

การศึกษาวิจัยและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์พลังงานของรถชุดล้อสายพานโดยการเปลี่ยนรูปแบบ
พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นระบบไฟฟ้า

ปริญญานิพนธ์

ของ

อธิบดี เหล่ารอด

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

กรกฎาคม 2551

การศึกษาวิจัยและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์พลังงานของรถชุดล้อสายพานโดยการเปลี่ยนรูปแบบ
พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นระบบไฟฟ้า

ปริญญานิพนธ์

ของ

อริบดี เหล่ารอด

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

กรกฎาคม 2551

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาวิจัยและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์พลังงานของรถชุดล้อสายพานโดยการเปลี่ยนรูปแบบ
พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นระบบไฟฟ้า

บทคัดย่อ

ของ

อธิปดี เหล่ารอด

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

กรกฎาคม 2551

อธิปดี เหล่ารอด (2551). การศึกษาวิจัยและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์พลังงานของรถขุดล้อสายพาน โดยการเปลี่ยนรูปแบบพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นระบบไฟฟ้า. ปริญญาโท วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ :บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผศ.ดร.พิชัย อัมมมงคล, ผศ.ดร. ศิริพรรณ ธงชัย

ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมจำนวนหลายล้านบาทย่อปีมาใช้ในภาคงานอุตสาหกรรมและคมนาคม โดยมีนโยบายของรัฐบาลที่ต้องการให้มีการใช้พลังงานที่ผลิตได้ภายในประเทศนำมาใช้ให้มากที่สุด เพื่อให้ลดการพึ่งพาแหล่งพลังงานที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่มีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพลังงานที่สามารถนำมาทดแทนได้นั้นไม่ว่าจะเป็นก๊าซธรรมชาติ เอทานอล ไบโอดีเซล พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานทางด้านไฟฟ้าก็ได้บรรจุเป็นส่วนหนึ่งของวาระแห่งชาติ

ซึ่งผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาและเล็งเห็นปัญหาของรถขุดล้อสายพาน KOMATSU PC200 ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงซึ่งมีอัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงประมาณ 25.8 ลิตร/ชม ให้ปรับเปลี่ยนระบบมาใช้พลังงานทางด้านไฟฟ้า ที่เป็นพลังงานสะอาดไม่มีมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม เช่น ไอเสียที่เป็นพิษ มลภาวะทางเสียง และภาวะโลกร้อน โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีแรงม้าเท่ากับเครื่องยนต์เดิมคือ 200 แรงม้า มาเป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังแทนนั่นคือ มอเตอร์ไฟฟ้า 214 แรงม้า (160 KW) 3 เฟส 380 โวลท์ ไฟฟ้ากระแสสลับ ไปขับเคลื่อนชุดไฮดรอลิกปั๊ม และผลสรุปก็คือการใช้ระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์ไฟฟ้าจะประหยัดค่าใช้จ่ายทางพลังงานมากกว่าใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในและไม่มีมลภาวะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ด้วยวิธีการนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรที่มีการจำกัดระยะทางการเคลื่อนที่ได้อีกด้วย

RESEARCH AND DEVELOPMENT FOR ENERGY CONSERVATION
OF AN EXCAVATOR BY TRANSFORMING FROM FOSSIL FUEL TO
ELECTRICAL SYSTEM

AN ABSTRACT
BY
ATHIBODEE LAOROD

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

July 2007

Athibodee Laorod (2008). *Research and Development for Energy Conservation of an Excavator by Transforming from Fossil Fuel to Electrical System.*

Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst. Prof. Dr. Pichai Asadamongkon, Asst. Prof. Dr. Siriphan Tongchai.

Thailand has been imported petroleum several billions baht per year to be used for transportation and industries. As a result, Thai government policy needs to save fuel consumption as well as to search for other energy sources or new energy products such as natural gas, bio-ethanol, bio-diesel and solar energy.

This research was aimed to find the solution of energy saving for the operation of the Komatsu PC200 excavator. One possibility was to use the highest efficiency source of energy. In this case, the diesel fueled internal combustion engine was replaced by an electric motor. The IC engine has higher energy consumption around 25.8 liters/hour and has lower efficiency than the electric motor. The electric motor used in this research was 160 kW (214 hp) power 3 phase, 380 Volt, 6 Pole for driving hydraulic system. Results shown that electric motor used less energy than the IC engine and produced no pollution. Furthermore, this method can be applied to other IC engine vehicle with limited movement.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ ดร.พิชัย อัมภมมงคล ประธานกรรมการ ควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ และ ผศ.ดร.ศิริพรรณ ธงชัย กรรมการควบคุมการทำ ปริญญานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ให้แนวคิดในการวิเคราะห์ และช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น ตลอดจนช่วยกรุณาตรวจแก้ปริญญานิพนธ์จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณ พายุ รังสรรค์ บริษัท ร็อคเอเซีย จำกัด และ คุณ ชำนาญ ดวงเดือน บริษัท บางปะกง อีคิวเมนท์ จำกัด ที่สนับสนุนทุนวิจัย ตลอดจนการวิจัยให้บรรลุผลสำเร็จไปด้วยดี และ ขอขอบพระคุณ คุณพระบิดา มารดา ครูบาอาจารย์ เกจิอาจารย์ ที่ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อ งานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมชั้น โครงการความร่วมมือหลักสูตรปริญญาโท มศว. และ รร. จปร. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล รุ่น 4 ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดเวลา

อธิบดี เหล่ารอด

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย.....	2
งบประมาณของโครงการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทปริทัศน์วรรณกรรม.....	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าและการควบคุม.....	5
โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า.....	5
โครงสร้างของมอเตอร์.....	6
การทำงานของมอเตอร์.....	6
ประสิทธิภาพและการสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้า.....	8
การสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงตามภาระการทำงานของมอเตอร์.....	9
สมรรถนะการใช้งานและค่าตัวประกอบกำลังมอเตอร์.....	10
การเปรียบเทียบราคาและค่าใช้จ่ายในการใช้งานของมอเตอร์.....	11
การเลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์.....	11
มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง.....	12
ทฤษฎีระบบส่งกำลัง.....	15
ทอร์กและการส่งกำลัง.....	17
ประสิทธิภาพการส่งกำลัง.....	18
ประสิทธิภาพของมอเตอร์.....	19
การสตาร์ทมอเตอร์และการควบคุมความเร็วรอบเพื่อประหยัดพลังงาน.....	22
การสตาร์ทแบบสตาร์ท-เดลต้า.....	24

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ)	
ระบบการป้องกันและความปลอดภัยของมอเตอร์.....	27
สายไฟฟ้าสำหรับวงจรมอเตอร์และสายไฟฟ้ากำลัง.....	28
การป้องกันกระแสลัดวงจรระหว่างสายและป้องกันการรั่วลงดิน.....	31
แนวทางการพิจารณาเพื่อลดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	31
ทฤษฎีการคำนวณอัตราค่าไฟฟ้า.....	33
การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	33
3 การออกแบบและการคำนวณ.....	35
การออกแบบฐานรองรับมอเตอร์.....	35
การคำนวณระบบส่งกำลัง.....	36
การคำนวณความตึงของสายพาน.....	38
แบบคำนวณเฟืองขับเคลื่อน.....	40
การคำนวณอัตราค่าพลังงานไฟฟ้า.....	41
การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์.....	42
4 การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	44
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	48
ขั้นตอนการเตรียมพร้อมการทดลอง.....	49
ขั้นตอนการสตาร์ททรูดไฟฟ้า.....	50
ขั้นตอนการดับทรูดไฟฟ้า.....	50
การทดลอง	50
สรุปผลการทดลองครั้งที่ 1.....	59
สรุปผลการทดลองครั้งที่ 2.....	65
สรุปผลการทดลองครั้งที่ 3.....	71

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ.....	72
สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ.....	72
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป.....	73
บรรณานุกรม.....	74
ภาคผนวก.....	76
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	84

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 คุณสมบัติของความเร็วรอบและทอร์คของโหลดต่างๆ.....	17
2 ค่าประสิทธิภาพตามปกติของมอเตอร์ที่ใช้งานตามขนาดโหลดต่างๆ.....	20
3 ประสิทธิภาพขั้นต่ำของมอเตอร์ธรรมดาและมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง.....	21
4 รหัสเลขรหัสสำหรับแสดงการป้องกัน (IP).....	27
5 ขนาดกระแสไฟฟ้าของสายไฟฟ้า.....	28
6 ขนาดปรับตั้งสูงสุดของอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรระหว่างสายและรั่วลงดิน.....	31
7 สรุปผลการทดลองครั้งที่ 1.....	59
8 สรุปผลการทดลองครั้งที่ 2.....	65
9 สรุปผลการทดลองครั้งที่ 3.....	71

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 โครงสร้างส่วนประกอบของมอเตอร์.....	5
2 สเตเตอร์และแผ่นเหล็กลามิเนต.....	6
3 ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนา.....	7
4 การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	8
5 การสูญเสียพลังงานในมอเตอร์.....	9
6 การใช้งานอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์.....	11
7 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพมอเตอร์.....	13
8 การปรับปรุงส่วนต่างๆของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง.....	13
9 กฎมือขวาในการหาทิศทาง.....	15
10 ขดลวด 1 ชุดหมุนในสนามแม่เหล็ก.....	16
11 ความสัมพันธ์ของความเร็วและทอร์คของโหลดต่างๆ.....	16
12 ทอร์คชนิดต่างๆที่เกิดขึ้นในมอเตอร์.....	18
13 การส่งกำลังด้วยสายพาน.....	19
14 สวิตช์ตัดตอนและเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วยมือ.....	22
15 สวิตช์แบบปุ่มกด.....	23
16 รีเลย์ควบคุม.....	23
17 คอนแทคเตอร์แบบแม่เหล็ก.....	24
18 การสตาร์ทแบบสตาร์ – เดลต้า.....	24
19 วงจรสตาร์ทแบบสตาร์ – เดลต้าด้วยสวิตช์ 3 ขั้ว 2 ทาง.....	25
20 วงจรสตาร์ทแบบสตาร์ – เดลต้าด้วยดรัมสวิตช์.....	26
21 วงจรสตาร์ทแบบสตาร์ – เดลต้าด้วยคอนแทคเตอร์.....	26
22 การเปรียบเทียบเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดแม่เหล็กกับฟิวส์หน่วงเวลา.....	29
23 คอนแทคเตอร์ที่ได้รับการป้องกันที่ค่ากระแสตัดวงจรสูง.....	30
24 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดความร้อนและแม่เหล็กสำหรับมอเตอร์ 100 แรงม้าขึ้นไป โดยมีระบบป้องกันสำรองต่อไว้ในช่วงโหลดเกิน.....	30
25 กราฟภาระโหลด.....	32
26 คานรับน้ำหนักมอเตอร์.....	35

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
27 เนมเพลทมอเตอร์ไฟฟ้า 160 kW.....	37
28 การทดสอบความเร็วรอบ.....	38
29 ทิศทางการหมุนและการขับเคลื่อนของสายพาน.....	38
30 การปรับตั้งความตึงสายพาน.....	39
31 เฟืองขับและเฟืองตาม.....	40
32 แสดงการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าเข้ากับเครื่องจักร.....	44
33 แสดงการติดตั้งวงจรมอเตอร์ควบคุม.....	44
34 แสดงการติดตั้งระบบส่งกำลังด้วยสายพาน.....	45
35 แสดงการติดตั้งเบรกเกอร์ 400 แอมป์.....	45
36 แสดงห้องจ่ายกระแส Substation 380 โวลต์, 400 แอมป์.....	46
37 แสดงตำแหน่งการต่อสายไฟเข้ากับเครื่องจักรโดยใช้ Spreader Bar.....	47
38 แสดงการติดตั้ง On/Off Switch-Emergency Switch ในห้อง Operator.....	47
39 แสดงตำแหน่งติดตั้งแอมป์มิเตอร์ในห้อง Operator.....	48
40 แสดงการติดตั้งสายไฟเมนจากตู้ Substation ไปยังเครื่องจักร.....	49
41 แสดงการต่อเครื่องมือวัด Data Locker.....	49
42 แสดงการทดสอบการเดินทางตรงของรถชุดไฟฟ้า.....	51
43 แสดงการทดสอบการเลี้ยวของรถชุดไฟฟ้า.....	51
44 แสดงการทดสอบการสวิงรอบตัวเองของรถชุดไฟฟ้า.....	52
45 แสดงการทดสอบการตักน้ำ 2 ลบ.ม.....	52
46 กราฟแสดงผลแรงเคลื่อนทางไฟฟ้า (วัตต์).....	53
47 กราฟแสดงผลค่าตัวประกอบกำลัง (P.F)	54
48 กราฟแสดงผลค่ากระแสไฟฟ้า (แอมป์).....	55
49 กราฟแสดงผลค่า Ums.....	56
50 กราฟแสดงผลค่า VA.....	57
51 กราฟแสดงผลค่า VAR.....	58
52 แสดงการทดสอบการตักถ่านหิน 2 ลบ.ม จากเรือขนถ่าย.....	60
53 แสดงการทดสอบการตักถ่านหิน 2 ลบ.ม ขึ้นรถบรรทุก 10 ล้อ.....	60

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
54 กราฟแสดงผลแรงเคลื่อนทางไฟฟ้า (วัตต์).....	61
55 กราฟแสดงผลค่าตัวประกอบกำลัง (P.F)	62
56 กราฟแสดงผลค่ากระแสไฟฟ้า (Amps).....	63
57 กราฟแสดงผลค่า Ums.....	64
58 ทดสอบการดักถ่านหินขึ้นรถบรรทุก 10 ล้อ.....	66
59 กราฟแสดงผลแรงเคลื่อนทางไฟฟ้า (วัตต์).....	67
60 กราฟแสดงผลค่าตัวประกอบกำลัง (P.F)	68
61 กราฟแสดงผลค่ากระแสไฟฟ้า (Amps)	69
62 กราฟแสดงผลค่า Ums.....	70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมจำนวนหลายล้านบาทต่อปี มาใช้ในภาคงานอุตสาหกรรมและคมนาคม โดยมีนโยบายของรัฐบาลที่ต้องการให้มีการใช้พลังงานที่ผลิตได้ภายในประเทศนำมาใช้ให้มากที่สุด เพื่อให้ลดการพึ่งพาแหล่งพลังงานที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่มีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพลังงานที่สามารถนำมาทดแทนได้นั้นไม่ว่าจะเป็นก๊าซธรรมชาติ เอทานอล ไบโอดีเซล พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานทางด้านไฟฟ้าก็ได้บรรจุเป็นส่วนหนึ่งของวาระแห่งชาติ ที่คนไทยทุกคนต้องมีส่วนร่วมช่วยกันอนุรักษ์พลังงาน

ซึ่งผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาและเล็งเห็นปัญหาของรถชุดล้อสายพาน KOMATSU PC200 ในบริษัท ร็อคเอเชีย จำกัด ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงซึ่งมีอัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงประมาณ 28 ลิตร/ชม ให้สับเปลี่ยนระบบมาใช้พลังงานทางด้านไฟฟ้า ที่เป็นพลังงานสะอาดไม่มีมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม เช่น ไอเสียที่เป็นพิษ และมลภาวะทางเสียง โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีแรงม้าเท่ากับเครื่องยนต์เดิมคือ 200 แรงม้า มาเป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังแทนนั่นคือ มอเตอร์ไฟฟ้า 214 แรงม้า (160 KW) 3 เฟส 380 โวลท์ ไฟฟ้ากระแสสลับ ไปขับเคลื่อนชุดไฮดรอลิคปั๊ม เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน และการใช้พลังงานที่ผลิตได้ภายในประเทศได้อย่างคุ้มค่าและให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและหาแนวทางการประหยัดพลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงโดยการสับเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแทนเครื่องยนต์ดีเซล

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานระหว่างเครื่องยนต์กับมอเตอร์ไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อศึกษาอัตราความคุ้มค่าในการลงทุน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ปรับปรุงรถชุดล้อสายพาน Komatsu PC200 ขนาดเครื่องยนต์ต้นกำลัง 200 แรงม้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล สับเปลี่ยนเป็นระบบไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 214 แรงม้า (160 KW) 3 เฟส 380 โวลท์ เพื่อใช้ในการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลในโรงงาน

1.3.2 จำกัดระยะทางการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องจักรให้เคลื่อนที่ได้ไม่เกิน 40 เมตร

1.3.3 ทดสอบประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องจักรและอัตราการคืนทุน

1.4 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

ลำดับ	รายการ	เดือน (พ.ศ. 2550)											
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	พ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1.	ศึกษาหัวข้อและสืบค้นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องการวิจัย	●	●										
2.	ออกแบบการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้า		●	●									
3.	ออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์			●	●								
4.	ติดตั้งมอเตอร์และวงจรควบคุม				●	●	●						
5.	ทดสอบการเดินเครื่องและการปรับแต่งประสิทธิภาพ							●					
6.	วัดผลและเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องจักรทางกลและทางด้านไฟฟ้า							●	●				
7.	วัดผลและเปรียบเทียบทางด้านพลังงาน								●	●			
8.	วัดผลและเปรียบเทียบอัตราความคุ้มค่าในการลงทุน									●	●		
9.	วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย										●	●	
10.	ตีพิมพ์ผลงานวิจัย												●

1.5 งบประมาณของโครงการวิจัย

ลำดับ	รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
1.	รถขุดล้อสายพาน Komatsu PC200 (Second hand)	850,000
2.	มอเตอร์ไฟฟ้า 200 hp 380 v. (Second hand)	85,000
3.	โรตารี อิเลคทริก	70,000
4.	แท่นรองรับมอเตอร์	7,000

5.	พูลเลย์ ชุดขับและ ชุดตาม	5,000
6.	สายพาน HTD-1890-14M	2,500
7.	สายไฟ 240 sq.mmx40 m.	100,000
8.	อินเวอร์เตอร์	3,500
9.	ชุดวงจรควบคุมมอเตอร์	20,000
10.	ชุดรีเลย์ป้องกันไฟตกไฟเกิน	15,000
11.	หม้อแปลง 380 V. / 400A. (Substation);	55,000
	รวมค่าใช้จ่าย	1,213,000

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง
- 1.6.2 สามารถอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เช่น มลภาวะไอเสียที่เป็นพิษ และ มลภาวะทางเสียง
- 1.6.3 สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา
- 1.6.4 คำนึงค่าต่อการลงทุน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทปริทัศน์วรรณกรรม (Literature Review)

ในการศึกษาค้นคว้าผลงานการอนุรักษ์พลังงานของรถขุดล้อสายพานโดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบพลังงานเชื้อเพลิงดีเซลเป็นระบบไฟฟ้านั้น ทั้งจากคู่มือเครื่องจักร เอกสารวิชาการทางพลังงาน พบว่ามีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีบริษัทผู้ผลิตเครื่องจักรจำนวนมากหันมาผลิตเครื่องจักรและอุปกรณ์ประหยัดพลังงานดังนี้

ธรรมศักดิ์ แสงน้อย (2550) บริษัท กร้าโซโซ (ประเทศไทย) จำกัด งานวิจัย “การเลือกใช้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU แทน TOD ในโรงงาน พบว่าเมื่อใช้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU เฉพาะ Off Peak ค่าไฟฟ้าที่จะต้องจ่ายจะถูกลงที่สุด

วิโรจน์ จินดารัตน์ (2549) งานวิจัย “การคำนวณช่วยในการตัดสินใจ เลือกระบบปรับอากาศที่เหมาะสมและประหยัดพลังงานในอาคาร” ได้อธิบายถึงวิธีการคำนวณคิดอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU, TOD และ IRR

Mr.Roger Wilkins (2003) Michigan concrete & drilling Inc. ได้ออกแบบรถขุดล้อสายพาน กำลังขนาด 30 hp. ซึ่งใช้กระแสไฟ 480 v. 3 phase ไปขับเคลื่อนไฮดรอลิคปั๊ม เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งพบว่าประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้ามากกว่าใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

บริษัท Demag- Komatsu (1995) ได้ลงนามร่วมทุนผลิตรถขุดไฟฟ้าในรุ่น H255s ขนาดกำลังมอเตอร์ 1200 hp. 6.6 KV. เป็นตัวขับเคลื่อนไฮดรอลิคปั๊ม เพื่อการอนุรักษ์พลังงานที่ใช้ดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งพบว่าประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้ามากกว่าใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

บริษัท P&H (1994) ได้ผลิตรถขุดไฟฟ้า P&H รุ่น 2100BL กำลังขนาดมอเตอร์ 1200 hp มาใช้ในเหมืองถ่านหิน เพื่อทดแทนพลังงานเชื้อเพลิง หลักการทำงาน กระแสที่ใช้ป้อนให้มอเตอร์ 6.6 kv. เพื่อไปขับเคลื่อนไฮดรอลิคปั๊ม ซึ่งพบว่าประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้ามากกว่าใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

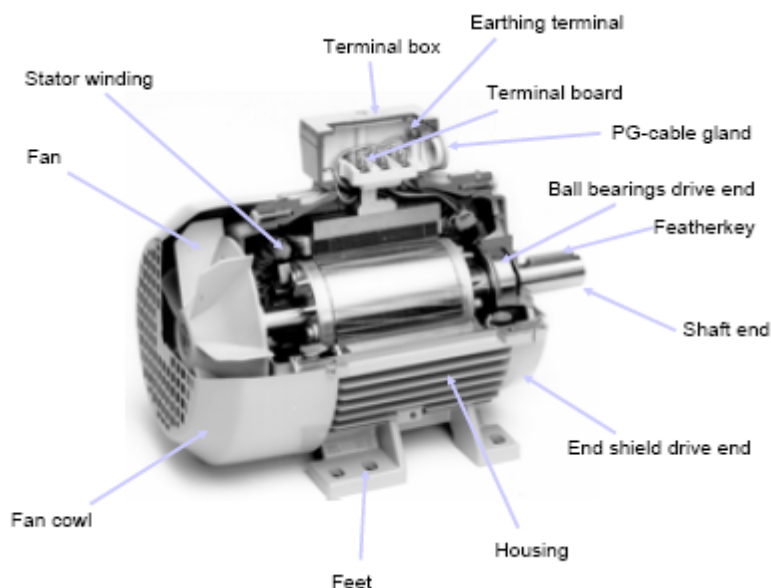
2.2 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าและการควบคุม

มอเตอร์เป็นเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าพื้นฐานที่ขับเคลื่อนอุปกรณ์และเครื่องจักรต่างๆ มอเตอร์จึงมีบทบาทสำคัญมากในงานอุตสาหกรรม และมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามาก ในโรงงานบางแห่งมีการใช้มอเตอร์มากถึง 80% ของภาระไฟฟ้าทั้งหมด ด้วยเหตุนี้ความสูญเสียด้านพลังงานส่วนใหญ่ในภาคอุตสาหกรรมจึงสิ้นเปลืองไปกับการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า เพราะฉะนั้นการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพย่อมก่อให้เกิดความมั่นคงทางเศรษฐกิจ ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

มอเตอร์ไฟฟ้าโดยปกติแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้ชนิด AC มอเตอร์มาทำการติดตั้งเข้าไปบนตัวรถชุดชนิดล้อสายพาน

2.2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมีอยู่หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel cage rotor Induction motor) เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน แข็งแรง ราคาถูก สะดวกต่อการบำรุงรักษา และสามารถปรับความเร็วรอบได้ง่าย

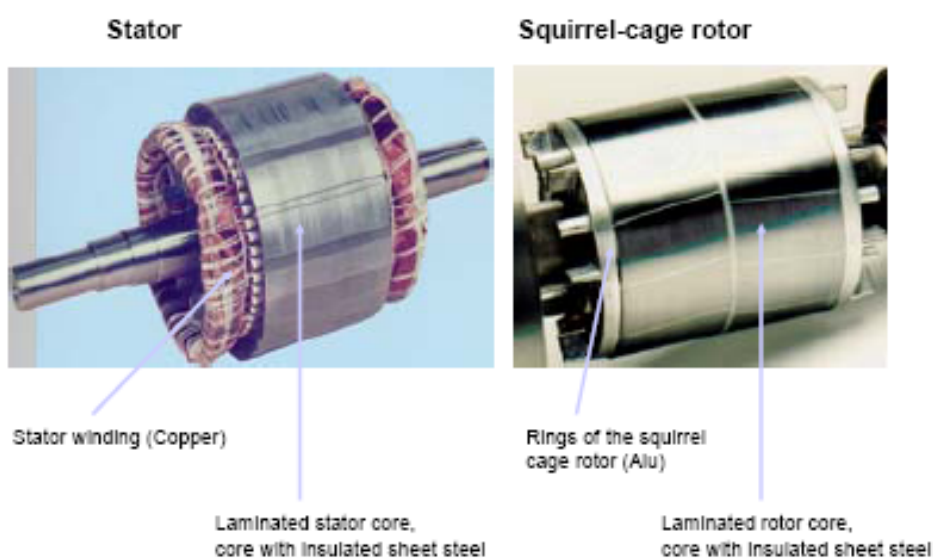


ภาพประกอบ 1 โครงสร้างส่วนประกอบมอเตอร์

2.2.2 โครงสร้างมอเตอร์ (Structure of Motor)

2.2.2.1 ส่วนที่อยู่กับที่เรียกว่า สเตเตอร์ (Stator) ทำหน้าที่ ยึดขดลวดที่บรรจุใน ร่องสลิต (Slot) ทำด้วยแผ่นเหล็กกลาไมเนท (Laminated Steel) บางๆ และมีร่องสลิตอัดเป็นแท่ง

2.2.2.2 ส่วนที่หมุน เรียกว่า (Rotor) จะมีแท่งตัวนำคล้ายกรงกระรอกฝังอยู่ภายใน โรเตอร์ ที่ปลายทั้งสองของแท่งตัวนำจะถูกัดวงจรด้วยตัวนำรูปวงแหวน แท่งตัวนำของโรเตอร์มักมี ลักษณะเฉียงเพราะจะทำให้มอเตอร์หมุนได้ราบเรียบและลดปัญหาเสียงฮัมของสนามแม่เหล็ก



ภาพประกอบ 2 สเตเตอร์และแผ่นเหล็กกลาไมเนท

2.2.3 การทำงานของมอเตอร์

การที่โรเตอร์หมุนได้เนื่องจากเมื่อขดลวดทองแดงที่พันอยู่กับสเตเตอร์มีกระแสไฟฟ้า ไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating magnetic fields) หมุนรอบๆ แกนเหล็กสเตเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดโรเตอร์ ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้จะสร้าง แรงบิดที่โรเตอร์ทำให้โรเตอร์หมุนไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) ซึ่งหาได้จาก



$$\text{Synchronous speed, } n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.1)$$

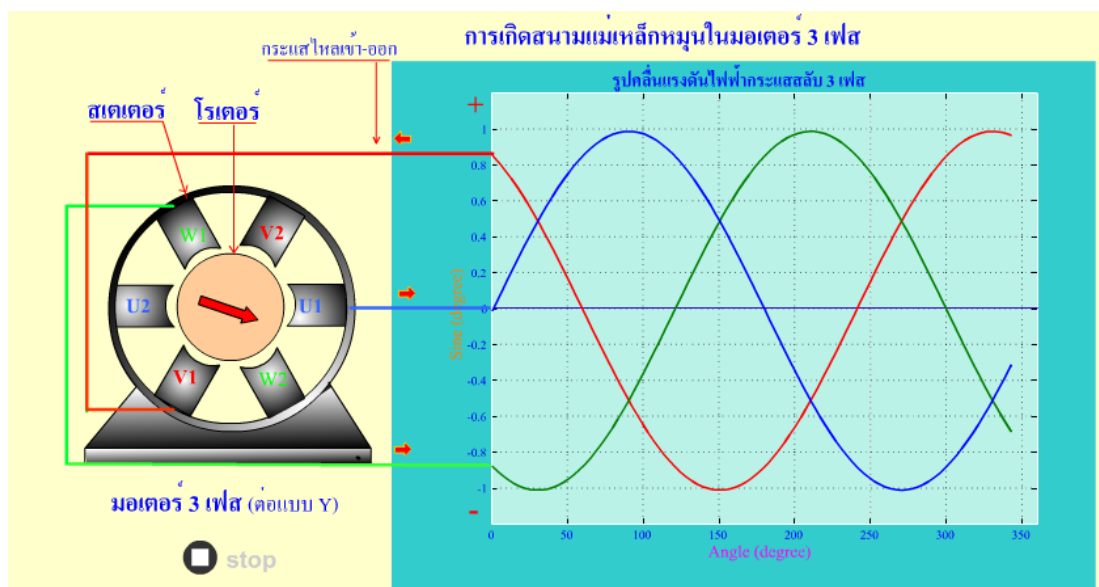
ภาพประกอบ 3 ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส

เมื่อ f = ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ
 P = จำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์

ซึ่งในการใช้งานจริงของมอเตอร์ไม่ได้หมุนที่ความเร็วซิงโครนัส แต่จะหมุนช้ากว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งผลต่างของความเร็วนี้ เรียกว่า ความเร็วไถล (Slip)

โดย
$$\text{Slip, } s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.2)$$

เมื่อ s = ไถล (Slip)
 n_s = ความเร็วที่ซิงโครนัส
 n_r = ความเร็วที่โรเตอร์

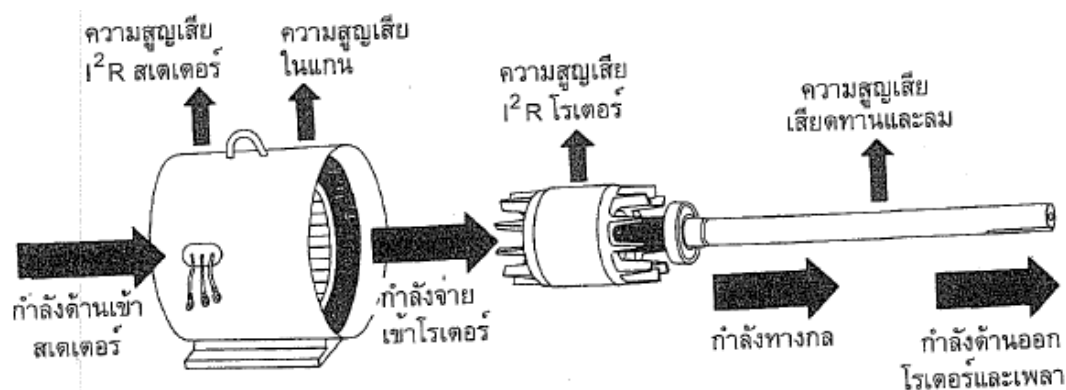


ภาพประกอบ 4 การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

ข้อสังเกต เมื่อชุดขดลวดใดได้รับรับแรงดันจากรูปคลื่นสูงสุด (ทั้ง + และ -) สนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกับขั้วกับขั้วนั้นๆ และในทางตรงกันข้ามถ้าหากไม่ได้รับแรงดัน (ศูนย์) สนามแม่เหล็กจะชี้ขนานไปกับขั้วแม่เหล็กนั้นๆ ซึ่งมีทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนเกิดความสัมพันธ์ของกระแสเข้าและไหลออกในขดลวดแต่ละชุดสัมพันธ์กันที่ก่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องระหว่างขั้วและเกิดการหมุนของสนามแม่เหล็กต่อเนื่องกันไป ในขณะเดียวกันสนามแม่เหล็กก็จะเหนี่ยวนำให้โรเตอร์หมุนตามไปด้วย

2.2.4 ประสิทธิภาพและการสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับค่าของการสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวมอเตอร์ โดยทั่วไปการสูญเสียในมอเตอร์เกิดจากการสูญเสียทางไฟฟ้า (Electrical loss) การสูญเสียจากภาระการใช้งาน (Stray loss) ซึ่งแบ่งเป็นการสูญเสียที่มีค่าคงที่และการสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงตามภาระของมอเตอร์ ดังนี้



ภาพประกอบ 5 การสูญเสียพลังงานในมอเตอร์

2.2.5 การสูญเสียที่มีค่าคงที่

การสูญเสียที่แกนเหล็ก (Core loss) เกิดจากพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก (Hysteresis loss) รวมทั้งการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนในแกนแม่เหล็ก (Eddy loss) เรียกรวมกันว่า “ค่าการสูญเสียขณะที่มีมอเตอร์ไม่มีภาระ” (No-load loss)

การสูญเสียจากแรงลมและแรงเสียดทาน (Windage and Friction loss) เกิดจากแรงเสียดทานในตลับลูกปืนและแรงต้านของครีบบระบายอากาศที่ตัวมอเตอร์

การสูญเสียที่สเตเตอร์ (Stator loss) จะอยู่ในรูปของความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดที่มีความต้านทานอยู่ภายใน

การสูญเสียที่โรเตอร์ (Rotor loss) อยู่ในรูปความร้อนเช่นเดียวกับสเตเตอร์แต่เกิดที่ขดลวดในโรเตอร์

2.2.6 การสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงตามภาระการทำงานของมอเตอร์

การสูญเสียจากภาระการทำงาน เป็นการสูญเสียที่สเตเตอร์และโรเตอร์จะมีการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของภาระ โดยเรียกว่า “ค่าความสูญเสียขณะที่มีมอเตอร์มีภาระ” เกิดจาก

1. กระแสไหลวนในแกนเหล็กที่โรเตอร์ขณะที่มีภาระ
2. กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดที่สเตเตอร์
3. ค่าการสูญเสียจากค่ากระแสฮาร์มอนิก ในตัวนำของโรเตอร์ขณะที่มีภาระ
4. ค่าสนามแม่เหล็กรั่วไหลที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าขณะที่มีภาระ

2.2.7 ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์หาได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ (\%)} = \frac{746 \times \text{แรงม้า Out put}}{\text{วัตต์ In put}} \times 100 \quad (2.3)$$

$$= \frac{\text{กำลังงาน Out put (วัตต์)}}{\text{กำลังงาน In put (วัตต์)}} \times 100 \quad (2.4)$$

ค่าประสิทธิภาพอาจเขียนอยู่ในภาพที่แสดงค่ากำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ด้วยก็ได้ ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ (\%)} = \frac{\text{กำลังงาน Out put}}{\text{กำลังงาน Out put} \times \text{กำลังงานสูญเสีย}} \times 100 \quad (2.5)$$

เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดควรจัดการให้มอเตอร์รับภาระที่ประมาณ 80-100% ของภาระเต็ม (Full-load) หรือ ค่าแรงม้า (Horse power) ที่บอกไว้ในป้ายชื่อ (Name plate) เป็นค่าของกำลังงานเข้าตู้ฟุต ส่วนค่ากำลังงานที่นำมาใช้จริง คือ ค่ากำลังงานอินพุต ปริมาณของพลังงานอินพุตที่ใช้ผลิตแรงม้าตามพิกัดนั้น จะแตกต่างกันไปสำหรับมอเตอร์แต่ละตัว มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า จะต้องการกำลังงานอินพุตน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่าที่ให้เข้าตู้ฟุตเท่ากัน

ข้อควรระวัง คือ ไม่ควรใช้มอเตอร์รับภาระเกินกำลัง (Over load) เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพต่ำลงและความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้น

2.2.8 สมรรถนะการใช้งานและค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์

$$\text{สมรรถนะการใช้งาน} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าที่วัดได้}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่เนมเพลท}} \times 100 \quad (2.6)$$

$$\text{ตัวประกอบกำลัง} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าที่เนมเพลท}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่วัดได้}} = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times I} \quad (2.7)$$

2.2.9 การเปรียบเทียบราคาและค่าใช้จ่ายในการใช้งานของมอเตอร์

โดยเฉลี่ยแล้วราคาของมอเตอร์ที่ซื้อจะมีค่าประมาณ 1 ถึง 2 % ของราคาค่าไฟฟ้าในการใช้งานมอเตอร์ตลอดอายุการใช้งาน (20 ปี) เช่น มอเตอร์มาตรฐานขนาด 55 kW ราคาประมาณ 90,000 บาท แต่ท่านอาจต้องจ่ายเงินถึง 13 ล้านบาท เพื่อเป็นค่าไฟฟ้าตลอดอายุการใช้งาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนชั่วโมงการใช้งานต่อปีโดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

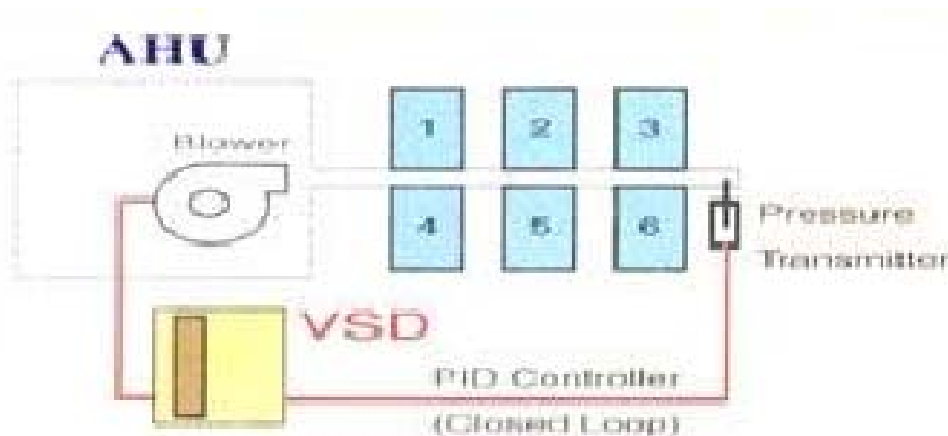
$$1. \text{ค่าพลังงานไฟฟ้าตลอดปี (บาท/ปี)} = (\text{kW}_{\text{พัด}}/\text{eff}) \times \% \text{ภาระ} \times (\text{ชั่วโมงใช้งาน/ปี}) \times \text{อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า} \quad (2.8)$$

$$2. \text{ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าตลอดปี (บาท/ปี)} = \text{kW}_{\text{สูงสุดที่วัดได้ในช่วง 15 นาทีในรอบเดือน}} \times \text{อัตราค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า} \times 12 \text{ เดือน} \quad (2.9)$$

$$3. \text{ค่าไฟฟ้ารวมทั้งหมด (บาท)} = (\text{ค่าพลังงานไฟฟ้าตลอดปี} + \text{ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าตลอดปี}) \times \text{อายุการใช้งาน} \quad (2.10)$$

2.2.10 การเลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (Variable Speed Drive: VSD)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้เหมาะสมกับสถานะของภาระ เป็นอุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมประเภทต่างๆทำให้สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงานได้สูง



ภาพประกอบ 6 การใช้งานอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

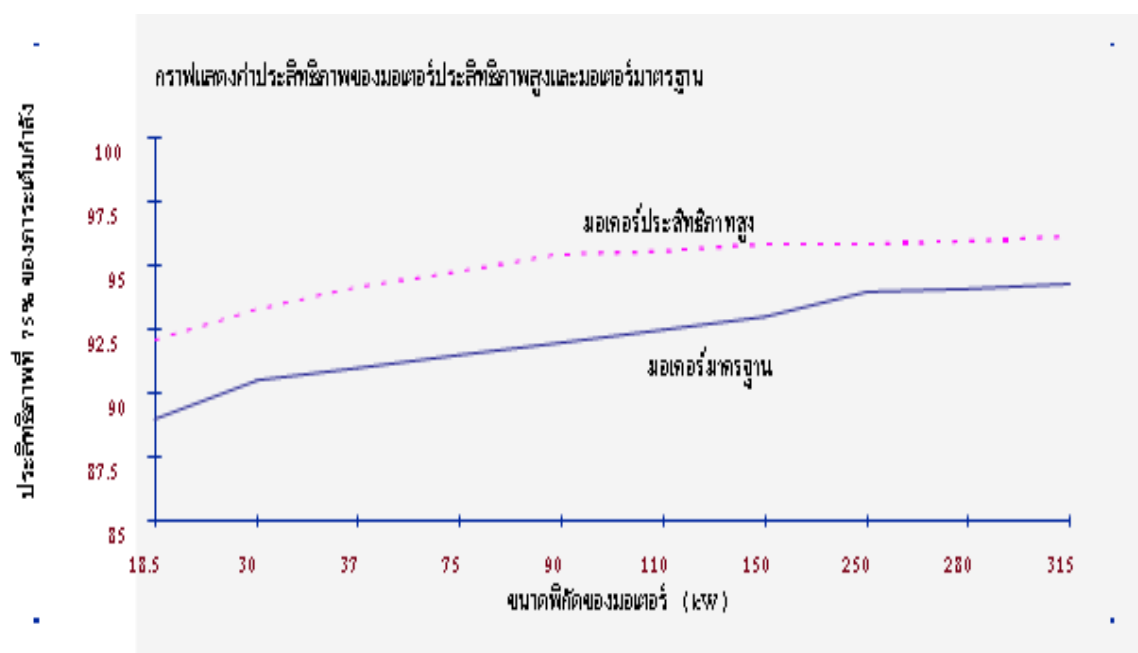
นอกจากนี้ยังสามารถใช้เครื่องควบคุมความเร็วเพื่อปรับเปลี่ยนความถี่และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage/frequency control: V/f) สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมความเร็วรอบให้สัมพันธ์กับความต้องการภาระของระบบ (Load demand) ได้อีกด้วย

2.2.11 ข้อดีของการใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

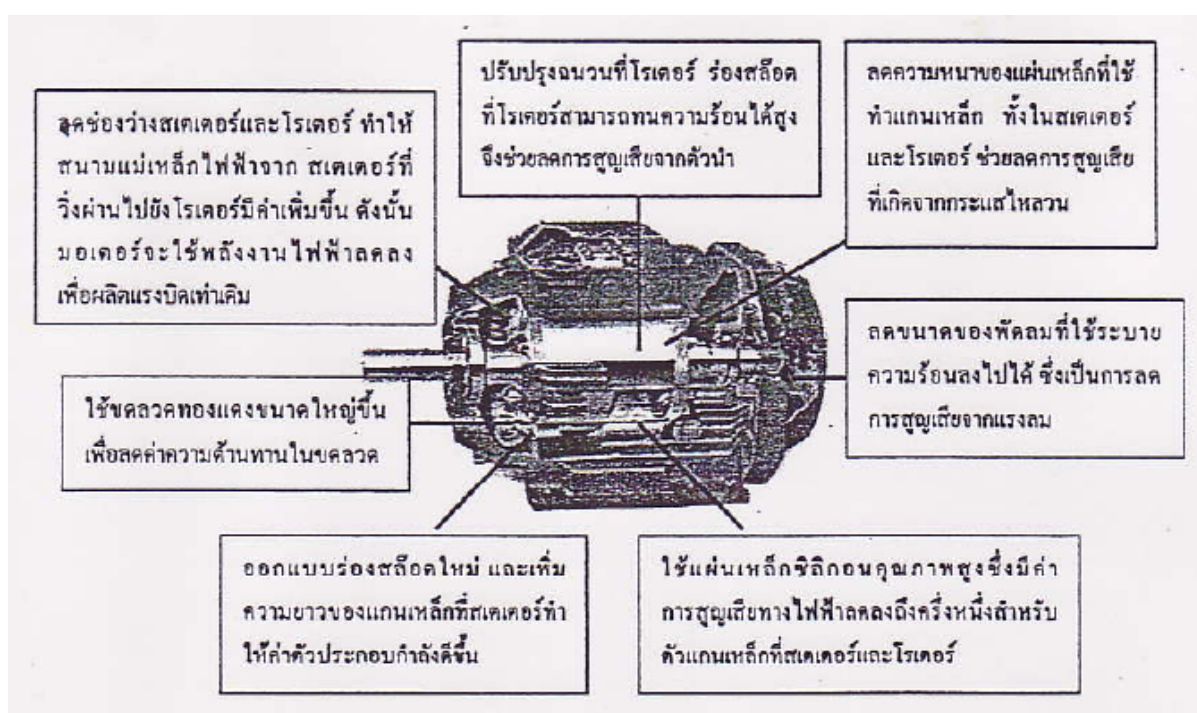
1. สามารถปรับความเร็วรอบมอเตอร์ได้ ทำให้เลือกใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสมตามความต้องการของงานแต่ละประเภท
2. มีการควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิด (Closed loop control) ทำให้ระบบมีการทำงานที่แม่นยำและมีเสถียรภาพอยู่ตลอดเวลา
3. เป็นการเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานให้ถูกต้องตามความต้องการ เนื่องจากระบบมีความแม่นยำมากขึ้นทำให้ช่วยลดต้นทุนการผลิต
4. ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องจักรและการป้องกันการสูญเสียจากการทำงานของมอเตอร์
5. ลดการกระชากไฟตอนเริ่มต้น ทำให้ลดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าลงได้
6. ประหยัดพลังงาน โดยใช้พลังงานตามความจำเป็นของภาระ

2.2.12 มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

เลือกใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งสามารถลดการสูญเสียพลังงานได้ประมาณ 25-30% นอกจากจะประหยัดพลังงานแล้วมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงยังมีข้อดีอื่นๆ อีกคือ เกิดความร้อนจากการทำงานน้อยกว่า อายุการใช้งานของฉนวนและลูกปืนยาวนานขึ้น การสิ้นเปลืองน้อยกว่า มีเสียงรบกวนน้อย และค่าตัวประกอบกำลังดีขึ้น ผู้ผลิตมอเตอร์ได้มีการเปลี่ยนแปลงและเลือกใช้วัสดุในการผลิตที่ดีขึ้น เพิ่มค่าประสิทธิภาพให้กับมอเตอร์ ดังภาพ



ภาพประกอบ 7 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพมอเตอร์



ภาพประกอบ 8 การปรับปรุงส่วนต่างๆของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

2.2.13 ความแตกต่างในเรื่องค่าพลังงาน

ในปัจจุบันมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงจะมีราคาสูงกว่ามอเตอร์มาตรฐานประมาณ 20% ราคาที่เพิ่มขึ้นนี้จะกลับคืนมาในรูปของการประหยัดพลังงาน จากการที่ประสิทธิภาพมอเตอร์นั้นสูงขึ้น การประหยัดค่าพลังงานสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าพลังงานที่ประหยัดได้} = \text{ค่าไฟฟ้าโดยเฉลี่ย} \times \text{กิโลวัตต์ชั่วโมงที่ประหยัดได้} \quad (2.11)$$

$$\text{กิโลวัตต์ชั่วโมงที่ประหยัดได้} = \text{กิโลวัตต์ที่ลดลง} \times \text{ชั่วโมงการทำงานตลอดปี} \quad (2.12)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าที่ลดลง} = KW_{\text{ที่กัก}} \times \left\{ \frac{100}{\text{Eff}_{\text{มอเตอร์มาตรฐาน}}} - \frac{100}{\text{Eff}_{\text{มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง}}} \right\} \quad (2.13)$$

โดย $\text{eff}_{\text{มอเตอร์มาตรฐาน}}$ คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์มาตรฐาน
 $\text{eff}_{\text{มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง}}$ คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

การคำนวณความเป็นไปได้ของการลงทุน โดยทั่วไปจะใช้วิธีที่เรียกว่า “ระยะเวลาคืนทุนแบบเชิงเดียว” (Simple payback)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุนแบบเชิงเดียว} = \frac{\text{ราคาที่เพิ่มขึ้น}}{\text{ค่าพลังงานที่ประหยัด}} \quad (2.14)$$

หรือ

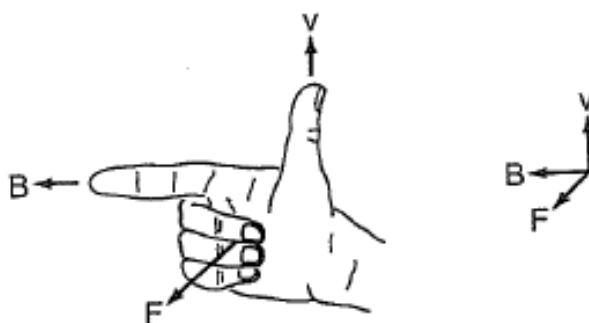
$$= \text{ราคามอเตอร์ประสิทธิภาพสูง} - \text{ราคามอเตอร์มาตรฐาน}$$

2.3 ทฤษฎีระบบส่งกำลัง ทอร์ก และประสิทธิภาพมอเตอร์

รายละเอียดในทฤษฎีบทนี้เป็นการกล่าวถึงการเกิดทอร์กขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จะทำให้ทราบถึงการส่งกำลัง ทำให้เข้าใจแนวคิดด้านประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่จะกล่าวในขั้นตอนต่อไป

2.3.1 แรงและทอร์กในสนามแม่เหล็ก

จากกฎของเลนส์ที่กล่าวถึงแรงของประจุในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนั้นทำให้ทราบได้ว่าแรงที่เกิดจากประจุในสนามแม่เหล็ก ซึ่งประจุนี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วในสนามแม่เหล็ก และหากนำกฎมือขวามาใช้ตามภาพที่ 9 แล้ว จะทำให้สามารถคำนวณค่าแรงที่เกิดขึ้นได้จากสมการคือ

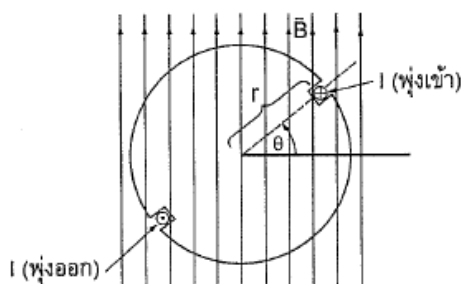


ภาพประกอบ 9 กฎมือขวาในการหาทิศทาง

แรง	=	ประจุ x ความเร็ว x ความหนาแน่นฟลักซ์	(2.15)
F	=	$q \times v \times B$	
เมื่อ F	คือ	แรงที่เกิดจากประจุ (นิวตัน)	
q	คือ	ประจุในสนามแม่เหล็ก (คูลอมป์)	
v	คือ	ความเร็วของประจุที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก (เมตร/วินาที)	
B	คือ	ความหนาแน่นฟลักซ์ (เวเบอร์/ตารางเมตร หรือ เทสลา)	

ดังนั้น เมื่อขดลวดตัวนำในโรเตอร์มีกระแสไฟฟ้าไหลและโรเตอร์หมุนตัดสนามแม่เหล็กตามภาพที่ 2.10 จะได้แรงดังนี้

เมื่อ I	คือ	กระแสไฟฟ้าไหลในโรเตอร์
r	คือ	กระแสไฟฟ้าไหลในโรเตอร์
θ	คือ	มุมระหว่างระนาบของตัวนำในโรเตอร์กับสนามแม่เหล็ก
$\mathcal{L}$	คือ	ความยาวของแกนโรเตอร์



ภาพประกอบ 10 ขดลวด 1 ชุดหมุนในสนามแม่เหล็ก

$$\begin{aligned} F &= B \mathcal{L} \sin \theta \\ \text{ดังนั้น ตัวนำที่ 1} \quad F_1 &= B \mathcal{L} \sin \theta \end{aligned} \quad (2.16)$$

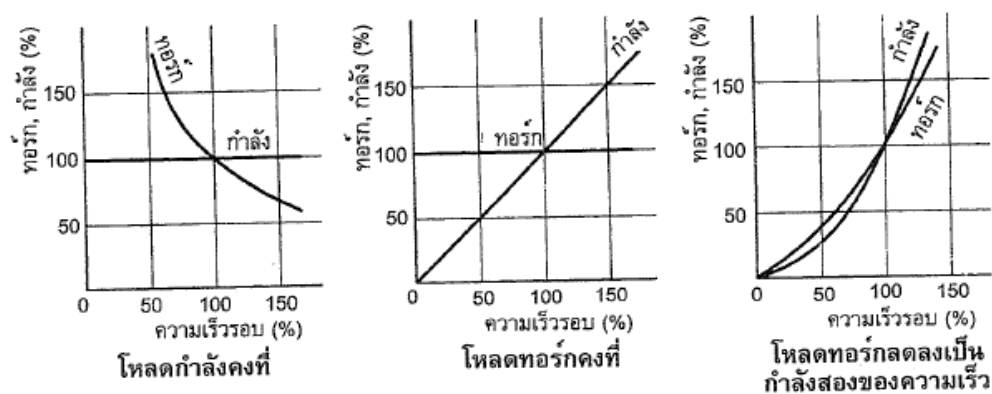
$$\text{ตัวนำที่ 2} \quad F_2 = B \mathcal{L} \sin \theta \quad (2.17)$$

หากต้องการหาค่าทอร์ก ก็สามารถทำได้โดยคำนวณได้จากแรงที่เกิดขึ้นคูณกับระยะทาง r (จากภาพที่ 10) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} T &= (F_1 \times r) + (F_2 \times r) \\ &= (B \mathcal{L} \sin \theta) (r) + (B \mathcal{L} \sin \theta) (r) \\ T &= 2 r B \mathcal{L} \sin \theta \quad (\text{นิวตัน - เมตร}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

โดยปกติแล้ว ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของโรเตอร์และทอร์กของโหลดนั้น จะขึ้นอยู่กับสภาพของโหลด จึงได้มีการแบ่งโหลดตามลักษณะของทอร์กออกเป็น 3 กรณี ดังภาพ 11

- สภาพที่โหลดกำลัง (P) คงที่
- สภาพที่โหลดทอร์ก (T) คงที่
- สภาพที่โหลดทอร์ก (T) ลดลงเป็นกำลังสองของความเร็ว (V)



ภาพประกอบ 11 ความสัมพันธ์ของความเร็วและทอร์กของโหลดต่างๆ

จากความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับทอร์กของโหลดต่างๆ ในภาพที่ 11 นำมาสรุปเป็นลักษณะของการใช้งานรวมทั้งแสดงตัวอย่างของโหลดได้ตามตารางที่ 1 ดังนี้

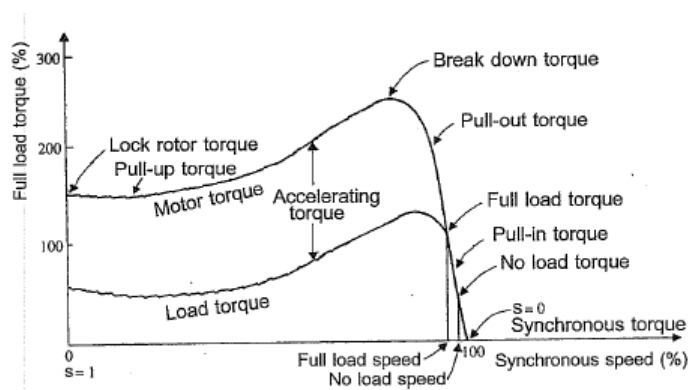
ตาราง 1 คุณสมบัติของความเร็วรอบและทอร์กของโหลดต่างๆ

ลักษณะของโหลด	ความสัมพันธ์ความเร็วรอบ		ตัวอย่างของโหลด
	กับทอร์ก	กับกำลัง	
กำลังคงที่	ทอร์กแปรผกผันกับความเร็วรอบ	กำลังคงที่	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ กำลังคงที่, ปั๊มจั่น
ทอร์กคงที่	ทอร์กคงที่	กำลังแปรตามความเร็วรอบ	สายพาน, บั๊มลูกสูบ
ทอร์กลดเป็นกำลังสองของความเร็ว	ทอร์กแปรตามกำลังสองของความเร็วรอบ	กำลังแปรตามกำลังสามของความเร็วรอบ	บั๊มแรงเหวี่ยง, โปลเวอร์

2.3.2 ทอร์กและการส่งกำลัง

ทอร์กเป็นแรงหมุนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ โดยปกติแล้วทอร์กจะมี 9 ชนิดด้วยกัน ดังภาพที่ 12 คือ

- (1) ทอร์กขณะตรึงโรเตอร์ (Lock-rotor torque) เป็นค่าทอร์กของโรเตอร์ที่ถูกยึดไว้ไม่ให้หมุนเมื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับชุดขดลวดด้านเข้าของมอเตอร์ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์
- (2) ทอร์กเร่ง (Accelerating torque) เป็นค่าทอร์กที่เกิดขึ้นที่ถูกเร่งขึ้นจากภาวะที่ยังไม่หมุนจนการจ่ายไฟฟ้าด้านเข้าให้มอเตอร์จนเต็มพิกัด
- (3) ทอร์กสุดกำลัง (Breakdown torque) เป็นค่าทอร์กที่เกิดขึ้นในภาวะที่จ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเข้าให้มอเตอร์จนเต็มพิกัดโดยมีความเร็วรอบคงที่
- (4) ทอร์กดึงขึ้น (Pull-up torque) เป็นค่าทอร์กที่เกิดในภาวะจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเข้าให้มอเตอร์เต็มพิกัด ซึ่งทอร์กที่เกิดขึ้นในช่วงที่โรเตอร์ถูกเร่งขึ้นจากภาวะที่หยุดนิ่งจนถึงความเร็วรอบที่เกิดภาวะทอร์กสุดกำลังขึ้น
- (5) ทอร์กดึงเข้า (Pull-in torque) เป็นค่าทอร์กที่เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนความเร็วรอบจากความเร็วสลลิป (Slip speed) เป็นความเร็วซิงโครนัส



ภาพประกอบ 12 ทอร์กชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์

(6) ทอร์กแบบความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance torque) เป็นค่าทอร์กที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่างศูนย์และความถี่ที่เป็น 2 เท่าของความถี่ระบบไฟฟ้า

(7) ทอร์กซิงโครนัส (Synchronous torque) เป็นค่าทอร์กที่ภาวะคงตัวเมื่อทำงานภาวะซิงโครนัสที่พิกัดกำลังไฟฟ้าด้านเข้า

(8) ทอร์กโหลดเต็ม (Full load torque) เป็นค่าทอร์กที่ต้องการเพื่อให้ได้ผลตามพิกัดด้านนอกที่ภาวะความเร็วและกำลังด้านเข้าตามพิกัด

(9) ทอร์กดึงออก (Pull out torque) เป็นค่าทอร์กสูงสุดที่ลดกำลังลง

นอกจากนี้แล้วยังมีชื่อเรียกทอร์กอื่นๆ อีกเช่น Motor torque, Load torque, No-Load torque เป็นต้น

2.3.3 ประสิทธิภาพการส่งกำลัง

ความเร็วของมอเตอร์จะลดลงได้สำหรับโหลดในช่วง 1-25 แรงม้า ยกเว้นปั๊ม ประสิทธิภาพการส่งกำลังจากเพลลาของมอเตอร์ไปยังโหลดก็เป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาถึงประสิทธิภาพ ซึ่งเพลลาของมอเตอร์อาจจะไปขับเกียร์, มุเลย์สายพาน หรือ เฟือง เป็นต้น

(1) การขับด้วยเกียร์ มักจะนิยมใช้กับมอเตอร์ขนาดไม่เกิน 20 แรงม้า โดยสามารถลดความเร็วในแต่ละระดับได้มาก กำลังสูญเสียจากเกียร์จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของอัตราส่วนเกียร์ (gear ratio) บวกกับ 10%

(2) การส่งกำลังด้วยสายพาน ประสิทธิภาพของสายพานมีองค์ประกอบ 7 ประการ ดังนี้



ภาพประกอบ 13 การส่งกำลังด้วยสายพาน

- ชนิดของสายพาน คือ วัสดุ, ความยืดหยุ่น, ความหนา, เส้นผ่าศูนย์กลาง เป็นต้น
- รูปแบบของสายพาน เป็นลักษณะในการใช้งานของสายพาน ซึ่งจะต้องพิจารณาถึงลักษณะงานที่จะใช้ด้วย
 - การบำรุงรักษาระบบขับเคลื่อน มีรายละเอียด คือ ความถี่ในการตรวจสอบบำรุงรักษา, การปรับความตึงของสายพาน โดยปกติการสลิปของสายพานประมาณ 8%
 - การออกแบบระบบขับเคลื่อน เช่น การออกแบบจำนวนสายพาน ซึ่งการใช้งานที่มีจำนวนสายพานน้อยหรือมากเกินไปก็จะมีผลเกี่ยวกับประสิทธิภาพด้วย
 - สัมประสิทธิ์ความฝืด การนำมอเตอร์ไปใช้งานในสถานที่ที่มีสภาพแวดล้อมไม่ดีนัก เช่น มีฝุ่นมาก, มีความชื้นสูง จะทำให้เกิดความฝืดซึ่งจะส่งผลให้เกิดสลิปขึ้น
 - เส้นผ่าศูนย์กลาง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กเกินไปจะส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง
 - ผู้ผลิตสายพาน หากผู้ผลิตสายพานใช้วัสดุและขบวนการผลิตที่ไม่มีคุณภาพก็จะทำให้ประสิทธิภาพของการส่งกำลังลดลงด้วย

2.3.4 ประสิทธิภาพของมอเตอร์

ความสูญเสียที่คำนวณออกมาเป็นค่าประสิทธิภาพนั้น จะแปรเปลี่ยนตามขนาดของโหลดแสดงได้ตามตารางที่ 2.2 ที่ใช้งานตามขนาดของโหลดที่ต่างกัน ซึ่งหากโหลดที่ค่ามากขึ้น ก็จะมีผลให้ประสิทธิภาพปกติของมอเตอร์มากตามไปด้วย (ปกติจะใช้ 75% ของพิกัดโหลดขึ้นไป)

ตาราง 2 ค่าประสิทธิภาพตามปกติ ของมอเตอร์ที่ใช้งานตามขนาดโหลดต่างๆ

ขนาดมอเตอร์ (แรงม้า)		ประสิทธิภาพ (%) ที่ขนาดโหลดต่างๆ			
		25%	50%	75%	100%
1	ธรรมดา	59.4	72.9	78.0	79.8
	ประสิทธิภาพสูง	73.1	82.3	85.1	85.9
10	ธรรมดา	79.9	86.4	87.5	86.7
	ประสิทธิภาพสูง	87.5	91.3	91.7	90.7
100	ธรรมดา	85.5	91.0	92.3	92.4
	ประสิทธิภาพสูง	92.7	95.2	95.6	95.2

การทดสอบประสิทธิภาพมอเตอร์ทำได้ 2 วิธี คือ วิธีแรกเป็นการวัดโดยตรงด้วยการใช้ไดนาโมมิเตอร์หรือตัวแปลงทอร์ก วัดกำลังด้านออกกับความเร็วรอบของมอเตอร์ และวัดกำลังด้านเข้าด้วยวัตต์มิเตอร์ หลังจากนั้นนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพ ส่วนการทดสอบค่าประสิทธิภาพอีกวิธีหนึ่งเป็นการวัดโดยทางอ้อมด้วยการวัดหรือวิเคราะห์หา กำลังสูญเสียในส่วนต่างๆของมอเตอร์ แล้วนำมาคำนวณเป็นค่าประสิทธิภาพ

โดยปกติการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์นั้น จะขึ้นกับรายละเอียดของแต่ละสถาบันและวิธีการทดสอบของแต่ละสถาบัน ซึ่งที่นิยมแพร่หลายมีอยู่ 3 สถาบัน คือ

- (1) IEEE-112 (The Institute of Electrical and Electronic Engineering, Inc)
- (2) IEC-34-2 (International Electro technical Commission)
- (3) JEC-37 (Japanese Electro technical Committee)

การทดสอบของแต่ละสถาบันจะมีรายละเอียดแตกต่างกันออกไป ส่วนในประเทศไทยนั้นมอเตอร์จะถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จะต้องมียุคประสิทธิภาพที่ได้ทำการทดสอบเทียบเท่าหรือมากกว่าค่ามาตรฐานของ IEEE-112 Method B (โดยทั่วไป วิธีการทดสอบที่ยุโรปและญี่ปุ่น จะเป็นแบบไม่มีโหลด แต่ความถูกต้องนั้นจะดีกว่าการทดสอบของอเมริกา กล่าวคือ ค่าที่ได้จะมากกว่าค่าปกติที่ควรจะเป็น)

ตามมาตรฐาน IEEE-112-1996 ให้มีวิธีการหาประสิทธิภาพถึง 10 วิธีที่แตกต่างกันซึ่งวิธีที่นำมาใช้กันแพร่หลายสำหรับมอเตอร์ จะมีอยู่เพียง 3 วิธี คือ Method A, Method B และ Method

โดยแบ่งเป็นวิธีหาค่าประสิทธิภาพสำหรับมอเตอร์ 3 กลุ่ม คือ ขนาดเล็กไม่ถึง 1 แรงม้า, ขนาดกลาง 1-250 แรงม้า และ ขนาดใหญ่มากกว่า 250 แรงม้า ตามลำดับ

ทั้งนี้ Method A เป็นวิธีด้านเข้า – ด้านออก, Method B เป็นวิธีด้านเข้า - ด้านออกที่ความสูญเสียถูกแยกออกไป ส่วน Method F เป็นวิธีวงจรไฟฟ้าสมมูล ซึ่งวิธีการทดสอบและรายละเอียดในการทดสอบพร้อมทั้งแบบฟอร์มการทดสอบจะกล่าวในบทต่อไป

ตาราง 3 ประสิทธิภาพขั้นต่ำของมอเตอร์ธรรมดา และมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง (กฟผ.)

ขนาด (แรงม้า)	ประสิทธิภาพ (%) ที่พิกัดโหลด				
	มอเตอร์ธรรมดา	มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง			
		2 ขั้ว	4 ขั้ว	6 ขั้ว	8 ขั้ว
7.5	84.8	88.5	89.5	89.5	85.5
10	85.6	89.5	89.5	89.5	88.5
15	87.4	90.2	91.0	90.2	88.5
20	88.3	90.2	91.0	90.2	89.5
25	88.9	91.0	92.4	91.7	89.5
30	89.8	91.0	92.4	91.7	91.0
40	90.4	91.7	93.0	93.0	91.0
50	91.0	92.4	93.0	93.0	91.7
60	91.5	93.0	93.6	93.6	91.7
75	92.0	93.0	94.1	93.6	93.0
100	92.0	93.6	94.5	94.1	93.0
125	92.2	94.5	94.5	94.1	93.6
150	92.8	94.5	95.0	95.0	93.6
200	93.3	95.0	95.0	95.0	94.1
250	93.5	95.4	95.0	95.0	94.5
300	93.5	95.4	95.4	95.4	94.5
400	93.8	95.4	95.4	95.4	94.5
500	94.0	95.4	95.8	95.4	94.5

ตามที่กล่าวมาข้างต้น ประสิทธิภาพของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบ, ขนาด, โหลด และการสูญเสียภายในมอเตอร์ นอกจากนั้นแล้วประสิทธิภาพของมอเตอร์ยังขึ้นกับการนำไปใช้งานให้ใกล้เคียงกับพิกัดโหลด ซึ่งโดยปกติควรจะใช้งานตั้งแต่ 75% ของพิกัดโหลดจึงจะเกิดประโยชน์อย่างสูงสุด

ส่วนในเรื่องของค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ขนาดต่างๆ ยิ่งถ้ามอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ค่าตัวประกอบกำลังก็จะสูงกว่ามอเตอร์ธรรมดา มีผลดีคือ เป็นการลดความสูญเสียในสายไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าลง การประหยัดพลังงานนอกจากนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์จะลดลง ซึ่งเป็นการช่วยลดขนาดของชุดคาปาซิเตอร์ที่จะนำมาใช้เพิ่มตัวประกอบกำลังอีกด้วย ซึ่งสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏ (KVA) ที่ลดลง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (KVAR) ที่ลดลงจากการใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงได้

2.4 การสตาร์ทมอเตอร์และการควบคุมความเร็วรอบเพื่อประหยัดพลังงาน

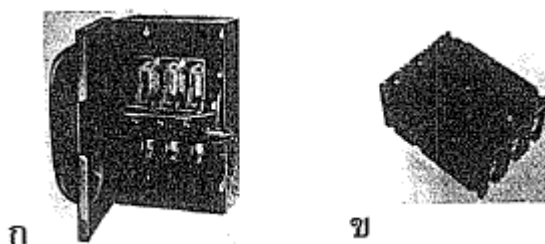
การนำมอเตอร์ทั่วไปมาใช้งาน ส่วนสำคัญประการหนึ่งที่มองข้ามไม่ได้คือ การสตาร์ทมอเตอร์ให้เกิดความปลอดภัยและเกิดประหยัดพลังงานมากที่สุด นอกจากนั้นแล้วการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ก็เป็นการประหยัดพลังงานได้อีกประการหนึ่ง

2.4.1 อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์

อุปกรณ์ควบคุมในการเปิดและปิดวงจรหรือแสดงภาวะการทำงานของมอเตอร์ มีอยู่หลายชนิดซึ่งพอจะแยกได้ ดังนี้

2.4.1.1 สวิตช์ตัดตอน (Disconnection switch)

อุปกรณ์นี้เป็นสวิตช์ไบมีดและมีฟิวส์ประกอบอยู่ด้วยภายในกล่อง อุปกรณ์นี้มีไว้เพื่อแยกมอเตอร์ออกจากระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเข้าโดยใช้มือโยก และยินยอมให้กระแสไหลต่อเติมพิกัดโหลดผ่านแต่จะป้องกันการลัดวงจรไว้ตาม 14



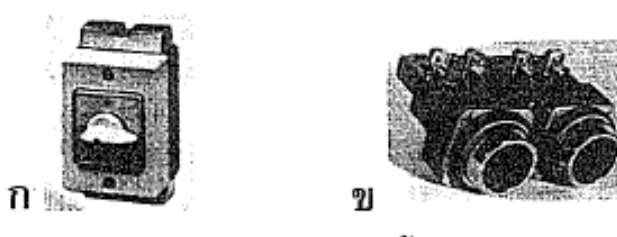
ภาพประกอบ 14 สวิตช์ตัดตอน และเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วยมือ

2.4.1.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วยมือ (Manual circuit breaker)

อุปกรณ์นี้เป็นสวิตช์โยกเพื่อเปิดและปิดวงจร ซึ่งจะปลดวงจรโดยอัตโนมัติเมื่อกระแสไฟฟ้าเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ โดยอุปกรณ์นี้เมื่อทำการปลดวงจรแล้วสามารถตั้งใหม่ได้ จึงนิยมนำมาใช้แทนสวิตช์ตัดตอนเนื่องจากไม่ต้องทำการเปลี่ยนฟิวส์

2.4.1.3 ปุ่มกด (Switch button)

อุปกรณ์นี้เป็นสวิตช์ที่ต้องใช้นิ้วกดเพื่อเปิดหรือปิดวงจร ปุ่มกดนี้จะมีสปริงเพื่อให้ปุ่มกลับคืนปกติเมื่อปล่อยมือตามภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 สวิตช์แบบปุ่มกด

2.4.1.4 รีเลย์ควบคุม (Control relay)

อุปกรณ์นี้เป็นสวิตช์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เปิดหรือปิดชุดคอนแทค เมื่อขดลวดรีเลย์ถูกกระตุ้น นอกจากนั้นแล้วยังมีรีเลย์หน่วงเวลา ซึ่งจะเปิดหรือปิดวงจรไฟฟ้าหลังจากผ่านเวลาหน่วงตั้งไว้แล้วตามภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 รีเลย์ควบคุม

2.4.1.5 คอนแทคเตอร์แบบแม่เหล็ก (Magnetic contactor)

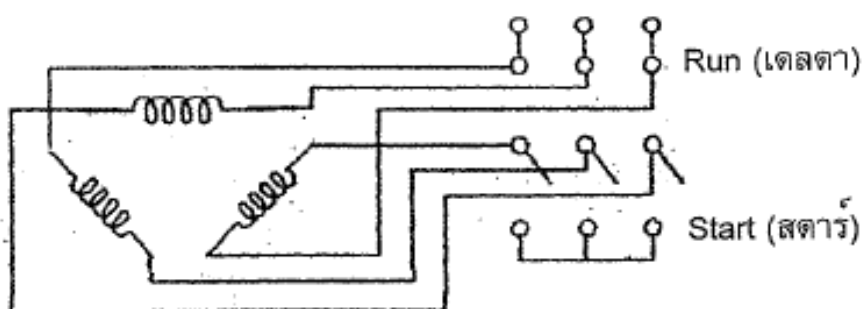
อุปกรณ์นี้เป็นรีเลย์ควบคุมขนาดใหญ่ๆ ที่มีไว้ใช้ในการปิดหรือใช้เปิดวงจรไฟฟ้ากำลัง อุปกรณ์นี้จะมีขดลวดรีเลย์และตัวกระทุ้งแบบแม่เหล็ก ตามรูปที่ 17 ซึ่งจะส่งผลไปยังชุดคอนแทคที่เคลื่อนที่ได้เมื่อขดลวดรีเลย์ถูกกระตุ้น



ภาพประกอบ 17 คอนแทคเตอร์แบบแม่เหล็ก

2.4.2 การสตาร์ทแบบสตาร์-เดลต้า

การสตาร์ทแบบสตาร์-เดลต้า (Y- Δ) นี้เป็นวิธีการสตาร์ทที่เริ่มต้นด้วยการต่อแบบสตาร์ ตามภาพประกอบ 18 ทำให้กระแสไฟฟ้าสตาร์ทต่ำแต่ทอร์คเริ่มเดินก็ลดลงด้วยเช่นเดียวกันจึงกล่าวได้ว่าการสตาร์ทด้วยวิธีนี้จะทำให้ทอร์คเริ่มเดินต่ำ แต่กระแสสตาร์ทก็จะลดลงมากด้วยและวิธีนี้ก็มีข้อดีเช่นกัน คือ ราคาไม่สูงมากนัก



ภาพประกอบ 18 การสตาร์ทแบบสตาร์ – เดลต้า

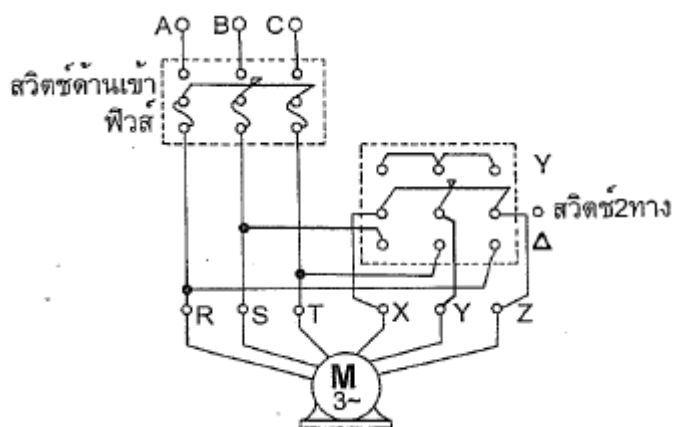
การต่อมอเตอร์ 3 เฟสแบบสตาร์จะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเพียง 220 โวลต์ แต่หากต่อวงจรแบบเดลต้าจะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเป็น 380 โวลต์ มอเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนต์เป็น 0.5 โอห์มต่อเฟส จะทำการคำนวณหากระแสไฟฟ้าได้ คือ

$$\text{การต่อวงจรสตาร์ที่เป็นสตาร์ (Y) จะใช้กระแสขณะสตาร์ที่} = 220/0.5 = 440 \text{ แอมป์} \quad (2.19)$$

$$\text{การต่อวงจรสตาร์ที่เป็นเดลต้า (\Delta) จะใช้กระแสขณะสตาร์ที่} = 380/0.5 = 760 \text{ แอมป์} \quad (2.20)$$

จะเห็นว่าการสตาร์ทมอเตอร์แบบเดลต้าจะใช้กระแสไฟฟ้าสูงเป็น 1.73 เท่าของสตาร์แบบสตาร์ และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมมอเตอร์ขณะสตาร์ทเดลต้า ก็สูงเป็น 1.73 เท่าของการสตาร์ทแบบสตาร์เช่นเดียวกัน วิธีนี้จึงเป็นระบบที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้สตาร์ทมอเตอร์

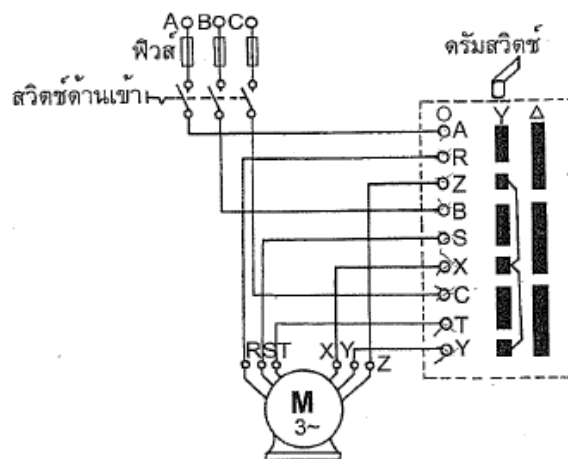
วิธีการสตาร์ทแบบสตาร์-เดลต้ามักจะใช้สวิตช์ 3 ขั้ว 2 ทาง ซึ่งสวิตช์ชนิดนี้เหมาะกับมอเตอร์ขนาด 30 แรงม้าขึ้นไปเพื่อช่วยให้สับสวิตช์ได้ง่ายขึ้น จากรูปที่ 19 เมื่อสับสวิตช์ด้านเข้าแล้วสับสวิตช์ 2 ทางไปทางด้านสตาร์ จะทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนด้วยวงจรสตาร์ ซึ่งเมื่อความเร็วประมาณ 75% ของความเร็วรอบปกติจึงจะสับสวิตช์ 2 ทางไปด้านเดลต้า ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยวงจรแบบเดลต้า และหากต้องการหยุดก็ปลดสวิตช์ 2 ทางไว้ที่ตำแหน่งตรงกลาง ข้อดีของสวิตช์ชนิดนี้ก็คือ ราคาถูก วงจรไม่ยุ่งยากและบำรุงรักษาง่าย ส่วนข้อเสียก็คือ มีการป้องกันเฉพาะฟิวส์ทางด้านเข้า, การสับสวิตช์ขนาดใหญ่ค่อนข้างยาก และจะต้องระวังเรื่องความปลอดภัยระหว่างปฏิบัติงานอีกด้วย



ภาพประกอบ 19 วงจรสตาร์ทมอเตอร์แบบสตาร์-เดลต้าด้วยสวิตช์ 3 ขั้ว 2 ทาง

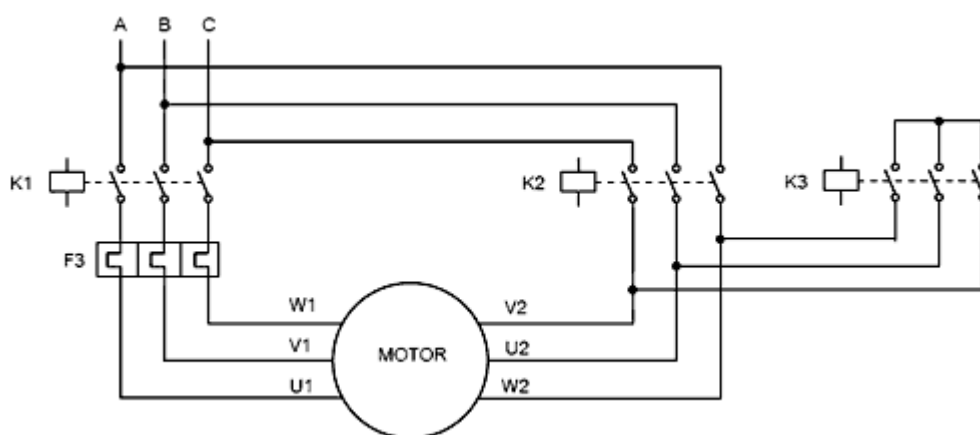
การสตาร์ทมอเตอร์แบบสตาร์-เดลต้า อาจจะใช้ตรัมสวิตช์ซึ่งเป็นการต่อวงจรด้วยหน้าสัมผัสจากแรงกดของสปริงจึงทำให้เร็วและแน่นกว่าสวิตช์ 3 ขั้ว 2 ทาง ข้างต้น และการโยกสวิตช์ก็เปลี่ยนเป็นแบบหมุนแทนซึ่งสะดวกและรวดเร็วกว่า ตามรูปที่ 20 เมื่อกดสวิตช์ทางเข้า กระแสไฟฟ้าจะจ่ายเข้าตรัมสวิตช์ให้ตรัมสวิตช์อยู่ตำแหน่งสตาร์ เมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์ประมาณ 75%

ของความเร็วกติ จึงโยกตรัมสวิตช์ไปยังตำแหน่งเดลต้า หากต้องการหยุดมอเตอร์ก็ให้เปิดสวิตช์ด้าน
เข้าและโยกตรัมสวิตช์ไปยังตำแหน่ง “O” ซึ่งเป็นตำแหน่งที่หน้าสัมผัสของตรัมสวิตช์เปิดวงจร



ภาพประกอบ 20 การสตาร์ทมอเตอร์แบบสตาร์-เดลต้าด้วยตรัมสวิตช์

นอกจากนั้นแล้ว การสตาร์ทแบบสตาร์-เดลต้าก็สามารถจะใช้คอนแทคเตอร์ได้อีกด้วยตาม
รูปที่ 21 โดยเมื่อเริ่มสตาร์ทก็ให้คอนแทคเตอร์แบบแม่เหล็ก K2 ทำงานก่อน แล้วให้คอนแทคเตอร์ช่วย
(NO) ของ K2 สั่งให้คอนแทคเตอร์หลัก K1 ทำงาน ทำให้ไฟฟ้าไหลเข้ามอเตอร์เป็นภาวะสตาร์ เมื่อ
มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วประมาณ 75% ของรอบปกติ ก็ให้ตัดคอนแทคเตอร์ K2 ออก แล้วต่อให้คอน
แทคเตอร์ K3 ทำงาน โดยที่คอนแทคเตอร์ K1 ยังทำงานอยู่ด้วย สุดท้ายก็จะได้ภาวะที่มอเตอร์ทำงาน
เป็นภาวะเดลต้า ซึ่งผู้วิจัยเลือกที่จะต่อวงจรด้วยวิธีนี้ ซึ่งไม่ยุ่งยากและง่ายต่อการควบคุม



ภาพประกอบ 21 การสตาร์ทมอเตอร์แบบสตาร์-เดลต้า ด้วยคอนแทคเตอร์

2.5 ระบบการป้องกันและความปลอดภัยของมอเตอร์

การนำมอเตอร์มาใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุด และประหยัดพลังงานได้นั้น จะต้องทราบถึงการออกแบบและมาตรฐานที่ระบุไว้สำหรับมอเตอร์ว่ามีระดับป้องกันเพียงใด และมีระดับฉนวนอยู่ในระดับใด เพื่อจะได้เลือกนำมาใช้ได้ตรงกับการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและป้องกันความเสียหายต่อวงจรไฟฟ้าและผู้ปฏิบัติงาน

2.5.1 ระดับการป้องกันของมอเตอร์

การทราบถึงคุณสมบัติในการกำหนดระดับป้องกันของมอเตอร์ จะทำให้สามารถนำมาใช้งานได้อย่างคุ้มค่า ซึ่งระดับป้องกันของมอเตอร์จะแสดงในรูปแบบของ IP

ค่าระดับการป้องกันมอเตอร์ที่แสดงอยู่ในรูปแบบของ IP นี้ จะมีตัวเลขต่อท้าย IP อยู่ 2 ตัวด้วยกันที่ใช้บอกลักษณะของการป้องกัน ซึ่งอธิบายเลขรหัสตัวแรกเป็นการป้องกันจากวัตถุภายนอก และเลขรหัสตัวที่สองเป็นรหัสการป้องกันของเหลว ดังตาราง 4 ที่เป็นไปตามมาตรฐาน มอก.513-2527, IEC 529 หรือ EN60034 Part 5 ดังต่อไปนี้

ตาราง 4 ระดับเลขรหัสสำหรับแสดงการป้องกัน (IP)

รหัส (เลข)	ตัวเลขแรก หมายถึง (การป้องกันจากวัตถุภายนอก)	ตัวเลขที่สอง หมายถึง (การป้องกันจากของเหลว)
0	ไม่มีการป้องกัน	ไม่มีการป้องกัน
1	มีการป้องกันวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 มม.เข้าไป	มีการป้องกันน้ำหยดใส่ในแนวตั้ง
2	มีการป้องกันวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่า 12 มม.เข้าไป	มีการป้องกันน้ำหยดทำมุม $\leq 50^\circ$
3	มีการป้องกันวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่า 2.5 มม.เข้าไป	มีการป้องกันน้ำหยดทำมุม $\leq 60^\circ$
4	มีการป้องกันวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่า 1.0 มม.เข้าไป	มีการป้องกันน้ำทุกทิศทาง
5	มีการป้องกันฝุ่นเข้าไป	มีการป้องกันน้ำฉีดใส่ทุกทิศทาง
6	มีการผนึกกันฝุ่น	มีการป้องกันน้ำฉีดใส่ทุกทิศทาง
7	-	มีการป้องกันน้ำท่วมชั่วคราว
8	-	มีการป้องกันน้ำ เมื่อใช้งานได้น้ำ

2.5.2 สายไฟฟ้าสำหรับวงจรมอเตอร์และสายไฟฟ้ากำลัง

2.5.2.1 สายไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์ตัวเดียว

สายวงจรย่อยสำหรับมอเตอร์ตัวเดียว ต้องทนกระแสไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่า 125% ของพิกัดกระแสโหลดเต็มที่ของมอเตอร์ และต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 1.5 ตร.มม. แต่กรณีที่มีมอเตอร์ใช้งานไม่ต่อเนื่องนั้นให้ขนาดกระแสไฟฟ้าไม่ต่ำกว่าค่าร้อยละจากพิกัดกระแสไฟฟ้าแบบแผ่นป้ายประจำมอเตอร์ ตามตารางที่ 5

ตาราง 5 ขนาดกระแสไฟฟ้าของสายไฟฟ้า

การใช้งานของตัวต้านทาน	ขนาดกระแสของสายไฟฟ้า
เริ่มเดินอย่างเบา	35%
เริ่มเดินอย่างหนัก	45%
เริ่มเดินอย่างหนักมาก	55%
ใช้งานเป็นระยะห่างมาก	65%
ใช้งานเป็นระยะห่างปานกลาง	75%
ใช้งานเป็นระยะถี่	85%
ใช้งานต่อเนื่อง	110%

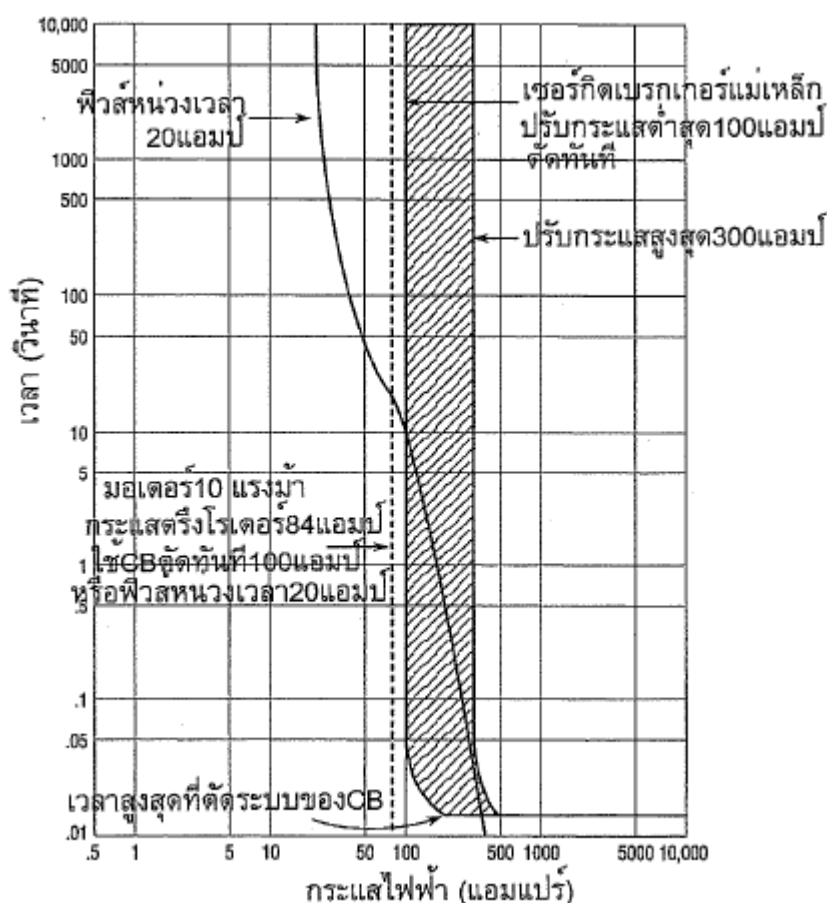
ขนาดสายเมนไฟฟ้า					
ตามข้อบังคับการไฟฟ้านครหลวง					
เครื่องวัด (แอมแปร์)	เฟส	ขนาดสูงสุดของ เมนสวิตช์ (แอมแปร์)	ขนาดค่าสุดของ สายเมน (ตร.มม.)		ทนแรงดันไฟฟ้า ของสายเมน (โวลต์)
			ในอากาศ	ในท่อ	
5 (15)	1	16	4	4*	300
15 (45)	1	50	10	16	300
30 (100)	1	100	25	50	300
50 (150)	1	125	35	70	300
15 (45)	3	50	10	16	750
30 (100)	3	100	25	50	750
50 (150)	3	125	35	70	750
200	3	250	95	150	750
400	3	500	240	500	750

* = หมายถึงหากเดินสายเมนในท่อฝังดิน ขนาดสายต้องไม่เล็กกว่า 10 ตร.มม.

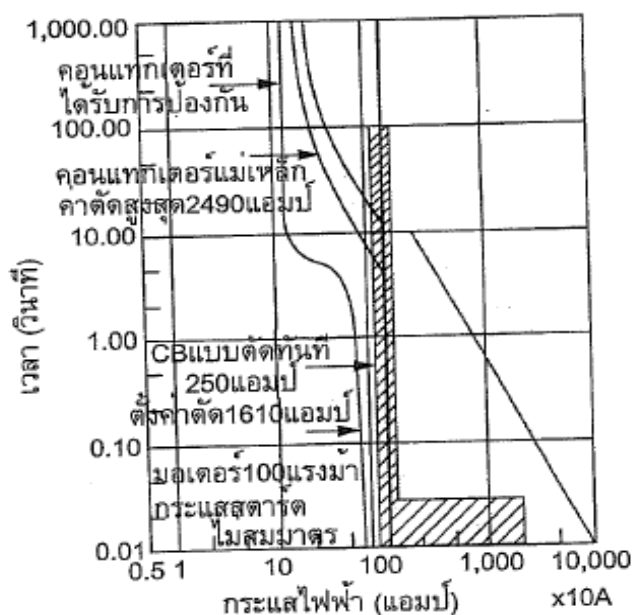
2.5.2.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์, ฟิวส์ และอุปกรณ์ปลดวงจรมอเตอร์

เซอร์กิตเบรกเกอร์ทั่วไปชนิดทำงานด้วยอุณหภูมิต่ำและแม่เหล็ก จะใช้ในการป้องกันวงจรมอเตอร์ ส่วนฟิวส์ที่มีการหน่วงเวลาจะนำมาใช้ป้องกันวงจรมอเตอร์เป็นอย่างดี แต่ข้อควรระวัง คือ ในกรณีที่ เป็นมอเตอร์ 3 เฟส อาจเกิดเหตุการณ์ที่ฟิวส์ขาดเพียง 1 เฟสได้

ในกรณีที่ มีการพัฒนางจรป้องกันมอเตอร์ อุปกรณ์ป้องกันวงจรมอเตอร์ที่เป็นแม่เหล็ก อย่างเดียวจะถูกนำมาใช้ เนื่องจากสามารถปรับแต่งค่ากระแสในการปลดวงจรได้ นั่นคือ ใช้การผสมผสานระหว่างชุดสตาร์ทกับรีโหลดเกิน จากเวลาที่ใช้ในการสตาร์ทกับการป้องกันกระแสเกินของ ภาวะตรึงโรเตอร์ การปรับค่าการปลดวงจรให้สูงกว่าค่ากระแสตรึง โรเตอร์นั้น จะพบเห็นและป้องกันการเกิดฟอลต์ได้เร็วกว่าฟิวส์ และเมื่อมีการลัดวงจรที่รุนแรงขึ้น มันจะทำงานช้ากว่าฟิวส์และจะไม่จำกัดกระแสได้เหมือนกับฟิวส์ทำได้ ซึ่งแสดงการป้องกันดังตารางที่ 6

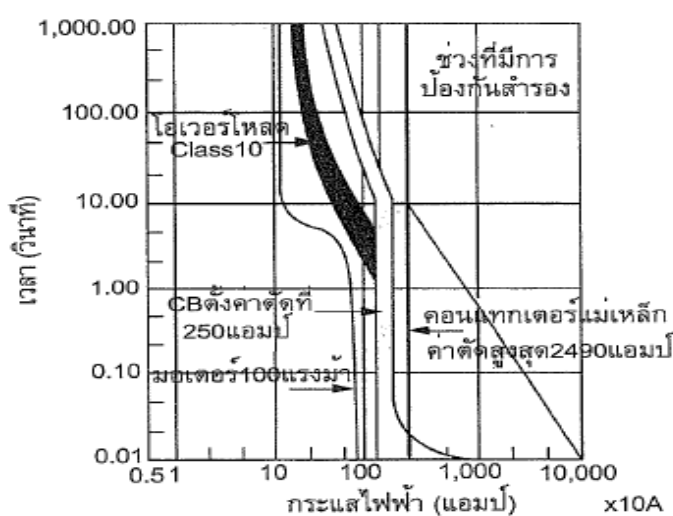


ภาพประกอบ 22 การเปรียบเทียบเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดแม่เหล็กกับฟิวส์หน่วงเวลา



ภาพประกอบ 23 คอนแทกเตอร์ที่ได้รับการป้องกันที่ค่ากระแสตัดวงจรสูง

ดังนั้นควรพิจารณาว่าต้องการระบบป้องกันสำรองสำหรับการทำงานภาวะโหลดเกินหรือไม่ ตามปกติอุปกรณ์โหลดป้องกันเกินจะป้องกันภาวะโหลดเกินและการเกิดฟอลต์ที่อิมพีแดนซ์สูงเมื่อใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรทันที ความผิดพลาดต่างๆ เช่น การทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกิน, การต่อสายผิด หรือการทำงานผิดพลาดของหน้าสัมผัส อาจจะทำให้เกิดการไม่ตัดวงจรเมื่อโหลดเกินหรือเกิดฟอลต์ได้ ซึ่งระบบป้องกันจำเป็นสำหรับการผิดพลาดผิดปกตินี้ ดังแสดงตามรูปที่ 24 ซึ่งจะมีระบบป้องกันสำรองต่อไว้ในช่วงโหลดเกิน



ภาพประกอบ 24 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดความร้อนและแม่เหล็กสำหรับมอเตอร์ 100 แรงม้าขึ้นไปโดยมีระบบป้องกันสำรองต่อไว้ในช่วงโหลดเกิน

2.5.3 การป้องกันกระแสลัดวงจรระหว่างสายและป้องกันการรั่วลงดิน

วงจรที่มีมอเตอร์ตัวเดียว อุปกรณ์ป้องกันในส่วนนี้ ต้องสามารถทนกระแสสตาร์ทของมอเตอร์ได้ และมีขนาดหรือการปรับตั้งไม่เกินค่าที่กำหนดดังตารางที่ 6 ถ้าค่าที่กำหนดไม่ตรงกับมาตรฐานของฟิวส์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้ใช้มาตรฐานที่สูงถัดไปได้

ตาราง 6 ขนาดปรับตั้งสูงสุดของอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรระหว่างสายและป้องกันการรั่วลงดิน
(คิดเป็น % ของกระแสโหลดเต็มที่)

ชนิดมอเตอร์	ฟิวส์ชนิด		เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิด	
	ทำงานไว	หน่วงเวลา	ปลดทันที	เวลาผกผัน
มอเตอร์ 1 เฟส ไม่มีรหัสอักษร	300%	175%	700%	250%
มอเตอร์ 1 เฟสทั้งหมด, มอเตอร์ 3 เฟส โรเตอร์ทรงกระบอก และมอเตอร์ ซิงโครนัส ซึ่งเริ่มเดินโดยรับ แรงดันไฟฟ้าเต็มที่ หรือ เริ่มเดินโดย ผ่านตัวต้านทานหรือ รีแอกเตอร์	300%	175%	700%	250%

2.6 แนวทางการพิจารณาเพื่อลดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด

2.6.1 ตัวประกอบภาระ (Load factor)

ในการพิจารณาเพื่อลดค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำเป็นต้องเข้าใจคำว่า ตัวประกอบภาระ (Load factor) เสียก่อน ตัวประกอบภาระเป็นค่าที่ได้จากการวัดความสม่ำเสมอในการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยมีสมการที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

$$\text{ตัวประกอบภาระ} = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยใน 1 เดือน (KWh)}}{\text{กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ใน 1 เดือน (KW)}} \times 100 \quad (2.21)$$

จากสมการข้างต้น จะเห็นว่าตัวแปรที่ทำให้ตัวประกอบภาระมีเปอร์เซ็นต์สูงหรือต่ำมีอยู่ 2 ตัว คือ จำนวนหน่วยพลังงานที่ใช้ (KWh) และจำนวนกิโลวัตต์สูงสุดหรือความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (KW) ดังนั้นการเพิ่มค่าตัวประกอบภาระให้สูงขึ้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

- (1) ลดจำนวนค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak demand) ลง
- (2) ปรับการใช้พลังงานไฟฟ้าให้มีการใช้งานอย่างสม่ำเสมอเพื่อลดการใช้จำนวน

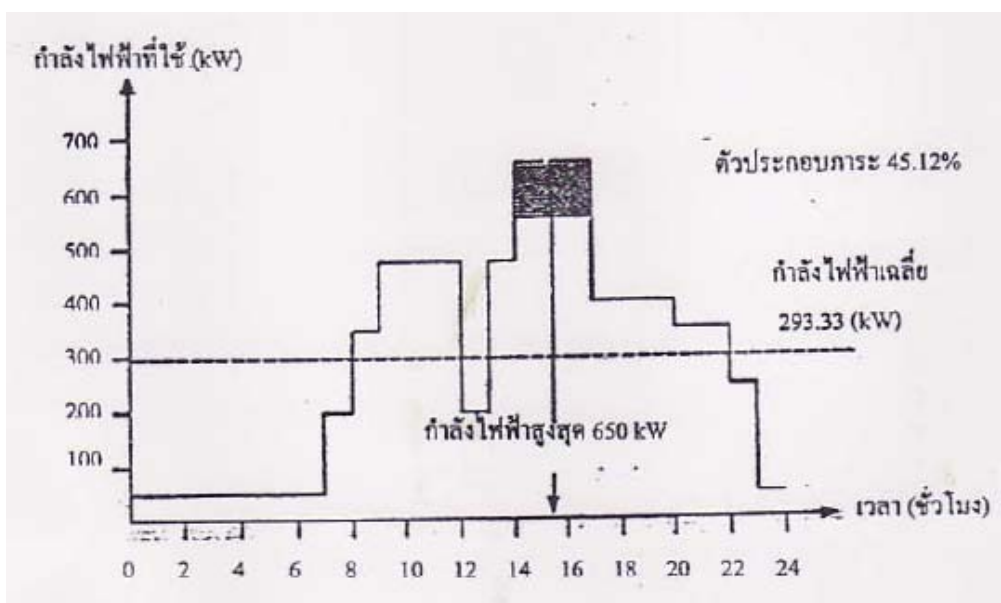
กิโลวัตต์-ชั่วโมงลง

การพิจารณาตัวประกอบภาระรายเดือนเพื่อให้ทราบศักยภาพในการลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ทั้งนี้ก็ต้องพิจารณาตัวประกอบภาระรายสัปดาห์และรายวันอีกด้วย เพราะฉะนั้นการคำนวณหาตัวประกอบภาระรายวันซึ่งจะหาได้จากสมการ

$$\text{กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้} = \frac{\text{ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้}}{\text{เวลาที่ใช้}} \quad (2.22)$$

2.6.2 การพล็อตกราฟภาระ (Load Curve)

เป็นการนำผลการบันทึกการใช้พลังงานไฟฟ้ารายชั่วโมงมาทำเป็นกราฟภาระให้ทราบโครงสร้างการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงได้อย่างถูกต้อง ดังรูปที่ 25



ภาพประกอบ 25 กราฟภาระ (Load Curve)

2.7 ทฤษฎีการคำนวณอัตราค่าไฟฟ้า

2.7.1 การคิดค่าไฟฟ้าอัตราตามช่วงเวลาของวัน TOD Rate (Time of Day Rate)

$$C1 = [[[DC_p \times P_p] + [D_{CPP} \times (PP - P_p)] + [E_c \times E] + [F_t \times E] + A_{CC}] \times N_M] + VAT \quad (2.23)$$

โดยที่ C1 คือ ค่าไฟฟ้า (Baht)

DC_p คือ อัตราค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วง On Peak (Baht/kW)

P_p คือ ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วง On Peak (kW) ปกติดูจากมิเตอร์กรณีนี้ สมมติจากการใช้ไฟฟ้าของเครื่องจักร

DC_{PP} คือ อัตราค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วง Partial Peak (Baht/kW)

PP คือ ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วง Partial Peak (kW) ปกติดูจากมิเตอร์กรณีนี้ สมมติจากการใช้ไฟฟ้าของเครื่องจักร

OP คือ อัตราค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วง Off Peak (Baht/kW)

E_c คือ อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า (Baht/Unit)

E คือ ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (kWh) ปกติดูจากมิเตอร์กรณีนี้ สมมติจากการใช้ไฟฟ้าของเครื่องจักร

F_t คือ สูตรปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติ (Baht/kW)

N_M คือ จำนวนเดือน (โดย 1 เดือนคิด 26x8 วัน 208 ชั่วโมง)

A_{CC} คือ ค่าใช้จ่ายอื่น (Baht/Month)

VAT คือ ภาษีมูลค่าเพิ่ม (%)

2.8 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

2.8.1 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

$$n = TS / Y_i \quad (2.24)$$

โดยที่ n คือ ระยะเวลาคืนทุน (ปี)

TS คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (บาท)

Y_i คือ ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)

2.8.2 การหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV)

$$NPV = -k_0 + \left[\frac{b_1 - c_1}{(i+1)} \right] + \left[\frac{b_2 - c_2}{(i+1)^2} \right] + \left[\frac{b_t - c_t}{(i+1)^n} \right] \quad (2.25)$$

โดยที่ NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)

k_0 คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรก (บาท)

b_t คือ ผลตอบแทนในปีที่ 1, 2, 3..., n (บาท)

c_t คือ ค่าใช้จ่ายในปีที่ 1, 2, 3..., n (บาท)

i คือ อัตราดอกเบี้ย (%)

t คือ ปีของโครงการ คือปีที่ 1, 2, 3..., n (ปี)

n คือ อายุโครงการ (ปี)

2.8.3 อัตราผลตอบแทนในการลงทุน (Internal Rate of Return ; IRR)

$$IRR \text{ คือ ค่าอัตราส่วนลด } (r) \text{ ที่จะทำให้ } \sum_{t=1} \frac{B_t - C_t}{(i+r)^t} = 0 \quad (2.26)$$

โดยที่ B_t คือ ผลตอบแทนในปีที่ t , (บาท)

C_t คือ ค่าใช้จ่ายในปีที่ t , (บาท)

t คือ ปีของโครงการมีค่า 1, 2, ..., n, (ปี)

r คือ อัตราส่วนลด, (%)

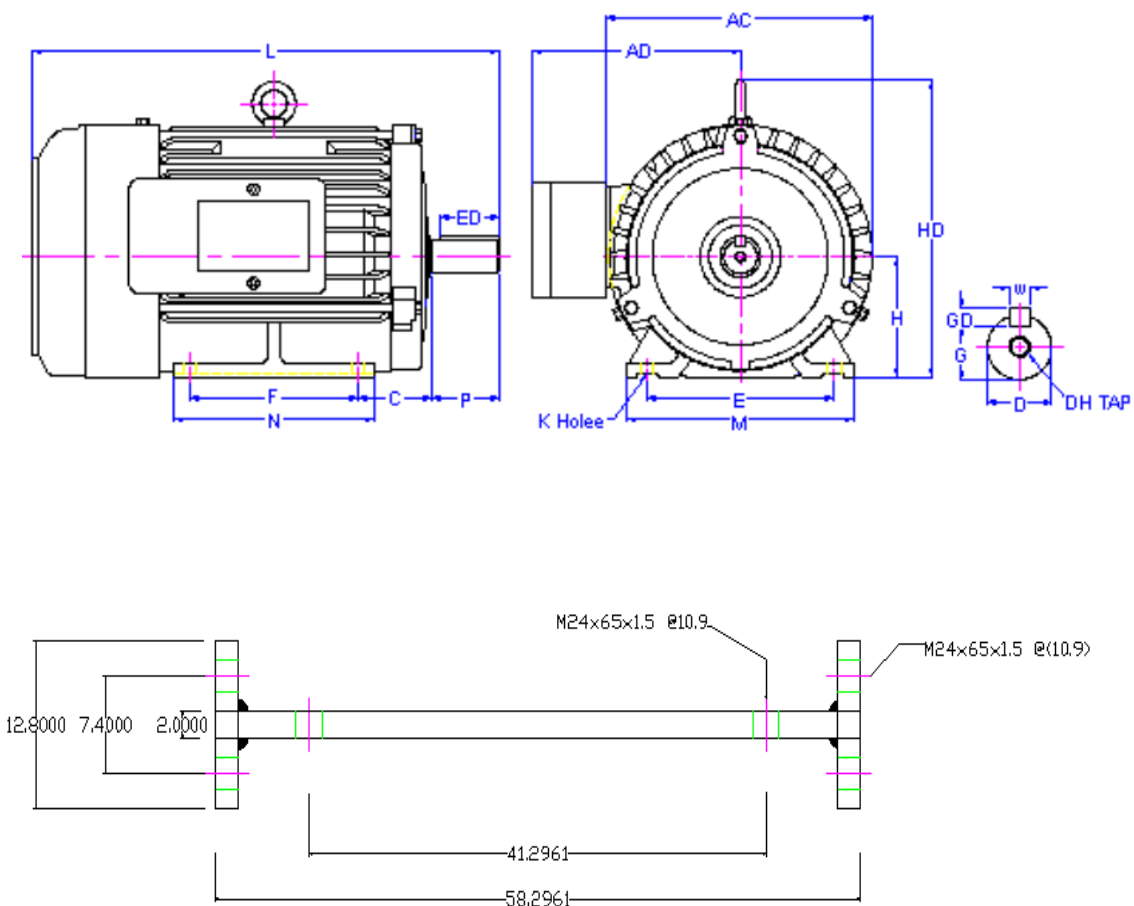
บทที่ 3

การออกแบบและการคำนวณ

ในการออกแบบและติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าเข้าไปในรถชุดนั้น จะต้องคำนึงถึงระบบเดิมที่ใช้เครื่องยนต์เป็นเครื่องต้นกำลัง ที่ไปขับเคลื่อนชุดไฮดรอลิคปั๊มทำงานเป็นหลักและองค์ประกอบที่สำคัญหลายส่วน การทำวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้ชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามาควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าอีกด้วย

ดังนั้นขั้นตอนในการดำเนินงานและปรับปรุงจะมีลำดับขั้นตอนของการออกแบบโดยใช้ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากข้อมูลของเครื่องยนต์เดิมบางส่วนนำมาอ้างอิงและการคำนวณ ดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบฐานรองรับมอเตอร์



ภาพประกอบ 26 คานรับน้ำหนักมอเตอร์

3.2 การคำนวณระบบส่งกำลัง

คำนวณและเปรียบเทียบแรงม้ากับทอร์คของเครื่องยนต์และมอเตอร์ไฟฟ้า จะต้องสัมพันธ์กัน
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเครื่องยนต์และทอร์ค

$$P_e = 2 \pi N T_e$$

$$P_e = \text{กำลังเครื่องยนต์, KW}$$

$$\pi = 3.1416$$

$$N = \text{ความเร็วรอบเครื่องยนต์}$$

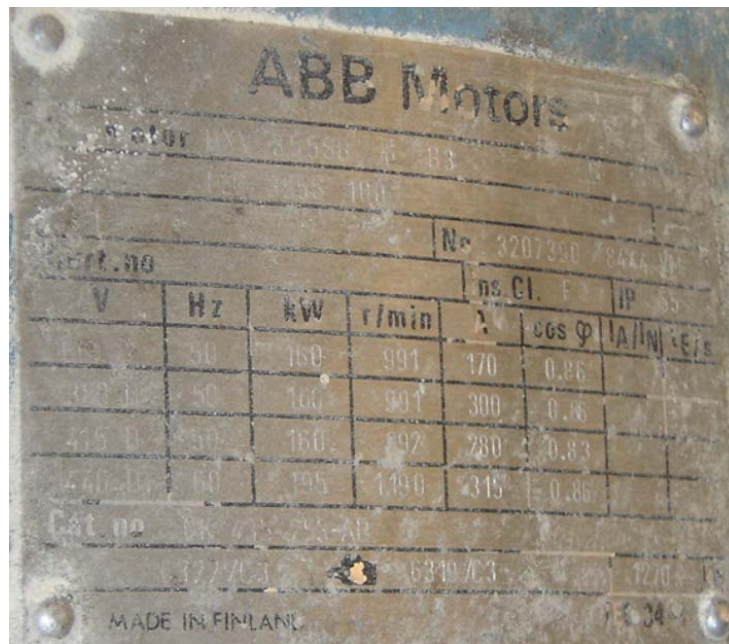
ข้อมูลจากคู่มือเครื่องยนต์และเนมเพลทมอเตอร์ไฟฟ้า

เครื่องยนต์	มอเตอร์ไฟฟ้า
เครื่องยนต์ 200 แรงม้า	มอเตอร์ไฟฟ้า 160 KW
ทอร์ค 490 NM/1600 / ไฮดรอลิค 2200 RPM	ทอร์ค 330 NM/991 RPM
อัตราการความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 215 g/kWh (25.8 L/hr)	อัตราการใช้ไฟฟ้า 160 KW/หน่วย

Specifications

EXCAVATORS BACKHOES

Model		PC200-6 st	PC200-6 CUSTOM	PC200-6 th	PC200EN-6
Item					
OPERATING WEIGHT*	kg(lb)	20150 (44,430)	20400 (44,980)	19880 (43,830)	19000 (41,890)
FLYWHEEL (SAE) HORSEPOWER (DIN)	HP(kW)/RPM PS(kW)/RPM	128 (96)/2000 130 (96)/2000	135 (102)/2000 137 (102)/2000	132 (99)/2000 134 (99)/2000	133 (99)/2200 135 (99)/2200
BUCKET CAPACITY RANGE (SAE)	m ³ (cu.yd)	0.47 ~ 1.15 (0.62)(1.50)	0.47 ~ 1.15 (0.62)(1.50)	0.50 ~ 1.17 (0.65)(1.53)	0.40 ~ 1.19 (0.52)(1.49)
PERFORMANCE: Swing speed Max travel speed	RPM km/h(MPH)	12.4 Hi 5.5 (3.4) Mi 4.1 (2.5) Lo 3.0 (1.9)	12.4 3.8 (2.4) — —	12.4 Hi 5.5 (3.4) — Lo 3.8 (2.4)	12.0 Hi 5.5 (3.4) Mi 4.0 (2.5) Lo 2.3 (1.7)
DIMENSIONS:*					
Overall length(transport)	mm(ft.in)	9510 (31'2")	9425 (30'11")	9425 (30'11")	8800 (28'10")
Overall height(transport)***		2985 (9'10")	2970 (10'0")	2970 (9'9")	2960 (9'9")
Overall width		2880 (9'5")	3000 (9'5")	3000 (9'10")	2490 (8'2")
Length of track on ground		3270 (10'9")	3270 (10'9")	3270 (10'9")	3260 (10'8")
Track gauge		2180 (7'2")	2180 (7'2")	2200 (7'3")	1990 (6'6")
Tail swing radius		2780 (9'1")	2780 (9'1")	2750 (9')	2656 (8'9")
Ground clearance		440 (1'5")	440 (1'5")	440 (1'5")	442 (1'5")
ENGINE:					
Model		KOMATSU S6D102E	KOMATSU S6D102E	KOMATSU S6D102E	KOMATSU S6D102
No. of cylinder-bore x stroke	mm (in)	6-102 x 120 (4.02 x 4.72)	6-102 x 120 (4.02 x 4.72)	6-102 x 120 (4.02 x 4.72)	6-102 x 120 (4.02 x 4.72)
Piston displacement	ltr.(cu.in)	5.88 (359)	5.88 (359)	5.88 (359)	5.88 (359)
HYDRAULIC SYSTEM:					
Hydraulic pump		2 x Variable Piston	2 x Variable Piston	2 x Variable Piston	1 x Variable Piston
Max. oil flow	ltr.(U.S.Gal)/min.	412 (109)	412 (109)	412 (109)	307 (81)
Max. oil pressure	kg/cm ² (PSI)	355 (5050)**	325 (4620)	355 (5050)**	355 (5050)**
Track shoe width/ ground pressure	mm(in)/ kg/cm ² (PSI)	700 (28)/ 0.41 (5.8)	800 (31.4)/ 0.36 (5.1)	800 (31.4)/ 0.35 (5.0)	500 (20)/ 0.54 (7.7)
CAPACITY(Refilled):					
Fuel tank		340 (89.8)	340 (89.8)	340 (89.8)	250 (66.1)
Hydraulic oil tank	ltr.(U.S.Gal)	166 (43.9)	166 (43.9)	166 (43.9)	120 (31.7)
MACHINE SPEC:*					
Boom	mm(ft.in)	5700 (18'8")	5700 (18'8")	5700 (18'8")	5150 (16'11")
Arm	mm(ft.in)	2925 (9'7")	2930 (9'7")	2925 (9'7")	2250 (7'5")
Bucket(SAE)	m ³ (cu.yd)	0.76 (1.00)	0.76 (1.00)	0.80 (1.05)	0.76 (1.00)



ภาพประกอบ 27 เนมเพลทมอเตอร์ไฟฟ้า 160 kW

ทดความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าจาก 991 rpm ให้ไปขับ hydraulic pump ที่ 2200 rpm
 ความเร็วรอบล้อขับ X เส้นผ่าศูนย์กลางล้อขับ = ความเร็วรอบล้อตาม x เส้นผ่าศูนย์กลางล้อตาม

$$n_1 \cdot d_1 = n_2 \cdot d_2$$

อัตราทด $i =$ ความเร็วล้อขับ / ความเร็วล้อตาม

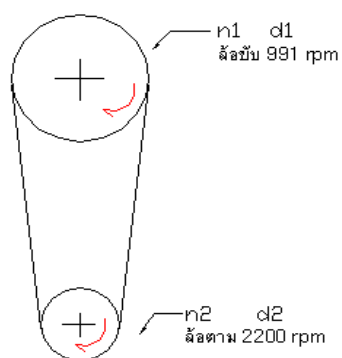
$$i = n_1/n_2 \text{ หรือ}$$

อัตราทด $i =$ เส้นผ่าศูนย์กลางล้อตาม / เส้นผ่าศูนย์กลางล้อขับ

$$i = d_2/d_1$$

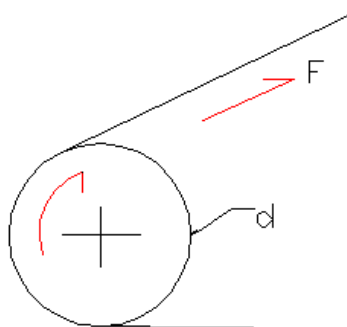
$$d_1 = 250 \text{ cm.}$$

$$d_2 = 114 \text{ cm.}$$



ภาพประกอบ 28 การทอดความเร็วรอบ

3.2.1 คำนวน Belt Tension และเลือกขนาดของสายพานส่งกำลัง



ภาพประกอบ 29 ทิศทางการหมุนและการขับเคลื่อนของสายพาน

$$M = F \cdot r$$

$$\omega = 2 \pi n$$

$$P = M \cdot \omega$$

$$\text{ความเร็วเชิงมุม} = 2 \times 3.14 \times (990/60)$$

$$\omega = 103.62 \text{ rad/s.}$$

$$\text{โมเมนต์บิด} = \text{กำลังขับ} / \text{ความเร็วเชิงมุม}$$

$$M = 160 \text{ kW} / 103.62 \text{ rad/s.}$$

$$= 1,544.10 \text{ Nm.}$$

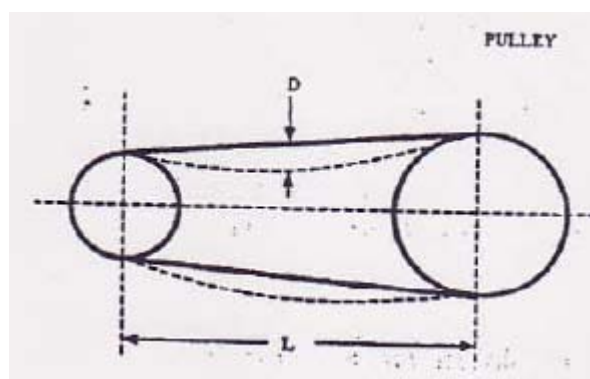
$$\text{แรง} = \text{โมเมนต์บิด} / \text{รัศมี}$$

$$F = 1,544.10 / 1.25$$

$$= 1,235.28 \text{ N.}$$

3.2.2 การตรวจปรับสายพานให้มีความตึงที่พอเหมาะ

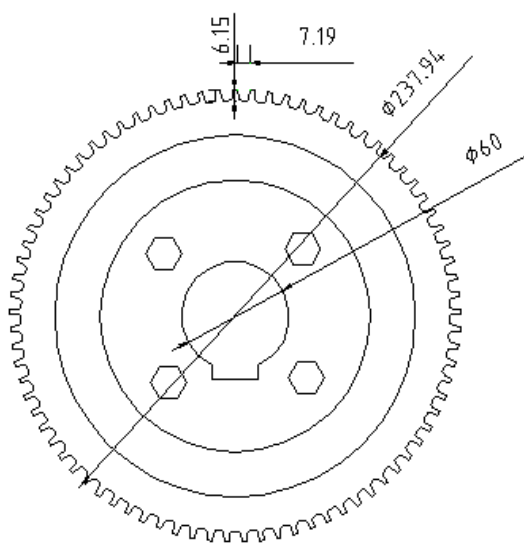
โดยปกติการใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนสายพานนั้นก็จะเกิดการสูญเสียอยู่ระหว่าง 2-3% แต่ถ้าสายพานหย่อนเกินไปก็จะทำให้เกิดการสูญเสียเพิ่มมากขึ้น



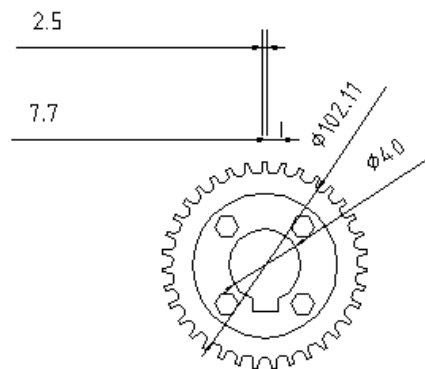
ภาพประกอบ 30 การปรับตั้งความตึงสายพาน

ระยะความห่างของพูลเลย์ 65 เซนติเมตร ก็จะได้ระยะความหย่อนของสายพานที่เหมาะสม $D = 65/100 = 0.65$ เซนติเมตร การตรวจสอบคือใช้นิ้วกดลงไปได้ระยะ D จะต้องไม่กว้างกว่าค่าที่คำนวณได้

3.2.3 การคำนวณเฟืองขับเคลื่อน



เฟืองขับ



เฟืองตาม

ภาพประกอบ 31 เฟืองขับและเฟืองตาม

$$\begin{aligned}
 \text{ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพิต} &= \frac{\text{จำนวนฟัน} \times \text{ระยะห่างระหว่างฟัน}}{\pi} \\
 &= (81 \times 7.19) / \pi \\
 &= 185.38 \text{ มม.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{โมดูล (M)} &= \frac{\text{ระยะห่างระหว่างฟัน}}{\pi} \\
 &= 7.19 / \pi \\
 &= 2.28
 \end{aligned}$$

3.4 การคำนวณอัตราค่าพลังงานไฟฟ้า

โดยปกติแล้วราคาของมอเตอร์ที่ซื้อจะมีค่าประมาณ 1-2% ของราคาค่าไฟฟ้าในการใช้งานมอเตอร์ตลอดอายุการใช้งาน (20ปี) ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนชั่วโมงการใช้งานต่อปี สมการต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

1. ค่าพลังงานไฟฟ้าตลอดปี (บาท/ปี)

$$= (\text{ขนาดของมอเตอร์} / \% \text{ประสิทธิภาพ}) \times \% \text{โหลด} \times \text{ชั่วโมงใช้งานต่อปี} \times \text{อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า}$$

2. ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าตลอดปี (บาท/ปี)

$$= \text{กิโลวัตต์สูงสุดที่วัดได้} \times \text{อัตราค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า} \times 12$$

3. ค่าไฟฟ้ารวมทั้งหมด (บาท)

$$= (\text{ค่าพลังงานไฟฟ้าตลอดปี} + \text{ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าตลอดปี}) \times \text{อายุใช้งาน}$$

จากข้อมูลงานวิจัยนี้ค่าใช้จ่ายในการใช้งานมอเตอร์ตลอดอายุการใช้งาน

$$\begin{aligned} \text{ขนาดมอเตอร์} &= 160 \text{ กิโลวัตต์ (ประสิทธิภาพ 93.3\% เฉลี่ย 80\% ของโหลด)} \end{aligned}$$

$$\text{ราคามอเตอร์} = 85,000 \text{ บาท}$$

$$\text{ชั่วโมงการใช้งาน} = 3,000 \text{ ชั่วโมง/ปี}$$

$$\text{อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า} = 1.7034 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง}$$

$$\text{อัตราค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า} = 300 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์}$$

การคำนวณ

$$\begin{aligned} 1. \text{ ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปี} &= (160/0.933) \times 0.8 \times 3,000 \times 1.7034 \\ &= 701,077.81 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \text{ ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า} &= 160 \times 300 \times 12 \\ &= 576,000 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3. \text{ ค่าไฟฟ้ารวมทั้งหมด} &= (701,077.81 \times 20\text{ปี}) + (576,000 \times 20\text{ปี}) \\ &= 25.54 \text{ ล้านบาท} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4. \text{ ราคามอเตอร์/ค่าไฟฟ้ารวมทั้งหมด} &= (85,000 / 25,541,556.2) \times 100\% \\ &= 0.33 \% \end{aligned}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งาน 3,000 ชั่วโมงต่อปีแล้ว ราคามอเตอร์จะมีค่าเพียง 0.33 % ของค่าไฟฟ้ารวมทั้งหมดตลอดอายุการใช้งาน

เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงตลอดการใช้งาน 20 ปี ซึ่งเราจะต้องจ่าย 704.34 บาท/ชม. X 3,000 ชม. ต่อปี x 20 ปี = 42,260,400 บาท

นั่นคือสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายทางพลังงาน = 16,718,843.8 บาท / ตลอดอายุการใช้งาน

3.5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

3.5.1 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

$$n = TS / Y_i$$

โดยที่ n คือ ระยะเวลาคืนทุน (ปี)

TS คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (บาท)

Y_i คือ ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)

$Y_i =$ ค่าใช้จ่ายพลังงานเชื้อเพลิงดีเซล/ปี – ค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้า/ปี

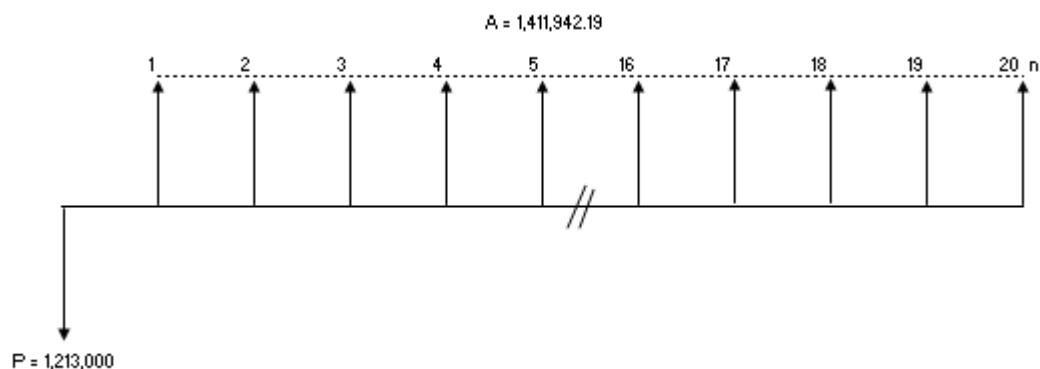
$$= 2,113,020 - 701,077.81$$

$$= 1,411,942.19 \text{ บาท/ปี}$$

$$N = 1,213,000 \text{ บาท} / 1,411,942.19 \text{ บาท/ปี}$$

$$= 0.859 \text{ ปี}$$

3.5.2 การหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และอัตราผลตอบแทนในการลงทุน (IRR)



P = ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (บาท)

A = ผลตอบแทนในการลงทุน (บาท/ปี)

N = จำนวนอายุการใช้งาน (ปี)

I = อัตราดอกเบี้ย (%/ปี)

$I = 5\%$

$$\begin{aligned}\text{มูลค่าปัจจุบันสุทธิ} &= -1,213,000 + 1,411,942.19(P/A, 5\%, 20) \\ &= -1,213,000 + 1,411,942.19 (12.462) \\ &= 16,382,623.57 \text{ บาท}\end{aligned}$$

$I = 5.5\%$

$$\begin{aligned}\text{มูลค่าปัจจุบันสุทธิ} &= -1,213,000 + 1,411,942.19(P/A, 5.5\%, 20) \\ &= -1,213,000 + 1,411,942.19 (11.95) \\ &= 15,659,709.17 \text{ บาท}\end{aligned}$$

เทียบหาค่า I (%)

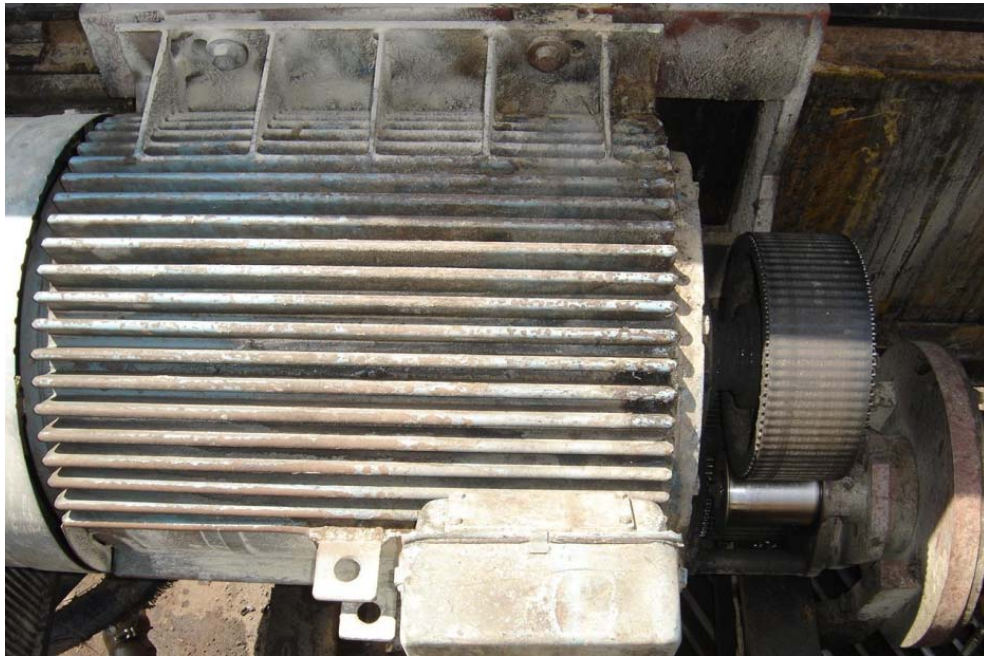
$$\begin{aligned}I &= 5 + \left\{ (5.5 - 5) / (16,382,623.57 + 15,659,709.17) \right\} \times (16,382,623.57 - 0) \\ &= 5.255 \%\end{aligned}$$

ถ้า MARR ต่ำกว่าอัตราผลตอบแทนที่คำนวณได้ให้เลือกการลงทุนนั้น

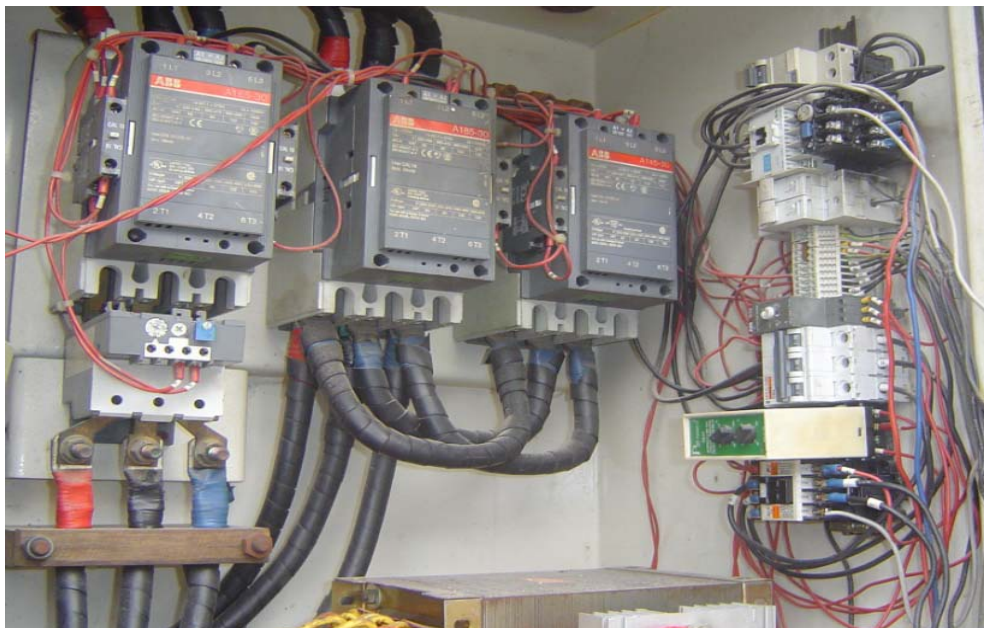
บทที่ 4

การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

หลังจากการคำนวณและออกแบบโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 160 KW ติดตั้งเข้ากับรถชุดล้อสายพาน ทางผู้วิจัยใช้ระยะเวลาดำเนินการประมาณ 7 เดือน แล้วจึงได้ทำการทดสอบเครื่องดังนี้



ภาพประกอบ 32 แสดงการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าเข้ากับเครื่องจักร



ภาพประกอบ 33 แสดงการติดตั้งวงจรมอเตอร์ควบคุม



ภาพประกอบ 34 แสดงการติดตั้งระบบส่งกำลังด้วยสายพาน



ภาพประกอบ 35 แสดงการติดตั้งเบรกเกอร์ 400A



ภาพประกอบ 36 แสดงห้องจ่ายกระแสไฟฟ้า Substation 380V / 400A



ภาพประกอบ 37 แสดงตำแหน่งการต่อสายไฟเข้ากับเครื่องจักร โดยใช้ Spreader Bar



ภาพประกอบ 38 แสดงการติดตั้ง On/Off Switch-Emergency Switch ในห้องOperator



ภาพประกอบ 39 แสดงตำแหน่งติดตั้งแอมป์มิเตอร์ในห้อง Operator

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

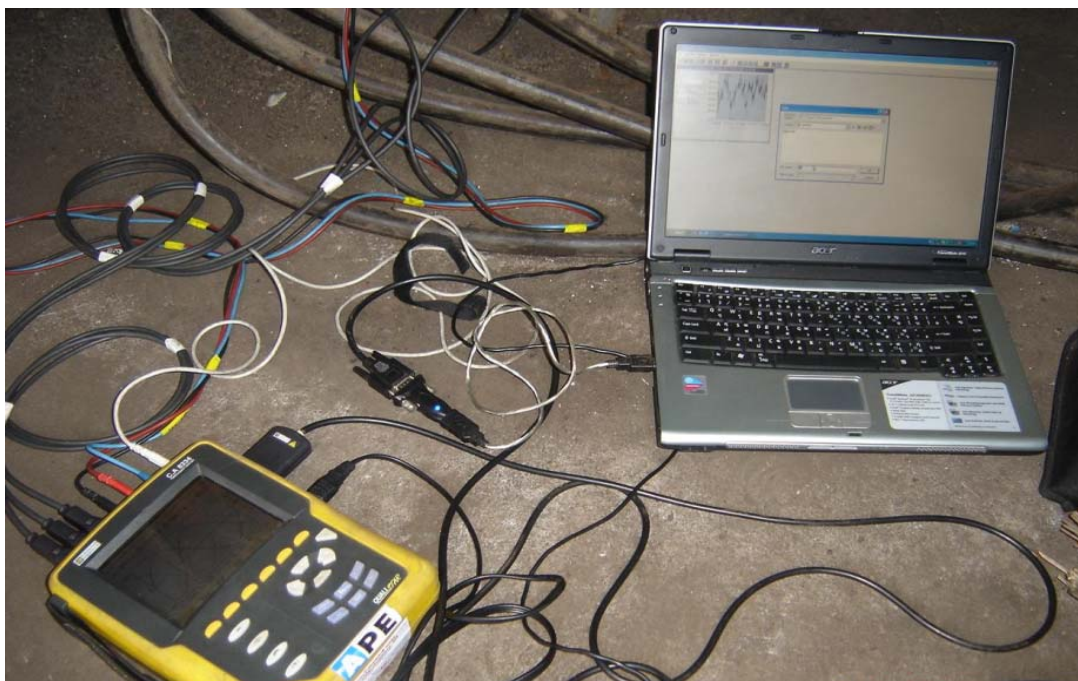
- 4.1.1 รถแบ็คโฮ Komatsu PC 200
- 4.1.2 มอเตอร์ไฟฟ้า 200 แรงม้า (160 KW), 380 V.
- 4.1.3 สลิปริง 400A
- 4.1.4 แท่นรองรับมอเตอร์
- 4.1.5 พูลเลย์ชุดขับ-ชุดตาม
- 4.1.6 สายพานส่งกำลัง HTD-1890-14M
- 4.1.7 สายไฟเมน 1x300 mm².x40mx4 สาย
- 4.1.8 อินเวอร์เตอร์
- 4.1.9 ชุดควบคุมวงจรมอเตอร์ไฟฟ้า
- 4.1.10 ชุดตู้จ่ายกระแสไฟฟ้า 380V / 400A
- 4.1.11 เครื่องมือวัดค่าพลังงานไฟฟ้า Data Locker รุ่น CA8334 Quali Star
- 4.1.12 คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ค

4.2 ขั้นตอนการเตรียมพร้อมการทดลอง

ทำการต่อสายไฟ 300 mm², 3 เฟส, 6 Pole จากตู้ Substation ไปยังเครื่องจักร ดังภาพประกอบ 40



ภาพประกอบ 40 แสดงการติดตั้งสายไฟเมนจากตู้ Substation ไปยังเครื่องจักร



ภาพประกอบ 41 แสดงการต่อเครื่องมือวัด Data Locker

4.3 ขั้นตอนการสตาร์ทรถชุดไฟฟ้า

หลังจากทำการติดตั้งอุปกรณ์ พร้อมทำการทดสอบเรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นก็จะเป็นการสตาร์ทเครื่องเพื่อทำการทดสอบ โดยในการทดสอบรถชุดไฟฟ้านั้น มีขั้นตอนที่ดังต่อไปนี้

4.3.1 ทำการตรวจสอบบริเวณที่จะทำการทดสอบไม่ให้มีบุคคลเข้าใกล้เครื่องจักร หรืออุปกรณ์ที่เป็นอุปสรรคในการทำงาน เนื่องจากในขณะที่ทำการทดลอง รถชุดไฟฟ้าอาจจะสวิงไปโดนได้ ซึ่งจะทำให้เกิดอุบัติเหตุและการเสียหายแก่ตัวรถชุดขึ้นมาได้

4.3.2 ตรวจสอบข้อต่อสายไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับรถชุดไฟฟ้าให้แน่น ทุกข้อต่อเพื่อป้องกันการช็อตที่อาจเกิดขึ้นได้

4.3.3 เริ่มทำการสตาร์ทเครื่องโดยทำการกดปุ่มสตาร์ท รอประมาณ 30 วินาที เพื่อให้วงจรเคล็ดทำงานเพราะรอบสูงสุดของมอเตอร์ทำงานที่วงจรนี้

4.4 ขั้นตอนการดับรถชุดไฟฟ้า

เมื่อจะทำการดับรถชุดไฟฟ้ามีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.4.1 เมื่อจะทำการดับเครื่อง ให้เราทำการกดปุ่ม Stop

4.4.2 หลังจากเตรียมสายลมให้เราเริ่มทำการปิดน้ำมันโดยทำการค่อยๆปรับ

4.4.3 ปิดสวิตช์ตัดไฟฟ้า Disconnection Switch เพื่อป้องกันไฟฟ้ารั่วไหล

4.4.4 เมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินให้กดปุ่ม Emergency Switch

4.5 ข้อควรระมัดระวัง

4.5.1 เมื่อทำการสตาร์ทชุดไฟฟ้า หากมีข้อบกพร่อง หรือสิ่งผิดปกติควรกดปุ่ม Emergency Switch ทันที

4.5.2 ตรวจสอบชุดอุปกรณ์ ข้อต่อสายไฟฟ้าทุกชิ้นก่อนทำการทดสอบ ให้แน่นหนา

4.5.3 ควรมีอุปกรณ์ดับเพลิงขณะทำการทดสอบ

4.5.4 ขณะทำการทดลองห้ามมีบุคคลยืนรอบๆรถชุดไฟฟ้า

4.6 การทดลอง

ในการทดลองการทำงานของรถชุดที่เชื่อมมอเตอร์ไฟฟ้านี้ทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองการใช้พลังงานทางด้านไฟฟ้าทั้งหมดเป็นจำนวน 3 ครั้ง ดังนี้

การทดลองครั้งที่ 1

การทดลองครั้งที่ 1 ได้ทำการทดลองในวันที่ 4 สิงหาคม 2550 เวลา 08.30น ได้ทำการทดสอบการใช้พลังงานทางไฟฟ้าของเครื่องจักรและทดสอบประสิทธิภาพการสวิงรอบตัวเองของเครื่องจักร รวมถึงการทดสอบการเดินและการเลี้ยวของเครื่องจักร ดังภาพประกอบและผลการทดสอบดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 42 แสดงการทดสอบการเดินทางตรงของรถขุดไฟฟ้า



ภาพประกอบ 43 แสดงการทดสอบการเลี้ยวของรถขุดไฟฟ้า



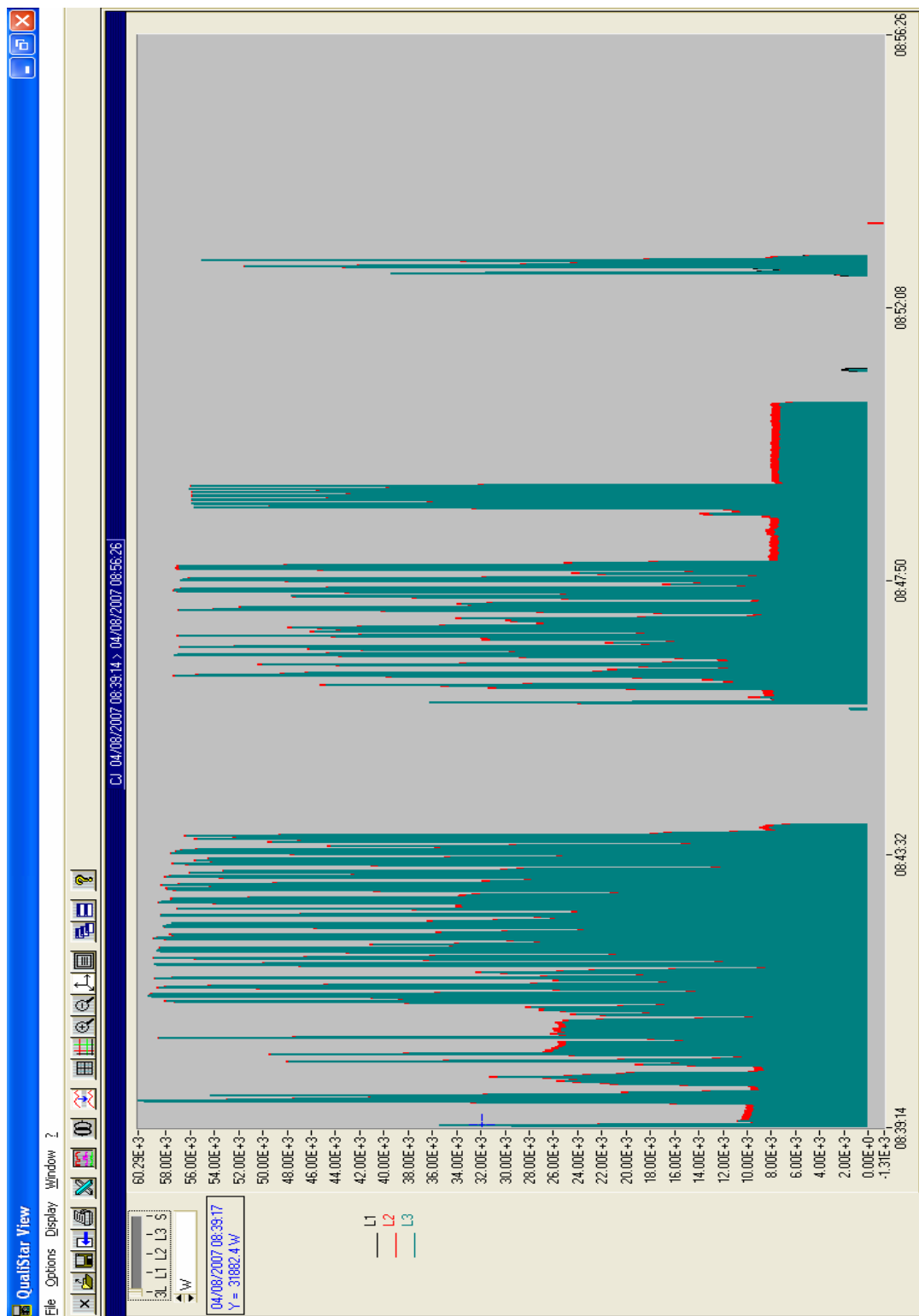
ภาพประกอบ 44 แสดงการทดสอบการสั่นรอบตัวเองของเครื่องจักร



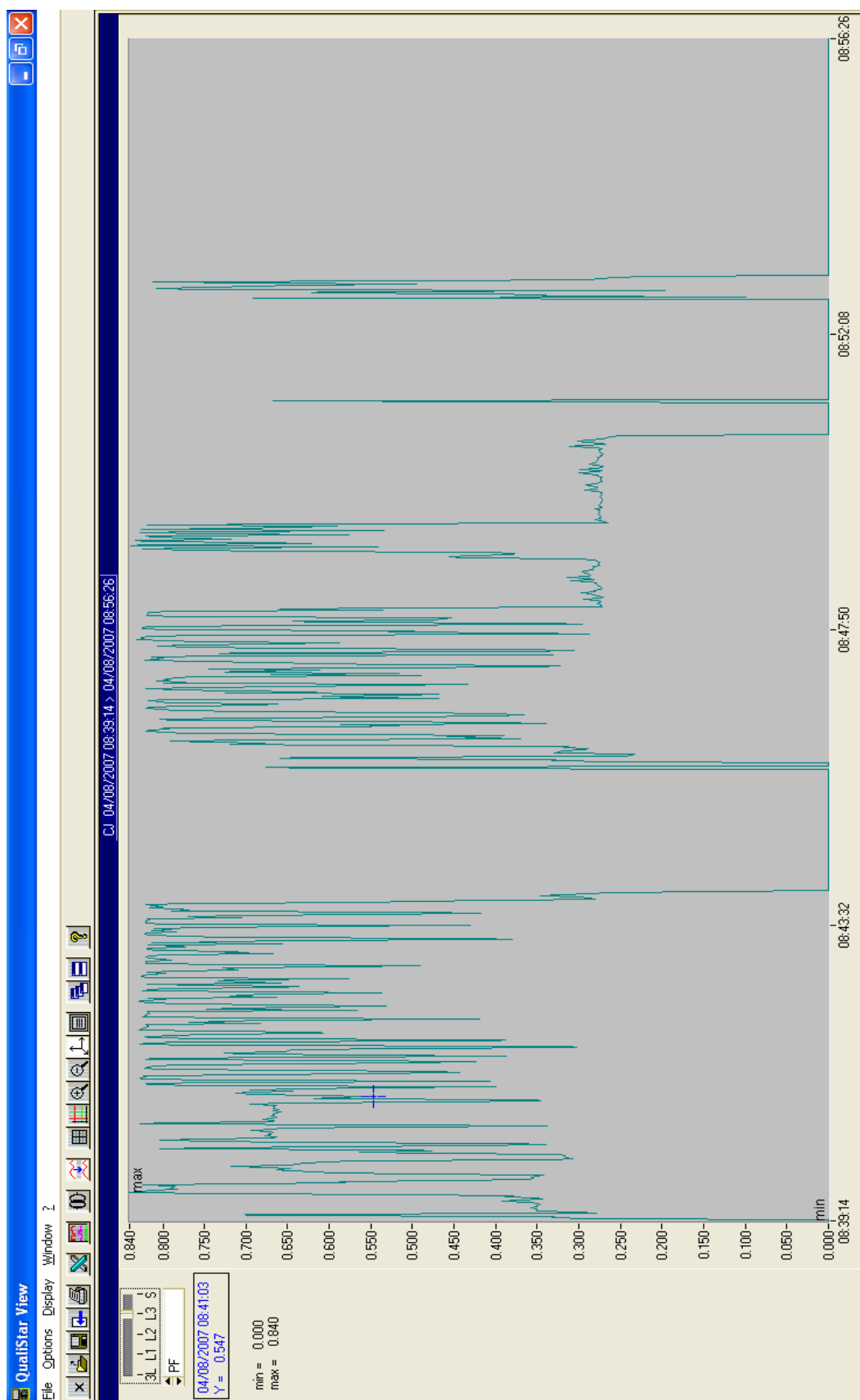
ภาพประกอบ 45 แสดงการทดสอบการตักน้ำ 2 ลบ.ม

ผลการทดลองครั้งที่ 1

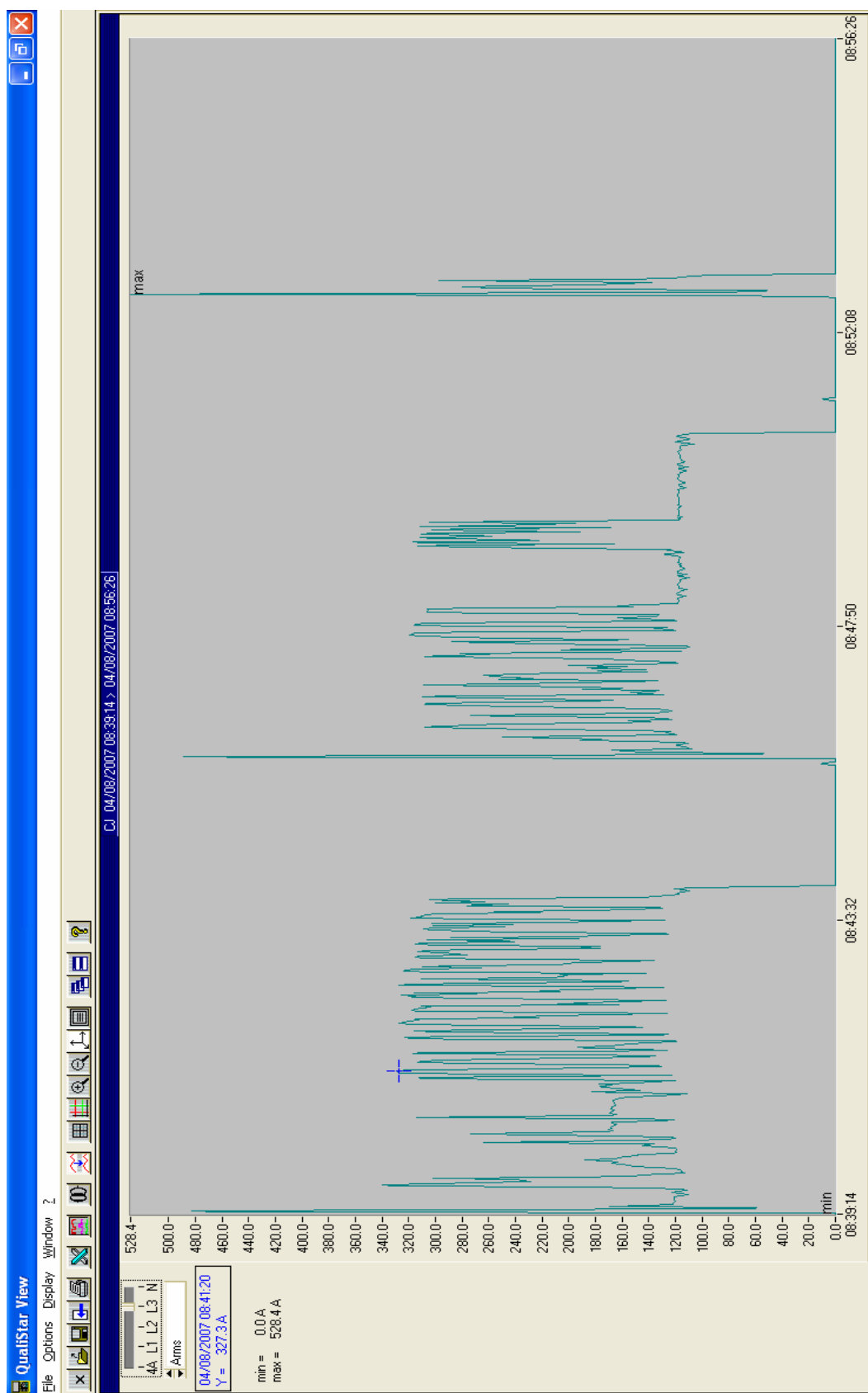
4.6.1 ผลการทดลองการใช้พลังงานทางไฟฟ้า



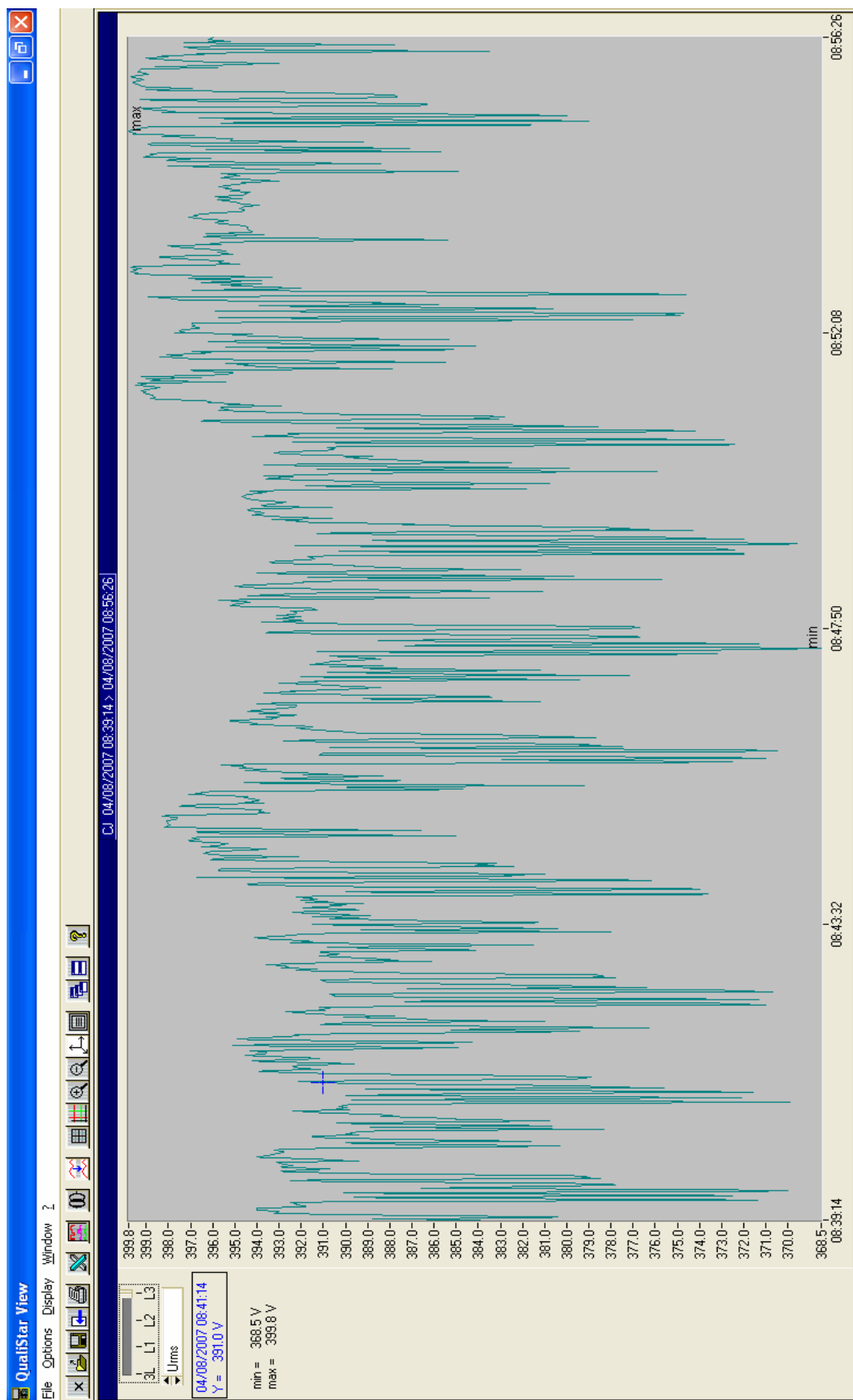
ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงผลแรงเคลื่อนทางไฟฟ้า (Watt)



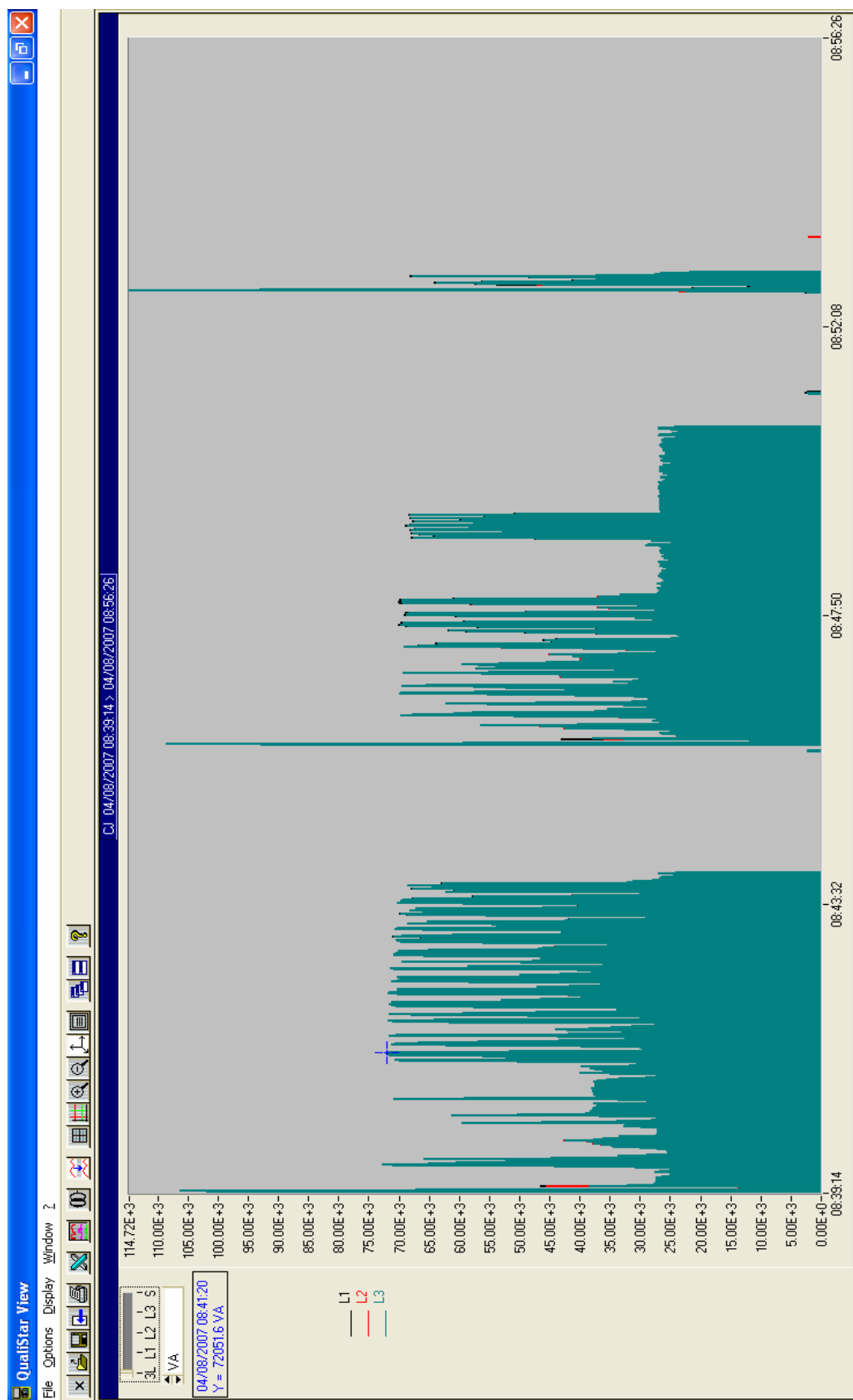
ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงผลค่าตัวประกอบกำลัง (P.F)



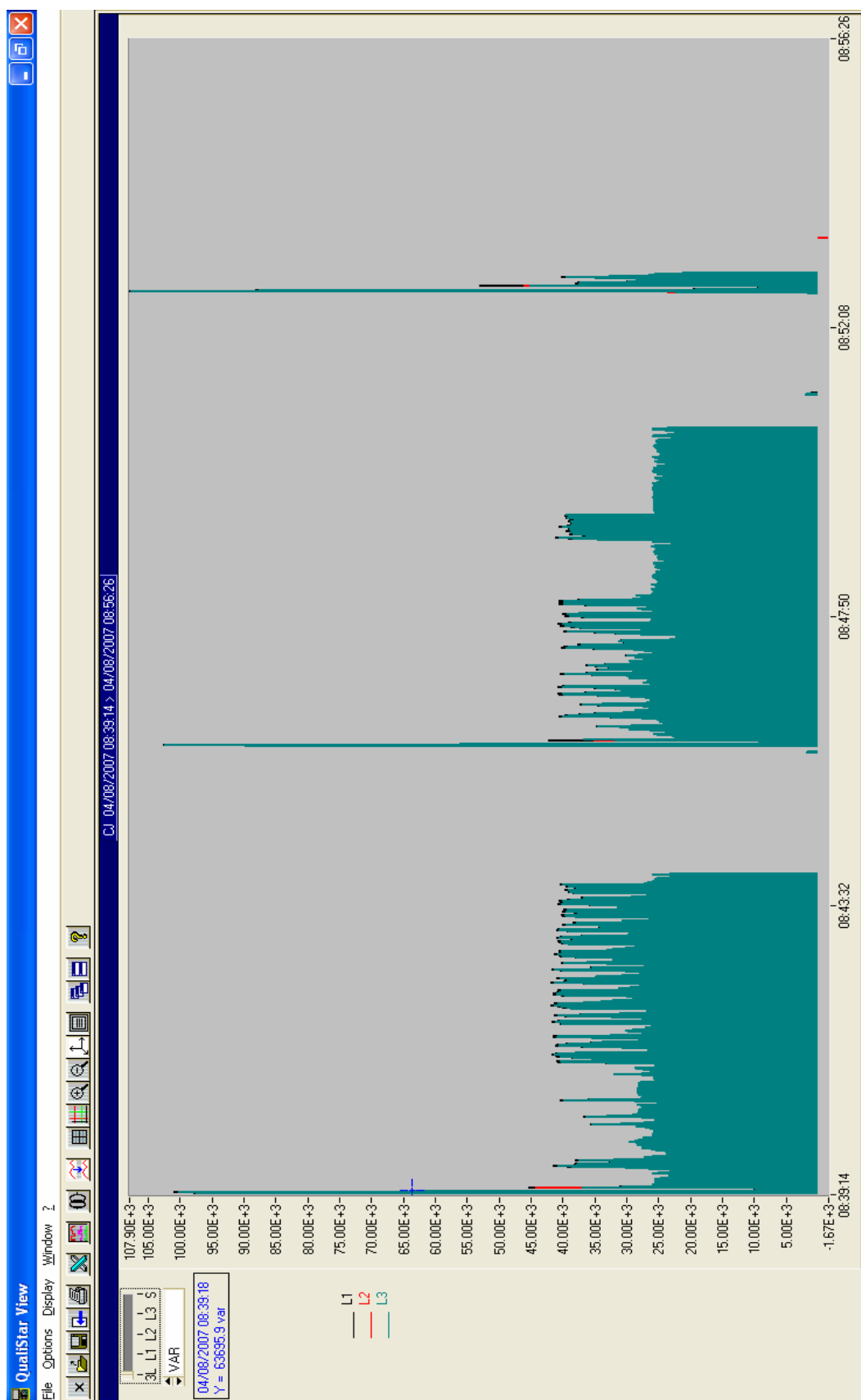
ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงผลค่ากระแสไฟฟ้า (Amps)



ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงผลค่า U_{ms}



ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงผลค่า VA



ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงผลค่า VAR

สรุปผลการทดลองครั้งที่ 1

ทดสอบระบบการทำงาน	รถชุดที่ใช้เครื่องยนต์	รถชุดที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า
ระบบการเดิน HI	0.65 m/s.	0.72 m/s.
ระบบการส้วงหมุน 360 องศา	12.4 RPM	13.2 RPM
ระบบการตักไหลดใส่รถบรรทุก 24 ตัน	3.35 Min	3.20 Min
ค่าใช้จ่ายทางพลังงาน (บาท)	215 g/kWh (25.8L/h) = 704.34 บาท	58 kWh = 100.36 บาท

การทดลองครั้งที่ 2

การทดลองครั้งที่ 2 ได้ทำการทดลองในวันที่ 29 ตุลาคม 2550 เวลา 10.00น ได้ทำการทดสอบการใช้พลังงานทางไฟฟ้าของเครื่องจักรและทดสอบประสิทธิภาพการตัดก้นหิน (ถ่านหิน) ขึ้นบนรถบรรทุก 10 ล้อ ดังภาพประกอบและผลการทดสอบดังต่อไปนี้

ผลการทดลองครั้งที่ 2

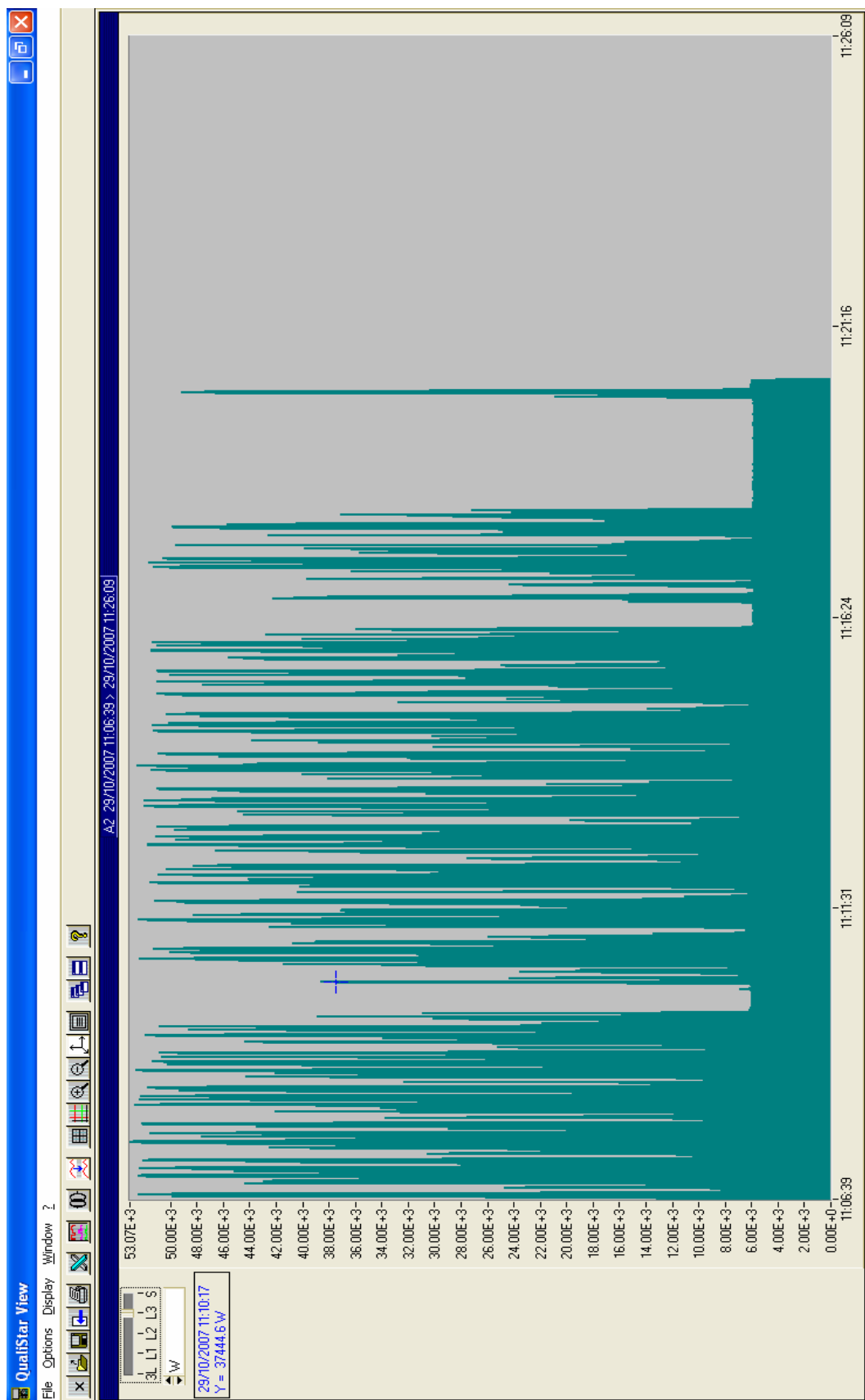
4.6.2 ผลการทดลองการใช้พลังงานทางไฟฟ้า



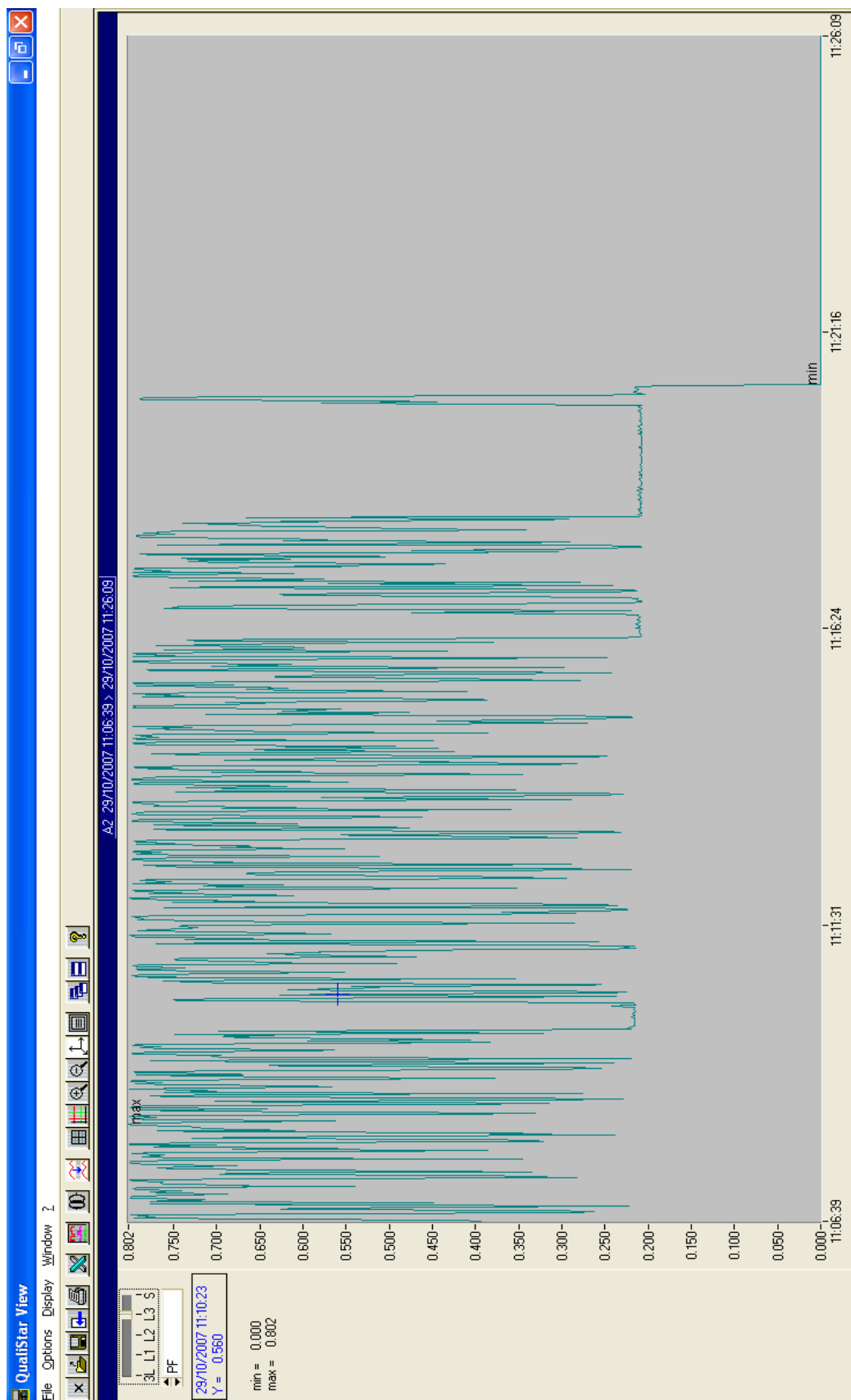
ภาพประกอบ 52 แสดงการทดสอบการตัดถ่านหิน 2 ลบ.ม จากเรือขนถ่าย



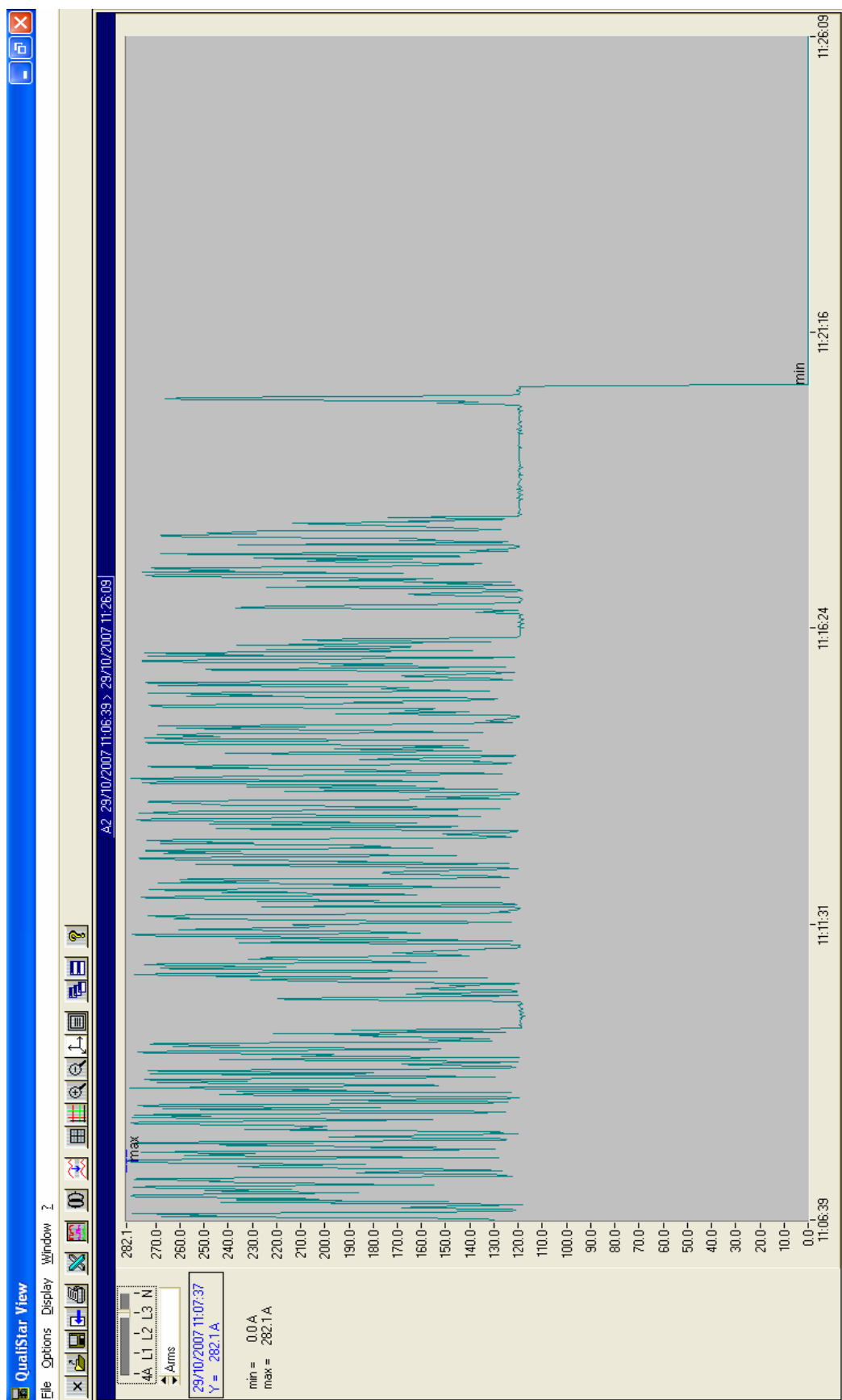
ภาพประกอบ 53 แสดงการทดสอบการตัดถ่านหิน 2 ลบ.ม ขึ้นรถบรรทุก 10 ล้อ



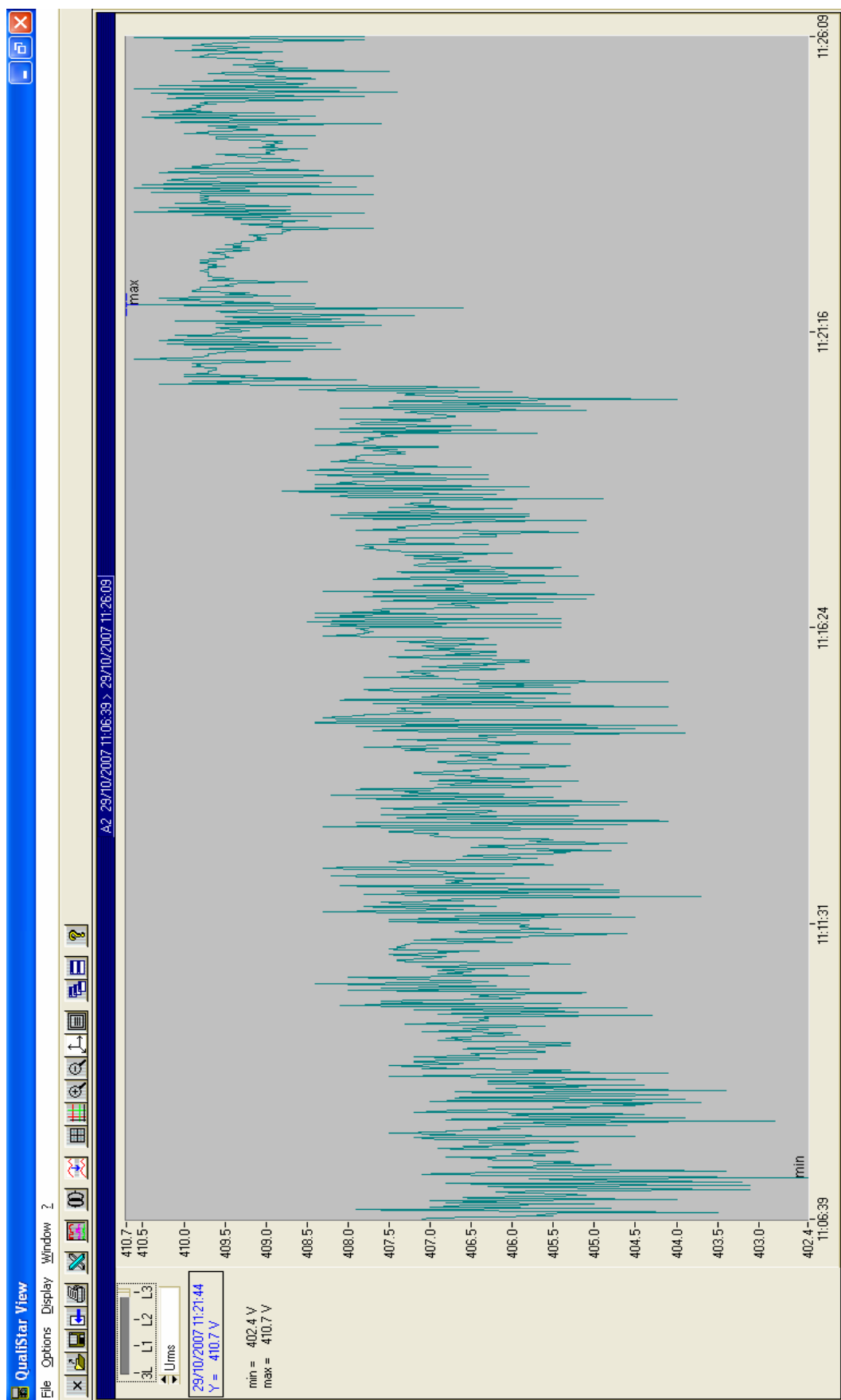
ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงผลค่าแรงเคลื่อนทางไฟฟ้า (Watt)



ภาพประกอบ 55 กราฟแสดงผลค่าตัวประกอบกำลัง (P.F)



ภาพประกอบ 56 กราฟแสดงผลค่ากระแสไฟฟ้า (Amps)



ภาพประกอบ 57 กราฟแสดงผลค่า Ums

สรุปผลการทดลองครั้งที่ 2

ทดสอบระบบการทำงาน	รถชุดที่ใช้เครื่องยนต์	รถชุดที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า
ระบบการเดิน HI	0.63 m/s.	0.69 m/s
ระบบการส้วงหมุน 360 องศา	12.4 RPM	13.5 RPM
ระบบการตักไหลดใส่รถบรรทุก 24 ตัน	3.40 Min	3.25 Min
ค่าใช้จ่ายทางพลังงาน	215 g/kWh (25.8L/h) = 704.34 บาท	53.07 kWh = 91.82 บาท

การทดลองครั้งที่ 3

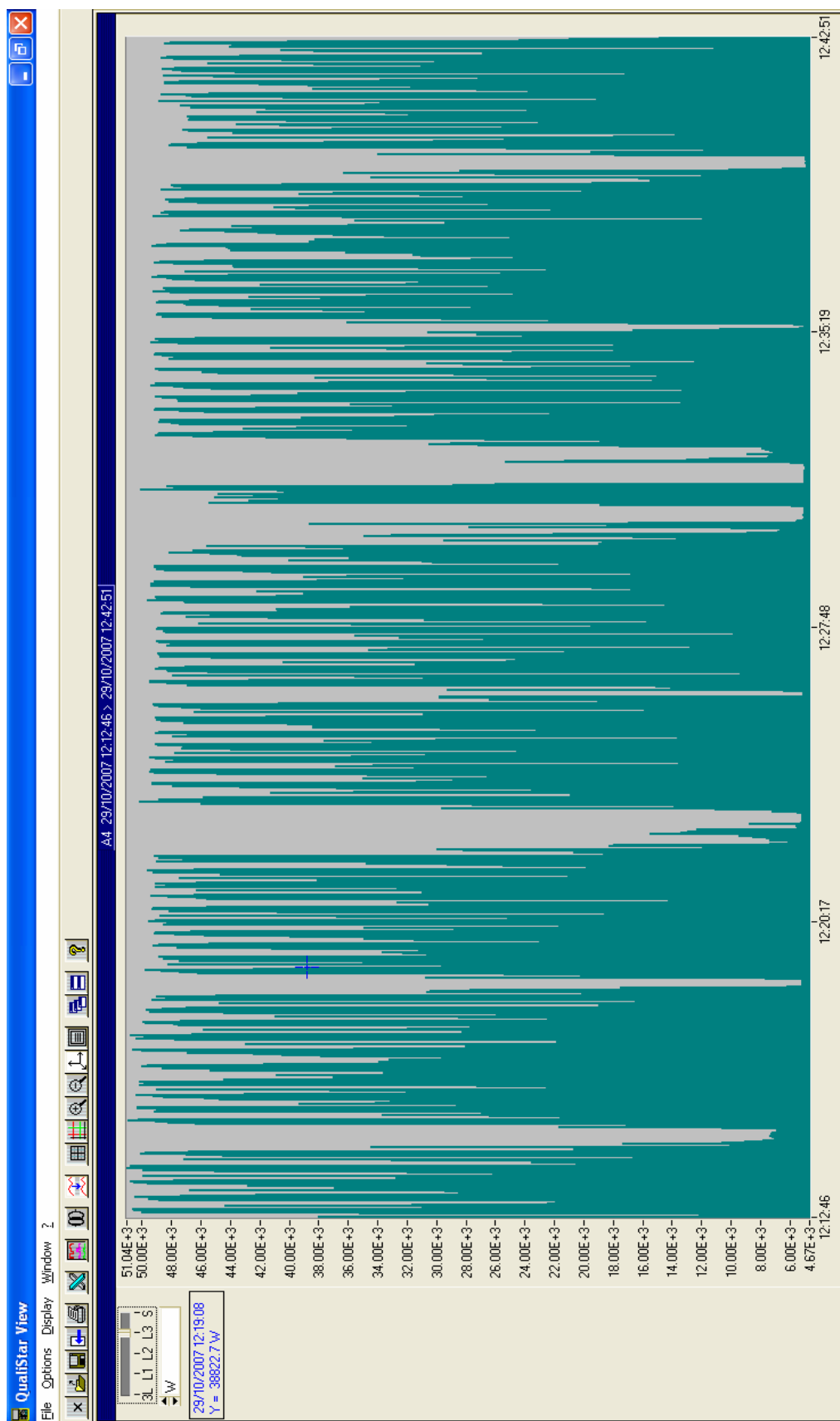
การทดลองครั้งที่ 3 ได้ทำการทดลองในวันที่ 29 ตุลาคม 2550 เวลา 12.00 น ได้ทำการทดสอบการใช้พลังงานทางไฟฟ้าของเครื่องจักรและทดสอบประสิทธิภาพการตัดก้นทุติบ (ถ่านหิน) ขึ้นบนรถบรรทุก 10 ล้อ ดังภาพประกอบและผลการทดสอบดังต่อไปนี้

ผลการทดลองครั้งที่ 3

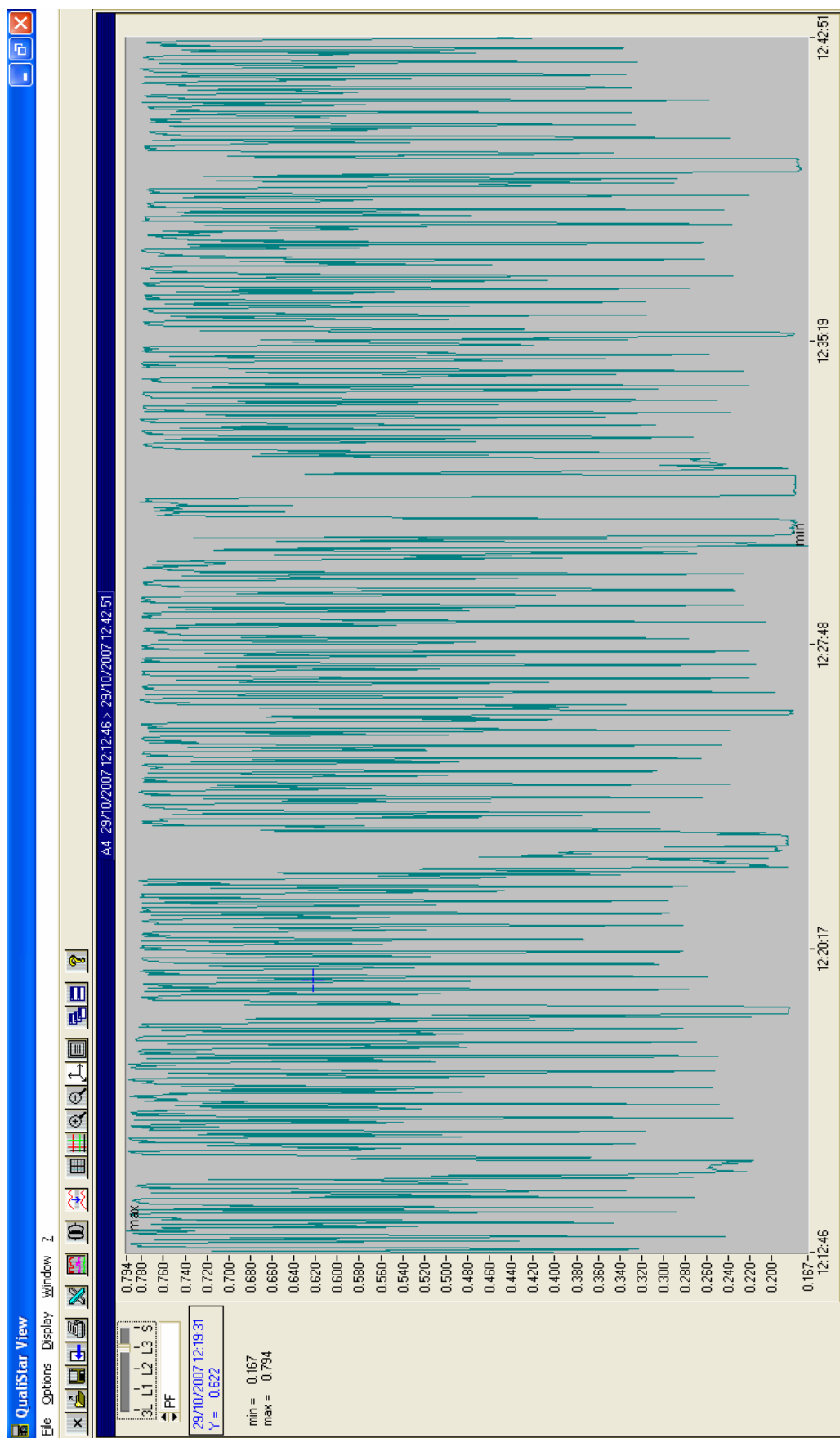
4.6.3 ผลการทดลองการใช้พลังงานทางไฟฟ้า



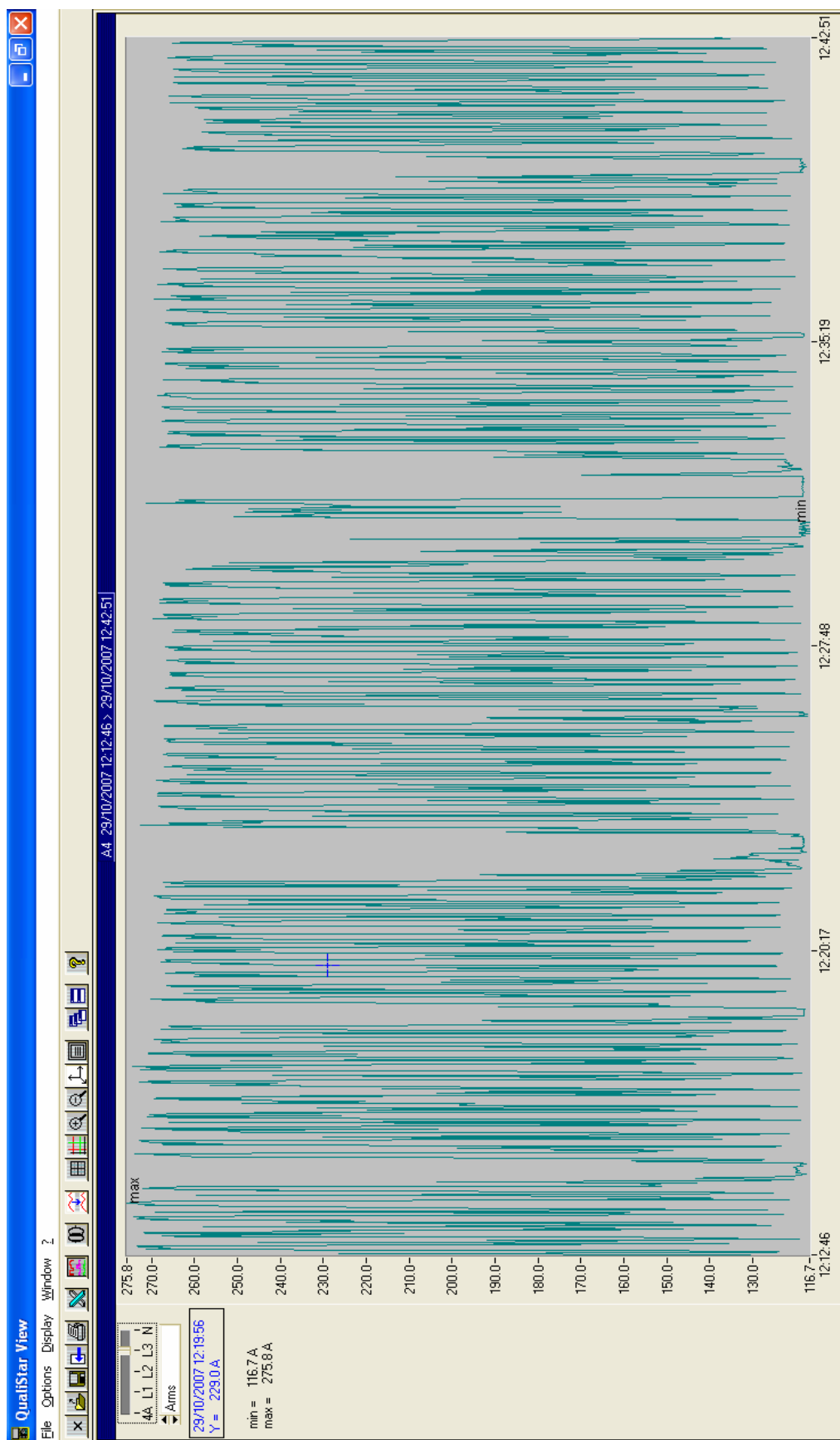
ภาพประกอบ 58 ทดสอบการตัดถ่านหินขึ้นรถบรรทุก 10 ล้อ



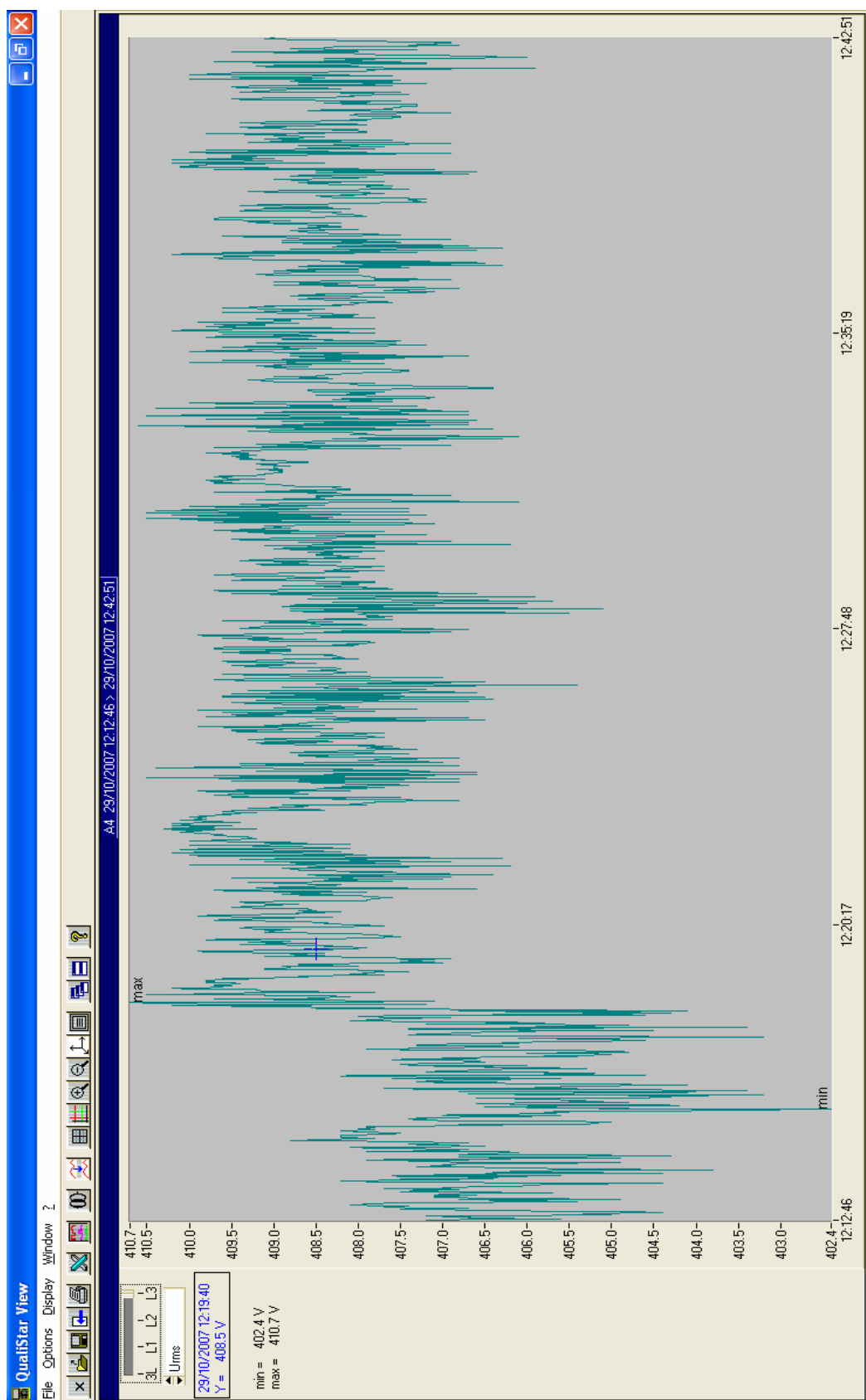
ภาพประกอบ 59 กราฟแสดงผลค่าแรงเคลื่อนทางไฟฟ้า (Watt)



ภาพประกอบ 60 กราฟแสดงผลค่าตัวประกอบกำลัง (P.F)



ภาพประกอบ 61 กราฟแสดงผลค่ากระแสไฟฟ้า (Amps)



ภาพประกอบ 62 กราฟแสดงผลค่า Ums

สรุปผลการทดลองครั้งที่ 3

ทดสอบระบบการทำงาน	รถชุดที่ใช้เครื่องยนต์	รถชุดที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า
ระบบการเดิน HI	0.65 m/s.	0.70 m/s
ระบบการส้วงหมุน 360 องศา	12.4 RPM	13.2 RPM
ระบบการตักไหลดใส่รถบรรทุก 24 ตัน	3.35 Min	3.22 Min
ค่าใช้จ่ายทางพลังงาน	215 g/kWh (25.8L/h) = 704.34 บาท	51.04 kWh = 88.31 บาท

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

5.1 สรุปและวิจารณ์ผลทดสอบ

ในการวิจัยครั้งนี้เป็นศึกษาวิจัยและพัฒนา โดยใช้ทฤษฎีทางเครื่องกล และไฟฟ้า ในทฤษฎีหลักการออกแบบและคำนวณ เพื่อการประหยัดพลังงาน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทางพลังงานทั้งสองแบบคือ พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลและพลังงานไฟฟ้าพบว่า ค่าใช้จ่ายทางพลังงานเครื่องจักรที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องต้นกำลังจะประหยัดมากกว่า เครื่องจักรที่ใช้เครื่องยนต์เดิม ซึ่งสามารถประหยัดเงินได้ถึง 603.98 บาท/ชม/คัน หรือ 1.41 ล้านบาท/ปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาตามระยะเวลาทุก ๆ 200 ชม. สามารถประหยัดเงินได้ถึง 15,000 บาท/คัน หรือ 225,000 บาท/ปี

ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพทางกลของรถชุดล้อสายพานจะเห็นว่าประสิทธิภาพทางกลไม่มีความแตกต่างเมื่อเปลี่ยนมาใช้ระบบต้นกำลังเป็นไฟฟ้า และระบบดังกล่าวก็ยังมีทั้งข้อดีและข้อเสียคือ

ข้อดี	ข้อเสีย
1. สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายทางพลังงาน	1. ขอบเขตในการทำงานของเครื่องจักรทำงานได้ในระยะทางที่จำกัดในรัศมีไม่เกิน 40ม. จากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า
2. สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา	
3. สามารถลดมลภาวะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม	

ดังนั้นสรุปได้ว่าเครื่องจักรที่มีลักษณะเช่นนี้ สามารถที่จะนำระบบต้นกำลังที่เป็นไฟฟ้ามาประยุกต์ เพื่อช่วยในการอนุรักษ์พลังงานของประเทศได้ รถชุดล้อสายพานพลังงานไฟฟ้า



5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

เนื่องจากงานวิจัยในครั้งนี้มีงบประมาณในการทำโครงการนี้จากบริษัทออคเอเชีย มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งไม่สามารถใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้งานได้ เนื่องจากพบว่ามีความค่าน้ำสูงมาก จึงหันมาใช้อุปกรณ์ Secondhand แทน ประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการประหยัดพลังงานที่ได้จึงไม่สูงมากนัก แต่ผู้วิจัยก็พอใจในผลงานวิจัยในครั้งนี้ ดังบทสรุปในหัวข้อ 5.1 ฉะนั้นหากต้องการให้เกิดประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานอย่างสูงสุด ควรจะปรับปรุงอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1. เลือกใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงที่เหมาะสมคือขนาด 75 kW และค่า PF ก็จะต้องสูงตาม ซึ่งจะสามารถประหยัดค่าพลังงานทางไฟฟ้าได้มากยิ่งขึ้น
2. เลือกใช้ Soft start เพื่อลดกระแสในการสตาร์ทมอเตอร์ไฟฟ้าตอนเริ่มต้น
3. เลือกใช้สายไฟขนาด $1 \times 90 \text{ mm}^2$ ที่เหมาะสมมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 75 kW

จะเห็นว่าเมื่อทราบค่าพลังงานที่แท้จริงจากการทดลองและวิจัยแล้วเราสามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมกับเครื่องจักรนั้นได้อย่างเหมาะสมและถูกต้อง รวมถึงต้นทุนในการลงทุนก็จะต่ำตามลงไปอีกด้วย ข้อเสนอแนะอีกอย่างหนึ่งคือ เรายังสามารถที่จะประยุกต์นำเครื่องจักรที่มีลักษณะการทำงานคล้ายๆกันนี้ หรือ เครื่องจักรเดิมที่ใช้เครื่องยนต์เป็นเครื่องต้นกำลังแต่ลักษณะการทำงานค่อนข้างอยู่กับที่ เช่น เครื่องล้อยพาน ทาวเวอร์คอน เครื่องยนต์พาวเวอร์แพค เป็นต้น ที่กล่าวมานี้สามารถนำมาประยุกต์เพื่อการอนุรักษ์พลังงานได้ทั้งสิ้น ถ้าทุกฝ่ายเห็นความสำคัญของการอนุรักษ์พลังงาน เราก็จะเหลือพลังงานให้ลูกหลานใช้กันในโลกอนาคตกันมากยิ่งขึ้น ประเทศชาติเราก็จะมีพลังงานหมุนเวียนใช้กันในชาติ ลดการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมจากต่างชาติได้มากยิ่งขึ้น ฉะนั้นงานวิจัยฉบับนี้คงเป็นประโยชน์ต่อนิสิต นักศึกษา หรือ ผู้ที่สนใจจะนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรชนิดต่างๆ เพื่อร่วมด้วยช่วยกันอนุรักษ์พลังงานสืบต่อไป

บรรณานุกรม

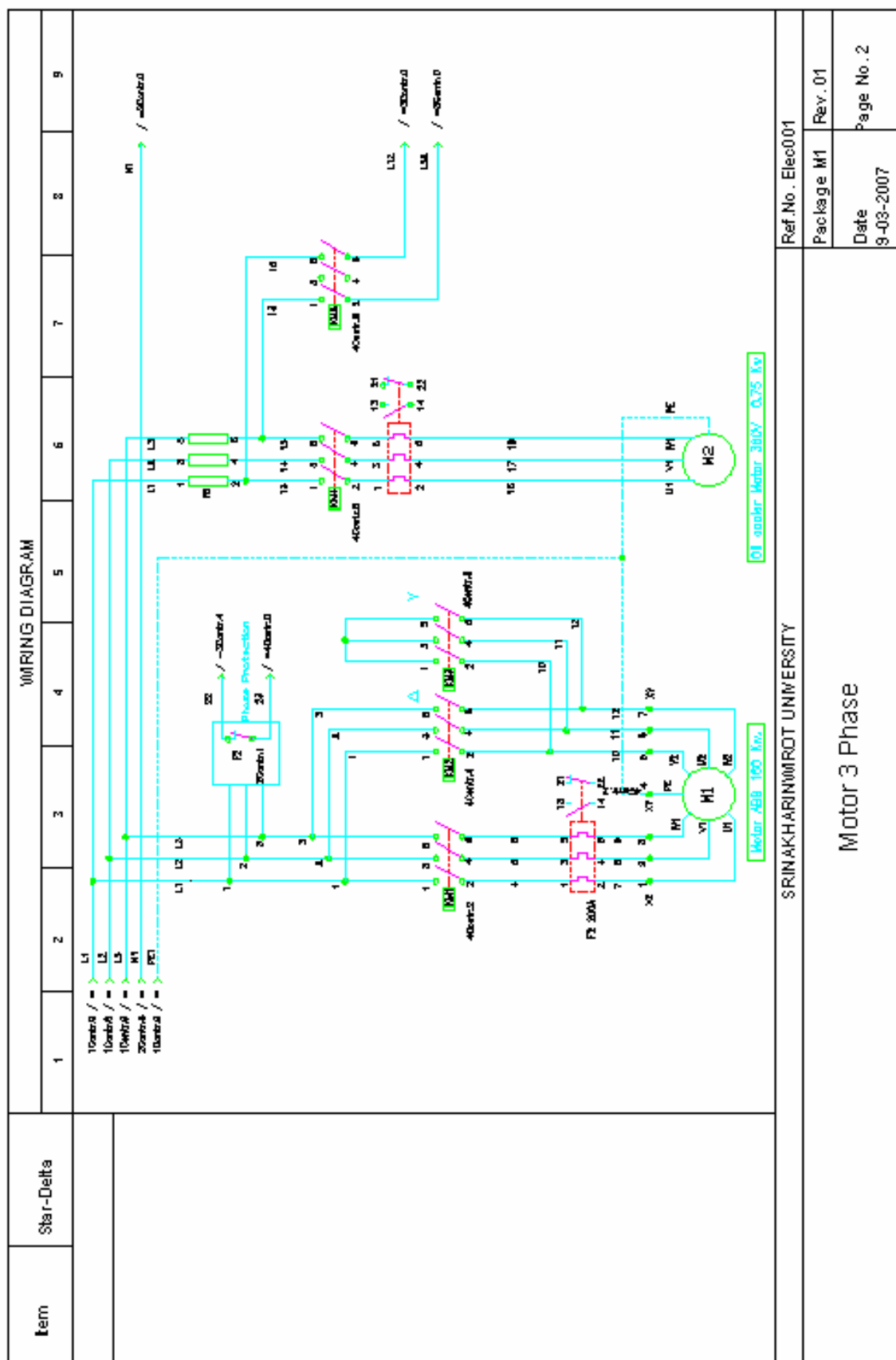
บรรณานุกรม

1. Vickers Hydraulic Components Catalog, Thai agency engineering Co.,Ltd.2550,
2. พิชัย อัมมมมงคล , คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เอกสารการเรียนรู้ การสอนวิชา Energy Conservation For Industrial กรุงเทพฯ: 2549.
3. พิชัย อัมมมมงคล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ ศิริพรรณ ธงชัย คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, Electrical Energy Conservation กรุงเทพฯ: 2548.
4. ถาวร อมตกิตต์,การส่งกำลังและการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (2548).
5. เอกสารการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย (2548), ครั้งที่ 1 , 11-13 พฤษภาคม.
6. บทเรียนผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์ อุตสาหกรรมสถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2548).
7. “ Performance Hand Book” Edition 21 Komatsu Co.,Ltd 2003.
8. “Performance Hand Book” Edition 31 Caterpillar Co.,Ltd. 2003.
9. H255s “Operation Manual” Demag- Komatsu Co.,Ltd. 1996.
10. www.ABB.com
11. Energy Saving_TH-tinamics.com
12. บรรเลง ศรีนิล และ ประเสริฐ กิ้วยสมบุญ, ตารางโลหะ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ: 2524.
13. ธีระยุทธ สุวรรณประทีป , วิศวกรรมยานยนต์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ: 2524.
14. บรรเลง ศรีนิล และ ประเสริฐ กิ้วยสมบุญ , ตารางโลหะ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ: 2524.

ภาคผนวก

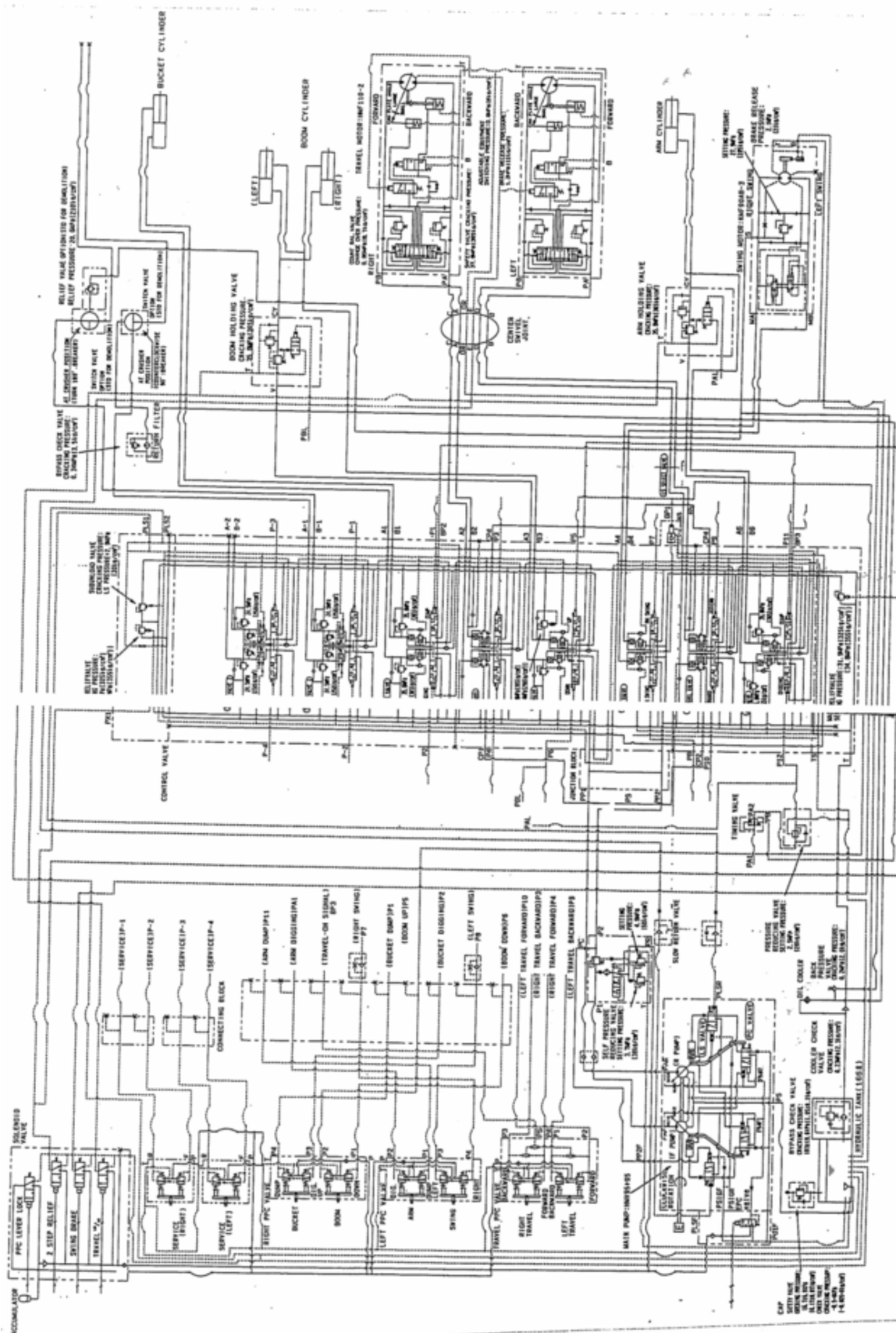
ภาคผนวก ก

แบบวงจรควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าของรถชุดล้อสายพาน



ภาคผนวก ข.

แบบวงจรควบคุมระบบไฮดรอลิกของรถขุดล้อสายพาน



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
f	ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า
p	จำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์
s	โพล
n_s	ความเร็วที่ซิงโครนัส
n_r	ความเร็วที่โรเตอร์
hp	แรงม้า
η	ประสิทธิภาพ
P	กำลังไฟฟ้า
P.F	ตัวประกอบกำลัง
V	แรงดันทางไฟฟ้า (โวลท์)
W	พลังงานทางไฟฟ้า (วัตต์)
F	แรงที่เกิดจากประจุ (นิวตัน)
q	ประจุในสนามแม่เหล็ก (คูลอมป์)
v	ความเร็วของประจุที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก (เมตร/วินาที)
B	ความหนาแน่นฟลักซ์ (เวเบอร์/ตารางเมตร หรือ เทสลา)
I	กระแสไฟฟ้าไหลในโรเตอร์
r	กระแสไฟฟ้าไหลในโรเตอร์
θ	มุมระหว่างระนาบของตัวนำในโรเตอร์กับสนามแม่เหล็ก
ϵ	ความยาวของแกนโรเตอร์
T	แรงบิด (ทอร์ค)
KVA	กำลังไฟฟ้าปรากฏ
KVAR	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

Y	การต่อวงจรสตาร์ทเป็นสตาร์ท
Δ	การต่อวงจรสตาร์ทเป็นเดลต้า
No	คอนแทคปกติเปิด
Nc	คอนแทคปกติปิด
K1	คอนแทคที่ 1
K2	คอนแทคที่ 2
K3	คอนแทคที่ 3
M3	มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส
C1	ค่าไฟฟ้า (บาท)
DC _p	อัตราค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วง On Peak (Baht/kW)
P _p	ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ในช่วง On Peak (kW) ปกติดูจากมิเตอร์ กรณีนี้ สมมุติจากการใช้ไฟฟ้าของเครื่องจักร
DC _{pp}	อัตราค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วง Partial Peak (Baht/kW)
PP	ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ในช่วง Partial Peak (kW) ปกติดูจาก มิเตอร์กรณีนี้สมมุติจากการใช้ไฟฟ้าของเครื่องจักร
OP	อัตราค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วง Off Peak (Baht/kW)
E _c	อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า (Baht/Unit)
E	ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (kWh) ปกติดูจากมิเตอร์กรณีนี้สมมุติจากการใช้ไฟฟ้า ของเครื่องจักร
Ft	สูตรปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติ (Baht/kW)
N _M	จำนวนเดือน (โดย 1 เดือนคิด 26x8 วัน 208 ชั่วโมง)
A _{cc}	ค่าใช้จ่ายอื่น (Baht/Month)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
VAT	ภาษีมูลค่าเพิ่ม (%)
N	ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
TS	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (บาท)
Y_i	ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)
NPV	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)
k_0	ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรก (บาท)
b_t	ผลตอบแทนในปีที่ 1, 2, 3..., n (บาท)
c_t	ค่าใช้จ่ายในปีที่ 1, 2, 3..., n (บาท)
i	อัตราดอกเบี้ย (%)
t	ปีของโครงการ คือปีที่ 1,2,3...,n (ปี)
n	อายุโครงการ (ปี)
B_t	ผลตอบแทนในปีที่ t, (บาท)
C_t	ค่าใช้จ่ายในปีที่ t, (บาท)
t	ปีของโครงการมีค่า 1,2,...,n, (ปี)
r	อัตราส่วนลด, (%)
Pe	กำลังเครื่องยนต์, KW
π	3.1416
N	ความเร็วรอบเครื่องยนต์
n1	ความเร็วรอบเฟืองขับ
n2	ความเร็วรอบเฟืองตาม
d1	เส้นผ่าศูนย์กลางเฟืองขับ
d2	เส้นผ่าศูนย์กลางเฟืองตาม
l	อัตราทด
M	โมเมนต์บิด

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์

ω

r

ความหมาย

ความเร็วเชิงมุม rad/s

รัศมีเฟืองขับและตาม

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายอธิปดี เหล่ารอด
วันเดือนปีเกิด	17 กุมภาพันธ์ 2513
สถานที่เกิด	ลำปาง
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	9/87 ม.6 หมู่บ้านรามนุช 14 ถ.สุขุมวิท ต.บ้านฉาง อ.บ้านฉาง จ.ระยอง 21130

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2528	มัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนอัสสัมชัญ ลำปาง
พ.ศ. 2532	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นต้น สาขา เครื่องกล จากโปลิเทคนิคลานนาเชียงใหม่
พ.ศ. 2535	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขา เครื่องกล จากวิทยาลัยเทคนิคลำปาง
พ.ศ. 2538	อุดมศึกษา(อุตสาหกรรมบัณฑิต) วิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2551	บัณฑิตศึกษา(วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) วิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ