar1(i,:) = read(m,'inputregs',282+1,2)/10000; %Kvar=Kvar/10000
```

```
    m4_Kvar2(i,:) = read(m,'inputregs',284+1,2)/10000;
```

```
    m4_Kvar3(i,:) = read(m,'inputregs',286+1,2)/10000;
```

```
    m4_KVA1(i,:) = read(m,'inputregs',288+1,2)/10000; %KVA=KVA/10000 unit
```

```
    m4_KVA2(i,:) = read(m,'inputregs',290+1,2)/10000;
```

```
    m4_KVA3(i,:) = read(m,'inputregs',292+1,2)/10000;
```

```

m4_KW3p(i,:) = read(m,'inputregs',296+1,2)/10000; %K=K/10000 unit Kilo
m4_Kvar3p(i,:) = read(m,'inputregs',298+1,2)/10000;
m4_KVA3p(i,:) = read(m,'inputregs',300+1,2)/10000;
end
clear m;

```

ในการอินเตอร์เฟสสัญญาณความเร็วรอบจะเป็นการส่งสัญญาณผ่านทาง Prot COM2 ของหน่วยประมวลผล โดยใช้อุปกรณ์ที่ได้แสดงในบทที่ 3 โดยมีส่วนของรหัสโปรแกรมของกระบวนการติดต่อดังต่อไปนี้

ส่วนตรวจวัดความเร็วรอบ

```

s = serial('COM2','BaudRate',9600,'DataBits',8,'Parity', 'none','StopBits',1);
fopen(s);
for i=1:2 % clear memory on tachrometer
    m4_RPM1=fgets(s);
end
iii=1;
for i=0:15:size(m4_RPM1,2)-15
    ii=i+1;
    while 1
        if (m4_RPM1(ii)=='4' && m4_RPM1(ii+1)=='1' && m4_RPM1(ii+2)=='2' && m4_RPM1(ii+3)=='7' && m4_RPM1(ii+4)=='0')
            break;
        end
        ii=ii+1;
    end
    m4_RPM(:,iii)=str2num([m4_RPM1(ii+10) m4_RPM1(ii+11) m4_RPM1(ii+12) m4_RPM1(ii+13)]);
    if m4_RPM1(ii+7) == 1 %D9
        m4_RPM(:,iii)/10;
    elseif m4_RPM1(ii+7) == 2
        m4_RPM(:,iii)/100;
    elseif m4_RPM1(ii+7) == 3
        m4_RPM(:,iii)/1000;
    end
    iii=iii+1;
end

```

```

fclose(s);
delete(s);
clear s;

```

ทั้งนี้ในการประมวลผลนั้นจะนำค่าทางไฟฟ้าและความเร็วรอบที่ได้มาเฉลี่ยกันอีกครั้งก่อนส่งข้อมูลไปยังส่วนประมวลผลการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยมีส่วนของรหัสโปรแกรมของกระบวนการติดต่อดังต่อไปนี้

ส่วนประมวลผลเฉลี่ยข้อมูล

```

% AVG Value

```

```

VL_Lavg =
((sum(m4_VL_L1)/size(m4_VL_L1,1))+sum(m4_VL_L2)/size(m4_VL_L2,1))+sum(m4_VL_L3)/size(m4_VL_L3,1))/3;%แรงดัน
line to line เฉลี่ย 3 เฟส ที่เฉลี่ยจากค่าที่ทำการวัด 5 ครั้ง
lavg = ((sum(m4_I1)/size(m4_I1,1))+sum(m4_I2)/size(m4_I2,1))+sum(m4_I3)/size(m4_I3,1))/3;%กระแสที่เฉลี่ยจากค่าที่ทำการวัด
5 ครั้ง
Ptotal = sum(m4_KW3p)/size(m4_KW3p,1); %power รวม 3 เฟส ที่เฉลี่ยจากค่าที่ทำการวัด 5 ครั้ง
PFavg = sum(m4_PFavg)/size(m4_PFavg,1);%power factor ที่เฉลี่ยจากค่าที่ทำการวัด 5 ครั้ง
RPMavg = sum(m4_RPM)/size(m4_RPM,2);%ความเร็วรอบ ที่เฉลี่ยจากค่าที่ทำการวัด 5 ครั้ง
VL_Lavg(:,2)=[];
lavg(:,2)=[];
Ptotal(:,2)=[];
PFavg(:,2)=[];
m4_h2 = msgbox('Reading Data Completed !')
%-----
%% Put Interface Code HERE
%%%%%%%%%%%%%%
set(handles.V2,'string',VL_Lavg);
set(handles.A2,'string',lavg);
set(handles.P2,'string',Ptotal);
set(handles.PF2,'string',PFavg);
set(handles.SP2,'string',RPMavg);

```

ในการทดสอบการวัดค่าทางไฟฟ้าจะใช้หน้าจอติดต่อผู้ใช้อย่างภาพที่ 4.1

ภาพที่ 4.1 หน้าจอทดสอบการทำงานของส่วนติดต่อผู้ใช้

4.1.2 การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้

จากโครงการวิจัย RDG57D0004 และ RDG59D0010 นั้นได้รับข้อเสนอแนะจากผู้ทรงคุณวุฒิและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในส่วนของหน้าจอติดต่อผู้ใช้ให้ปรับปรุงเพื่อให้มีความสะดวกและเข้าใจง่ายในการใช้งานมากขึ้น ในโครงการวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการปรับปรุงส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) โดยเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่พัฒนาขึ้น จะมีหน้าจอสัมผัสแบ่งออกเป็น

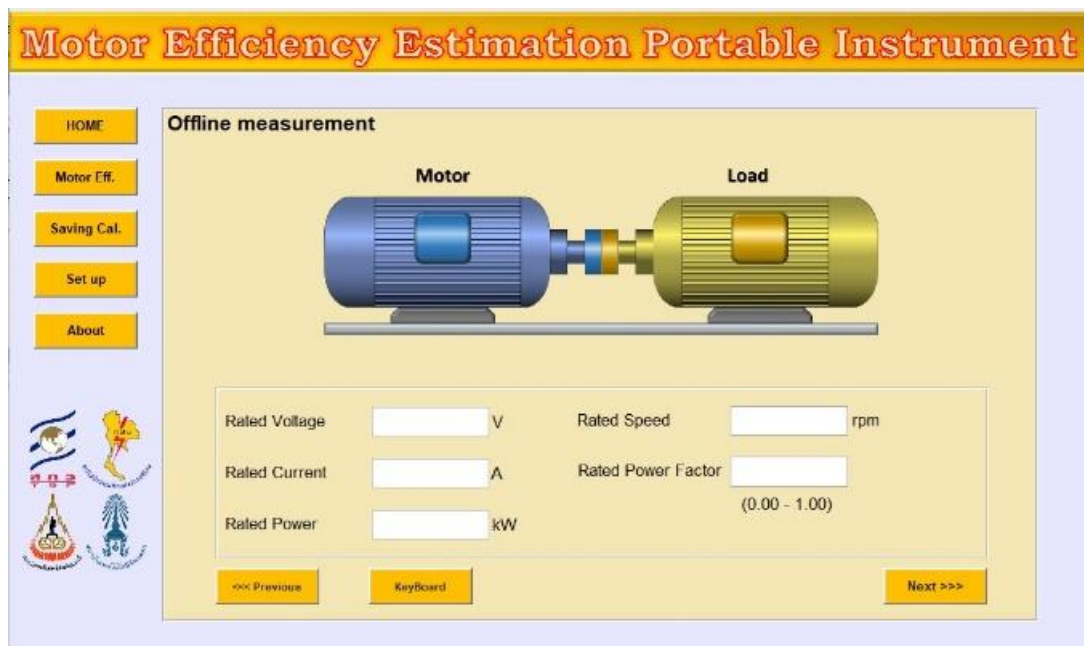
1. เมนูหลัก (Home) และแนะนำหน่วยงานที่สนับสนุนโครงการวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 4.2
2. ส่วนประมวลผลประสิทธิภาพของมอเตอร์
 - 1.1 เมนูรับค่าคุณลักษณะของมอเตอร์ (Name Plate Information) ดังแสดงในภาพที่ 4.3
 - 1.2 เมนูประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการกรอกข้อมูลจากเครื่องวัดอื่น (Off Line Measurment) ดังแสดงในภาพที่ 4.4
 - 1.3 เมนูประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการตัวเครื่องวัด (On Line Measurement)
 - 1.3.1 เมนูยืนยันการติดตั้งสารเคเบิลเครื่องวัดกระแส แรงดัน และเซนเซอร์วัดความเร็วรอบที่ระบบไฟฟ้าและมอเตอร์ (Cable Connection to Equipment) ดังแสดงในภาพที่ 4.5
 - 1.3.2 เมนูยืนยันการติดตั้งสารเคเบิลเครื่องวัดกระแส แรงดัน และเซนเซอร์วัดความเร็วรอบที่ตัวเครื่องวัด (Cable Connection to Instrument) ดังแสดงในภาพที่ 4.6
 - 1.3.3 เมนูการรับค่าจากเครื่องวัด (On Line Measurement) ดังแสดงในภาพที่ 4.7
 - 1.4 เมนูประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ (Estimated Efficiency) ดังแสดงในภาพที่ 4.8
3. เมนูช่วยคำนวณความคุ้มค่าในการลงทุนเปลี่ยนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง (Saving Calculation) ดังแสดงในภาพที่ 4.9
4. เมนูปรับตั้งการอินเตอร์เฟซของระบบ (Set Up) ดังแสดงในภาพที่ 4.10

5. เมนูแสดงข้อมูลผู้สนับสนุนในการพัฒนา ทีมงานวิจัย ข้อมูลของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา (About) ดังแสดงในภาพที่ 4.11

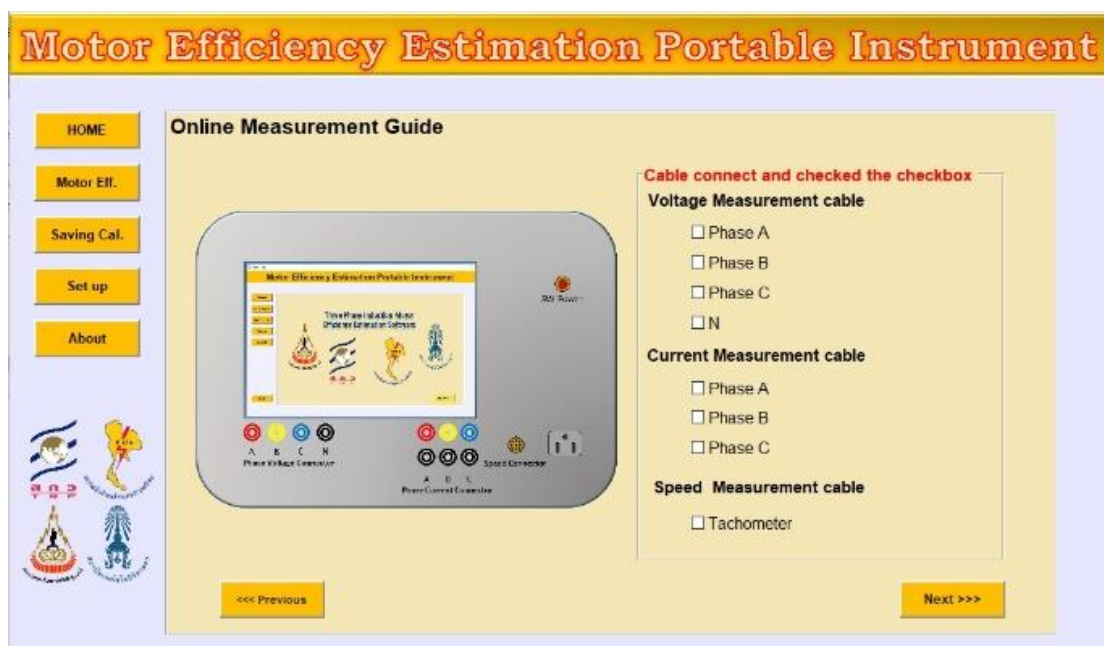


ภาพที่ 4.2 หน้าต่างเมนูหลัก (Home)

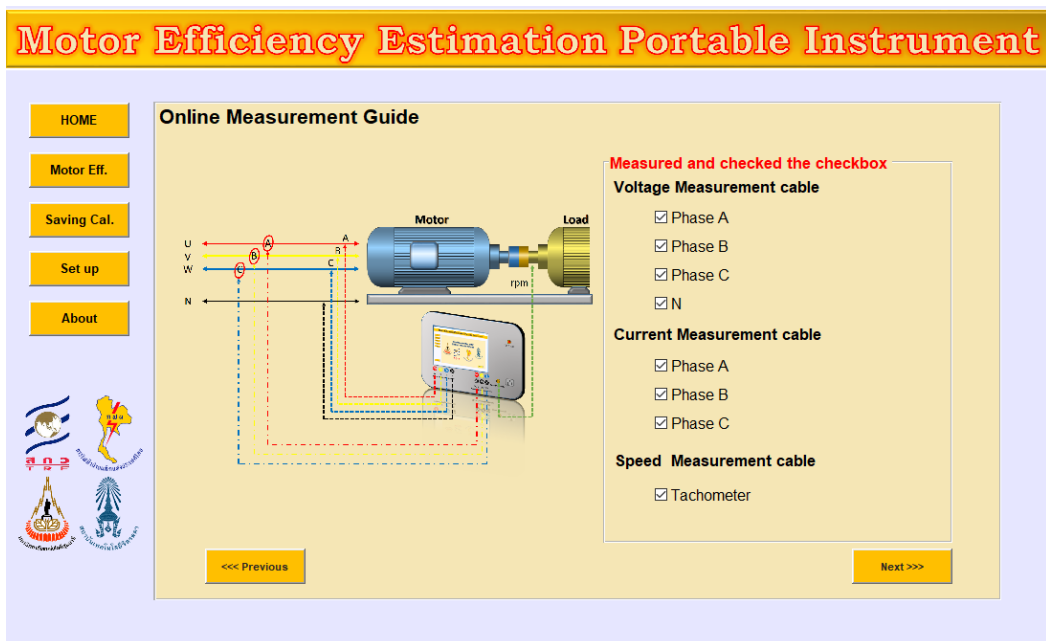
ภาพที่ 4.3 หน้าต่างเมนูรับค่าคุณลักษณะของมอเตอร์ (Name Plate Information)



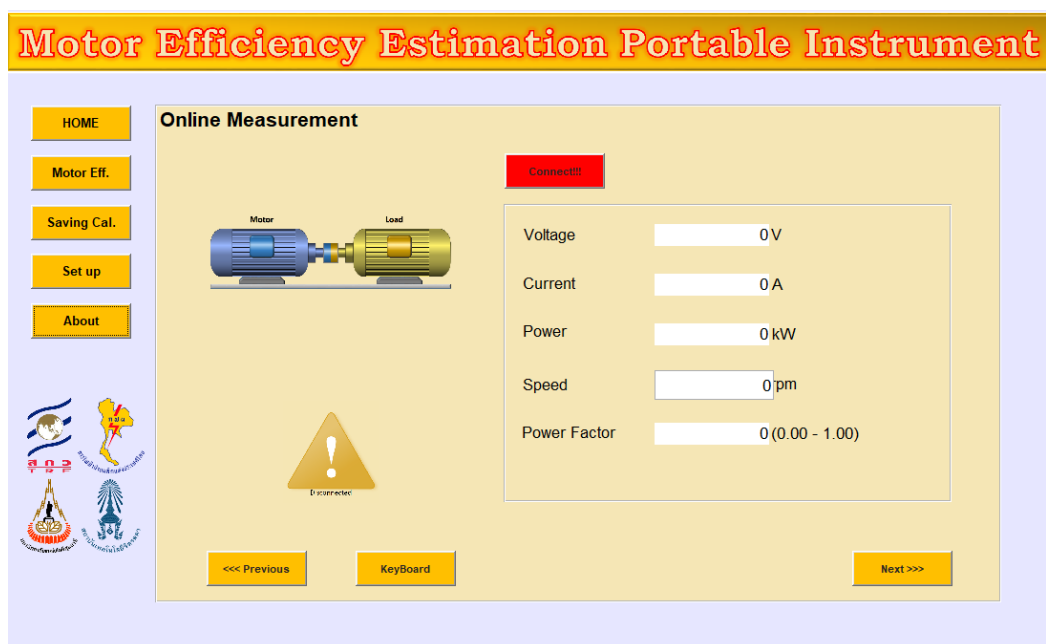
ภาพที่ 4.4 เมนูประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการกรอกข้อมูลจากเครื่องวัดอื่น (Off Line Measurement)



ภาพที่ 4.5 เมนูประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการตัวเครื่องวัด (On Line Measurement) ยืนยันการติดตั้งสารเคเบิลเครื่องวัดกระแส แรงดัน และเซนเซอร์วัดความเร็วรอบที่ระบบไฟฟ้าและมอเตอร์ (Cable Connection to Equipment)



ภาพที่ 4.6 เมนูประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการตัวเครื่องวัด (On Line Measurement) ยืนยันการติดตั้งสารเคเบิลเครื่องวัดกระแส แรงดัน และเซนเซอร์วัดความเร็วรอบที่ตัวเครื่องวัด (Cable Connection to Instrument)



ภาพที่ 4.7 เมนูการรับค่าจากเครื่องวัด (On Line Measurement)

Motor Efficiency Estimation Portable Instrument

HOME

Motor Eff.

Saving Cal.

Set up

About



Estimated Efficiency (%)

Number of PSO Iteration :

PSO base Equivalent Circuit Estimation (%Eff) :

Name Plate Method (%Eff) :

Current Method (%Eff) :

Slip Method (%Eff) :

ภาพที่ 4.8 เมนูประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ (Estimated Efficiency)

Motor Efficiency Estimation Portable Instrument

HOME

Motor Eff.

Saving Cal.

Set up

About



Saving calculation

Measured Electrical Power : kW

Existing Motor Efficiency : %

New Motor Efficiency : %

Motor Annual Operating Hour :

Average Electricity Cost : Bath/kWh

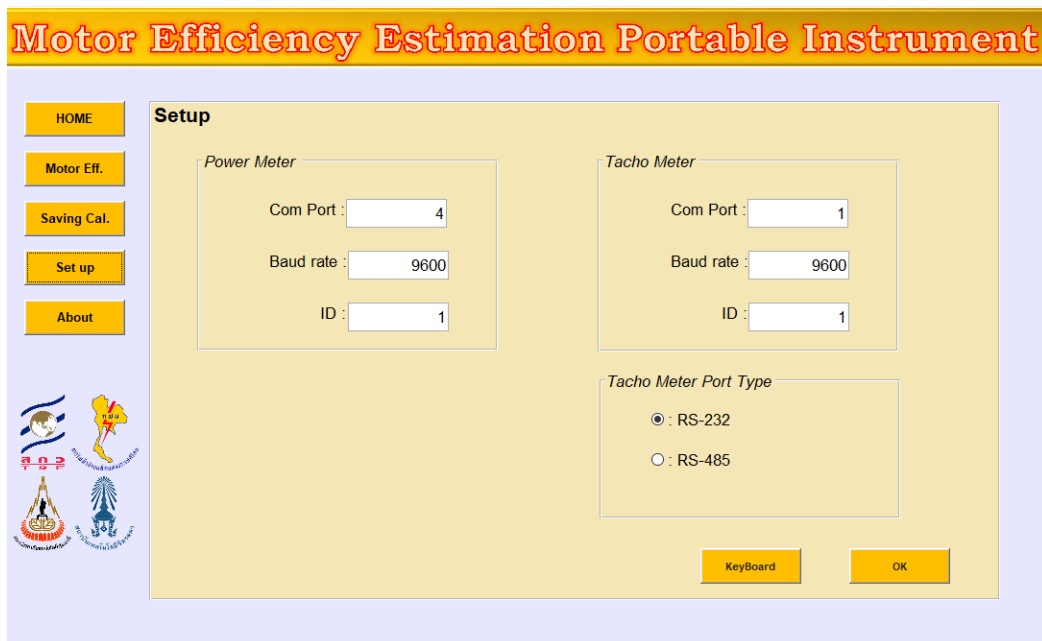
Motor Replacement Cost : Bath/kWh

Annual Electricity Saving : kWh

Annual Electricity Cost Saving : Bath

Payback Period : Years

ภาพที่ 4.9 เมนูช่วยคำนวณความคุ้มค่าในการลงทุนเปลี่ยนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง (Saving Calculation)



ภาพที่ 4.10 หน้าต่างเมนูปรับตั้งการอินเทอร์เฟสของระบบ (Set Up)



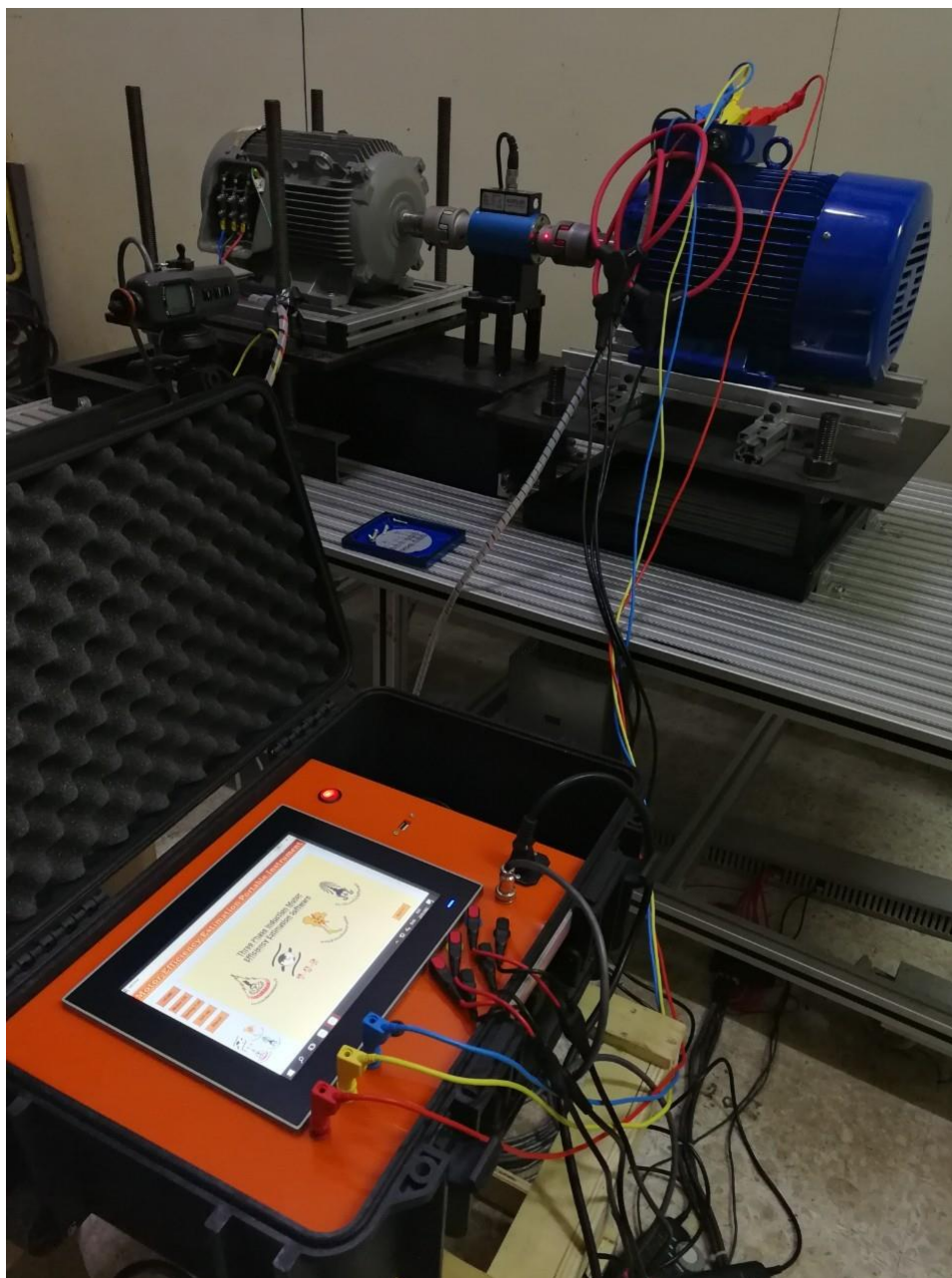
ภาพที่ 4.11 หน้าต่างเมนูแสดงข้อมูลเกี่ยวกับโครงการวิจัยและตัวเครื่องวัด (About)

4.1.3 โครงสร้างเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพา

การออกแบบโครงสร้างเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพาได้ทำการออกแบบให้มีลักษณะที่สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกโดยหน่วยประมวลผลและเซนเซอร์บรรจุในกล่องที่มีล๊อคดังแสดงในภาพที่ 4.12 และในการติดตั้งจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.12 ภาพเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส
โดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา



ภาพที่ 4.13 ภาพเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส
โดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา

4.2 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา (MEEPI)

4.2.1 ผลการทดสอบกับมอเตอร์ที่ตรวจวัดในห้องปฏิบัติการจากโครงการ RDG57D0004

ผลการทดสอบกับมอเตอร์ที่ตรวจวัดในห้องปฏิบัติการจากโครงการ RDG57D0004 โดยได้คัดเลือกข้อมูลการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1.5 kW และ 11 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่ที่ถูกทดสอบ 50% 70% และ 100% ของพิกัดกำลังสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตาราง 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 การทดสอบผลการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพากับข้อมูลของมอเตอร์ขนาด 1.5 kW จากโครงการ RDG57D0004

Load	Voltage	Current	P.F.	Input	Torque	Speed	Output	Current Method	Slip Method	Shaft Torque Method	MEEPI
(%)	(V)	(A)	Lagging	(kW)	(N.m)	(RPM)	(kW)	(%)	(%)	(%)	(%)
50.00	393.00	2.27	0.55	0.85	4.70	1476.00	0.73	117.82	60.50	85.50	85.78
70.00	394.00	2.70	0.68	1.25	7.00	1463.00	1.07	95.29	63.43	85.80	86.45
100.00	397.00	3.37	0.76	1.77	10.00	1447.00	1.52	84.00	64.16	85.60	84.88

ตารางที่ 4.2 การทดสอบผลการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพากับข้อมูลของมอเตอร์ขนาด 11 kW จากโครงการ RDG57D0004

Load	Voltage	Current	P.F.	Input	Torque	Speed	Output	Current Method	Slip Method	Shaft Torque Method	MEEPI
(%)	(V)	(A)	Lagging	(kW)	(N.m)	(RPM)	(kW)	(%)	(%)	(%)	(%)
50.00	383.00	14.60	0.69	6.69	36.80	1481.00	5.70	110.47	78.10	85.32	85.09
70.00	379.00	17.30	0.76	8.63	50.00	1471.00	7.70	101.48	92.41	89.15	85.00
100.00	376.00	23.30	0.80	12.20	72.80	1464.00	11.15	96.68	81.15	91.45	87.31

จากตามตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่าวิธีการค่ากระแส (CM) ให้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนไปมากโดยประเมินค่าประสิทธิภาพสูงกว่าความเป็นจริงที่จุดทดสอบ 50% ของพิกัดเป็นค่าประสิทธิภาพ 117.82% ในขณะที่วิธีการค่าโวล (SM) ให้ค่าต่ำกว่าความเป็นจริงที่ประสิทธิภาพ 60.5% โดยวิธีการ MEEPI ที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงการทดสอบจริงจากการวัดแรงบิดที่เพลลา (Shaft Torque Method) มากที่สุดที่ 85.78% นอกจากนี้ที่จุดทดสอบ 70% และ 100% ก็พบว่าวิธีการที่นำเสนอ (MEEPI) จากเครื่องวัดก็ยังให้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

จากตามตารางที่ 4.2 เห็นได้ว่าผลการทดสอบมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกับตารางที่ 4.1 โดยวิธีการค่ากระแส (CM) ให้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนไปมากโดยเฉพาะที่การทำงานต่ำกว่าพิกัดมาก ในขณะที่วิธีการค่าโวล (SM) ก็ให้ค่าประเมินประสิทธิภาพต่ำกว่าความเป็นจริงเช่นกัน ส่วนวิธีการที่นำเสนอจากเครื่องทดสอบ (MEEPI) ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงการทดสอบจริงจากการวัดแรงบิดที่เพลลา (Shaft Torque Method) มากที่สุด

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสด้วยวิธีการของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพา มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกระแสและวิธีการค่าโวล

4.2.2 ผลการทดสอบกับมอเตอร์ที่ตรวจวัดในห้องปฏิบัติการเพิ่มเติม

ผลการทดสอบการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพา กับมอเตอร์ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 1.5 kW 2.2 kW และ 7.5 kW สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และผลการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพาได้แสดงในตารางที่ 4.4 ทั้งนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์แต่ละตัวใน 3 สถานะการทำงานและเปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละวิธีการ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1.5 kW 2.2 kW และ 7.5 kW ในห้องปฏิบัติการ

Number	Size (kW)	Input Electrical Power				Output Mechanical Power		
		Voltage (V)	Amp	P.F.	Power _{elec.} (kW)	Torque (N·m)	RPM	Power _{Mech.} (kW)
1	Rated	400	15.48	0.800	7.500		1461	
	7.50	399.25	15.642	0.785	8.510	48.3	1464	7.405
		404.21	11.62	0.710	5.936	33.9	1465	5.201
		403.6	10.104	0.645	4.558	25.5	1470	3.925
2	Rated	380	5.3	0.800	2.200		1420	
	2.2	412.8	4.276	0.778	2.687	14.9	1433	2.236
		412.3	3.263	0.717	2.027	11.1	1452	1.688
		413.9	2.337	0.610	1.433	7.6	1468	1.168
3	Rated	380	3.9	0.790	1.500		1420	
	1.50	412.21	2.4436	0.761	1.928	10.4	1423	1.550
		415.31	1.3587	0.684	1.427	7.6	1446	1.151
		414.86	0.4367	0.577	1.059	5.4	1463	0.827

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.4 พบว่ามีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการทดสอบในหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสด้วยวิธีการของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพา มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกระแสและวิธีการค่าโกล

อย่างไรก็ตามวิธีการการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสด้วยวิธีการของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รับกวนการทำงานแบบพกพายังมีโอกาที่จะประเมินผิดพลาดไปจากความเป็นจริงได้มากในบางโอกาสเนื่องจากใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในการวิเคราะห์ ซึ่งในการหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดดังกล่าวจะสามารถทำได้โดยการประมวลผลหลายครั้งและตัดทอนค่าที่ห่างจากกลุ่มออกแล้วทำการเฉลี่ยค่าที่ได้มาเป็นค่าประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์

ตารางที่ 4.4 การทดสอบผลการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพากับข้อมูลการทดสอบมอเตอร์ขนาด 1.5 kW 2.2 kW และ 7.5 kW

Number	Size (kW)	Tested Efficiency	CM	SM	MEEPI
1	7.50	87.014	88.887	81.048	90.091
		87.614	95.841	115.788	90.017
		86.122	108.368	128.862	90.055
2	2.2	83.207	71.753	80.913	79.454
		83.269	72.504	76.666	83.146
		81.519	73.724	72.845	80.283
3	1.50	80.391	52.885	88.125	79.356
		80.647	40.024	84.752	80.176
		78.114	17.314	78.073	83.961

4.3 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากการดำเนินงานในเฟสหนึ่งของโครงการ ทำการทดสอบมอเตอร์ที่ใช้งานจริงโครงการนำร่องจำนวน 5 ตัว สามารถสรุปผลประหยัดในภาพรวมเฉพาะในส่วนของพลังงานที่ลดลงจากการเปลี่ยนมอเตอร์ได้ดังตารางที่ 1 และระยะเวลาคืนทุนได้ดังตารางที่ 2 โดยเป็นการคำนวณจากมอเตอร์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาของนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้น และมีรายละเอียดเพิ่มเติมดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบในเฟสที่สองเพื่อยืนยันผลอีกจำนวน 25 ตัว ซึ่งประเมินผลประหยัดได้ประมาณ 383,595 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ต่อ ปี จากนั้นจึงขยายผลสู่มอเตอร์ของผู้ประกอบการในเครือข่ายเฟสที่สาม ในโครงการการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสสำหรับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนมาตรการอนุรักษ์พลังงาน ที่ได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณหาประสิทธิภาพด้วยวิธีการวงจรมูลโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ ที่ได้รับทุนจากโครงการร่วมสนับสนุนทุนวิจัย สกว.-กฟผ. ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 ซึ่งในระยะแรกของโครงการนี้ คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์แล้วรวม 119 ชุด ซึ่งมีจำนวนมอเตอร์เข้าร่วมโครงการมากกว่าเฟสที่สองที่วิจัยเพื่อยืนยันผลจำนวน 25 ตัวมากกว่าสี่เท่าตัว จึงประเมินผลการประหยัดพลังงานที่เกิดขึ้นจากโครงการแล้วมากกว่า 1,600 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ต่อ ปี

ตารางที่ 4.5 การใช้พลังงาน

	การใช้พลังงาน	หน่วย
ก่อนดำเนินโครงการ	308,589.20	กิโลวัตต์-ชั่วโมง ต่อ ปี
หลังดำเนินโครงการ	288,123.70	กิโลวัตต์-ชั่วโมง ต่อ ปี
ผลต่าง	20,465.5 (6.632 %)	กิโลวัตต์-ชั่วโมง ต่อ ปี (%)

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาคืนทุน

	ค่าใช้จ่าย	หน่วย
การทดสอบด้วยวิธีเดิม	75,000	บาท

การทดสอบด้วยวิธีที่ส่งเข้าประกวด	10,000	บาท
ระยะเวลาคืนทุน	-	ปี

หมายเหตุ

- การเปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุนในกรณีทดสอบด้วยวิธีเดิมและวิธีวงจรสมมูลที่ศึกษาในโครงการวิจัยได้แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4
- การทดสอบด้วยวิธีวงจรสมมูลที่ศึกษาในโครงการวิจัยเป็นค่าใช้จ่ายในการเช่าเครื่องมือและบริการการทดสอบ

ตารางที่ 4.7 การคำนวณผลประโยชน์จากมอเตอร์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาของนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้น

ผลประโยชน์จากมอเตอร์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาของนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้น							ส่วนนี้เป็นพลังงานที่ลดได้จากวิธีการที่นำเสนอ
มอเตอร์	พิกัด (kW)	กำลังงานไฟฟ้าก่อนเปลี่ยน (kW)	กำลังงานไฟฟ้าหลังเปลี่ยน (kW)	จำนวนชั่วโมงทำงานต่อปี	พลังงานไฟฟ้าก่อนเปลี่ยน (หน่วย/ปี)	พลังงานไฟฟ้าก่อนเปลี่ยน (หน่วย/ปี)	พลังงานที่ใช้ในการขนย้ายและทดสอบในห้องปฏิบัติการ (หน่วย/ครั้ง)
1	3.7	1.760	1.344	6000	10560.00	8064.00	9.25
2	7.5	6.020	5.200	2740	16494.80	14248.00	18.75
3	11.0	13.450	12.197	4500	60525.00	54886.50	27.50
4	22.0	22.290	21.860	4380	97630.20	95746.80	55.00
5	37.0	20.160	18.820	6120	123379.20	115178.40	92.50
รวม					308589.20	288123.70	203.00

ตารางที่ 4.8 การคำนวณระยะเวลาคืนทุนจากมอเตอร์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาของนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้น

ผลประโยชน์จากมอเตอร์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาของนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้น						ส่วนนี้เป็นค่าใช้จ่ายที่ลดได้จากวิธีการที่นำเสนอ
มอเตอร์	พิกัด (kW)	รวมผลประโยชน์ (หน่วย)	ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย (บาท/หน่วย)	ผลประโยชน์ต่อปี (บาท/ปี)	เงินลงทุนในการเปลี่ยนมอเตอร์ (บาท)	ค่าทดสอบ (ค่าแรง ค่าขนย้าย ค่าห้องปฏิบัติการ) (บาท)
1	3.7	2505.25	4.25	10,647.31	15,000.00	10,000.00

2	7.5	2265.55	4.15	9,402.03	25,000.00	10,000.00
3	11.0	5666.00	4.05	22,947.30	35,000.00	15,000.00
4	22.0	1938.40	4.35	8,432.04	45,000.00	15,000.00
5	37.0	8293.30	4.15	34,417.20	60,000.00	25,000.00
รวม				85,845.88	180,000.00	75,000.00
ระยะเวลาคืนทุนจากวิธีการที่นำเสนอ (ปี)				2.10		
ระยะเวลาคืนทุนจากการนำมอเตอร์ไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ (ปี)				2.97		

4.4 สรุปต้นทุนในการจัดสร้างเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา

จากการที่ได้ดำเนินการจัดสร้างต้นแบบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาโดยใช้อุปกรณ์มาตรฐานที่สามารถใช้เป็นเครื่องวัดที่รับรองผลได้สามารถสรุปงบประมาณในการจัดสร้างได้ดังตารางที่ 4.9 ทั้งนี้ในการจัดสร้างโดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ออกแบบจะมีต้นทุนประมาณ 100,000.- บาท และหากใช้การจัดหาอุปกรณ์ทดแทนที่มีคุณภาพลดลงก็จะสามารถลดต้นทุนในการจัดสร้างลงได้ประมาณ 50%

ตารางที่ 4.9 ประมาณการงบประมาณในการจัดสร้างเครื่อง MEEPI

รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนางานวิจัย			อุปกรณ์ที่สามารถทดแทน	ช่วงราคา
ลำดับ	คุณสมบัติอุปกรณ์	ราคารวม		

รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนางานวิจัย			อุปกรณ์ที่สามารถทดแทน	ช่วงราคา
ลำดับ	คุณสมบัติอุปกรณ์	ราคารวม		
1	10.4" Fanless Panel PC with Intel® Celeron® N2930 Processor Industrial 10.4" TFT SVGA LED panel with 30k (min.) lifetime backlight Durable 5-wire Resistive Touch Screen System memory up to 8 GB DDR3L SDRAM onboard Embedded Intel processor, quad core Celeron® N2930 1.83GHz onboard Compact Fanless Design with solid Al Alloy enclosure True-flat with IP65 certified front panel protection E-Eye Monitoring and Protection Supports Full-size Mini PCIe Expansion Supports USB 3.0 Supports Windows Embedded and Android Supports VESA 75 Industrial grade	40,000.00	เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหรือแท็บเล็ตที่รองรับระบบปฏิบัติการ Windows ที่ไม่ใช่กลุ่ม Industrial grade ซึ่งมีราคาถูกกว่า แต่จะลดค่าความถูกต้อง ลดเสถียรภาพในการทำงาน การทนต่อสัญญาณรบกวน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อายุการทำงาน และการทนอุณหภูมิจากการวัดมอเตอร์ที่เครื่องจักรหน้างานจริง	10,000-40,000
2	Multifunction Power Meter Industrial grade ผ่านการ Calibrate - สามารถวัดค่า V(Line), V(Phase), A(Phase), kW, kVA, kVar, kWh, kVAh, kVarh, PF, Hz, kW Demand Peak Demand, THD (Harmonic) สำหรับ 1 Phase /3 Phase - สามารถตั้งค่า (PT) Ratio และ (CT) Ratio ได้ - เอาท์พุทแบบ Pulse, Analog 4-20 mA - สามารถสื่อสารผ่านพอร์ท RS485, MODBUS RTU PROTOCOL	10,000.00	Power Meter ที่ไม่ใช่กลุ่ม Industrial grade ที่สามารถวัดค่ากระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้า PF และสื่อสารผ่านพอร์ท RS485 ซึ่งมีราคาถูกกว่า แต่จะลดค่าความถูกต้อง ลดเสถียรภาพในการทำงาน การทนต่อสัญญาณรบกวน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อายุการทำงาน และการทนอุณหภูมิจากการวัดมอเตอร์ที่เครื่องจักรหน้างานจริง	5,000-10,000

รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนางานวิจัย			อุปกรณ์ที่สามารถทดแทน	ช่วงราคา
ลำดับ	คุณสมบัติอุปกรณ์	ราคารวม		
3	Flexible Current Probe Industrial grade Measurement: AC: 30A/300A/3000A Output sensitivity: AC: 100mV/10mV/1mV per Amp Accuracy: 1% of full scale Bandwidth (-3dB): 10Hz~10KHz Noise: 0-03A/0.075A/0.5A Probe cable length: 254 mm (10") or 458 mm (18") Probe cable diameter: 8.5mm (nominal) Cable length (cable to box): 1.8m (6ft) Cable length (box to output): 0.5m	16,000.00	Current sensor ที่ไม่ใช่กลุ่ม Industrial grade ย่านการวัดคงที่ ซึ่งมีราคาถูกกว่า แต่จะลดค่าความถูกต้อง ลดเสถียรภาพในการทำงาน การทนต่อสัญญาณรบกวน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อายุการทำงาน และการทนอุณหภูมิ จากการวัดมอเตอร์ที่เครื่องจักรหน้างานจริง โดยเลือกย่านการวัดเฉพาะ	5,000-16,000
4	Photoelectric Sensor Industrial grade Sensing Mode Diffuse Features Long distance sensing with pin-point beam. Cross-talk prevention for two sensors Light Source Red Laser Diode 650nm Light Source Output 3mW FDA Laser Class Class II Sensing Distance 400mm Spot Size 2mm at 400mm Repeatability 0.5mm Hysteresis 20% at 400mm Sensitivity Adjustment Potentiometer 1-turn External Input Laser Off Response Time 250μs Control Output NPN Operation Temperature -10 to +50° C Protection IP 67	3,000.00	เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบที่ไม่ใช่กลุ่ม Industrial grade หรือการวัดแบบสัมผัสที่สามารถทำได้ ซึ่งมีราคาถูกกว่าแต่จะลดค่าความถูกต้อง ลดเสถียรภาพในการทำงาน การทนต่อสัญญาณรบกวน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อายุการทำงาน และการทนอุณหภูมิ จากการวัดมอเตอร์ที่เครื่องจักรหน้างานจริง	500-3,000

รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนางานวิจัย			อุปกรณ์ที่สามารถทดแทน	ช่วงราคา
ลำดับ	คุณสมบัติอุปกรณ์	ราคารวม		
5	Digital Transmitter Industrial grade - อุปกรณ์แปลงสัญญาณทางไฟฟ้า ให้เป็นสัญญาณ อะนาล็อกมาตรฐานแบบดิจิทัล - รับอินพุตประเภท Frequency, RPM - อินพุตและเอาต์พุต แยกอิสระจากกัน (ISOLATION) - อินพุตและเอาต์พุต สามารถปรับตั้งย่าน High-Low Limit ได้ ทำให้สามารถตั้ง Range ในการแปลง สัญญาณได้ตามต้องการ - สามารถโปรแกรมเลือกสัญญาณด้านเอาต์พุตเป็น แบบ Direct หรือ Inverse ได้ - Function Peak Hold แสดงค่าสูงสุด - การติดตั้งแบบ DIN RAIL Mounting - สามารถสื่อสารกับ Computer โดยผ่านพอร์ท RS485 MODBUS RTU Protocol	8,000.00	Digital Transmitter ที่ไม่ใช่กลุ่ม Industrial grade ซึ่งมีราคาถูกกว่าแต่จะลดค่าความถูกต้อง ลดเสถียรภาพในการทำงาน การทนต่อสัญญาณรบกวน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อายุการทำงาน และการทนอุณหภูมิ จากการวัดมอเตอร์ที่เครื่องจักรหน้างานจริง	2,000-8,000
6	RS485 to USB Industrial grade • สามารถส่งสัญญาณได้ระยะไกลถึง 1.2 km. • อัตราการสื่อสาร Auto Baud Rate Max. 115.2 kbps. • มี LED แสดงสถานะการทำงานของ RS-485, RS-232, Tx, Rx • สามารถใช้ต่อพ่วงกับอุปกรณ์ (Device) ได้สูงสุด 32 ตัว	4,000.00	RS485 to USB convertor ที่ไม่ใช่กลุ่ม Industrial grade ซึ่งมีราคาถูกกว่าแต่จะลดค่าความถูกต้อง ลดเสถียรภาพในการทำงาน การทนต่อสัญญาณรบกวน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อายุการทำงาน และการทนอุณหภูมิ จากการวัดมอเตอร์ที่เครื่องจักรหน้างานจริง	500-4,000
7	Power Supply Industrial grade High efficiency, long life and high reliability Miniature size, high power density Easy installation - screw terminals Harmonic current compliance to EN 61000-3-12	3,000.00	Power Supply ที่ไม่ใช่กลุ่ม Industrial grade ซึ่งมีราคาถูกกว่าแต่จะลดค่าความถูกต้อง ลดเสถียรภาพในการทำงาน การทนต่อสัญญาณรบกวน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อายุการทำงาน และการทนอุณหภูมิ จากการวัดมอเตอร์ที่เครื่องจักรหน้างานจริง	1,000-3,000
8	Industrial grade Multi Contact Test lead, 32A, 600V, 2m, Lead Length	4,000.00		
9	Industrial grade Dolphin Clip, Brass Contact,	2,000.00		

รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนางานวิจัย			อุปกรณ์ที่สามารถทดแทน	ช่วงราคา
ลำดับ	คุณสมบัติอุปกรณ์	ราคารวม		
	32A			
12	Industrial grade shrouded blade socket,4mm	2,000.00		
10	Safety hardcase Industrial grade heavy duty polyurethane กล่องกันกระแทก กันฝุ่นกันน้ำ IP67 มีล้อลาก	5,000.00		
11	กล่องภายใน	2,000.00		
13	ขาตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ	1,000.00		
14	terminal, connector, ac plug, switch, สายไฟ, น็อต ฯลฯ	5,000.00		
	รวมงบประมาณ	105,000.00		

4.5 สรุปผลการจัดสัมมนา

คณะผู้วิจัยจาก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และจากสถาบันเทคโนโลยีจิตรลดาได้จัดกิจกรรมการประชุมระดมความคิดเห็นและเผยแพร่งานวิจัย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา ณ โรงแรมรามารการ์เด็น กรุงเทพมหานคร ในวันศุกร์ที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2562 วิทยากรคือ รศ.ถาวร อมตกิจดี รศ.ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ และผศ.เพชร นันทิวัฒนา โดยการดำเนินการมีการบรรยาย ทฤษฎีพร้อมยกตัวอย่างกรณีที่เกิดขึ้นจริงที่เป็นประสบการณ์ของวิทยากรให้ผู้เข้าร่วมอบรมได้รับความรู้ นอกจากนี้ยังให้ผู้เข้าอบรมได้ฝึกปฏิบัติทดสอบการใช้งานโปรแกรม และเครื่องมือวัดจริง เพื่อให้ความเห็นต่อผลงานการวิจัย ผู้เข้าอบรมส่วนใหญ่มีตำแหน่งหน้าที่การทำงานคือ ผู้บริหาร ผู้จัดการ วิศวกร หรือหัวหน้าช่างเทคนิค ส่วนใหญ่ไม่เคยทดลองใช้ซอฟต์แวร์ หรือเครื่องมือประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์มาก่อน

เมื่อสิ้นสุดกิจกรรมดังกล่าว ทางคณะผู้วิจัยได้ออกแบบสอบถามความคิดเห็นของผู้เข้าร่วมกิจกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงผลงานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยทำการเก็บข้อมูลผู้เข้าร่วมกิจกรรมที่ตอบแบบสอบถามทั้งสิ้น 22 คน จากจำนวนผู้เข้าร่วม 53 คน คิดเป็นร้อยละ 41.50 ของจำนวนผู้เข้าร่วมกิจกรรม การรายงานแบบสอบถามแบ่งเป็น การแสดงความถี่ เปอร์เซ็นต์ การแสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับความคิดเห็นต่อการจัดกิจกรรม สุดท้ายคือข้อเสนอแนะอื่นๆ ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้

ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป

ชื่อ-นามสกุล

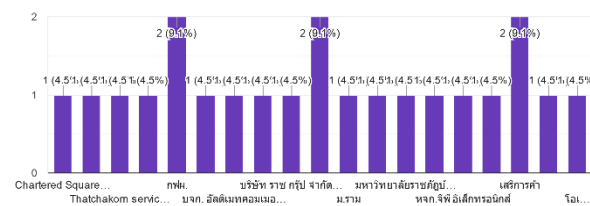
22 responses

นายอนุรักษ์ หวังดำรงวงศ์
อภิชาติ พิษิตวิริยะกุล
ยุริรัตน์ พิษิตวิริยะกุล
ยุวดี ศิริชัยวัฒนาโยธิน
พาดารัก พิษิตวิริยะกุล
อนันต์ สันชัยอนันต์
รุจน์ พัฒนเจริญ
ภูมิไผท ไผทรักษ์
มาณพ กว้างวิทยานนท์
พีร์ ชัยมงคลมณี
อัฑฒ์เมธ อัคคะทัพนาราร

พีรวัฒน์ มีสุข
ธีรวิทย์ วัญญูสกุล
อนันตชัย พูลทรัพย์
ธีรชาติ สุขเอี่ยม
กวินชัย ต้องตรงทรัพย์
ทศพร ตริประสิทธิ์
นายกำพร โตจิรัตนกุล
อำนาจ สวัสดิ์
สุชาติ จงควินิต
ยอด สุขขมมงคล
สัมพันธ์ จะยสม

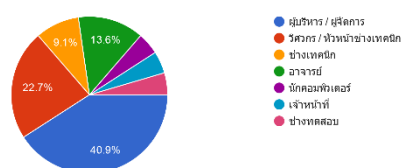
หน่วยงาน

22 responses



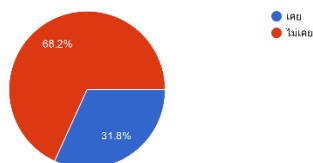
ตำแหน่ง

22 responses



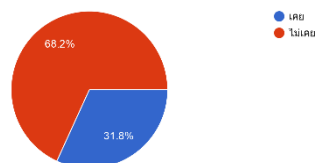
ท่านเคยทดลองใช้ "ซอฟต์แวร์" ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะทำงานจริงหรือไม่

22 responses

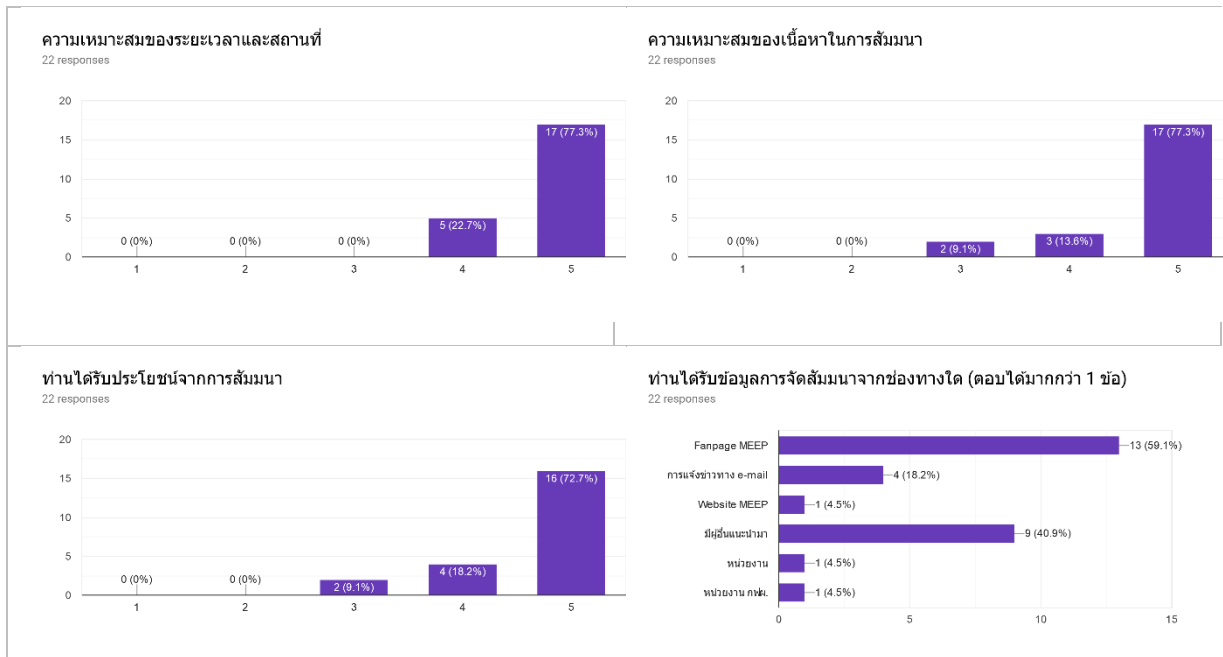


ท่านเคยทดลองใช้ "เครื่องมือวัด" ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะทำงานจริงหรือไม่

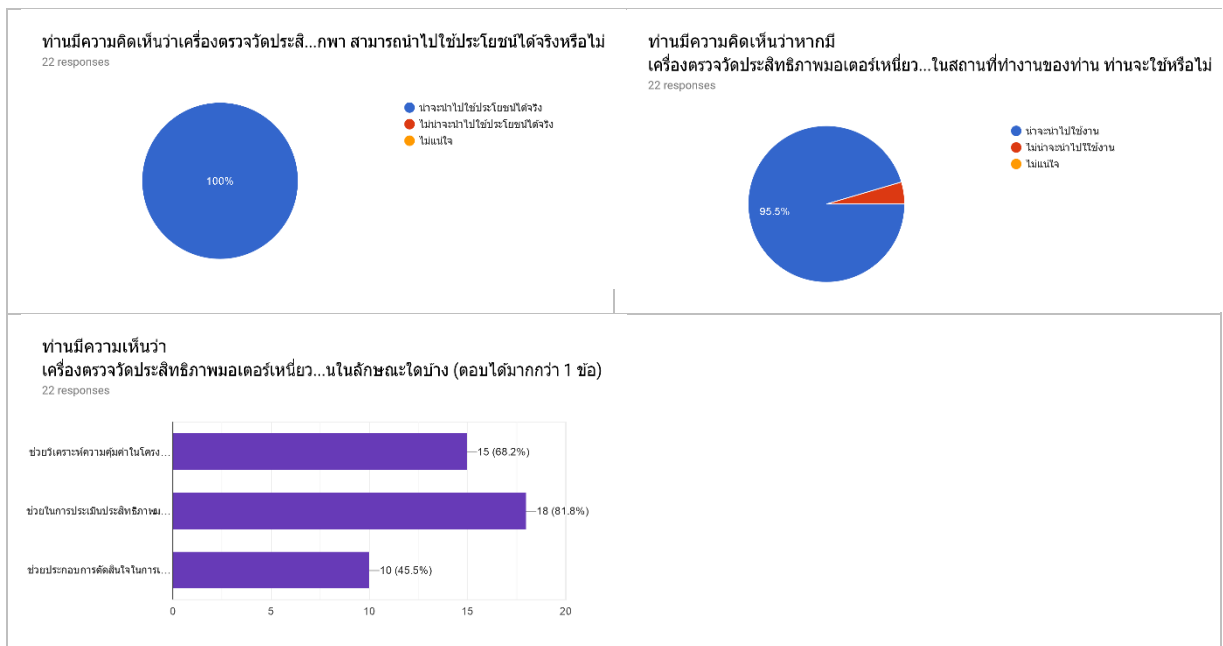
22 responses



ตอนที่ 2 เกี่ยวกับการจัดสัมมนา



ตอนที่ 3 เกี่ยวกับเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส



ผู้เข้าร่วมสัมมนาทั้งหมดมีความคิดเห็นว่าเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์ฯ น่าจะนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง มีประโยชน์ต่องานที่ทำอยู่ และส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 95 ให้ความเห็นว่าหากที่ทำงานมีเครื่องมือวัดดังกล่าว จะนำเครื่องมือวัดมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์

ข้อเสนอแนะ

- ได้รับความรู้ มองภาพโดยรวมชัดเจน เข้าใจในเนื้อหาที่มีประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน
- เข้าใจเนื้อหา ได้รับความรู้เป็นประโยชน์ต่อการทำงาน
- อธิบาย ชัดเจน เข้าใจในเนื้อหา ได้รับความรู้มากขึ้น
- ได้รับความรู้เพิ่มขึ้น การปรับใช้การทำงาน

- ขอที่ติดต่อสำหรับปรึกษาการใช้งาน
- อยากให้ทีมงาน พัฒนาเครื่องมือนี้ต่อ โดยเฉพาะ การคำนวณค่าเฉลี่ย ปสภ อัตโนมิติ, การตรวจวัดปสภ ระบบมอเตอร์ไฟฟ้า ที่ใช้ inverter
- ควรจะดำเนินโครงการต่อเพื่อให้มีAccuracyมากที่สุด และน่าจะต่อยอดให้เป็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้
- ไม่ควรให้ผู้ใช้งานตั้งค่า PSO Iteration เอง ควร Fix ค่าไว้เลย เพราะถ้าผู้ใช้งานตั้งค่าน้อยๆ แล้วกดคำนวณหลายๆครั้งค่าประสิทธิภาพจะสวิงมาก +ถึง5-7%
- โปรแกรมออฟไลน์ ไม่มีการแจ้งเตือนกรณี แรงดันต่ำหรือสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด
- ไม่มีการล็อกโปรแกรมในกรณีที่ป้อนค่าผิด เช่นกรณีใส่ค่า PF=1

สรุปค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมโครงการ

หัวข้อการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับความพึงพอใจ
1. ความเหมาะสมของระยะเวลาและสถานที่	4.77	0.42	มากที่สุด
2. ความเหมาะสมของเนื้อหาในการสัมมนา	4.68	0.65	มากที่สุด
3. ท่านได้รับประโยชน์จากการสัมมนา	4.64	0.66	มากที่สุด
คิดค่าเฉลี่ยรวม	4.69	0.58	มากที่สุด

ผลการวิเคราะห์ระดับความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมโครงการ ผู้เข้าร่วมมีความพึงพอใจในระดับมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของทุกหัวข้อคือ 4.69

ภาพบรรยากาศกิจกรรมการสัมมนาเผยแพร่ผลลัพธ์โครงการวิจัย

การพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา

สนับสนุนโดย ชุดโครงการร่วมสนับสนุนทุนวิจัย กฟผ.-สกว.

วันที่ 30 สิงหาคม พ.ศ. 2562 ณ โรงแรมรามาร์คเด้น กรุงเทพมหานคร







บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้ทำวิจัยและพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส ในสภาวะการทำงานจริงโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพา โดยใช้วิธีการที่ได้พัฒนาและทดสอบกับมอเตอร์จริงในโครงการ RDG57D0004 และ RDG59D0010 ซึ่งได้พัฒนาซอฟต์แวร์ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสจากการตรวจวัดค่าตัวแปรที่ไม่รบกวนการทำงานของมอเตอร์ที่ใช้งานอยู่ โดยโครงการวิจัยนี้จะนำซอฟต์แวร์ดังกล่าวมาพัฒนาร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดและหน่วยประมวลผลที่มีหน้าจอแสดงผลที่เครื่องตรวจวัดแทนการบันทึกข้อมูลสำหรับซอฟต์แวร์ ทำให้สามารถใช้งานได้สะดวกมากขึ้น ขอบเขตหลักของโครงการนี้ประกอบด้วยการพัฒนาซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพให้สามารถประมวลผลบนหน่วยประมวลผลที่เชื่อมต่อกับชุดตรวจวัดและแสดงผลแบบสัมผัสได้และพัฒนาชุดตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าและชุดเชื่อมต่อสัญญาณกับหน่วยประมวลผลที่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังงานไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์โดยไม่ต้องปลดโหลด โดยต้นแบบที่พัฒนาขึ้นจะทดสอบกับมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส โดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพานี้จะเป็นประโยชน์ในการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ ให้มีความชัดเจนและเป็นแนวทางที่เป็นที่ยอมรับในการคำนวณ

โดยผลการดำเนินงานโครงการได้บรรลุเป้าหมายทำการพัฒนาเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาโดยใช้กระบวนการคำนวณที่ได้พัฒนาขึ้น โดยสามารถใช้เป็นเครื่องมือตรวจวิเคราะห์ที่สามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่ใช้งานได้ตรงจากหน้าจอของเครื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ให้มีความชัดเจนและเป็นแนวทางที่เป็นที่ยอมรับในการคำนวณที่มีความสะดวกมากขึ้นและเป็น การลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศวัตถุประสงค์ของโครงการประกอบด้วย

ผลลัพธ์การทดสอบเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาพบว่าสามารถส่งผ่านสัญญาณจากเซนเซอร์ไปยังหน่วยประมวลผลได้ตรงกับตัวอุปกรณ์วัดที่มีความแม่นยำระดับอุตสาหกรรมและสามารถประมวลผลผลลัพธ์ค่าประสิทธิภาพได้ตรงกับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในโครงการ RDG57D0004 โดยตัวเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะเป็นกระเป๋าล้อลากที่สามารถเคลื่อนย้ายไปยังใช้งานได้สะดวก และจากการทดสอบการประเมินประสิทธิภาพกับข้อมูลการทดสอบมอเตอร์จากโครงการ RDG57D0004 และมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการพบว่าวิธีการที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ในเครื่องตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นให้ผลลัพธ์ที่มีแม่นยำกว่าวิธีการกระแสและวิธีการค่าไกล

นอกจากนี้โครงการวิจัยยังได้จัดสัมมนาเผยแพร่ผลลัพธ์โครงการและรับฟังความคิดเห็นจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และได้นำผลลัพธ์และข้อเสนอแนะจากการจัดสัมมนาและการทดสอบมาปรับปรุงเครื่องตรวจวัดประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสโดยไม่รบกวนการทำงานแบบพกพาให้สามารถใช้ในการตรวจประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ใช้งานได้จริงและมีความแม่นยำตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยยังได้มีการขยายผลการใช้งานซอฟต์แวร์ประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะการทำงานจริงที่พัฒนาขึ้นโดยมีผู้เข้าร่วมการสัมมนาส่วนใหญ่เป็นวิศวกรจากภาครัฐและเอกชน และมีความเห็นว่าซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะช่วยในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์สำหรับการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ ช่วยประกอบการตัดสินใจในการเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ และช่วยวิเคราะห์ความคุ้มค่าในโครงการการเปลี่ยนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงได้ นอกจากนี้ยังเสนอให้มีการส่งเสริมให้มีซอฟต์แวร์การจัดการมอเตอร์ใน

อุตสาหกรรมแบบนี้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากผลการดำเนินการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการประเมินประสิทธิภาพด้วยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ลักษณะตามมาตรฐานได้มีความแม่นยำมากพอสำหรับการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ และมีประโยชน์ต่อการจัดทำมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของมอเตอร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, *IEEE Standard 112-2004*, Nov. 2004.
- [2] International Standard, Rotating Electrical Machines, *IEC60034*, 1999.
- [3] J. S. Hsu, J. D. Kueck, M. Olszewski, D. A. Casada, P. J. Otaduy, and L. M. Tolbert, "Comparison of Induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods," *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 34, issue:1, pp. 117-125, Jan./Feb. 1998.
- [4] Bin Lu, Student Member, Thomas G. Habetler, and Ronald G. Harley, "A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors," *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 42, No. 4, JULY/AUGUST, pp. 924-932, 2006.
- [5] U.S. Department of Energy, "Determining Electric Motor Load and Efficiency," Motor Challenge, DOE/GO-10097-517.
- [6] K. S. Huang, Q. H. Wu, and D. R. Turner, "Effective Identification of Induction Motor Parameters Based on Fewer Measurements," *IEEE Transactions on Energy Conv.*, Vol. 17, No. 1, pp. 55-60, Mar. 2002.
- [7] Gastli, "Identification of Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Using the Single phase Test," *IEEE Transactions on Energy Conv.*, Vol. 14, No. 1, pp. 51-56, Mar. 1999.
- [8] J. S. Hsu, and B. P. Scoggins, "Field Test of Motor Efficiency and Load Changes Through Air-gap Torque," *IEEE Transactions on Energy Conv.*, Vol. 10, No. 3, pp. 471-477, Sep. 1995.
- [9] S. I. MOON and A. KEYANY, "Estimation of induction machine parameters from standstill time-domain data," *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 30, No. 6, pp. 1609-1615, 1994.
- [10] J. D. Kueck, "Development of a method for estimating motor efficiency and analyzing motor condition," in *Proc. IEEE Pulp and Paper Ind. Tech. Conf.*, pp. 67-72, Jun. 1998.
- [11] Wallance, A. Von Jouanne, E. Wiedenbrug, E. Matheson, and J. Douglass, "A laboratory assessment of in-service and non-intrusive motor efficiency testing methods," *Electr. Power Compon. Syst.*, Vol. 29, No. 6, pp. 517-529, Jun. 2001.
- [12] D. E. BORGARD, G. OLSSON, and R. D. LORENZ, "Accuracy issues for parameter estimation of field oriented induction machine drives," *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 31, No. 4, pp. 795-801, 1995.
- [13] J. R. Holmquist, J. A. Rooks, and M. E. Richter, "Practical approach for determining motor efficiency in the field using calculated and measured values," *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 40, No. 1, pp. 242-248, Jan./Feb. 2004.
- [14] J. D. Kueck, M. Olszewski, D. A. Casada, J. Hsu, P. J. Otaduy, and L. M. Tolbert, "Assessment of methods for estimating motor efficiency and load under field

- conditions,” Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Laboratory Rep. ORNL/ TM-13165, 1996.
- [15] Mayank Pratap Singh, “Parameter Estimation of Three Phase Induction Motor: An Innovative Approach”, Ph.D. Synopsis in the area of Electrical Machines., Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Dayalbagh Educational Institute, 2013.
 - [16] F. Alonge, F. D’Ippolito, G. Ferrante and F.M. Raimondi, “Parameter Identification of Induction Motor Model Using Genetic Algorithms,” *IEE Proc.,Control Theory Appl.*, Vol. 145, No. 6, pp. 587-593, Nov. 1998.
 - [17] I. Kostov, V. Spasov and V. Rangelova, “Application of Genetic Algorithms for Determining the Parameters of Induction Motors,” *Technical Gazette*, Vol. 16, No. 2, pp. 49-53, 2009.
 - [18] T. Phumiphak and C. Chat-uthai, “Estimation of Induction Motor Parameters Based on Field Test Coupled with Genetic Algorithm,” in *Proc. IEEE Power System Technology. PowerCon.*, Vol.2, pp. 1199–1203, 2002.
 - [19] Hassan Farhan and et al., “Investigation of Induction Motor Parameter Identification Using Particle Swarm Optimization-Based RBF Neural Network (PSO-RBFNN),” *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 6(19), pp. 4564-4570, Sep. 2011.
 - [20] S. A. Ethni and et al., “Comparison of Particle Swarm and Simulated Annealing Algorithms for Induction Motor Fault Identification,” in *Proc. IEEE Industrial Informatics. INDIN International Conference.*, pp. 470–474, Jun. 2009.
 - [21] Hassan M. Emara, Wesam Elshamy and A. Bahgat, “Parameter identification of induction motor using modified Particle Swarm Optimization algorithm,” in *Proc. IEEE Industrial Electronics. ISIE International Symposium.*, pp. 841–847, Jun. 2008.
 - [22] C. Picardi and N. Rogano, “Parameter Identification of Induction Motor Based on Particle Swarm Optimization,” in *Proc. IEEE Power Electronic, Electrical Drives, Automation and Motion. SPEEDAM International Symposium.*, pp. 968–973, May. 2006.
 - [23] V.P. Sakthivel, R. Bhuvaneswari and S. Subramanian, “An Improved Particle Swarm Optimization for Induction Motor Parameter Determination,” *International Journal of Computer Application*, Vol. 1, No. 2, pp. 62-67, 2010.
 - [24] N. Supakit, “Evolutionary Computation Between Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization,” *Journal of Information Science and Technology*, Vol. 2, No.2, Jul.-Dec. 2011.
 - [25] Motors and Generators, NEMA MG1-2003 Standard, 2003.
 - [26] “In-plant electric motor loading and efficiency techniques,” Ontario Hydro, Toronto, ON, Canada, Market Literature.
 - [27] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน สถานการณ์พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทย มกราคม-มิถุนายน 2560 เข้าถึงได้ที่ www.dede.go.th

- [28] สถาบันพลังงานเพื่ออุตสาหกรรม สมาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย คู่มือการขึ้นทะเบียนเป็นบริษัทจัดการพลังงาน 2558
- [29] องค์การภาคีด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม การอนุรักษ์พลังงานของมอเตอร์ เข้าถึงได้ที่ www.ienergyguru.com
- [30] Manoharan SUBRAMANIAN, Ananthi KALIYAMOORTHYA, “Review On Efficiency Of Energy Efficient Motor Standards,” *Journal of Electrical Engineering*.
- [31] Ed. 1: Rotating Electrical Machines—Part 30: Efficiency Classes of Single-Speed, Three-Phase, Cage-Induction Motors (IE-Code), IEC Std. 60034-30, 2008.
- [32] Anbal T. de Almeida, Fernando J. T. E. Ferreira and Joao A.C. Fong., “Standards for Super- Premium Efficiency Class for Electric Motors,” *Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference - Conference Record 2009 IEEE*, Calgary, AB, Canada, 3-7 May 2009.
- [33] Anibal T. De Almeida and Fernando J. T. E. Ferreira., “Technical and Economical Considerations on Super High-Efficiency Three-Phase Motors,” *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 50, No. 2, Mar./Apr. 2014.
- [34] Daniel Liang, “High efficiency motors: Standards and Solutions,” International Copper Association, 7th Oct. 2015.
- [35] ABB Technical note, “IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors”.
- [36] Conrad U. Brunner, Chris Evans, Rita Werle, “Standard Format for IEC Standards - Learning from motor standards for other electric equipment,” Electric Systems Motor Forum.
- [37] Schleicher, M., & Blasinger, F., “Digital Interfaces and Bus Systems for Communication Practical Fundamentals,” 3rd., M.K. Juchheim GmbH & Co, Fulda, 2001.
- [38] Modbus, I. D. A., “Modbus application protocol specification v1. 1a. North Grafton,” Massachusetts, 2004.
- [39] Modicon, I., “Modicon modbus protocol reference guide. North Andover,” Massachusetts, 28-29, 1996.
- [40] Automation, S., “MODBUS over serial line–Specification and Implementation guide. V.,” Modbus Organization, Inc., 2002.
- [41] http://195.134.76.37/applets/AppletSmooth/Apppl_Smooth2.html
- [42] <https://terpconnect.umd.edu/~toh/spectrum/Smoothing.html>

ภาคผนวก

ผลการทดสอบมอเตอร์ในห่อปฏิบัติการด้วยวิธีที่นำเสนอจากโครงการ การพัฒนารูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะทำงานจริงสำหรับการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงาน (RDG57D0004)

และ

ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ใช้งานจริงด้วยวิธีที่นำเสนอจากโครงการ การประเมินผลการประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะทำงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม (RDG59D0010)

ผลการทดสอบมอเตอร์ในห่อปฏิบัติการด้วยวิธีที่นำเสนอจากโครงการ การพัฒนารูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะทำงานจริงสำหรับการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงาน (RDG57D0004)

จากการทดสอบวิธีการคำนวณกับมอเตอร์ที่ได้ทดสอบในห้องปฏิบัติการที่สภาวะการทำงานตั้งแต่ 10 – 100 % ประกอบด้วย

1. มอเตอร์ขนาด 1.5 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่ มอเตอร์ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี และมอเตอร์ที่ผ่านการซ่อมบำรุงโดยพันขดลวดใหม่ รวม 3 ตัว
2. มอเตอร์ขนาด 10 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่ มอเตอร์ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี และมอเตอร์ที่ผ่านการซ่อมบำรุงโดยพันขดลวดใหม่ รวม 3 ตัว
3. มอเตอร์ขนาด 30 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่ มอเตอร์ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี และมอเตอร์ที่ผ่านการซ่อมบำรุงโดยพันขดลวดใหม่ รวม 3 ตัว

ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

ตารางที่ A1 ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับ การทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ขนาด 1.5 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่

Load	Input	Output	Test Efficiency	Current Method		Slip Method		PSO Method (Proposed)	
(%)	(kW)	(kW)	(%)	Efficiency	Error	Efficiency	Error	Efficiency	Error
				(%)	(% point)	(%)	(% point)	(%)	(% point)
10.00	0.33	0.23	71.00	255.35	184.35	51.95	19.05	93.69	22.69
20.00	0.40	0.31	78.00	213.97	135.97	53.57	24.43	93.31	15.31
30.00	0.55	0.44	79.20	162.83	83.63	54.55	24.65	90.64	11.44
40.00	0.80	0.67	83.20	123.53	40.33	56.25	26.95	86.61	3.41
50.00	0.85	0.73	85.50	117.82	32.32	60.50	25.00	85.36	0.14
60.00	1.07	0.92	86.30	103.90	17.60	60.08	26.22	88.16	1.86
70.00	1.25	1.07	85.80	95.29	9.49	63.43	22.37	85.50	0.30
80.00	1.39	1.19	85.80	91.09	5.29	61.66	24.14	86.53	0.73
90.00	1.59	1.39	87.10	86.57	0.53	61.99	25.11	87.04	0.06
100.00	1.77	1.52	85.60	84.00	1.60	64.16	21.44	85.33	0.27
Root Mean Square Error (Total) =					25.01		7.60		2.99
Root Mean Square Error (< 50% Load) =					61.79		11.97		7.47
Root Mean Square Error ($\geq$ 50% Load) =					6.40		9.84		0.34

ตารางที่ A2 ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับ การทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ ขนาด 1.5 kW ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี

Load	Input	Output	Test Efficiency	Current Method		Slip Method		PSO Method (Proposed)	
(%)	(kW)	(kW)	(%)	Efficiency	Error	Efficiency	Error	Efficiency	Error
				(%)	(% point)	(%)	(% point)	(%)	(% point)
10.00	0.33	0.20	61.38	13.53	47.85	233.10	171.72	91.64	30.26
20.00	0.43	0.31	72.33	20.73	51.60	182.80	110.47	90.91	18.58
30.00	0.62	0.51	82.21	34.00	48.21	135.26	53.05	84.77	2.56
40.00	0.76	0.63	82.93	42.00	40.93	117.25	34.32	84.70	1.77
50.00	0.91	0.75	82.44	50.00	32.44	102.75	20.31	86.53	4.09
60.00	1.12	0.93	82.81	61.87	20.94	92.09	9.28	83.12	0.31
70.00	1.23	1.04	84.89	69.60	15.29	89.54	4.65	82.24	2.65
80.00	1.40	1.18	83.96	78.33	5.63	85.57	1.61	81.58	2.38
90.00	1.58	1.32	83.29	87.73	4.44	81.94	1.35	77.62	5.67
100.00	1.81	1.48	81.87	98.80	16.93	79.22	2.65	74.51	7.36
	Root Mean Square Error (Total) =				10.49		21.50		3.72
	Root Mean Square Error (< 50% Load) =				23.65		53.43		8.91
	Root Mean Square Error ($\geq$ 50% Load) =				7.57		3.84		1.79

ตารางที่ A3 ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับ การทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ ขนาด 1.5 kW ที่ผ่านการซ่อมบำรุงโดยพันขดลวดใหม่

Load	Input	Output	Test Efficiency	Current Method		Slip Method		PSO Method (Proposed)	
(%)	(kW)	(kW)	(%)	Efficiency	Error	Efficiency	Error	Efficiency	Error
				(%)	(% point)	(%)	(% point)	(%)	(% point)
10.00	0.38	0.20	53.38	199.56	146.18	49.34	4.04	93.16	39.78
20.00	0.50	0.33	65.31	156.67	91.36	56.25	9.06	90.80	25.49
30.00	0.69	0.50	71.83	121.38	49.55	57.07	14.76	90.23	18.40
40.00	0.82	0.63	77.07	108.23	31.16	64.02	13.05	84.62	7.55
50.00	0.97	0.77	79.08	97.94	18.86	67.65	11.43	81.95	2.87
60.00	1.12	0.90	80.49	91.52	11.03	68.64	11.85	81.66	1.17
70.00	1.34	1.09	81.53	84.58	3.05	71.36	10.17	81.63	0.10
80.00	1.48	1.21	81.62	81.64	0.02	73.48	8.14	82.72	1.10
90.00	1.69	1.36	80.75	79.14	1.61	75.44	5.31	81.17	0.42
100.00	1.89	1.48	78.17	74.29	3.88	74.40	3.77	77.38	0.79
	Root Mean Square Error (Total) =				18.34		3.11		5.14
	Root Mean Square Error (< 50% Load) =				45.51		5.51		12.82
	Root Mean Square Error ($\geq$ 50% Load) =				3.74		3.66		0.57

ตารางที่ A4 ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับ การทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ ขนาด 11 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่

Load	Input	Output	Test Efficiency	Current Method		Slip Method		PSO Method (Proposed)	
(%)	(kW)	(kW)	(%)	Efficiency	Error	Efficiency	Error	Efficiency	Error
				(%)	(% point)	(%)	(% point)	(%)	(% point)
10.00	1.95	1.06	54.53	269.98	215.45	56.41	1.88	81.84	27.31
20.00	3.16	2.25	71.10	171.41	100.31	69.62	1.48	88.13	17.03
30.00	4.68	3.68	78.61	131.96	53.35	70.51	8.10	90.83	12.22
40.00	5.62	4.65	82.88	118.90	36.02	83.19	0.31	88.31	5.43
50.00	6.69	5.70	85.32	110.47	25.15	78.10	7.22	88.12	2.80
60.00	7.83	6.92	88.44	104.73	16.29	80.78	7.66	88.02	0.42
70.00	8.63	7.70	89.15	101.48	12.33	92.41	3.26	88.21	0.94
80.00	9.95	9.08	91.29	99.21	7.92	85.68	5.61	89.64	1.65
90.00	10.34	9.44	91.38	98.89	7.51	85.11	6.27	90.20	1.18
100.00	12.20	11.15	91.45	96.68	5.23	81.15	10.30	88.96	2.49
	Root Mean Square Error (Total) =				24.86		1.92		3.51
	Root Mean Square Error (< 50% Load) =				61.55		2.11		8.71
	Root Mean Square Error ($\geq$ 50% Load) =				5.77		2.88		0.73

ตารางที่ A5 ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับ การทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ ขนาด 11 kW ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี

Load	Input	Output	Test Efficiency	Current Method		Slip Method		PSO Method (Proposed)	
(%)	(kW)	(kW)	(%)	Efficiency	Error	Efficiency	Error	Efficiency	Error
				(%)	(% point)	(%)	(% point)	(%)	(% point)
10.00	2.06	1.25	60.70	203.54	142.84	53.40	7.30	84.11	23.41
20.00	3.14	2.19	69.74	147.82	78.08	61.31	8.43	89.60	19.86
30.00	4.12	3.12	75.87	122.12	46.25	73.42	2.45	91.18	15.31
40.00	5.58	4.50	80.75	104.31	23.56	78.85	1.90	88.97	8.22
50.00	6.96	5.74	82.38	97.10	14.72	75.07	7.31	87.66	5.28
60.00	7.96	6.65	83.55	94.25	10.70	79.46	4.09	87.07	3.52
70.00	8.84	7.57	85.58	93.86	8.28	74.66	10.92	87.39	1.81
80.00	10.06	8.60	85.47	91.74	6.27	87.48	2.01	87.15	1.68
90.00	11.65	9.97	85.55	91.46	5.91	82.62	2.93	88.00	2.45
100.00	12.88	11.01	85.49	91.26	5.77	83.27	2.22	88.50	3.01
	Root Mean Square Error (Total) =				17.23		1.85		3.61
	Root Mean Square Error (< 50% Load) =				42.72		2.89		8.82
	Root Mean Square Error ($\geq$ 50% Load) =				3.75		2.40		1.31

ตารางที่ A6 ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับ การทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ ขนาด 11 kW ที่ผ่านการซ่อมบำรุงโดยพันขดลวดใหม่

Load	Input	Output	Test Efficiency	Current Method		Slip Method		PSO Method (Proposed)	
(%)	(kW)	(kW)	(%)	Efficiency	Error	Efficiency	Error	Efficiency	Error
				(%)	(% point)	(%)	(% point)	(%)	(% point)
10.00	1.98	1.10	55.27	286.42	231.15	33.33	21.94	82.78	27.51
20.00	3.18	2.19	68.76	181.41	112.65	48.43	20.33	90.00	21.24
30.00	4.15	3.28	78.84	144.90	66.06	53.01	25.83	91.22	12.38
40.00	5.63	4.66	82.85	117.23	34.38	54.71	28.14	90.53	7.68
50.00	6.36	5.44	85.46	112.23	26.77	55.35	30.11	90.29	4.83
60.00	7.58	6.51	85.81	101.91	16.10	58.05	27.76	87.21	1.40
70.00	8.64	7.42	85.80	98.46	12.66	61.11	24.69	87.59	1.79
80.00	10.76	9.24	85.93	91.78	5.85	67.47	18.46	87.39	1.46
90.00	11.42	9.80	85.83	92.04	6.21	71.28	14.55	87.06	1.23
100.00	12.85	11.00	85.60	89.03	3.43	68.48	17.12	88.48	2.88
	Root Mean Square Error (Total) =				27.00		7.41		3.82
	Root Mean Square Error (< 50% Load) =				66.93		12.13		9.42
	Root Mean Square Error ($\geq$ 50% Load) =				5.82		9.33		1.06

ตารางที่ A7 ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์
ขนาด 30 kW ที่เป็นมอเตอร์ใหม่

Load	Input	Output	Test Efficiency	Current Method		Slip Method		PSO Method (Proposed)	
(%)	(kW)	(kW)	(%)	Efficiency	Error	Efficiency	Error	Efficiency	Error
				(%)	(% point)	(%)	(% point)	(%)	(% point)
10.00	4.87	3.07	63.13	249.96	186.83	61.66	1.47	58.51	4.62
20.00	7.12	6.18	86.87	182.11	95.24	56.19	30.68	71.09	15.78
30.00	10.44	9.09	87.11	140.09	52.98	67.05	20.06	80.10	7.01
40.00	13.90	12.21	87.83	123.68	35.85	57.54	30.29	84.51	3.32
50.00	16.04	14.34	89.37	116.53	27.16	68.56	20.81	86.84	2.53
60.00	18.63	16.79	90.10	113.30	23.20	80.52	9.58	88.16	1.94
70.00	23.89	21.56	90.27	104.52	14.25	75.36	14.91	89.74	0.53
80.00	26.13	23.56	90.18	97.81	7.63	72.72	17.46	89.53	0.65
90.00	29.31	26.49	90.38	93.95	3.57	68.24	22.14	90.45	0.07
100.00	32.67	29.59	90.56	93.13	2.57	61.21	29.35	91.04	0.48
	Root Mean Square Error (Total) =				22.28		6.83		1.85
	Root Mean Square Error (< 50% Load) =				54.81		11.89		4.55
	Root Mean Square Error ($\geq$ 50% Load) =				6.58		8.17		0.56

ตารางที่ A8 ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์
ขนาด 30 kW ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี

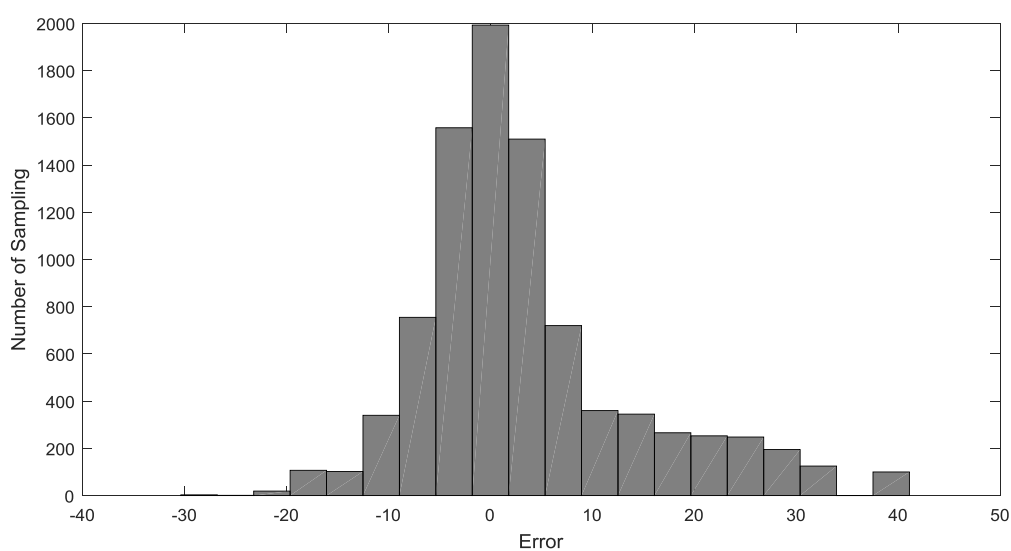
Load	Input	Output	Test Efficiency	Current Method		Slip Method		PSO Method (Proposed)	
(%)	(kW)	(kW)	(%)	Efficiency	Error	Efficiency	Error	Efficiency	Error
				(%)	(% point)	(%)	(% point)	(%)	(% point)
10.00	4.63	3.09	66.69	201.91	135.22	64.79	1.90	54.94	11.75
20.00	7.83	6.19	79.11	135.58	56.47	76.63	2.48	73.56	5.55
30.00	10.02	8.83	88.14	127.56	39.42	79.84	8.30	79.36	8.78
40.00	13.34	11.85	88.85	116.40	27.55	74.96	13.89	84.22	4.63
50.00	16.53	14.79	89.51	106.72	17.21	72.60	16.91	86.59	2.92
60.00	19.90	17.89	89.89	109.08	19.19	70.35	19.54	88.91	0.98
70.00	24.28	21.82	89.89	97.02	7.13	86.49	3.40	89.45	0.44
80.00	26.84	24.13	89.90	96.82	6.92	81.97	7.93	89.86	0.04
90.00	29.83	26.74	89.63	94.20	4.57	77.10	12.53	90.04	0.41
100.00	32.59	29.35	90.06	93.03	2.97	73.64	16.42	90.92	0.86
	Root Mean Square Error (Total) =				15.68		3.80		1.67
	Root Mean Square Error (< 50% Load) =				38.56		4.12		4.09
	Root Mean Square Error ($\geq$ 50% Load) =				4.69		5.70		0.54

ตารางที่ A9 ผลการทดสอบแต่ละวิธีเปรียบเทียบกับทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการของมอเตอร์ขนาด 30 kW ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี

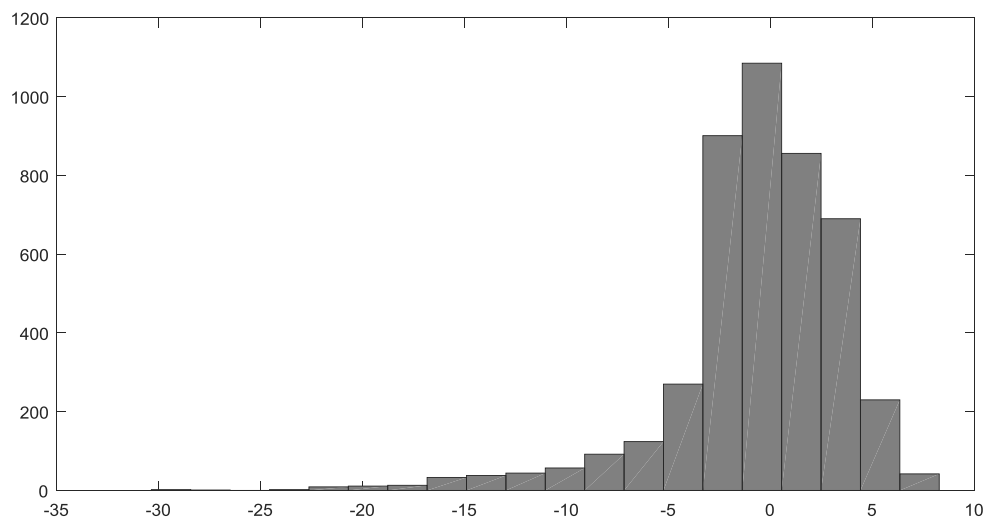
Load	Input	Output	Test Efficiency	Current Method		Slip Method		PSO Method (Proposed)	
(%)	(kW)	(kW)	(%)	Efficiency	Error	Efficiency	Error	Efficiency	Error
				(%)	(% point)	(%)	(% point)	(%)	(% point)
10.00	5.02	3.27	65.19	205.49	140.30	79.68	14.49	60.16	5.03
20.00	7.64	6.22	81.41	145.36	63.95	91.62	10.21	72.13	9.28
30.00	11.10	9.67	87.07	121.38	34.31	90.09	3.02	81.12	5.95
40.00	13.27	11.68	88.06	117.80	29.74	82.89	5.17	83.68	4.38
50.00	16.42	14.63	89.08	113.79	24.71	79.17	9.91	86.14	2.94
60.00	20.17	18.16	90.02	109.07	19.05	84.28	5.74	88.05	1.97
70.00	24.15	22.07	91.43	100.03	8.60	103.52	12.09	89.50	1.93
80.00	25.51	23.30	91.31	99.24	7.93	101.92	10.61	89.60	1.71
90.00	29.35	26.83	91.39	98.09	6.70	91.99	0.60	90.91	0.48
100.00	32.22	29.43	91.30	96.05	4.75	86.90	4.40	91.20	0.10
	Root Mean Square Error (Total) =				16.44		2.76		1.36
	Root Mean Square Error (< 50% Load) =				40.18		4.68		3.22
	Root Mean Square Error ($\geq$ 50% Load) =				5.72		3.37		0.73

ตารางที่ A10 ค่าเฉลี่ยรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเป็นจุดเปอร์เซ็นต์ (%point) จากผลการทดสอบแต่ละวิธี

Condition	Overall Root Mean Square of Mismatch to Shaft Torque Method		
	Current Method	Slip Method	PSO Method (Proposed)
Root Mean Square Error (Total) =	7.053	1.680	1.096
Root Mean Square Error (< 50% Load) =	17.439	2.712	2.698
Root Mean Square Error (> 50% Load) =	1.738	2.139	0.317



ภาพที่ A1 ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดของผลลัพธ์จากการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ ด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด



ภาพที่ A2 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์จากการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์
ด้วยวิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด

ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ใช้งานจริงด้วยวิธีที่นำเสนอจากโครงการ การประเมินผลการประยุกต์ใช้
ซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสที่สภาวะทำงานจริงในโรงงาน
อุตสาหกรรม (RDG59D0010)

ตารางที่ B1 มอเตอร์ได้รับการคัดเลือกเข้าศึกษาความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนใหม่

ลำดับที่	ขนาดมอเตอร์ (กิโลวัตต์)	แรงดันพิกัด (โวลต์)	อายุมอเตอร์ (ปี)	ชั่วโมงการใช้งาน (ชั่วโมง)	หมายเหตุ
1	3.7	380	15	7500	-
2	7.5	380	34	2740	-
3	11	400	15	4500	ผ่านการพัน
4	22	380	25	4380	-
5	37	400	14	6120	-

ตารางที่ B2 คุณสมบัติของมอเตอร์ขนาด 3.7 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

คุณสมบัติของมอเตอร์ก่อนเปลี่ยน			คุณสมบัติของมอเตอร์หลังเปลี่ยน		
พิกัดกำลัง	3.7	kW	พิกัดกำลัง	4	kW
พิกัดแรงดัน	380	V	พิกัดแรงดัน	380	V
พิกัดกระแส	9.4	A	พิกัดกระแส	8.8	A
ตัวประกอบกำลัง	ไม่สามารถอ่านค่าได้	Lagging	ตัวประกอบกำลัง	0.76	Lagging
ความเร็วรอบที่พิกัด	ไม่สามารถอ่านค่าได้	rpm	ความเร็วรอบที่พิกัด	960	rpm
ประสิทธิภาพ	N.A.	%	ประสิทธิภาพ	90.87	%

ตารางที่ B3 สรุปผลการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 3.7 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

ผลการตรวจวัดก่อนเปลี่ยน	ผลการตรวจวัดหลังเปลี่ยน
-------------------------	-------------------------

แรงดันเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	381.587	V	แรงดันเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	384.420	V
กระแสเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	6.367	A	กระแสเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	4.508	A
ความเร็วรอบ	990	rpm	ความเร็วรอบ	997	rpm
กำลังไฟฟ้าปรากฏเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	4.210	kVA	กำลังไฟฟ้าปรากฏเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	3.003	kVA
กำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	1.761	kW	กำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	1.344	kW
กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	3.824	kVAR	กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	2.686	kVAR

ตารางที่ B4 ผลประหยัดจากการประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับผลประหยัดจริงที่ทำการตรวจวัด

	วิธีค่าโกล	วิธีกระแส	วิธีวงจรสมมูล
พิกัดมอเตอร์ (kW)	3.7	3.7	3.7
กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ (kW)	1.76	1.76	1.76
ประสิทธิภาพมอเตอร์เก่าจากการประเมิน (%)	N.A.	142.91	81.51
กำลังงานกลขาออกจากการประเมิน (kW)	N.A.	2.516	1.435
ประสิทธิภาพมอเตอร์ใหม่จากแผ่นป้าย (%)	90.86	90.86	90.86
ประเมินกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใหม่จะใช้ (kW)	N.A.	2.769	1.579
ประเมินกำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (kW)	N.A.	-1.009	0.181
กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใหม่ใช้จริงโดยเฉลี่ย (kW)	1.344	1.344	1.344
กำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้จริงโดยเฉลี่ย (kW)	0.417	0.417	0.417
ความคลาดเคลื่อนของผลประหยัดเปรียบเทียบกับการตรวจวัดจริง (kW)	N.A.	-1.425	-0.235
ความคลาดเคลื่อนของผลประหยัดเปรียบเทียบกับการตรวจวัดจริงเมื่อคิดเป็นร้อยละของพิกัดมอเตอร์	N.A.	38.516	6.360

ตารางที่ B5 คุณสมบัติของมอเตอร์ขนาด 7.5 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

คุณสมบัติของมอเตอร์ก่อนเปลี่ยน			คุณสมบัติของมอเตอร์หลังเปลี่ยน		
พิกัดกำลัง	7.5	kW	พิกัดกำลัง	7.5	kW
พิกัดแรงดัน	380	V	พิกัดแรงดัน	380	V
พิกัดกระแส	15.5	A	พิกัดกระแส	15.5	A
ตัวประกอบกำลัง	0.9	Lagging	ตัวประกอบกำลัง	0.9	Lagging
ความเร็วรอบที่พิกัด	2900	rpm	ความเร็วรอบที่พิกัด	2900	rpm
ประสิทธิภาพ	81.69	%	ประสิทธิภาพ	81.69	%

ตารางที่ B6 สรุปผลการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 11 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

ผลการตรวจวัดก่อนเปลี่ยน			ผลการตรวจวัดหลังเปลี่ยน		
แรงดันเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	378.37	V	แรงดันเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	380.22	V
กระแสเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	10.52	A	กระแสเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	7.81	A
ความเร็วรอบ	2956	rpm	ความเร็วรอบ	2956	rpm
กำลังไฟฟ้าปรากฏเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	6.89	kVA	กำลังไฟฟ้าปรากฏเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	5.15	kVA
กำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	6.02	kW	กำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	5.20	kW
กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	3.36	kVAR	กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	3.36	kVAR

ตารางที่ B7 ผลประหยัดจากการประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับผลประหยัดจริงที่ทำการตรวจวัด

	วิธีค่าไกล	วิธีกระแส	วิธีวงจรสมมูล
พิกัดมอเตอร์ (kW)	7.5	7.5	7.5
กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ (kW)	6.02	6.02	6.02
ประสิทธิภาพมอเตอร์เก่าจากการประเมิน (%)	54.35	84.19	72.95
กำลังงานกลขาออกจากการประเมิน (kW)	3.272	5.068	4.392
ประสิทธิภาพมอเตอร์ใหม่จากแผ่นป้าย (%)	81.69	81.69	81.69
ประเมินกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใหม่จะใช้ (kW)	4.005	6.204	5.376
ประเมินกำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (kW)	2.015	-0.184	0.644
กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใหม่ใช้จริงโดยเฉลี่ย (kW)	5.20	5.20	5.20
กำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้จริงโดยเฉลี่ย (kW)	0.82	0.82	0.82
ความคลาดเคลื่อนของผลประหยัดเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจริง (kW)	1.195	-1.004	-0.176
ความคลาดเคลื่อนของผลประหยัดเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจริงเมื่อคิดเป็นร้อยละของพิกัดมอเตอร์	15.930	13.390	2.345

ตารางที่ B8 คุณสมบัติของมอเตอร์ขนาด 11 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

คุณสมบัติของมอเตอร์ก่อนเปลี่ยน			คุณสมบัติของมอเตอร์หลังเปลี่ยน		
พิกัดกำลัง	11	kW	พิกัดกำลัง	11	kW
พิกัดแรงดัน	400	V	พิกัดแรงดัน	400	V
พิกัดกระแส	21.5	A	พิกัดกระแส	21.5	A
ตัวประกอบกำลัง	0.85	Lagging	ตัวประกอบกำลัง	0.85	Lagging
ความเร็วรอบที่พิกัด	2900	rpm	ความเร็วรอบที่พิกัด	2900	rpm
ประสิทธิภาพ	91.2	%	ประสิทธิภาพ	91.2	%

ตารางที่ B9 สรุปผลการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 11 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

ผลการตรวจวัดก่อนเปลี่ยน			ผลการตรวจวัดหลังเปลี่ยน		
แรงดันเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	383.413	V	แรงดันเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	385.751	V
กระแสเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	23.575	A	กระแสเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	20.743	A
ความเร็วรอบ	2940	rpm	ความเร็วรอบ	2940	rpm
กำลังไฟฟ้าปรากฏเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	15.668	kVA	กำลังไฟฟ้าปรากฏเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	13.864	kVA
กำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	13.445	kW	กำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	12.197	kW
กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	8.045	kVAR	กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	6.591	kVAR

ตารางที่ B10 ผลประหยัดจากการประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับผลประหยัดจริงที่ทำการตรวจวัด

	วิธีค่าไกล	วิธีกระแส	วิธีวงจรสมมูล
พิกัดมอเตอร์ (kW)	11	11	11
กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ (kW)	13.45	13.445	13.445
ประสิทธิภาพมอเตอร์เก่าจากการประเมิน (%)	45.1021	85.991	81.51
กำลังงานกลขาออกจากการประเมิน (kW)	6.064	11.561	10.959
ประสิทธิภาพมอเตอร์ใหม่จากแผ่นป้าย (%)	86.879	86.879	86.879

ประเมินกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใหม่จะใช้ (kW)	6.980	13.308	12.614
ประเมินกำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (kW)	6.465	0.137	0.831
กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใหม่ใช้จริงโดยเฉลี่ย (kW)	12.197	12.197	12.197
กำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้จริงโดยเฉลี่ย (kW)	1.248	1.248	1.248
ความคลาดเคลื่อนของผลประหยัดเปรียบเทียบกับการตรวจวัดจริง (kW)	5.217	-1.111	-0.417
ความคลาดเคลื่อนของผลประหยัดเปรียบเทียบกับการตรวจวัดจริงเมื่อคิดเป็นร้อยละของพิกัดมอเตอร์	47.429	10.096	3.792

ตารางที่ B11 คุณลักษณะของมอเตอร์ขนาด 22 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

คุณสมบัติของมอเตอร์ก่อนเปลี่ยน			คุณสมบัติของมอเตอร์หลังเปลี่ยน		
พิกัดกำลัง	22	kW	พิกัดกำลัง	22	kW
พิกัดแรงดัน	380	V	พิกัดแรงดัน	380	V
พิกัดกระแส	41.5	A	พิกัดกระแส	42.5	A
ตัวประกอบกำลัง	0.86	Lagging	ตัวประกอบกำลัง	0.90	Lagging
ความเร็วรอบที่พิกัด	2930	rpm	ความเร็วรอบที่พิกัด	2930	rpm
ประสิทธิภาพ	92.00	%	ประสิทธิภาพ	87.40	%

ตารางที่ B12 สรุปผลการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 22 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

ผลการตรวจวัดก่อนเปลี่ยน			ผลการตรวจวัดหลังเปลี่ยน		
แรงดันเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	393.6	V	แรงดันเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	394.20	V
กระแสเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	37.31	A	กระแสเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	35.86	A
ความเร็วรอบ	2960	rpm	ความเร็วรอบ	2955	rpm
กำลังไฟฟ้าปรากฏเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	25.45	kVA	กำลังไฟฟ้าปรากฏเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	24.49	kVA
กำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	22.29	kW	กำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	21.86	kW
กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	12.28	kVAR	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	11.05	kVAR

ตารางที่ B13 ผลประหยัดจากการประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับผลประหยัดจริงที่ทำการตรวจวัด

	วิธีค่าไกล	วิธีกระแส	วิธีวงจรสมมูล
พิกัดมอเตอร์ (kW)	22	22	22
กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ (kW)	22.29	22.29	22.29
ประสิทธิภาพมอเตอร์เก่าจากการประเมิน (%)	60.5087	91.9097	85.4185
กำลังงานกลขาออกจากการประเมิน (kW)	13.487	20.487	19.040
ประสิทธิภาพมอเตอร์ใหม่จากแผ่นป้าย (%)	87.387	87.387	87.387
ประเมินกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใหม่จะใช้ (kW)	15.434	23.444	21.788
ประเมินกำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (kW)	6.856	-1.154	0.502
กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใหม่ใช้จริงโดยเฉลี่ย (kW)	21.86	21.86	21.86
กำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้จริงโดยเฉลี่ย (kW)	0.430	0.430	0.430
ความคลาดเคลื่อนของผลประหยัดเปรียบเทียบกับการตรวจวัดจริง (kW)	6.426	-1.583	0.072
ความคลาดเคลื่อนของผลประหยัดเปรียบเทียบกับการตรวจวัดจริงเมื่อคิดเป็นร้อยละของพิกัดมอเตอร์	29.210	7.197	0.329

ตารางที่ B14 คุณสมบัติของมอเตอร์ขนาด 37 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

คุณสมบัติของมอเตอร์ก่อนเปลี่ยน			คุณสมบัติของมอเตอร์หลังเปลี่ยน		
พิกัดกำลัง	37	kW	พิกัดกำลัง	37	kW
พิกัดแรงดัน	400	V	พิกัดแรงดัน	400	V
พิกัดกระแส	68	A	พิกัดกระแส	64	A
ตัวประกอบกำลัง	0.85	Lagging	ตัวประกอบกำลัง	0.87	Lagging
ความเร็วรอบที่พิกัด	1475	rpm	ความเร็วรอบที่พิกัด	1480	rpm
ประสิทธิภาพ	92.39	%	ประสิทธิภาพ	94.7	%

ตารางที่ B15 สรุปผลการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 37 กิโลวัตต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

ผลการตรวจวัดก่อนเปลี่ยน			ผลการตรวจวัดหลังเปลี่ยน		
แรงดันเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	408.83	V	แรงดันเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	406.19	V
กระแสเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	40.80	A	กระแสเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	35.64	A
ความเร็วรอบ	1492.00	rpm	ความเร็วรอบ	1492.00	rpm
กำลังไฟฟ้าปรากฏเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	28.91	kVA	กำลังไฟฟ้าปรากฏเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	25.25	kVA
กำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	20.16	kW	กำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	18.82	kW
กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเฉลี่ยก่อนเปลี่ยน	20.73	kVAR	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเฉลี่ยหลังเปลี่ยน	16.83	kVAR

ตารางที่ B16 ผลประหยัดจากการประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับผลประหยัดจริงที่ทำการตรวจวัด

	วิธีค่าไดล	วิธีกระแส	วิธีวงจรสมมูล
พิกัดมอเตอร์ (kW)	37	37	37
กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ (kW)	20.16	20.16	20.16
ประสิทธิภาพมอเตอร์เก่าจากการประเมิน (%)	61.3517	112.55	87.2074
กำลังงานกลขาออกจากการประเมิน (kW)	12.369	22.690	17.581
ประสิทธิภาพมอเตอร์ใหม่จากแผ่นป้าย (%)	94.7	94.7	94.7
ประเมินกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใหม่จะใช้ (kW)	13.061	23.960	18.565
ประเมินกำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (kW)	7.099	-3.800	1.595
กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใหม่ใช้จริงโดยเฉลี่ย (kW)	18.82	18.82	18.82
กำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้จริงโดยเฉลี่ย (kW)	1.34	1.34	1.34
ความคลาดเคลื่อนของผลประหยัดเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจริง (kW)	5.759	-5.140	0.255
ความคลาดเคลื่อนของผลประหยัดเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจริงเมื่อคิดเป็นร้อยละของพิกัดมอเตอร์	15.566	13.892	0.689



สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

มอบประกาศนียบัตรนี้ เพื่อประกาศเกียรติคุณ

รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพชร นันทิวัฒนา
และ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา กอเจริญญ

ในฐานะที่ได้รับรางวัลสภาวิจัยแห่งชาติ : รางวัลผลงานประดิษฐ์คิดค้น ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๓
รางวัลประกาศเกียรติคุณ



(นายสุวิทย์ เมษินทรีย์)

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

