



การเลือกขนาดและวิเคราะห์ต้นทุนผลตอบแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พลังน้ำขนาดเล็กจากน้ำระบายความร้อนของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ Size Selection and Cost Benefit Analysis Micro- Hydro Generator from Cooling Water of Hydropower Plant

สุทธิพงษ์ วงศ์สารภี, เสริมเกียรติ จอมจันทร์ยอง

Sutthipong Wongsarapee, Sermkiat Jomjanyong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการเลือกขนาดกำลังผลิตติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้น้ำจากระบบระบายความร้อนของโรงไฟฟ้าพลังน้ำเป็นต้นกำลังโดยใช้ข้อมูลทางด้านวิศวกรรมและประสบการณ์การติดตั้งจากโครงการต่างๆ มาใช้ประกอบการพิจารณา ผลสรุปที่ได้คือ ชุดกังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหรือขนาด S (กำลังผลิตไม่เกิน 20 กิโลวัตต์) มีความเหมาะสมที่สุดและเหมาะสมกับการติดตั้งแบบทิวบูลาร์ (tubular) หรือแบบเบ้าท์ (bulb) ในส่วนของกังหันน้ำจะเป็นแบบพร็อบเพอเรอ (propeller turbine) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (induction generator) และเพื่อให้มั่นใจว่าการพิจารณาเลือกขนาดนั้นถูกต้องจึงได้นำมาเปรียบเทียบกับการใช้เทคนิคเดลฟาย ที่ใช้ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญในด้านต่างๆ จำนวน 19 คน ผลการสรุปที่ได้เหมือนกันทั้ง 2 วิธี เมื่อได้ข้อสรุปแล้วจึงได้ทำการจัดหาอุปกรณ์และเข้าดำเนินการติดตั้งชุดกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพร้อมทำการทดสอบเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 10 กิโลวัตต์ เพื่อให้ทราบความคุ้มค่าของโครงการจึงได้ทำการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าได้รับอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (B/C ratio) เท่ากับ 1.303 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV) เท่ากับ 152,019 บาท ระยะเวลาคืนทุน (payback period, PB) เท่ากับ 7.817 ปี อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (internal rate of return, IRR) เท่ากับ 18.16 เปอร์เซ็นต์ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ความไวของโครงการโดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้าและอัตราค่าไฟฟ้าเพื่อใช้ในการตัดสินใจลงทุนของโครงการ

Abstract

The study introduces size selection and generation capacity of a Micro-Hydro Generator generated by water cooling of Hydro Power Plant by a decision from engineering data and experience from some projects. In conclusion, the optimal turbine and generator size are then obtained. It indicated that the small size (S) or the capacity of less than 20 KW was suitable for this study especially on tubular and bulb type installation. For water turbine, the propeller turbine was appropriate and for power generator, the induction generator should be selected. To confirm the optimal turbine and generator sizes Delphi technique was used with the opinion of 19 experts. The optimal turbine and generator size selections were consistent by the 2 methods. After that, equipment and installation shall be provided. To verify the system, the micro-hydro Power Generation has been tested. It was indicated that the system could deliver electrical power by 10 KW. Finally, the system

was evaluated by economic analysis. It was found that the benefit-to-cost ratio (B/C ratio) was 1.303 while the net present value (NPV) was 152,019 Baht. Moreover, the payback period (PB) was 7.817 years and the internal rate of return (IRR) was 18.16%. From the sensitivity analysis, the plant factor and the electricity rate were altered to determine the possibility of the project.

1. บทนำ

พลังงานหมุนเวียนเป็นสิ่งที่กำลังได้รับความสนใจ และได้รับการสนับสนุนทั้งในรูปแบบมาตรการและนโยบายต่างๆจากรัฐบาล เพื่อให้ภาครัฐและเอกชนหันมาใส่ใจและหาวิธีการต่างๆ เพื่อนำพลังงานเหล่านั้นมาใช้ได้อย่างเป็นรูปธรรม งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ระบบน้ำระบายความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักจากโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ก่อนที่น้ำจะถูกปล่อยออกไปโดยไม่เกิดประโยชน์ให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้มาจ่ายให้กับระบบจ่ายไฟฟ้าหลักภายในโรงไฟฟ้า เพื่อลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่รับมาจากระบบภายนอกทำให้โรงไฟฟ้าสามารถจ่ายพลังงานเข้าระบบส่งไฟฟ้าได้มากขึ้น และเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในการลดใช้ค่าใช้จ่ายที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพและเป็นการดูแลสิ่งแวดล้อมที่ได้เริ่มเข้ามามีบทบาทมากในการพัฒนาเทคโนโลยีของพลังงานในด้านพลังงานไฟฟ้าสะอาด ซึ่งเชื่อว่าโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กจะกลับมาเป็นบทบาทอีกครั้งในอนาคต [7] ในปัจจุบันได้มีการเพิ่มความสำคัญของการประหยัดพลังงานที่มีอยู่ได้มีการนำพลังงานหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ที่เรียกกันว่าแหล่งทรัพยากรพลังงานทางเลือก ที่มีค่าใช้จ่ายต่ำและอุปกรณ์การเชื่อมต่อชุดขับเคลื่อนที่มีความหลากหลาย ความน่าสนใจในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นทางเลือกเพื่อพัฒนาแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เพราะว่าค่าใช้จ่ายต่อเครื่องต่ำ และเครื่องจะต้องมีความแข็งแรงทนทานสูง การใช้งานและการบำรุงรักษาง่าย [4] โดยเฉพาะการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ สำหรับการประยุกต์ใช้มีส่วนมากขึ้นในอนาคต [6] และที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนภูมิพล มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้งานทั้งหมด 8 เครื่อง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องที่ 1-6 มีกำลังการผลิตเครื่องละ 82,000 กิโลวัตต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 7 มีกำลังการผลิต 115,000 กิโลวัตต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 8 มีกำลังการผลิต 171,000 กิโลวัตต์ ทั้งหมดจัดอยู่ในกลุ่มเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ [1] ลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นี้จะใช้น้ำในการระบายความร้อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีอัตราการไหล 6,400 ลิตร / นาที เพียงพอที่จะนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมากมาติดตั้ง ซึ่งจุดที่จะมีความเป็นไปได้ที่จะทำการติดตั้งนั้นมีหลายจุดด้วยกันตลอดทั้งแนวท่อน้ำระบายความร้อนของโรงไฟฟ้า



รูป 1 แสดงท่อน้ำของระบบน้ำระบายความร้อน

2. หลักการและทฤษฎีที่น่าสนใจ

หลักเกณฑ์และข้อกำหนดด้านวิศวกรรม

การหาขนาดกำลังผลิตที่เหมาะสมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาใช้งานจะต้องพิจารณาหลักเกณฑ์และข้อกำหนดด้านวิศวกรรมดังนี้ [2]

1) ปริมาณน้ำออกแบบ ในการพิจารณาเลือกปริมาณน้ำออกแบบโครงการจะต้องคำนึงถึงการผลิตไฟฟ้าที่ให้บริการอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง ดังนั้น

$$Q_d = Q_{90} \quad (1)$$

$$Q_d = \text{ปริมาณน้ำออกแบบ}$$

Q_{90} = ปริมาณน้ำที่ 90% ของข้อมูลปริมาณน้ำทั้งหมดเนื่องจากน้ำที่ใช้จะมีค่าความสูญเสียประมาณ 10 %

2) ความสูงของหัวน้ำในการออกแบบ (Design Head) การศึกษาความสูงของหัวน้ำออกแบบจะต้องคำนึงถึงความสูญเสียหัวน้ำ เนื่องจากขนาด ความยาว และแนวของท่อชักน้ำ ท่อส่งน้ำ

ความสูงของหัวน้ำออกแบบคำนวณได้โดย

$$H_d = H_G - H_L \quad (2)$$

H_d = ความสูงของหัวน้ำออกแบบ

H_G = ความสูงของหัวน้ำทั้งหมด

H_L = ความสูญเสียหัวน้ำเนื่องจากความยาว ความโค้งของท่อ

3) กำลังการผลิตและพลังงานไฟฟ้า

ก. กำลังผลิตไฟฟ้า (Installed Capacity)

$$P_t = 9.81 Q_d * h_d * n \quad (3)$$

P_t = กำลังผลิตติดตั้ง (KW)

Q_d = ปริมาณน้ำออกแบบ (m^3/sec) = Q_{90}

n = ประสิทธิภาพของกังหัน

ข. พลังงานไฟฟ้า (Energy)

$$E_t = P_t * PF * 8760 \text{ (KWH)} \quad (4)$$

E_t = พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี

PF = ตัวประกอบโรงไฟฟ้า (Plant Factor)

เทคนิคเดลฟาย

เทคนิคเดลฟาย คือ กระบวนการรวบรวมความคิดเห็นหรือการตัดสินใจในเรื่องใดเรื่องหนึ่งเกี่ยวกับอนาคตจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สอดคล้องเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันและมีความถูกต้องน่าเชื่อถือมากที่สุด โดยที่ผู้ทำการวิจัยไม่ต้องนัดสมาชิกในกลุ่มผู้เชี่ยวชาญให้มาประชุมพบปะกัน แต่ขอให้อ่านให้สมาชิกแต่ละคนแสดงความคิดเห็นหรือตัดสินใจปัญหาในรูปแบบของ

การตอบแบบสอบถาม และเทคนิคเดลฟายเป็นกระบวนการรวบรวมความคิดเห็นหรือการตัดสินใจในเรื่องใดเรื่องหนึ่งเกี่ยวกับเหตุการณ์ หรือแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในอนาคต โดยใช้แบบสอบถามเพื่อให้ได้ความคิดเห็นที่สอดคล้องต้องกันในการนำมาสู่ข้อสรุปผลที่น่าเชื่อถือ ตามปกติเทคนิคเดลฟายนี้จะใช้แบบสอบถาม 4 รอบด้วยกัน แต่ในบางกรณีอาจจะใช้แบบสอบถามเพียง 2-3 รอบเท่านั้น เพราะอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในคำตอบของผู้เชี่ยวชาญหรือค่าพิสัยระหว่างควอไทล์แคบมากเมื่อเป็นเช่นนี้กระบวนการวิจัยก็สามารถยุติได้แล้ว สำหรับจำนวนผู้เข้าร่วมโครงการนั้นแม้จะไม่มีกำหนดตายตัวว่าควรจะใช้จำนวนเท่าใดก็ตามผลการวิจัยเกี่ยวกับจำนวนผู้เชี่ยวชาญในการวิจัยแบบเดลฟายว่าควรมีจำนวนเท่าไรจึงจะเหมาะสม ในการประชุมประจำปี California Junior Colleges Association เมื่อปี พ.ศ. 2514 พบว่าหากมีจำนวนตั้งแต่ 17 คนขึ้นไป อัตราการลดของความคลาดเคลื่อน (Error) จึงมีน้อยมากดังแสดงในตาราง ดังนั้นผู้เชี่ยวชาญจึงควรมีจำนวนไม่น้อยกว่า 17 คน แต่ในงานวิจัยในครั้งนี้จะผู้เชี่ยวชาญจากด้านต่างๆ จำนวน 19 คน เช่น ด้านไฟฟ้า ด้านเครื่องกล ด้านการติดตั้ง ด้านการควบคุมการเดินเครื่อง

ตาราง 1 แสดงการลดลงของความคลาดเคลื่อนของจำนวนผู้เชี่ยวชาญ

จำนวนผู้เชี่ยวชาญ	ช่วงของความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อนลดลง
1 - 5	1.20 - 0.70	0.50
5 - 9	0.70 - 0.58	0.12
9 - 13	0.58 - 0.54	0.04
13 - 17	0.54 - 0.50	0.04
17 - 21	0.50 - 0.48	0.02
21 - 25	0.48 - 0.46	0.02
25 - 29	0.46 - 0.44	0.02

ที่มา : ผศ.ดร. ยุทธ ไกยวรรณ, 2550

กล่าวโดยสรุป ในส่วนลักษณะของเทคนิคเคลฟาย ถือได้ว่าเป็นระเบียบวิธีการวิจัยแบบหนึ่งซึ่งต่างจากระเบียบการวิจัยแบบอื่นก็ได้ เพราะวิธีการวิจัยชนิดนี้ตามลักษณะข้อมูลแล้วเป็นการวิจัยที่มุ่งแสวงหาข้อมูลทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เนื่องจากมีการใช้สถิติอ้างอิงอยู่ด้วยแม้ว่าสถิติที่ใช้ คือ มัธยฐาน (Median) กับพิสัยควอไทล์ (Interquartile Range) เพื่อสรุปผลและแปลผลความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญจากการวิจัยเรื่องนั้นๆ เมื่อได้จำนวนผู้เชี่ยวชาญครบตามจำนวนที่ต้องการแล้ว จึงได้ทำการส่งแบบฟอร์มการสำรวจ ให้กับผู้เชี่ยวชาญจำนวน 2 ครั้ง โดยครั้งแรกผลการสำรวจความเห็นของผู้เชี่ยวชาญที่ได้ให้คะแนนในแบบสำรวจ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

คะแนน 1 คือ น้อยมาก

คะแนน 2 คือ น้อย

คะแนน 3 คือ ปานกลาง

คะแนน 4 คือ มาก

คะแนน 5 คือ มากที่สุด

วิธีการพิจารณา

จะใช้ค่ามัธยฐานที่คำนวณได้จากคำตอบ ค่ามัธยฐานที่คำนวณได้จากคำตอบของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ แปลความหมายตามเกณฑ์ ต่อไปนี้
ค่ามัธยฐานต่ำกว่า 1.50 หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าข้อนั้นเป็นไปได้น้อยที่สุด
ค่ามัธยฐานอยู่ในช่วง 1.50 ถึง 2.49 หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าข้อนั้นเป็นไปได้น้อย
ค่ามัธยฐานอยู่ในช่วง 2.50 ถึง 3.49 หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าข้อนั้นเป็นไปได้พอควร
ค่ามัธยฐานอยู่ในช่วง 3.50 ถึง 4.49 หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าข้อนั้นเป็นไปได้มาก
ค่ามัธยฐานตั้งแต่ 4.50 ขึ้นไป หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าข้อนั้นเป็นไปได้มากที่สุด [5]

การคำนวณหาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

วิธีการคำนวณหาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์โดยใช้สูตรดังต่อไปนี้ [2]

1) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value Method : NPV) คือ ผลรวมของผลประโยชน์สุทธิที่ได้ปรับค่าของเวลาแล้วของโครงการซึ่งมุ่งจัดว่าโครงการที่พิจารณาอยู่นั้นจะให้ผลตอบแทนคุ้มค่าหรือไม่

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} \quad (5)$$

กำหนดให้

B_t = ผลประโยชน์ของโครงการในปีที่

1,2,3,...,n

C_t = ค่าใช้จ่ายของโครงการเริ่มตั้งแต่ปีที่

1,2,3,...,n

r = อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลด

t = อายุของโครงการ ปีที่ 1,2,3,...,n

n = อายุสิ้นสุดโครงการ

2) อัตราผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (Benefit Cost Ratio : B/C Ratio) แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์กับค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายตลอดอายุของโครงการ เกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจก็คือเลือกโครงการที่ค่า B/C Ratio เกินกว่า 1 ซึ่งหมายความว่าผลประโยชน์ที่จะได้จากโครงการจะมีค่ามากกว่าค่าใช้จ่ายที่เสียไป โดยอัตราผลประโยชน์คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$B/C = \frac{\sum_{t=1}^n B_t / (1+r)^t}{\sum_{t=1}^n C_t / (1+r)^t} \quad (6)$$

3) อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal Rate of Return : IRR) คือ อัตราที่ทำให้

ผลตอบแทนและต้นทุนที่ได้คิดลดเป็นค่าปัจจุบันแล้วเท่ากัน อัตราที่กล่าวถึงจะเป็นอัตราความสามารถของเงินลงทุนที่จะก่อให้เกิดรายได้คุ้มกับเงินลงทุนนั้นพอดี หรือกล่าวอีกในหนึ่งก็คือ หาว่าอัตราส่วนลดตัวใดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นศูนย์ การคำนวณ IRR อาจจะเริ่มต้นด้วยการหักผลประโยชน์ออกด้วยค่าใช้จ่ายเป็นปีๆ ไปตลอดอายุโครงการเพื่อให้ได้มาซึ่งผลประโยชน์สุทธิในแต่ละปีจะปรากฏผลเป็นบวกหรือเป็นลบเป็นปีๆ ไปหรือกระแสเงินสดหลังจากนั้นก็หาอัตราส่วนลดที่จะทำให้ผลรวมของข้อมูลปัจจุบันของผลประโยชน์สุทธิตามกันแล้วมีค่าเป็นศูนย์ วิธีการคำนวณหา IRR ทำได้ 2 วิธีดังต่อไปนี้

1. วิธี Trial and error

IRR คือค่า r (อัตราส่วนลด) ที่ทำให้

$$\sum_{t=1}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} = 0 \quad (7)$$

2. วิธีการ Interpolation

$$IRR = [r_L + (r_U - r_L)] * \left[\frac{(NPV_L)}{(NPV_L - NPV_U)} \right] \quad (8)$$

r_L = อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดด้านล่าง

r_U = อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดด้านบน

NPV_L = มูลค่าปัจจุบันสุทธิด้านล่าง

NPV_U = มูลค่าปัจจุบันสุทธิด้านบน

4) ระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิ จากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับค่าลงทุนของโครงการหลัก เกณฑ์นี้พิจารณาจำนวนปีที่จะได้รับผลตอบแทนคุ้มกับเงินลงทุนและใช้กันมากในวงธุรกิจ โดยเฉพาะที่มีการลงทุนที่มีการเสี่ยงสูงเช่น กรณีผลผลิตใหม่ หรือใช้วิธีการใหม่ๆ ที่ไม่มีการคุ้มครองสิทธิบัตร (Patent) สิ่งที่น่าสนใจคือได้ใหม่จะถูกขโมยความคิด หรือลอกเลียนแบบจากคู่แข่ง

ได้ภายในระยะเวลาอันสั้นหลังจากที่ผลผลิตใหม่นั้นออกสู่ตลาดหรือ ในกรณีที่ภาวะในทางการเมืองไม่แน่นอน ฉะนั้นเพื่อความไม่ประมาทนักลงทุนจึงต้องพิจารณาเลือกโครงการที่ให้ผลตอบแทนคืนเร็วในระยะสั้นๆ เช่น ระหว่าง 3-5 ปี ซึ่งระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [3]

$$0 = -P + NCF (P/A, i, n_p) \quad (9)$$

0 = ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับค่าลงทุนของโครงการ

P = ค่าลงทุนของโครงการ

NCF = ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงาน

จากสูตรข้างต้นได้นำมาคำนวณหาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์พร้อมกับการวิเคราะห์ความไวของโครงการโดยให้ค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงและทำให้ค่าไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการลงทุนกับโครงการนั้นๆ

3. การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการทำวิจัยเริ่มจากการสำรวจบริเวณที่สามารถติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมากตามจุดต่างๆ ของระบบน้ำระบายความร้อนของโรงไฟฟ้าพบว่าทั้งหมด 5 จุดด้วยกันดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. บริเวณท่อด้านปล่อยน้ำออกของระบบน้ำระบายความร้อนชั้น B1
2. บริเวณท่อน้ำเข้าของระบบน้ำระบายความร้อน ชั้น B2
3. บริเวณท่อด้านปล่อยน้ำออกของระบบน้ำระบายความร้อนชั้น B2
4. บริเวณท่อน้ำเข้าของท่อส่งน้ำหลักของระบบน้ำระบายความร้อนชั้น B3

5. บริเวณท่อด้านปล่อยน้ำออกของระบบน้ำระบายความร้อนชั้น B3 ก่อนปล่อยลงท้ายน้ำ

แต่ละจุดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน จากการพิจารณาพบว่าบริเวณท่อด้านปล่อยน้ำออก (Outlet) ของระบบน้ำระบายความร้อนจากโรงไฟฟ้า ชั้น B3 ก่อนปล่อยลงท้ายน้ำเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นทำการกำหนดหาขนาดและกำลังผลิตในแต่ละจุดเพื่อเลือกหาขนาดที่เหมาะสมของชุดกังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลทางด้านวิศวกรรมและประสบการณ์การติดตั้งจากโครงการต่างๆ มาใช้ประกอบการพิจารณา

$$\text{ปริมาณน้ำ (Qd)} = 0.13 \quad \text{m}^3/\text{sec}$$

$$\text{ความสูงหัวน้ำ (hd)} = 11 \quad \text{m.}$$

$$\text{ประสิทธิภาพของกังหัน (n)} = 80 \quad \text{เปอร์เซ็นต์}$$

$$\text{ตัวประกอบโรงไฟฟ้า (PF)} = 40 \quad \text{เปอร์เซ็นต์}$$

กำลังผลิตไฟฟ้า (Installed Capacity)

$$P_t = 9.81 Q_d * h_d * n$$

$$P_t = 9.81 * 0.13 * 11 * 0.8$$

$$P_t = 11.02 \quad \text{KW.}$$

พลังงานไฟฟ้า (Energy)

$$E_t = P_t * PF * 8760$$

$$E_t = 11.02 * 40 \% * 8760$$

$$E_t = 38,614.08 \quad (\text{KWH/Year})$$

จากการคำนวณได้ขนาดกำลังผลิต 11.02 KW. แต่เนื่องจากขนาดกำลังผลิตของเครื่องไฟฟ้าขนาดเล็กที่เป็นขนาด 11.02 KW. ไม่นิยมสร้างขึ้นมา ส่วนมากจะสร้างเป็นขนาด 10 KW. 20 KW. หรือ 30 KW. ดังนั้นขนาดกำลังการผลิตติดตั้งที่เหมาะสมที่เลือกใช้คือ 10 KW. และชุดกังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะได้เป็นขนาดเล็กหรือขนาด S (กำลังผลิตไม่เกิน 20 กิโลวัตต์) มีความเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้แล้วต้องนำข้อมูลอื่นๆ มาพิจารณาร่วมด้วย เช่น ลักษณะการติดตั้ง

ชนิดของกังหันน้ำ ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการติดตั้งมากที่สุด จากการพิจารณาพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะนำมาติดตั้งที่จุดนี้จะเหมาะสมกับการติดตั้งแบบทิวบูลาร์ (Tubular) หรือแบบเบ้า (Bulb) ที่ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย จำนวนอุปกรณ์ไม่มากและไม่ซับซ้อน ในส่วนของกังหันน้ำจะเป็นแบบพร็อพเพอเรอ (Propeller turbine) ที่นิยมใช้งานกับระดับหัวน้ำต่ำ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Induction generator) เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการบำรุงรักษา และเพื่อให้มั่นใจว่าการพิจารณาเลือกขนาดนั้นถูกต้องจึงได้นำข้อมูลดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับการใช้เทคนิคเดลฟายที่ใช้ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญในด้านต่างๆ จำนวน 19 คน ประกอบด้วย ด้านไฟฟ้าจำนวน 7 คน ด้านเครื่องกลจำนวน 6 คน ด้านก่อสร้างและติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำจำนวน 2 คน และด้านการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำจำนวน 4 คน จากผลการสำรวจความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญในการเลือกขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 19 คนแล้ว จำนวน 2 ครั้ง สามารถสรุปผลความเห็นของผู้เชี่ยวชาญที่ได้ให้คะแนนในแบบสำรวจ ดังรายละเอียดต่อไปนี้ จากตารางการสำรวจการเลือกขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดเล็ก (S) ขนาดกลาง (M) และขนาดใหญ่ (L) เมื่อนำค่าคะแนนที่ได้ทั้ง 2 ครั้งมาเปรียบเทียบกับกันจะมีค่าคะแนนใกล้เคียงกันทั้ง 2 ครั้ง ดังนั้นการสำรวจจึงได้ทำ 2 ครั้งเท่านั้นเนื่องจากค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 2 แสดงค่าคะแนนที่ได้จากการเลือกขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกันทั้ง 2 ครั้ง

ค่าเฉลี่ยที่ได้ครั้งที่	การเลือกขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า		
	ขนาดเล็ก (S)	ขนาดกลาง (M)	ขนาดใหญ่ (L)
1	4.89	2.11	1.21
2	4.89	2.00	1.21

จากตารางการสำรวจความเห็นของผู้เชี่ยวชาญในข้อที่ 1 การเลือกขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยคะแนนที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 19 คนให้ จะเลือกขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดเล็ก (S) ได้ระดับคะแนน 4.89 คะแนน ทั้ง 2 ครั้ง ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดและอยู่ในเกณฑ์ ค่ามัธยฐาน ตั้งแต่ 4.50 ขึ้นไป หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่า เป็นไปได้มากที่สุด ในการเลือกขนาดกลาง (M) จะ ได้ระดับคะแนน 2.11 คะแนน และ 2.00 คะแนน จะอยู่ใน เกณฑ์ 1.50 ถึง 2.49 หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่า เป็นไปได้น้อย สำหรับการเลือกขนาดใหญ่ (L) จะ ได้ระดับคะแนน 1.21 คะแนน ทั้ง 2 ครั้ง จะอยู่ในเกณฑ์ค่า กว่ 1.50 หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่า เป็นไปได้ น้อยที่สุด จากคะแนนที่ได้สรุปได้ว่าการเลือกขนาดเครื่อง กำเนิดไฟฟ้า ขนาดเล็ก (S) มีความเหมาะสมที่สุด

ตาราง 3 แสดงค่าคะแนนที่ได้จากการเลือกชนิดของกังหัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับทั้ง 2 ครั้ง

ค่าเฉลี่ยที่ได้ ครั้งที่	การเลือกชนิดของกังหัน	
	กังหันแบบ Propeller	กังหันแบบ Cross Flow
1	4.95	2.68
2	4.84	2.53

จากตารางการสำรวจความเห็นของผู้เชี่ยวชาญใน ข้อที่ 2 การเลือกชนิดของกังหัน จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยคะแนน ที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 19 คนให้ จะเลือกกังหันแบบ Propeller ได้ระดับคะแนน 4.95 คะแนน และ 4.84 คะแนน ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดและอยู่ในเกณฑ์ ค่ามัธยฐาน ตั้งแต่ 4.50 ขึ้นไป หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่า เป็นไปได้มากที่สุด สำหรับการเลือกกังหันแบบ Cross Flow จะ ได้ระดับคะแนน 2.68 คะแนน และ 2.53 คะแนน จะอยู่ในเกณฑ์ค่ามัธยฐานอยู่ในช่วง 2.50 ถึง 3.49 หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่า เป็นไปได้พอควร จากคะแนนที่ได้สรุปได้ว่าการเลือกกังหันแบบ Propeller มีความเหมาะสมที่สุด

ตาราง 4 แสดงค่าคะแนนที่ได้จากการเลือกลักษณะการ ติดตั้ง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับทั้ง 2 ครั้ง

ค่าเฉลี่ยที่ได้ ครั้งที่	การเลือกลักษณะการติดตั้ง	
	การติดตั้งแบบ Tubular	การติดตั้งแบบ Cross Flow
1	4.89	2.63
2	4.84	2.32

จากตารางการสำรวจความเห็นของผู้เชี่ยวชาญใน ข้อที่ 2 การเลือกลักษณะการติดตั้ง จะเห็นว่าค่าเฉลี่ย คะแนนที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 19 คนให้ จะเลือกการติดตั้ง แบบ Tubular ได้ระดับคะแนน 4.89 คะแนน และ 4.84 คะแนน ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดและอยู่ในเกณฑ์ ค่ามัธยฐาน ตั้งแต่ 4.50 ขึ้นไป หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่า เป็นไปได้มากที่สุด สำหรับการเลือกการติดตั้งแบบ Cross Flow จะ ได้ระดับคะแนน 2.63 คะแนน จะอยู่ในเกณฑ์ ค่ามัธยฐานอยู่ในช่วง 2.50 ถึง 3.49 หมายความว่า กลุ่ม ผู้เชี่ยวชาญเห็นว่า เป็นไปได้พอควร และ 2.32 คะแนน ค่ามัธยฐานอยู่ในช่วง 1.50 ถึง 2.49 หมายความว่า กลุ่ม ผู้เชี่ยวชาญเห็นว่า เป็นไปได้น้อย จากคะแนนที่ได้สรุปได้ ว่าการเลือกการติดตั้งแบบ Tubular มีความเหมาะสมที่สุด

ตาราง 5 แสดงค่าคะแนนที่ได้จากการเลือกชนิดเครื่องกำเนิด ไฟฟ้า เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับทั้ง 2 ครั้ง

ค่าเฉลี่ยที่ได้ ครั้งที่	การเลือกชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบซิงโครนัส	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบเหนี่ยวนำ
1	3.16	4.95
2	2.89	4.95

จากตารางการสำรวจความเห็นของผู้เชี่ยวชาญใน ข้อที่ 2 การเลือกชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นว่าค่าเฉลี่ย คะแนนที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 19 คนให้ จะเลือกเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ได้ระดับคะแนน 3.16 คะแนนและ

2.89 คะแนน จะอยู่ในเกณฑ์ค่ามัธยฐานในช่วง 2.50 ถึง 3.49 หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าเป็นไปได้พอควร สำหรับการเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำได้ระดับคะแนน 4.95 คะแนน ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดและอยู่ในเกณฑ์ ค่ามัธยฐานตั้งแต่ 4.50 ขึ้นไป หมายความว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าเป็นไปได้มากที่สุด จากคะแนนที่ได้สรุปได้ว่าการเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำมีความเหมาะสมที่สุดจากรายที่ได้ เปรียบเทียบทุกหัวข้อจะเห็นได้ว่าผู้เชี่ยวชาญทั้ง 19 ท่าน มีความเห็นเป็นดังต่อไปนี้

ตาราง 6 แสดงสรุปผลการเลือกขนาดกำลังผลิตที่เหมาะสม

ลำดับที่	รายการ	สรุปผลการเลือก
1	การเลือกขนาดกำลังผลิตติดตั้ง	ขนาดเล็ก (S)
2	การเลือกชนิดกังหันน้ำ	แบบ Propeller or Kaplan
3	การเลือกลักษณะการติดตั้งที่เหมาะสม	แบบ Tubular
4	การเลือกชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ(Induction Generator)

ผลการสรุปที่ได้จะเหมือนกันทั้ง 2 วิธี เมื่อได้ข้อสรุปแล้วจึงได้ทำการจัดหาและเตรียมอุปกรณ์ให้พร้อมก่อนเข้าดำเนินการติดตั้ง สำหรับขั้นตอนการติดตั้ง เริ่มจากการตัดท่อน้ำระบายความร้อนเดิม การเชื่อมท่อน้ำระบายความร้อนใหม่พร้อมชุดกังหันเข้าแทนที่ จากนั้นทำการติดตั้งอุปกรณ์ด้านไฟฟ้า เช่น ตู้ควบคุม และการดึงสายส่งไฟฟ้าไปยังชุดจ่ายพลังงานไฟฟ้าหลักของโรงไฟฟ้าเป็นต้น ภายหลังการติดตั้งแล้วเสร็จได้ทำการทดสอบการทำงานอุปกรณ์ ป้องกันต่างๆและการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าขนาดกำลังผลิต 10 กิโลวัตต์ เข้าสู่ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าหลักของโรงไฟฟ้า ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ก่อนการเริ่มโครงการ

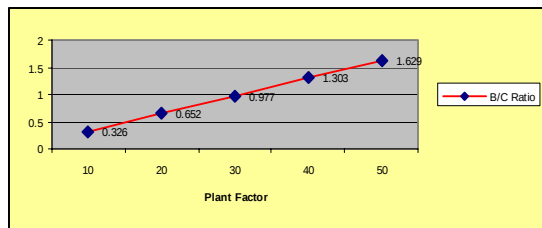


รูป 2 แสดงการเชื่อมต่อชุดกังหันน้ำเข้ากับวาล์วน้ำและท่อชุดใหม่แล้วเสร็จ

4. ผลการวิจัย

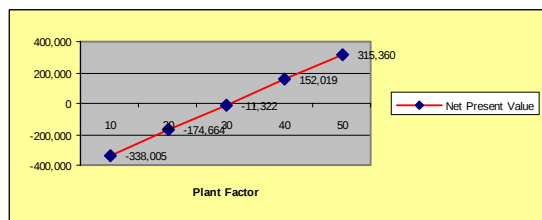
เพื่อให้โครงการมีความสมบูรณ์งานวิจัยนี้ได้นำค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและค่าใช้จ่ายด้านอื่นมาเปรียบเทียบกับรายได้ แล้วทำการวิเคราะห์โครงการทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าที่ค่าด้านการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10 กิโลวัตต์ ตัวประกอบโรงไฟฟ้า(Plant factor, PF) 40 เปอร์เซ็นต์ อัตราค่าไฟฟ้า 2.3774 บาทต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมง อัตราส่วนลด 12 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาโครงการ 25 ปี จะได้รับอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (B/C ratio) เท่ากับ 1.303 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value, NPV) เท่ากับ 152,019 บาท ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) เท่ากับ 7.817 ปี อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal rate of return, IRR) เท่ากับ 18.16 เปอร์เซ็นต์

เมื่อนำข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่ได้มาวิเคราะห์ความไวโดยให้ค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้า(PF) มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 10 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้ดังรูปกราฟต่อไปนี้ การวิเคราะห์ความไวอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน ของโครงการวิจัยพบว่า ค่า PF ที่ 10-30 เปอร์เซ็นต์ จะมีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนน้อยกว่า 1 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้โครงการไม่เกิดความคุ้มค่างบกับเงินลงทุน แต่เมื่อค่า PF มีค่ามากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปจนถึง 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน มากกว่า 1 ซึ่งจะ ทำให้โครงการเกิดความคุ้มค่างบกับเงินลงทุน



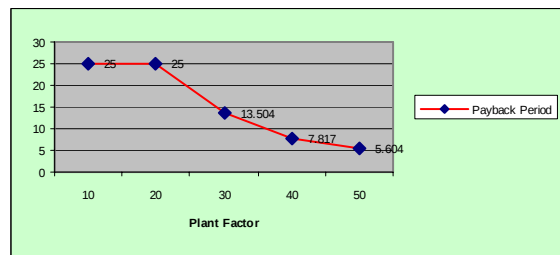
รูป 3 แสดงกราฟของอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน เมื่อค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์ความไว มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการวิจัย พบว่า ค่า PF ที่ 10-30 เปอร์เซนต์ จะเห็นได้ว่ามีค่าติดลบแสดงว่าถ้าลงทุนในโครงการจะทำให้ขาดทุนได้ ทำให้โครงการไม่น่าสนใจ และที่ ค่า PF ที่ 40-50 เปอร์เซนต์ มีค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกแสดงว่าโครงการมีผลตอบแทนที่น่าสนใจที่จะลงทุน



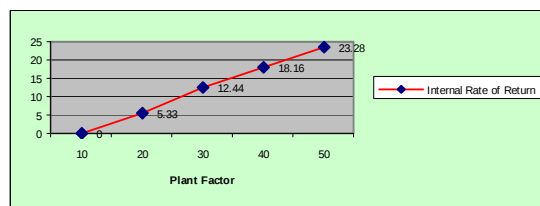
รูป 4 แสดงกราฟของมูลค่าปัจจุบันสุทธิเมื่อค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์ความไว ระยะเวลาคืนทุนของโครงการวิจัย พบว่า ค่า PF ที่ 10-20 เปอร์เซนต์ ได้ระยะเวลาคืนทุนมากกว่า 25 ปี ซึ่งใช้เวลานานเกินกว่าอายุโครงการ จึงไม่น่าสนใจที่จะสร้างโครงการ ถ้าโครงการมีระยะเวลาคืนทุนช้ากว่าอายุของโครงการ และ เมื่อค่า PF สูงมากขึ้นที่ 30 เปอร์เซนต์ได้ระยะเวลาคืนทุน 13.504 ปี ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าอายุโครงการ จึงทำให้โครงการนี้ น่าสนใจที่จะลงทุนสร้างโครงการ แต่ต้องพิจารณาข้อมูลด้านอื่นๆ ประกอบด้วยและ เมื่อค่า PF สูงมากขึ้นที่ 40 และ 50 เปอร์เซนต์ได้ระยะเวลาคืนทุน 7.817 และ 5.604 ปี โครงการจะมีระยะเวลาคืนทุนเร็วและมีความน่าสนใจ



รูป 5 แสดงกราฟของระยะเวลาคืนทุน เมื่อค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์ความไวอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการพบค่า PF ที่ 10-20 เปอร์เซนต์ จะมีค่าน้อยกว่าดอกเบี้ยเงินกู้ที่ 12 เปอร์เซนต์ โครงการจึงไม่น่าลงทุน แต่ที่ค่า PF ที่ 30 เปอร์เซนต์ ขึ้นไป อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ จึงจะมากกว่า 12 เปอร์เซนต์ ทำให้ โครงการมีความน่าสนใจที่จะลงทุน



รูป 6 แสดงกราฟของอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ เมื่อค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

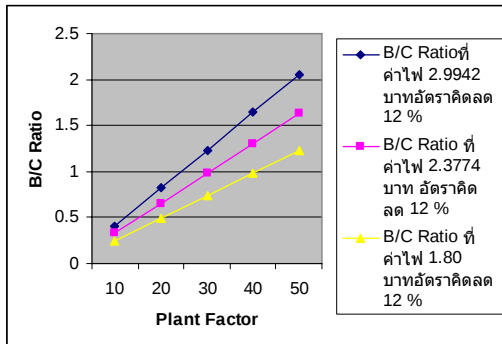
เมื่อนำข้อมูลที่ได้นำมารวบรวมไว้ในตารางให้เห็นได้ชัดมากยิ่งขึ้นแสดงดังตาราง

ตาราง 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า PF ที่มีผลต่อค่า B/C Ratio และค่าอื่นๆ

Plant Factor	B/C Ratio	Net Present Value	Payback Period	Internal Rate of Return
10	0.326	-338,005	มากกว่า 25 ปี	0
20	0.652	-174,664	มากกว่า 25 ปี	5.33
30	0.977	-11,322	13.504	12.44
40	1.303	152,019	7.817	18.16
50	1.629	315,360	5.604	23.28

จะเห็นได้ว่าโครงการจะมีความน่าสนใจลงทุนเมื่อค่าประกอบโรงไฟฟ้าตั้งแต่ 40 เปอร์เซนต์ขึ้นไปและทำการ

วิเคราะห์ ความไวของโครงการจากการเปลี่ยนแปลงอัตราค่าไฟฟ้าจาก 2.3774 บาท เพิ่มขึ้นเป็น 2.9942 บาท และลดลงเหลือ 1.80 บาท พบว่าที่อัตราค่าไฟฟ้า 2.9942 บาท โครงการมีความน่าสนใจต่อการลงทุนเมื่อค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้าตั้งแต่ 30 เปอร์เซนต์ขึ้นไป แต่กรณีอัตราค่าไฟฟ้า 1.80 และ 2.3774 บาท โครงการต้องมีค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้า 40 เปอร์เซนต์ขึ้นไป



รูป 7 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงของ B/C Ratio เมื่อค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

5. สรุปผลการวิจัย

จากการเลือกขนาดกำลังการผลิตติดตั้งโดยวิธีการใช้ข้อมูลการคำนวณทางด้านวิศวกรรมและประสบการณ์จากการติดตั้งโครงการต่างๆ มาเปรียบเทียบกับวิธีการใช้เทคนิคเดลฟาย ที่ใช้ประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญจากหลายๆ ด้านมาทำการประเมิน พบว่าผลที่ออกมาได้ข้อสรุปเหมือนกันทั้ง 2 วิธี สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าโครงการจะมีความน่าสนใจ โครงการจะต้องมีค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้าตั้งแต่ 40 เปอร์เซนต์ขึ้นไปและค่าไฟฟ้าที่จำหน่ายจะต้องไม่น้อยกว่า 2.3774 บาท

เอกสารอ้างอิง

- [1] โครงการศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าพลังน้ำ. *ความรู้พื้นฐานโรงไฟฟ้าพลังน้ำ*. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. กุมภาพันธ์ 2545.
- [2] ประเสริฐ อินทับ. *ขนาดกำลังผลิตที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กระดับหมู่บ้านในเขตภาคเหนือของประเทศไทย*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.
- [3] ประสาน แสงจุ่น. *การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนของการขนานระบบสำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำแม่คำปองโครงการ 3 เข้ากับเครือข่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2548.
- [4] ปัญญา ขอดโอวาท. *อนุกรมเครื่องกลไฟฟ้าเล่ม 2 (เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ)*. กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, 2547.
- [5] ยุทธ ไกยวรรณ. *หลักการทํารว้จยและการทําวิทยานิพนธ์*. กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, 2550.
- [6] G.K. Singh. *Self-excited induction generator research-a survey*. Electric Power Systems Research, Volume 69, Issues 2-3, May 2004, p. 107-144.
- [7] Oliver Paish. *Small hydro power : technology and current status*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 6, Issue 6, December 2002, p.537-556.