

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ในการคัดเลือก
ทางเลือก เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงกรณีศึกษา:

โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง

**FEASIBILITY ANALYSIS FOR TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS ON
SELECTION OF EFFICIENCY IMPROVEMENT FOR HIGH VOLTAGE MOTOR:
A CASE STUDY OF BANGKHEN WATER TREATMENT PLANT,
METROPOLITAN WATERWORKS AUTHORITY**

ยงยุทธ ศรีโหมต¹, ศันสนีย์ สุภาภา² และ พัชรภรณ์ ญาณภีร³

¹สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม (ภาคพิเศษ) ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร
กรุงเทพมหานคร 10900, yongyutmwa@gmail.com

^{2,3}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900,
²fengsas@ku.ac.th, ³fengppy@ku.ac.th

Yongyut Srimode¹, Sansanee Supapa² and Patcharaporn Yanpirat³

¹Graduate Program in Engineering Management, Department of Industrial Engineering,
Faculty of Engineering, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Rd., Ladyao, Jatujak
Bangkok 10900, Thailand, yongyutmwa@gmail.com

^{2,3}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University
50 Ngamwongwan Rd., Ladyao, Jatujak Bangkok 10900, Thailand,
²fengsas@ku.ac.th, ³fengppy@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การประปานครหลวงมีนโยบายในการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิตและการสูบน้ำให้มี
มาตรฐานสูง มีความมั่นคงและมีเสถียรภาพ เพื่อก้าวไปสู่การเป็น Best-in-Class ของการประปา
ชั้นนำในระดับแนวหน้าของอาเซียน จึงจัดทำแผนงานการปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องจักรและ
อุปกรณ์ต่างๆ ให้มีความทันสมัยพร้อมใช้งาน และจากการรวบรวมข้อมูลปัญหาการขัดข้องจาก
ประวัติการซ่อมบำรุงมอเตอร์ไฟฟ้าส่งสูบน้ำมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงชนิดซิงโครนัสเดิม ภายในโรงสูบน้ำ

ส่งน้ำ-1 ย้อนหลัง 2 ปีพบว่ามีความชำรุดต้องซ่อมบำรุงถึง 2 ครั้งต้องหยุดทำงานถึง 886 วัน เนื่องจากมีอายุใช้งานมานานกว่า 38 ปี และจากการศึกษาสาเหตุการชำรุดต้องซ่อมบำรุงและข้อมูลทางด้านเทคนิคและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้เสนอแนวทางการปรับปรุง 4 ทางเลือก ได้แก่ 1) เปลี่ยนขดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้าเดิม 2) เปลี่ยนมอเตอร์ชนิดซิงโครนัสใหม่ 3) เปลี่ยนเป็นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ และ 4) เปลี่ยนเป็นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำพร้อมเครื่องปรับความเร็วรอบ การวิเคราะห์ด้วยวิธี AHP พบว่าการเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดทางด้านเทคนิค เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่มีความทนทาน ใช้งานง่าย บำรุงรักษาน้อย แต่เนื่องจากต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์หาอัตราผลตอบแทนในการลงทุนส่วนที่เพิ่ม พบว่าทางเลือกที่ 1 เปลี่ยนขดลวดมอเตอร์ซิงโครนัสเดิม เป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ ผลการวิเคราะห์ความไวของการเปลี่ยนแปลง ทั้งในด้านค่าใช้จ่ายการจัดหาและติดตั้งเครื่องจักร ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า ค่าจ้างพนักงานควบคุมเครื่องจักร ในช่วง $\pm 25\%$ ของแต่ละปัจจัย ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการตัดสินใจ ดังนั้นผลสรุปของงานวิจัยนี้คือหากมีงบประมาณ 12.45 ล้านบาทควรเลือกวิธีการที่มีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์คือการเปลี่ยนขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้าเดิม แต่หากมีงบประมาณ 29.55 ล้านบาทควรเลือกทางเลือกที่ 3 คือเป็นการเปลี่ยนเป็นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความเหมาะสมทางเทคนิคที่สุด

คำสำคัญ: มอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูง, การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนในส่วนที่เพิ่ม, การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

ABSTRACT

Metropolitan Waterworks Authority has their policy to improve and develop production and transmission of water with high standard, stability and preciously to step into "The Best - in-Class of Metropolitan Waterworks in Asian" . According to the maintenance records of the high voltage motors in transmission pump for the last 2 years, it was found that there were 22 maintenance records which caused 886 shut down days and the Polarization Index of the motors were under standard limit. In consequence, it is necessary to improve efficiency of the high voltage motors in transmission pump station- 1 that has been operated over 38 years. The causes of maintenance were analyzed and the 4 alternatives were suggested which were 1) changing only the winding of the old motor, 2) changing the old motor to synchronous motor, 3) changing the old motor to induction motor and 4)changing to induction motor with variable speed drive. The Analytic Hierarchy Process was conducted and it was

found that the changing of new induction motor was the best alternative because of better tolerance, easy to operate and less maintenance requirement. And due to high investment cost, economic analysis was also taken into consideration, the incremental investment analysis was applied for selection, it was found that changing winding of old motor was the economical alternative, due to the lowest investment cost. The sensitivity analysis of the 3 variables which were machine and installation costs, electricity cost, and labor cost at the range of $\pm 25\%$ the selected alternative was still the economical selection. It was concluded that if the available budget was at 12.45 million baht, the alternative of changing only winding was recommended but if the budget was at 29.55 million baht, the technically feasible alternative of changing to induction motor was the preferable alternative.

KEYWORDS: High voltage motor, Incremental Investment analysis, Economic analysis.

1. บทนำ

ระบบการสูบน้ำประปา (Transmission Water System) ของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง มีโรงสูบน้ำทั้งหมด 3 โรง ได้แก่

1. โรงสูบน้ำ-1 (TPS-1) เริ่มใช้งาน ปี พ.ศ. 2522 มีมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนสมอเตอร์ (Synchronous Motor) ความเร็วคงที่ (Fixed Speed) สำหรับใช้ขับเครื่องสูบน้ำจำนวน 5 เครื่อง มีปริมาณการสูบน้ำ 1,000,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เพื่อส่งน้ำประปาผ่านอุโมงค์ส่งน้ำไปยังโรงจ่ายน้ำลุมพินี โรงสูบน้ำจ่ายน้ำสำโรง โรงสูบน้ำจ่ายน้ำราษฎร์บูรณะ และโรงสูบน้ำจ่ายน้ำพลโยธิน

2. โรงสูบน้ำ-2 (TPS-2) เริ่มใช้งานเมื่อปี พ.ศ. 2531 มีมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor) แบบปรับความเร็วรอบได้ (VSD) สำหรับใช้ขับเครื่องสูบน้ำจำนวน 5 เครื่อง มีปริมาณการสูบน้ำ 1,100,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เพื่อส่งน้ำประปาผ่านอุโมงค์ส่งน้ำไปยังโรงสูบน้ำจ่ายน้ำลาดพร้าว โรงสูบน้ำจ่ายน้ำคลองเตย และโรงสูบน้ำจ่ายน้ำสำโรง

3. โรงสูบน้ำ-3 (TPS-3) เริ่มใช้งานเมื่อปี พ.ศ. 2546 มีมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor) แบบปรับความเร็วรอบได้ (VSD) สำหรับใช้ขับเครื่องสูบน้ำจำนวน 4 เครื่อง มีปริมาณการสูบน้ำ 1,100,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เพื่อส่งน้ำประปาผ่านอุโมงค์ส่งน้ำไปยังโรงสูบน้ำจ่ายน้ำลุมพินี โรงสูบน้ำจ่ายน้ำมีนบุรี โรงสูบน้ำจ่ายน้ำลาดกระบังและโรงสูบน้ำจ่ายน้ำบางพลี

โรงสูบน้ำทั้ง 3 โรงจะมีระบบเส้นท่อเชื่อมต่อกัน เพื่อใช้ในการสูบน้ำทดแทนกันได้ (Bypass) โดยจะสูบน้ำจากถังเก็บน้ำใส (Water Reservoir) ภายในโรงงานผลิตน้ำบางเขน เข้าไปในพื้นที่บริการผ่านระบบอุโมงค์และท่อจ่ายน้ำหลายขนาด ที่มีการควบคุมแรงดันน้ำและประมาณการสูบน้ำภายในอุโมงค์และเส้นท่อให้เหมาะสมตามช่วงเวลา เพื่อส่งน้ำประปาให้ไปถึง

บ้านเรือนประชาชนผู้ใช้น้ำตามปริมาณการใช้น้ำในแต่ละพื้นที่บริการ

ตามนโยบายของฝ่ายวางแผนพัฒนาระบบผลิตและส่งน้ำ ได้กำหนดอายุใช้งานเครื่องจักรประเภทเครื่องสูบน้ำและมอเตอร์ไฟฟ้าไว้ที่ 20 ปี แต่เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าหมายเลข 1 ถึง 4 ของโรงสูบน้ำ-1 มีอายุการใช้งานมากกว่า 38 ปี ซึ่งเกินอายุการใช้งานมาตรฐานที่กำหนดไว้ ส่งผลให้อุปกรณ์ต่างๆ มีการเสื่อมสภาพและหาอะไหล่สำหรับเปลี่ยนทดแทนเมื่ออุปกรณ์ชำรุดได้ยาก บางครั้งต้องใช้ระยะเวลาซ่อมบำรุงรักษานาน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดจากปัญหาขลวดที่พันอยู่ในตัวมอเตอร์เกิดการลัดวงจร หากเกิดการลัดวงจรขึ้นภายในขลวดของมอเตอร์ไฟฟ้าจะส่งผลให้มอเตอร์ต้องหยุดการใช้งานเป็นระยะเวลานาน จะต้องมีการบริหารจัดการผู้รับจ้างเพื่อนำมอเตอร์ออกไปแก้ไขที่โรงงานของผู้รับจ้าง และเนื่องจากเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่ใช้กับแรงดันไฟฟ้าระดับสูงถึง 6,600 โวลต์ จึงต้องใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบและแก้ไขเพื่อเปลี่ยนอุปกรณ์ต่างๆ ไม่น้อยกว่าครั้งละ 3 เดือน จึงจะสามารถนำกลับมาติดตั้งใช้งานได้ตามปกติ

จากข้อมูลการชำรุดบกพร่องของมอเตอร์ไฟฟ้า หากมอเตอร์ไฟฟ้าหมายเลข 1 ชำรุด จะส่งผลให้ไม่สามารถสูบน้ำได้ 9,180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อตัว คิดเป็นมูลค่าน้ำ 96,390 บาทต่อชั่วโมง แต่หากเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหมายเลข 2 - 5 ชำรุด จะทำให้ไม่สามารถสูบน้ำได้ 18,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อตัว คิดเป็นมูลค่าน้ำ 189,000 บาทต่อชั่วโมงต่อตัว (คิดอัตราค่าน้ำแบบขายเหมา 10.50 บาทต่อลูกบาศก์เมตร)

ดังนั้นจึงได้เลือกโรงสูบน้ำ-1 (TPS-1) เป็นกรณีศึกษาในการศึกษาวิจัยโดยพิจารณาวิธีการปรับปรุงมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อเสนอต่อหน่วยงานที่มีหน้าที่ในการตัดสินใจและวางแผนในการจัดเตรียมตามงบประมาณที่เหมาะสม เพื่อทำให้ระบบการสูบน้ำมีความมั่นคงและมีเสถียรภาพลดการชำรุดบกพร่อง ทั้งยังเป็นการเตรียมความพร้อมรองรับกับปริมาณความต้องการใช้น้ำในอนาคตที่จะเพิ่มมากยิ่งขึ้น ตามแผนยุทธศาสตร์ฉบับที่ 3 การประปานครหลวง [1]

2. วัตถุประสงค์

เพื่อเสนอทางเลือกในการปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบน้ำโดยวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์ในการพิจารณาคัดเลือกทางเลือกที่เหมาะสม และวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการตัดสินใจในการลงทุนในโครงการลงทุนปรับปรุงมอเตอร์ไฟฟ้าโรงสูบน้ำ-1 (TPS-1) เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า ของโรงงานผลิตน้ำอื่นๆ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

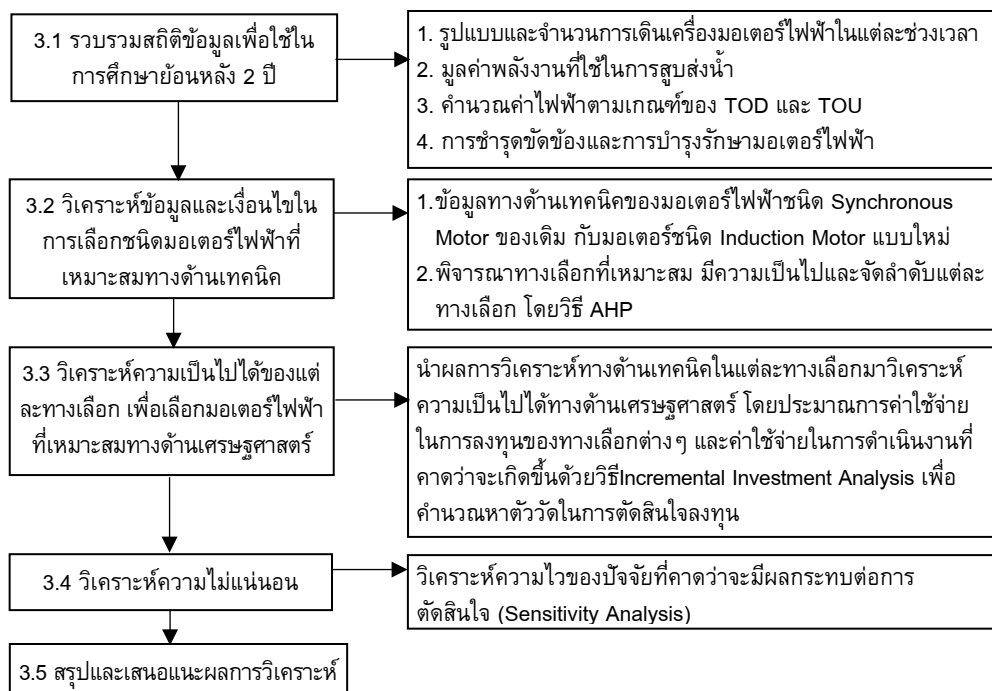
3.1 รวบรวมสถิติ ข้อมูล และจำนวนการเดินเครื่องมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อใช้สูบน้ำในแต่ละช่วงเวลาย้อนหลัง 1 ปี ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในการสูบน้ำและคำนวณค่าไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบตามเกณฑ์ของ TOD และ TOU ย้อนหลัง 1 ปี รวมทั้งข้อมูลปัญหาและสาเหตุของการขัดข้องและการซ่อมบำรุงมอเตอร์ไฟฟ้าของโรงสูบน้ำย้อนหลังในช่วง 2 ปี เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดทางเลือกวิธีการในการปรับปรุงมอเตอร์ไฟฟ้า

3.2 ศึกษาข้อมูลและเงื่อนไขของการเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อกำหนดทางเลือกทางด้านเทคนิคและพิจารณาทางเลือกทางด้านเทคนิคที่เหมาะสม โดยวิธี Analytic hierarchy process (AHP)

3.3 ศึกษาและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการลงทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบในแต่ละทางเลือก โดยประมาณการค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานด้วยวิธีหาอัตราผลตอบแทนในการลงทุนส่วนที่เพิ่ม

3.4 วิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการลงทุน โดยการวิเคราะห์ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรของปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการตัดสินใจ

3.5 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

4. ผลการวิจัย

ข้อมูลเบื้องต้นของโรงสูบน้ำ-1 โรงงานผลิตน้ำบางเขน กรณีศึกษาดำเนินการวิจัย

1. มอเตอร์ไฟฟ้าที่ติดตั้งใช้งานภายในโรงสูบน้ำ-1 เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงชนิดซิงโครนัส มีจำนวนทั้งหมด 5 เครื่อง มอเตอร์ไฟฟ้าหมายเลข 1 เป็นขนาดเล็กและมอเตอร์ไฟฟ้าหมายเลข 2-5 เป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งมีรายละเอียดและขนาดพิกัด ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงภายในโรงสูบน้ำ-1

รายการ	ผู้ผลิต	แรงดัน	กระแสไฟฟ้า	กำลังงาน (KW)	ปริมาณสูบน้ำ (m ³ /hr)
Motor No.1	Meden.	6,600	89.7	992	9,180
Motor No.2	Meden.	6,600	173	1,920	180,000
Motor No.3	Meden.	6,600	173	1,920	180,000
Motor No.4	Meden.	6,600	173	1,920	180,000
Motor No.5	Meden.	6,600	173	1,920	180,000

จากการรวบรวมสถิติ ข้อมูล และจำนวนการเดินเครื่องมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อใช้สูบน้ำในแต่ละช่วงเวลาย้อนหลัง 1 ปี พบว่าโรงสูบน้ำ-1 มีรูปแบบการเดินเครื่องสูบน้ำ ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดข้อมูลของการเดินเครื่องมอเตอร์ไฟฟ้า ในการสูบน้ำของโรงสูบน้ำ-1

ช่วงเวลา	การเดินเครื่อง	ปริมาณน้ำสูบน้ำ (m ³)
00.00 น. – 06.00 น.	เดินเครื่องขนาดใหญ่ 1 ตัว	143,713
06.00 น. – 18.00 น.	เดินเครื่องขนาดใหญ่ 2 ตัว ขนาดเล็ก 1 ตัว	520,071
18.00 น. – 24.00 น.	เดินเครื่องขนาดใหญ่ 2 ตัว	233,139
รวมปริมาณน้ำสูบน้ำเฉลี่ยต่อวัน		896,923

2. โรงงานผลิตน้ำบางเขน รับไฟฟ้าแรงสูงจากการไฟฟ้านครหลวง ระดับแรงดันไฟฟ้า 69,000 โวลต์ จัดเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 4 (ประเภทกิจการขนาดใหญ่) สามารถเลือกรูปแบบการคิดค่าไฟฟ้าได้ 2 แบบ คือการคิดค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของวัน (TOD) และตามช่วงเวลาของการใช้

งาน (TOU) จากการรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าย้อนหลัง 1 ปี และนำมาคำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่าไฟฟ้าแบบตามช่วงเวลาของวันและตามช่วงเวลาของการใช้งาน พบว่ามีค่าไฟฟ้า ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการคำนวณค่าไฟฟ้าแบบตามช่วงเวลาของวัน (TOD) และตามช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU)

เดือน	ปริมาณน้ำส่ง	คิดค่าไฟฟ้าแบบ TOD	คิดค่าไฟฟ้าแบบ TOU
ต.ค. 58	27,871,077	10,463,765	9,952,720
พ.ย. 58	27,656,442	10,799,128	10,359,651
ธ.ค. 58	28,191,637	10,968,678	10,247,812
ม.ค. 58	27,246,393	10,074,243	9,449,741
ก.พ. 58	21,757,189	7,552,200	6,972,091
มี.ค. 58	21,011,905	7,109,514	6,590,036
เม.ย. 58	16,021,812	4,772,253	4,233,932
พ.ค. 58	17,015,132	4,438,364	4,028,584
มิ.ย. 58	23,122,538	6,748,237	6,544,615
ก.ค. 58	28,137,494	9,355,356	8,684,385
ส.ค. 58	27,947,814	9,457,315	8,780,479
ก.ย. 58	26,916,748	9,070,472	8,764,956,v
เฉลี่ยต่อเดือน	24,408,015	8,400,749	7,884,061

จากการเปรียบเทียบ พบว่าการคิดค่าไฟฟ้าแบบตามช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) จะประหยัดค่าใช้จ่ายได้ร้อยละ 6.2 หรือจะประหยัดได้เฉลี่ยปีละ 6,200,800 บาท ซึ่งสอดคล้องกับ Cerchi C, Badruzzamam M, Oppenheimer J, and Bros CM [2] ได้ศึกษาพบว่าระบบการบริหารจัดการพลังงานควรเลือกรูปแบบการจัดการพลังงาน ที่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่นการเปลี่ยนการใช้การวางแผนการเดินเครื่องในช่วงที่มีค่าความต้องการใช้พลังงานต่ำ (Off Peak Demand Charge) ดังนั้นการประสานรหลวงจึงควรใช้ระบบการคำนวณค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU)

3. การศึกษาข้อมูลการชำรุดบกพร่องของมอเตอร์ไฟฟ้าที่โรงสูบน้ำ-1 ย้อนหลัง 2 ปี ในปี 2558-2559 พบว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเกิดการชำรุดบกพร่องรวมทั้งสิ้น จำนวน 22 ครั้ง คิดเป็นระยะเวลาที่มอเตอร์ต้องหยุดการทำงานรวม 886 วัน คิดเฉลี่ยเป็น 40.27 วัน/เครื่อง/ปี และพบว่าสาเหตุหลักที่ทำให้ต้องหยุดการใช้งานมอเตอร์ถึง 8 ใน 22 ครั้งเกิดจากขดลวดไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ลัดวงจร ต้องใช้เวลาในการซ่อมบำรุงถึง 659 วัน คิดเป็นร้อยละ 74.38 ของวันที่ต้องหยุดซ่อมบำรุงในรอบ 2 ปี จึงทำให้เกิดความเสี่ยงในการสูบน้ำไม่ได้ตามแผนที่วางไว้ ดังนั้นจึงควร เปลี่ยนมอเตอร์ไฟฟ้าเนื่องจากมีอายุการใช้งานนานถึง 38 ปีเกินเกณฑ์ที่การประปานครหลวงกำหนด หรือ ควรเปลี่ยนขดลวดใหม่ ซึ่ง Dlamini V, Bansal RC, and Naidoo R [3] ศึกษาพบว่า การซ่อมบำรุงรักษา มอเตอร์มอเตอร์ตามมาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนด เช่น การเปลี่ยนขดลวด แกนเหล็กหรือลูกปืนจะ รักษาประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้สูงอยู่ตลอดเวลาและยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้าให้ ยาวนานขึ้น

4. การศึกษาข้อมูลทางด้านเทคนิคของมอเตอร์ไฟฟ้าและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนด ทางเลือกทางด้านเทคนิค Costa [4] พบว่ามอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถนำมาติดตั้งใช้งาน มีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่

4.1) มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัส (Synchronous motor) มีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ข้อดีของมอเตอร์ชนิดซิงโครนัสคือ

- 1) มีความเร็วรอบคงที่ (Synchronous speed)
- 2) มีประสิทธิภาพและค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor) สูง
- 3) ใช้กระแสไฟฟ้าในการขับภาระ (Load) น้อย ทำให้มีค่าความสูญเสียภายในของ

แกนเหล็กและขดลวดน้อย

ข้อเสียของมอเตอร์ชนิดซิงโครนัสคือ

- 1) มีผู้ผลิตน้อยราย และใช้งานเฉพาะกลุ่มอุตสาหกรรมทำให้มูลค่าการลงทุนเริ่มแรก สูง ใช้ระยะเวลาในการสั่งผลิตนาน
- 2) ปรึบความเร็วรอบมีความยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง
- 3) มีชุดแปรงถ่านและส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ต้องบำรุงรักษา และมีค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนตามอายุการใช้งาน

4.2) มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ (Induction motor) มีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ คือ

- 1) การเริ่มเดินเครื่องทำได้ง่ายและสะดวก เนื่องจากขณะเริ่มเดินเครื่องจะจ่ายไฟฟ้า เข้าที่ขดลวดด้านสเตเตอร์เพียงอย่างเดียว ไม่ต้องจ่ายไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดของโรเตอร์เหมือนกับ มอเตอร์ชนิดซิงโครนัส

2) สามารถใช้ร่วมกับเครื่องปรับอากาศรอบได้ ส่งผลทำให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และเพิ่มลดปริมาณการสูบน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3) ไม่มีแปรงถ่านเชื่อมต่อระหว่างขดลวดชุดโรเตอร์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก ทำให้ลดการซ่อมบำรุงรักษา

4) ไม่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ลดการบำรุงรักษา และไม่มีค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ตามอายุการใช้งาน

ข้อเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ คือ

1) ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor) ต่ำ ทำให้ใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่า ต้องออกแบบขนาดสายไฟฟ้าให้ใหญ่ขึ้น

2) ต้องติดตั้ง Capacitor bank เพื่อชดเชยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงและบำรุงรักษาเพิ่มขึ้น

จากข้อมูลทางด้านเทคนิคของมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูง ทั้ง 2 ชนิด สามารถสรุปข้อดีและข้อเสียได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสและมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ

รายการ	มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัส	มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ
การลงทุนเริ่มแรก	สูง	ต่ำ
ความเร็วรอบของโรเตอร์	คงที่	ค่อนข้างคงที่
กระแสไฟฟ้าในการขับ Load	น้อย	มาก
ค่าตัวประกอบกำลัง	สูง	ต่ำ
ประสิทธิภาพในการใช้งาน	สูง	ต่ำ
ผู้ผลิตและการใช้งาน	ไม่แพร่หลาย	แพร่หลาย
การปรับความเร็วรอบ	ทำได้ยาก	ทำได้ง่าย
ส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	มี	ไม่มี
การบำรุงรักษา	ค่อนข้างสูง	ต่ำ

ข้อมูลและเงื่อนไขในการเลือกขนาดฟักัดของมอเตอร์ไฟฟ้าทางด้านเทคนิค จากการเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัส พบว่าเมื่อนำมาใช้ขับเคลื่อนสูบน้ำ โดยขณะ

เดินเครื่องใช้งานมอเตอร์ชนิดซิงโครนัสจะมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.995 และมีค่าการใช้กำลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 1,794 กิโลวัตต์ และใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 158.7 แอมป์แปร์

จากการเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ พบว่าเมื่อนำมาใช้ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำ โดยขณะเดินเครื่องใช้งานมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำจะมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.756 และมีค่าการใช้กำลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 1,775 กิโลวัตต์ และใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 207.6 แอมป์แปร์

จากข้อมูลจะพบว่ามอเตอร์ทั้ง 2 ชนิด ใช้กำลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 1,800 กิโลวัตต์ เนื่องจากภาระที่มอเตอร์ไปขับได้แก่เครื่องสูบน้ำมีค่าคงที่คือ 1,700 กิโลวัตต์ ดังนั้นชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้าจึงไม่มีผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้า แต่การใช้มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำพร้อมชุดปรับความเร็วรอบ จะลดค่าพลังงานไฟฟ้าลงได้ร้อยละ 12

การศึกษาข้อมูลทางด้านเทคนิคของมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงข้างต้น พบว่ามีทางเลือกในการปรับปรุงมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงของเดิม จำนวน 4 ทางเลือก คือ

ทางเลือกที่ 1 เปลี่ยนเฉพาะขดลวด (Rewinding) มอเตอร์ชนิดซิงโครนัสของเดิม เนื่องจากจากประวัติการซ่อมบำรุงในรอบ 2 ปีที่ผ่านมาพบว่ามีปัญหาจากขดลวดมอเตอร์ถึง 8 ใน 22 ครั้ง และต้องใช้เวลาในการซ่อมบำรุงขดลวดถึงร้อยละ 74.38 ของวันที่ต้องหยุดซ่อมบำรุงในรอบ 2 ปี

ทางเลือกที่ 2 ติดตั้งมอเตอร์ชนิดซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor) ชุดใหม่ ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเดิมที่โรงสูบน้ำ-1 (TPS-1) ใช้อยู่

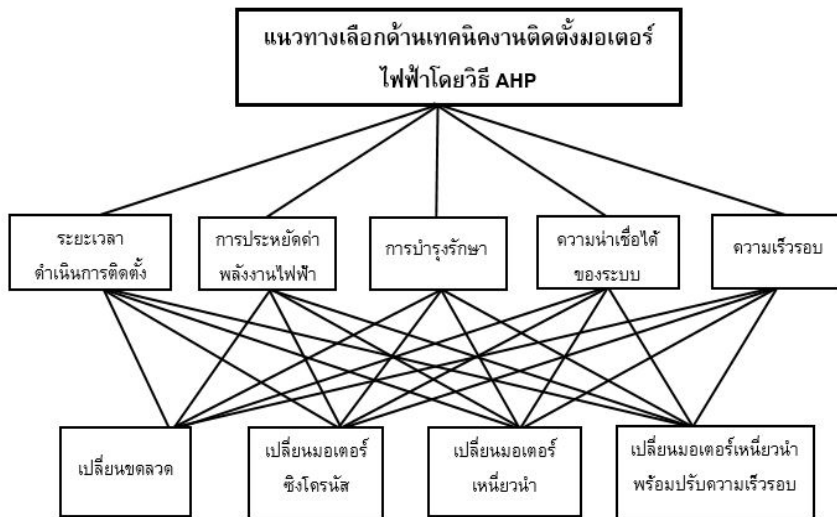
ทางเลือกที่ 3 ติดตั้งมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction motor) ชุดใหม่ เนื่องจาก Costa [4] พบว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำจะมีประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 75 ถึง 95 ของภาระสูงสุด

ทางเลือกที่ 4 ติดตั้งมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction motor) ชุดใหม่ พร้อมชุดปรับความเร็วรอบจาก Saidur R, and Mahlia TMI [5] ได้นำเทคโนโลยีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยระบบไฟฟ้ามาใช้งานร่วมกับมอเตอร์พบว่าจะทำให้มอเตอร์ใช้พลังงานลดลง

5. การพิจารณาทางเลือกทางด้านเทคนิคที่เหมาะสม โดยวิธี Analytic hierarchy process (AHP)

Delgado A, and TolmasQuim [6] ได้พบว่าข้อมูลในการตัดสินใจในการเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าได้แก่ข้อมูลทางด้านเทคนิคโดยการกำหนดเกณฑ์ทางเลือกที่เป็นปัจจัยสำคัญ และเสาวนีย์ [7] ได้ศึกษาการประเมินประสิทธิภาพผู้ส่งมอบท่อและอุปกรณ์ประปา การประเมินครหลวงโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นแบบคลุมเครือ (FAHP) โดยกำหนดเกณฑ์ทางเลือกโดยผู้เชี่ยวชาญจากการประเมินครหลวงที่เกี่ยวข้องโดยตรง การคัดเลือกการพิจารณาทางเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าตามงานวิจัยนี้ผู้เชี่ยวชาญการประเมินครหลวงได้ร่วมกันระดมความคิดและเห็นควรให้ใช้วิธี AHP เนื่องจากไม่มีความซับซ้อน โดยได้ร่วมกันกำหนดเกณฑ์ในการตัดสินใจหลักและเกณฑ์ในการตัดสินใจรอง แล้วนำเกณฑ์ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับตัดสินใจเพื่อให้คะแนนหรือนำหนัก

ของแต่ละทางเลือก โดยแบ่งทางเลือกของการตัดสินใจออกเป็นคู่ๆ และให้คะแนนตามระดับความสำคัญของแต่ละทางเลือก ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 การจัดลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์โดยวิธี AHP เพื่อพิจารณาทางเลือกชนิดมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสม

จากการร่วมพิจารณาของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อจัดลำดับความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ตามวิธีของ AHP จากตารางที่ 5 พบว่าเกณฑ์ทางเลือกหลักที่มีคะแนนสูงสุดได้แก่ ทางเลือกด้านการบำรุงรักษาได้คะแนน 0.312 และเกณฑ์ทางเลือกรองที่มีคะแนนสูงสุดได้แก่ ทางเลือกการเปลี่ยนมอเตอร์ไฟฟ้าของเดิมมาเป็นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำได้คะแนน 0.351

ตารางที่ 5 ค่าระดับคะแนนของเกณฑ์ทางเลือกหลัก และเกณฑ์ทางเลือกรอง

วิธีทางเลือก	การบำรุงรักษา	ความน่าเชื่อถือของระบบ	การประหยัดพลังงานไฟฟ้า	ระยะเวลาดำเนินการติดตั้ง	ความสามารถปรับรอบความเร็วรอบ	คะแนนเกณฑ์รองรวม
ติดตั้งมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ	0.116	0.083	0.171	0.523	0.103	0.351
ติดตั้งมอเตอร์ชนิดซิงโครนัส	0.231	0.234	0.247	0.089	0.103	0.204
ติดตั้งมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำพร้อมปรับความเร็วรอบ	0.490	0.526	0.094	0.261	0.175	0.268
การเปลี่ยนขดลวด	0.163	0.157	0.483	0.126	0.620	0.177
คะแนนเกณฑ์หลักรวม	0.312	0.239	0.219	0.140	0.090	1.000
C.R.	0.07	0.08	0.03	0.04	0.02	0.09

6. การศึกษาและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนปรับปรุงมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูง ลลิตา [8] ได้ศึกษาและวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนสร้างหน่วยกรองน้ำแบบทั่วไปของกรณีศึกษาหน่วยกรองน้ำในนิคมอุตสาหกรรมโดยการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางการเงิน การลงทุนและค่าใช้จ่ายในส่วนที่เพิ่มขึ้นของแต่ละทางเลือกตามเงื่อนไขที่กำหนด สำหรับงานศึกษาวิจัยนี้ได้เลือกทางเลือกที่มีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์โดยวิธีการวิเคราะห์การลงทุนในส่วนเพิ่ม (Incremental investment analysis) และได้รวบรวมข้อมูลเพื่อประกอบการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ ดังต่อไปนี้

1) การประมาณค่าใช้จ่ายของการลงทุนได้มาจากราคากลางและการประกวดราคาที่ใช้ในการจัดซื้อและจัดจ้างของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

2) ระยะเวลาในการวิเคราะห์ 20 ปี ตามอายุงานของเครื่องจักรอุปกรณ์หลัก และมูลค่าซากของเครื่องจักรร้อยละ 4 ของค่าเครื่องจักรอุปกรณ์

3) เนื่องจากเป็นหน่วยงานของรัฐ จึงไม่คิดภาษีเงินได้นิติบุคคล และไม่พิจารณาเงินเพื่อ

4) กำหนดอัตราผลตอบแทนการลงทุนขั้นต่ำ (MARR) ไว้ที่ร้อยละ 10

การประมาณต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการลงทุนปรับปรุงมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูง มีรายละเอียดตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 รายละเอียดของค่าใช้จ่ายในแต่ละทางเลือก

รายละเอียด	เปลี่ยนขดลวดมอเตอร์ชนิดซิงโครนัลเดิม	ติดตั้งมอเตอร์ชนิดซิงโครนัลใหม่	ติดตั้งมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำใหม่	ติดตั้งมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำพร้อมชุดปรับความเร็วรอบใหม่
1. ระยะเวลาในการจัดหาและติดตั้ง	6 เดือน	12 เดือน	12 เดือน	18 เดือน
2. มอเตอร์ไฟฟ้า	ชุดเดิม	ชุดใหม่	ชุดใหม่	ชุดใหม่
3. เงินลงทุนรวม (ต่อเครื่อง)				
3.1 งาน Rewinding Motor (ล้านบาท)	9.30	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
3.2 งานเปลี่ยนอุปกรณ์และงานติดตั้ง (ล้านบาท)	3.15	10.80	10.80	10.80
3.3 งานจัดหามอเตอร์ (ล้านบาท)	ไม่มี	29.20	18.75	18.75
3.4 งานจัดหาเครื่องปรับความเร็วรอบ (ล้านบาท)	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	15.50
รวมเงินลงทุนต่อเครื่อง (ล้านบาท)	12.45	40.00	29.55	45.05
4. ปรับความเร็วรอบได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ต้องปรับปรุง	ได้
5. ระยะเวลาในการรับประกันหลังเสร็จงาน	12 เดือน	24 เดือน	24 เดือน	24 เดือน
6. ระยะเวลาในการรับบำรุงรักษา	ไม่มี	24 เดือน	24 เดือน	24 เดือน
7. ระยะเวลาในการ Overhaul มอเตอร์	60 เดือน	60 เดือน	60 เดือน	60 เดือน
8. ระยะเวลาในการเปลี่ยนอุปกรณ์จ่ายกระแส	ทุก 84 เดือน	ทุก 84 เดือน	ไม่มี	ทุก 96 เดือน

ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีหาอัตราผลตอบแทนในส่วนที่เพิ่มขึ้น (Incremental investment analysis) โดยเปรียบเทียบกระแสเงินสดในส่วนที่เพิ่มของแต่ละโครงการ เพื่อหาส่วนต่างของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ของทั้ง 4 ทางเลือก พบว่ามีค่า NPV และค่า IRR ของแต่ละทางเลือก ตามตารางที่ 7

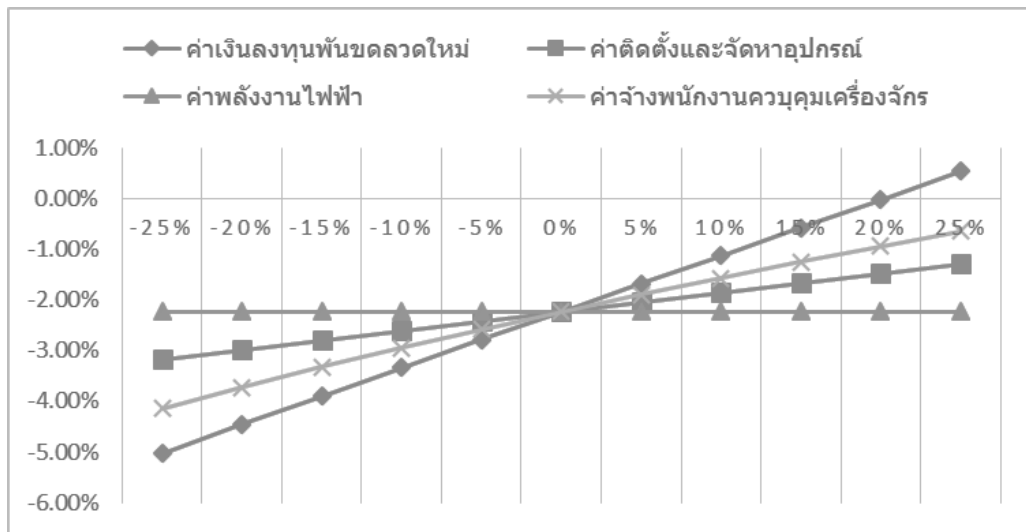
ตารางที่ 7 การคัดเลือกโครงการ ด้วยวิธี Incremental investment analysis

ลำดับที่	การเปรียบเทียบ	IRR	NPV	ข้อพิจารณา
1	ทางเลือกที่ 3 กับทางเลือกที่ 1	-2.23%	-141.80	ควรเลือกทางเลือกที่ 1
2	ทางเลือกที่ 2 กับทางเลือกที่ 1	-6.97%	-115.93	ควรเลือกทางเลือกที่ 1
3	ทางเลือกที่ 4 กับทางเลือกที่ 1	4.85%	-54.42	ควรเลือกทางเลือกที่ 1

ผลการศึกษาและวิเคราะห์การลงทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าค่า IRR ที่คำนวณได้ต่ำกว่าค่า MARR 10 % ที่กำหนดไว้ ดังนั้นทางเลือกที่ 1 การเปลี่ยนขดลวด (Rewinding) มอเตอร์ซึ่งโครนัสของเดิม จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมมากที่สุดทางด้านเศรษฐศาสตร์

7. วิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการลงทุน โดยวิเคราะห์ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายของปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการตัดสินใจ (Sensitivity analysis) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่อาจส่งผลกระทบต่อการคัดเลือกโครงการ ปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ ค่าใช้จ่ายด้านการลงทุนพันขดลวดใหม่ ค่าใช้จ่ายการติดตั้งเครื่องจักรและจัดหาอุปกรณ์ ค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าจ้างพนักงานควบคุมเครื่องจักร

ซึ่งจะเปรียบเทียบระหว่างทางเลือกที่ 1 ซึ่งเป็นทางเลือกที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ กับทางเลือกที่ 3 ซึ่งเป็นทางเลือกที่เหมาะสมทางเทคนิค จะพบว่าค่า IRR มีการเปลี่ยนแปลงค่าตามรูปที่ 3 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความไวช่วง $\pm 25\%$ ของแต่ละตัวแปรไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการตัดสินใจ ยังคงเลือกทางเลือกที่ 1 เนื่องจากค่า IRR น้อยกว่าค่า MARR ที่กำหนดไว้



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ของทางเลือกที่ 1 กับทางเลือกที่ 3

4. สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

1. ผลการศึกษาข้อมูลทางด้านทางเทคนิคของมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูง ทั้งมอเตอร์ชนิดซิงโครนัส (Synchronous motor) และมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction motor) พบว่ามอเตอร์แต่ละชนิดจะมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไป แต่สามารถนำมาใช้ทดแทนมอเตอร์ของเดิมได้ทั้ง 2 ชนิด

2. การวิเคราะห์ทางเทคนิคโดยวิธี AHP พบว่าเกณฑ์ปัจจัยหลักที่ต้องนำมาพิจารณาเป็นลำดับแรกได้แก่ เกณฑ์ด้านการบำรุงรักษาและควรเลือกวิธีติดตั้งมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction motor) ชุดใหม่ เนื่องจากมีระดับคะแนนรวมสูงสุด

3. การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าการเปลี่ยนขดลวด (Rewinding) มอเตอร์ซิงโครนัสของเดิม มีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์มากที่สุด เพราะค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำกว่าทางเลือกอื่นๆ มาก

เนื่องจากการเปลี่ยนขดลวดใช้ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนขดลวดเพียง 12.45 ล้านบาท ในขณะที่การเปลี่ยนเป็นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนถึง 29.55 ล้านบาท และการประปรานครหลวงมีงบประมาณที่จำกัด ดังนั้นผู้บริหารจึงได้ตัดสินใจเลือกการเปลี่ยนขดลวดใหม่ ซึ่งใช้งบประมาณน้อย ดำเนินการให้แล้วเสร็จภายใน 6 เดือน อีกทั้งผู้ใช้งานและหน่วยงานด้านบำรุงรักษามีความชำนาญในการใช้งานและบำรุงรักษา แต่หากสามารถจัดหางบประมาณเพิ่มเติมได้ ควรเลือกวิธีการเปลี่ยนมอเตอร์ไฟฟ้าของเดิมมาเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ เนื่องจากจะได้มอเตอร์ชุดใหม่ ที่มีความทนทานสูง การบำรุงรักษาน้อย ส่งผลทำให้ระบบสูบน้ำมีความมั่นคงและมีเสถียรภาพที่สูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการประสานครหลวงและเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ข้อมูล ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งประกอบการจัดทำงานวิจัยนี้

References

- [1] Metropolitan Waterworks Authority. The 3rd strategic plan. n.p.: 2012.
- [2] Cherchi C, Badruzzamam M, Oppenheimer J, Bros. CM. Energy and water quality management systems for utility's operations. A review Journal of Environmental Management 2015;153:108-20.
- [3] Dlamini V, Bansal RC, Naidoo R. A motor management strategy for optimizing energy use and reducing life cycle costs. Scientific Research 2014;2:448-56.
- [4] Costa D, Bortoni E. Are my motor oversized. Energy Conversion and Management 2009;50:2282-7.
- [5] Saidur R, Mahlia TMI. Energy economic and environmental benefits of using high-efficiency motors to replace standard motor for the Malaysian industries. Energy Policy 2012;38:4617-25.
- [6] Delgado A, Tolmasquim MT. Analysis of a feasible tariff policy for the introduction of high efficiency electric motor in Brazil. Energy Conversion and Management 2002;43:827-44.
- [7] Saowanee Nankrajay. Evaluation of efficiency for water piping and fitting suppliers by applying data envelopment analysis and fuzzy analytic hierarchy process: A case study of Metropolitan Waterworks Authority. [Independent study of master degree in engineering management]. Bangkok: Kasetsart university; 2014. (In Thai)
- [8] Lalita Patanasanniwas. Technical and economic feasibility analysis for investment of conventional water treatment unit: A case study of water treatment unit of industrial park. [Independent study of master degree in engineering management]. Bangkok: Kasetsart university; 2015. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ยงยุทธ ศรีโหมต ผู้อำนวยการกองบำรุงรักษาไฟฟ้ากำลัง ฝ่ายบำรุงรักษา ระบบไฟฟ้า รองผู้ว่าการผลิตและส่งน้ำ การประปานครหลวง 400 ถนน ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210 เบอร์โทรศัพท์ 02-5039400
E-mail: yongyutmwa@gmail.com



รศ.ศันสนีย์ สุภาภา, M.S. (Industrial Eng.), Illinois Institute of Technology, USA. วุฒิวิศวกร สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, กรรมการ สภาวิศวกร และผู้ทรงคุณวุฒิพิเศษ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และ สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน E-mail: fengsas@ku.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Engineering project feasibility study, Process improvement



รศ.พัชรภรณ์ ญาณภิรต์, D.Tech.Sc. (Industrial Engineering) Asian Institute of Technology (AIT) รองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรม อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน E-mail: fengppy@ku.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Applied Operations Research, Multiple Criteria Decision Making, Supply Chain Management, and Cost Management