การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานน้ำเพื่อการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบยั่งยืน

เกียรติศักดิ์ สกุลพันธ์[1], ธนภัทร พรหมวัฒนภักดี[2,*]
[1,2] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

Received: 30 August 2024
Revised: 9 December 2024
Accepted: 10 December 2024

บทคัดย่อ

โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กแบบน้ำไหลผ่านตลอดปี (Run of River Hydropower Plant) มีค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพการใช้งาน (Plant Capacity Factor) ต่ำถึง 14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีสาเหตุหลักจากอัตราการไหลของน้ำที่เกิดขึ้นจริง ในขณะที่แผนพัฒนาพลังงานทดแทนของกระทรวงพลังงานมุ่งเน้นการเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำขนาดเล็กในพื้นที่ที่มีศักยภาพทั่วประเทศ การพัฒนาเทคนิคเพื่อประเมินศักยภาพพลังงานน้ำและกำหนดกำลังการผลิตติดตั้งที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง การศึกษานี้นำเสนออัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ข้อมูลอัตราการไหลจริงร่วมกับฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณ พร้อมทั้งแก้ปัญหาข้อมูลที่ขาดหายเงื่อนไขการทำงานของเครื่องกังหันที่กำหนดอัตราการไหลต่ำสุดที่เครื่องสามารถทำงานได้ ถูกระบุในอัลกอริทึมเพื่อความสมจริง ผลลัพธ์จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใช้อัลกอริทึมดังกล่าวช่วยประเมินศักยภาพพลังงานน้ำได้อย่างแม่นยำ ทั้งในแง่ของกำลังการผลิตติดตั้งและการผลิตกระแสไฟฟ้ารายปี นอกจากนี้ยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับความต่อเนื่องของการทำงานของเครื่องกังหัน ซึ่งสามารถรองรับการทำงานตลอดปีอย่างมีประสิทธิภาพ อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปปรับใช้จริงก่อนการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบน้ำไหลผ่านตลอดปี เพื่อเพิ่มศักยภาพการใช้ทรัพยากรน้ำและตอบสนองต่อเป้าหมายของแผนพัฒนาพลังงานทดแทนในอนาคต

คำสำคัญ: โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ น้ำไหลผ่านตลอดปี การประเมินศักยพลังงานน้ำ การพัฒนาอย่างยั่งยืน

[*] ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: Thanapat.pr@spu.ac.th

Algorithmic Assessment of Water Flow Potential for Sustainable Run-of-River Hydropower Plant Development

Kiattisak Sakulpan[1], Thanapat Promwattanapakdee[2,*]
[1,2] Faculty of Engineering, Sripatum University

Received: 30 August 2024
Revised: 9 December 2024
Accepted: 10 December 2024

Abstract

Small-scale run-of-river hydropower plants typically exhibit a low Plant Capacity Factor (PCF) of only 14%, primarily due to variations in actual water flow rates. Meanwhile, the Ministry of Energy's renewable energy development plan emphasizes increasing electricity generation from small hydropower plants in areas with potential water resources nationwide. Therefore, developing techniques to assess hydropower potential and determine optimal installed capacity is critical. This study presents an algorithm designed to use actual flow rate data and probability distribution functions to enhance computational accuracy and address missing data issues. Additionally, the algorithm incorporates turbine operation constraints, such as the minimum flow rate required for operation, to improve reliability. The results demonstrate that the proposed algorithm effectively assesses hydropower potential in terms of both optimal installed capacity and annual electricity generation. Moreover, the study highlights the relationship between water flow rates and the continuous operation of hydropower turbines, supporting year-round efficiency. The algorithm is adaptable for real-world application in run-of-river hydropower plants, enhancing water resource utilization and aligning with national renewable energy development goals.

Keywords: Hydropower plant, Run-of-river, Hydropower potential, Sustainable development

[*] Corresponding Author; E-mail: Thanapat.pr@spu.ac.th

ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan: AEDP) ของกระทรวงพลังงาน ได้นำเสนอเป้าหมายในการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนต่อการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย (Total Final Energy Consumption) ไม่ต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ในรูปแบบพลังงานไฟฟ้าความร้อนและเชื้อเพลิงชีวภาพ ภายในปี พ.ศ. 2593 (ค.ศ. 2050) ซึ่งการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำขนาดเล็ก เป็นหนึ่งในเป้าหมายการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ในทางกลับกัน โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กที่อยู่ในความดูแลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคก็กระจายอยู่หลายพื้นที่ทางภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จากรายงานข้อมูลกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยย้อนหลัง 10 ปีของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กพบว่า ตัวชี้วัดประสิทธิภาพการใช้งานของโรงไฟฟ้า (Plant Capacity Factor) ที่เป็นสัดส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงกับค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถผลิตได้อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ โดยที่มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 14.67 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามข้อมูลบ่งชี้ว่าการประเมินศักยภาพกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กในรูปแบบการไหลผ่านตลอดทั้งปี (Run of River Hydropower Plant) มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก เนื่องจากโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำรูปแบบนี้ ไม่มีเขื่อนขนาดใหญ่ในการกักเก็บน้ำ มีเพียงแค่ฝายน้ำล้นเพื่อกักเก็บน้ำบางส่วนและปล่อยน้ำให้ไหลล้นฝายเพื่อการใช้อุปโภคบริโภคและระบบนิเวศน์รอบโรงไฟฟ้านั้นๆ ในขณะที่ประเทศไทยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น เพื่อใช้ในการพัฒนาในด้านต่างๆ ดังที่กล่าวมา จึงมีการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนและเทคโนโลยีใหม่ๆ โดยเฉพาะการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ ไพทรูย์ เหล่าดี และคณะ (2012) ได้นำเสนอผลการศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำขนาดเล็กที่มีศักยภาพในพื้นที่เขตภาคเหนือตอนล่าง อีกทั้ง ปัณฑิตา นรเศรษฐ์ปัญญา และคณะ (2022) มีการศึกษาศักยภาพการใช้พลังงานน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้าของอ่างเก็บน้ำแม่ทก อ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำ และอ่างเก็บน้ำแม่วะ ในพื้นที่จังหวัดลำปาง ยิ่งไปกว่านั้น Phethuayluk (2014) ได้นำเสนอผลการศึกษาความเป็นไปได้ของศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากประตูระบายน้ำของโครงการชลประทานจำนวน 4 แหล่งและน้ำตกอีก 14 แหล่ง ในพื้นที่จังหวัดพัทลุง ซึ่งผลการศึกษาทั้งหมดไม่ได้ระบุถึงเทคนิคการประเมินพลังงานน้ำที่แน่ชัด ไม่ได้วิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังของสภาพอากาศและการไหลของน้ำเพื่อหาแนวโน้มและความแปรปรวน รวมไปถึงการใช้ทรัพยากรน้ำในพื้นที่อย่างคุ้มค่า จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยหัวข้อการประเมินศักยภาพการผลิตกำลังงานไฟฟ้าจากพลังงานน้ำในประเทศไทย

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กของ กฟภ.

โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก	แม่เตียน	แม่ใจ	แม่ยะ	แม่ปาย	แม่เทย	ขุนแปะ
1. ชนิดของเครื่องกังหันพลังน้ำ	Francis	Francis	Turgo	Turgo	Turgo	Turgo
2. กำลังการผลิตติดตั้ง (KW)	2x965	875	1,150	2x1,259	2,250	90
3. กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายปี (kW)	498.9	219.9	494.8	915.0	912.5	13.2
4. ประสิทธิภาพการใช้งาน (%)	25.85	25.12	43.02	36.34	40.56	14.67

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาเทคนิคการประเมินศักยภาพพลังงานน้ำและกำลังการผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กก่อนการก่อสร้าง ภายใต้การใช้ทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับนโยบายพลังงานทดแทนของภาครัฐ

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Niadas & Mentzelopoulos (2008) งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการใช้ความน่าจะเป็นในการประเมินการออกแบบและประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก วิธีการนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อระบุความไม่แน่นอนที่มีผลต่อการออกแบบและมุมมองทางเศรษฐกิจของโครงการพลังน้ำขนาดเล็ก ภายใต้ข้อจำกัดของวิธีการออกแบบแบบเดิมที่ใช้เส้นโค้งระยะเวลาการไหลในอดีต ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กในภูเขาของกรีซแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์สามารถนำไปใช้ในหลายสภาพแวดล้อมทางอุทกวิทยาและเศรษฐกิจต่าง ๆ ได้

Luisa Liucci et al. (2014) การศึกษานี้ประเมินผลกระทบของระบบการไหลของน้ำในแม่น้ำและความไม่แน่นอนทางอุทกวิทยาต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแบบน้ำไหลผ่านตลอดทั้งปี ในประเทศ อิตาลี โดยใช้ Flow Duration Curves (FDCs) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าผลผลิตพลังงานลดลงเมื่อการไหลของน้ำคงที่ไปสู่การไหลในรูปแบบน้ำหลาก และอัตราการการผลิตลดลงเมื่อมีการออกแบบการไหลที่สูงขึ้น นอกจากนี้การวิเคราะห์ FDCs ยังแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการผลิตพลังงานในฤดูร้อนและฤดูฝน ซึ่งช่วยในการออกแบบการไหลที่เหมาะสมตามลักษณะอุทกวิทยาของลุ่มน้ำ

Cavalcanti & Reis (2017) ได้นำเสนอวิธี Most Probable Maximum Hydrograph (MPMH) ในการแก้ไขข้อจำกัดของวิธีการทางสถิติในการคำนวณการไหลสูงสุด ใช้ข้อมูลจากกราฟน้ำท่าที่สังเกตได้ เช่น คาบเวลาการเกิด, การไหลสูงสุด และปริมาณที่เกี่ยวข้อง โดยใช้สมการถดถอยเชิงเส้นหรือการแจกแจงเอ็กซ์โพเนนเชียล วิธีนี้มีศักยภาพสูงในการประเมินการไหลออกแบบ เมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม ข้อท้าทายอยู่ที่การตัดสินใจเรื่องคาบเวลาของกราฟน้ำท่า มาตรฐานที่เป็นปัจจัยสำคัญในการประมาณการไหลสูงสุด

Gernaat et al. (2017) ได้นำเสนอการประเมินศักยภาพทางเทคนิคและเศรษฐกิจของพลังงานน้ำทั่วโลก พบว่า พลังงานน้ำมีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าได้ถึง 9.49 PWh ต่อปี ในราคาต่ำกว่า 0.50 ดอลลาร์ต่อ kWh โดยใช้ระดับความสูงหัวน้ำและอัตราการไหลของน้ำในการคำนวณ พบว่าพื้นที่ที่มีศักยภาพสูงสุดอยู่ในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก (39%), อเมริกาใต้ (25%) และแอฟริกา (24%) และสามารถผลิตไฟฟ้าได้ในราคาต่ำกว่า 0.10 ดอลลาร์ต่อ kWh

Shengwan et al. (2019) นำเสนอการวิเคราะห์พลังงานน้ำใน 4 ประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ มาเลเซีย อินโดนีเซีย ไทย และพม่า โดยเน้นถึงศักยภาพและความสำคัญของพลังงานน้ำในการตอบสนองความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับสถานะทรัพยากรพลังงานน้ำ สถานการณ์ปัจจุบันของการพัฒนา และการกระจายตัวของสถานีไฟฟ้าพลังน้ำ รวมถึงนโยบายพลังงาน ข้อได้เปรียบ อุปสรรค และข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาในอนาคตของทั้ง 4 ประเทศ

แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การเปลี่ยนพลังงานศักย์จากการไหลของน้ำจากผลต่างของระดับความสูงเป็นพลังงานจลน์ด้วยชุดควบคุมการไหลของน้ำเพื่อให้ความเร็วน้ำไหลสัมผัสกับพื้นผิวใบกังหันที่เชื่อมต่อกับเพลาให้เกิดการหมุนเพื่อเปลี่ยนเป็น

พลังงานกลและต่อเนื่องไปที่เพลาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบ คือ หลักการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ ดังนั้น อัตราการไหลของน้ำ และระดับความสูงหัวน้ำ คือตัวแปรสำคัญต่อการคำนวณหาค่ากำลังงานติดตั้ง ซึ่งการตรวจวัดค่าอัตราการไหลของน้ำและความถี่ของการเกิดค่าการไหลตลอดทั้งปีจะเป็นตัวแปรที่สร้างความแม่นยำต่อการประมาณศักยภาพการผลิตไฟฟ้า ในขณะที่ Paish (2002) ได้นำเสนอกำลังการผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$P_{in} = \rho g Q_D H_N \quad (1)$$

เมื่อ P_{in} คือ กำลังการผลิตติดตั้ง (kW), Q_D คืออัตราการไหลออกแบบ (m^3/s), และ H_N คือความสูงหัวน้ำสุทธิ (m) โดยปกติทั่วไป การประเมินศักยภาพการผลิตติดตั้งจะใช้อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่เกิดขึ้นในการประเมินกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากมีความเป็นไปได้ 50 เปอร์เซ็นต์ที่อัตราการไหลจะเกิดขึ้น แต่ค่าเฉลี่ยนี้อาจจะไม่สามารถใช้ในการพิจารณาเลือกขนาดและชนิดเครื่องกังหันพลังน้ำ ที่สามารถทำการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้ตลอดทั้งปี ดังนั้น ความเป็นไปได้ของช่วงการเกิดอัตราการไหลของน้ำจะต้องถูกพิจารณา เพื่อใช้เป็นตัวแปรในการคำนวณหาค่าผลรวมของกำลังการผลิตติดตั้ง ดังนั้นสมการที่ 1 สามารถเขียนใหม่เป็น

$$P_{in} = \sum_{i=1}^{n} \left[\rho g Q_D H_N P_{r,i}\right] \quad (2)$$

เมื่อ P_r คือ ความเป็นไปได้ของช่วงการเกิดอัตราการไหล, i คือ ลำดับของช่วงการเกิดอัตราการไหล, และ n คือจำนวนทั้งหมดของช่วงการเกิดอัตราการไหล อย่างไรก็ตาม ตัวแปรของความน่าจะเป็นของช่วงการเกิดอัตราการไหลของน้ำ สามารถใช้ในการเพิ่มความแม่นยำของการประเมินกำลังการผลิตติดตั้งรวมของโรงไฟฟ้าพลังน้ำได้ รวมไปถึงการประเมินกำลังการการผลิตพลังงานไฟฟ้ารายปี ได้จากสมการที่ 3

$$E = P_{in} hr \quad (3)$$

เมื่อ E คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี (kWh/year), P_{in} คือ กำลังการผลิตติดตั้ง (kW), และ hr คือจำนวนชั่วโมงการทำงานภายในหนึ่งปี (hrs/year) อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละชนิดเครื่องกังหันจะมีความแตกต่างกันซึ่งจะขึ้นอยู่กับขอบเขตการทำงาน ดังนั้น *กรณีศึกษานี้จะใช้ข้อมูลทั้งหมดของโรงไฟฟ้าพลังน้ำบ้านขุนแปะ ตั้งอยู่ที่ อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่* ซึ่งอยู่ในความดูแลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) มาทำการศึกษาแนวทางใหม่ของการประเมินศักยภาพการผลิตติดตั้งเมื่อทำการพิจารณาอัตราการไหลของน้ำที่เกิดขึ้นในแต่ละวันจะพบว่า มีความเป็นไปได้ที่อัตราการไหลของน้ำจะเกิดขึ้นซ้ำอีกครั้งในวันอื่นๆ ดังนั้น ความน่าจะเป็นของช่วงการเกิดต้องถูกนำมาใช้ เพื่อประเมินความถี่ของการเกิดซ้ำของอัตราการไหลของน้ำในช่วงดังกล่าว จึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$P_r = \frac{n}{N} \quad (4)$$

เมื่อ *Pr* คือ ความน่าจะเป็นของช่วงการเกิด, *n* คือ จำนวนข้อมูลในแต่ละช่วงการเกิด, และ *N* คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดของช่วงการเกิด ซึ่งวิธีการคำนวณความน่าจะเป็นของช่วงการเกิดสามารถทำได้ดังนี้:

- จัดเรียงข้อมูลอัตราการไหลที่คำนวณได้ จากค่ามากที่สุดไปหาค่าน้อยที่สุด
- กำหนดช่วงหรือพิสัยของข้อมูลอัตราการไหลอย่างละเท่าๆ กัน
- ตรวจนับจำนวนข้อมูล (วัน) ในแต่ละช่วงของการเกิด (n)
- คำนวณผลรวมของจำนวนข้อมูลที่เกิดขึ้นทั้งหมด (N)
- คำนวณความน่าจะเป็นของช่วงการเกิด ด้วยสมการที่ 4

ความผิดพลาดที่เกิดจากการตรวจวัดด้วยเงื่อนไขต่างๆและการขาดหายของข้อมูล รวมไปถึงจำนวนข้อมูลค่าอัตราการไหลของน้ำที่ทำการจัดเก็บมีจำนวนไม่มากพอที่จะใช้ในการวิเคราะห์ เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการประเมินกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้ทำการจัดเก็บมาวิธีการทางสถิติศาสตร์ที่เรียกว่า ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Distribution Function) จึงถูกนำมาใช้ในกรณีศึกษานี้ ตำราจำนวนมากรวมถึงเอกสารงานวิจัย ได้แนะนำให้ใช้วิธีการวัดความน่าจะเป็นไปได้สูงสุด (Maximum likelihood method) ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น วิธีการนี้เป็นวิธีที่ดีที่สุดในเชิงสถิติ และให้ผลการคำนวณที่ผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ โดยฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นที่ได้รับการนิยมในการวิเคราะห์ข้อมูลทางอุทกวิทยาจะมีอยู่ 3 ฟังก์ชันดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันการแจกแจงแบบไวย์บูล (Weibull distribution function)

เป็นฟังก์ชันการแจกแจงที่นิยมใช้กันมากในงานด้านวิศวกรรม เนื่องจาก มีความสามารถหลากหลายและง่ายต้องการใช้งาน ฟังก์ชันการแจกแจงแบบไวย์บูล ประกอบด้วยสองพารามิเตอร์คือ พารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter) และพารามิเตอร์ขนาด (Scale parameter) ดังนั้น ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function, PDF) ของการแจกแจงแบบไวย์บูล คือ

$$f(x) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left\{\left(-\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}\right\} \quad (5)$$

เมื่อ *f(x)* คือฟังก์ชันความน่าจะเป็นของชุดข้อมูลการไหล (*x*), $\square$ คือ พารามิเตอร์ขนาด, และ β คือ พารามิเตอร์รูปร่าง พารามิเตอร์รูปร่างของการแจกแจงไวย์บูลแสดงถึงความลาดชันของข้อมูล ซึ่งความแตกต่างของพารามิเตอร์รูปร่างจะส่งผลกระทบกับพฤติกรรมของการกระจายข้อมูล ในส่วนของพารามิเตอร์ขนาดของการแจกแจงไวย์บูล จะส่งผลกระทบกับการกระจายข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงพิกัด เมื่อค่าของพารามิเตอร์ขนาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์รูปร่างคงที่ จุดสูงสุดของเส้นโค้ง ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF) จะลดลง

ฟังก์ชันการแจกแจงแบบล็อกปกติ (Lognormal distribution function)

ฟังก์ชันการแจกแจงแบบปกติและล็อคปกติ คือ หนึ่งในฟังก์ชันการแจกแจงที่ได้รับการนิยมสูงสุดในงานทางด้านสถิติ และบ่อยครั้งจะถูกนำมาวิเคราะห์ปัญหาทางด้านอุทกวิทยา ฟังก์ชันการแจกแจงแบบล็อคปกติ คือ การกระจายความน่าจะเป็นแบบต่อเนื่องของตัวแปรสุ่ม ที่มีการกระจายตามปกติแบบลอการิทึม ดังนั้น ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ของการแจกแจงแบบล็อกปกติ คือ

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}[ln(x) - \mu]^2\right\} \quad (6)$$

เมื่อ พารามิเตอร์ μ และ σ^2 คือ ค่าเฉลี่ย (mean) และค่าความแปรปวน (variance) ของลอการิทึมฟังก์ชันของตัวแปร x ค่าเฉลี่ย (μ) คือพารามิเตอร์ขนาดของการกระจายข้อมูล และ ค่าความแปรปรวน (σ^2) คือตัวกำหนดพารามิเตอร์รูปร่างของการกระจายข้อมูล

ฟังก์ชันการแจกแจงแบบแกมม่า (Gamma distribution function)

ฟังก์ชันการแจกแจงแบบแกมม่า มักจะถูกนำมาใช้ในการจำลองปรากฏการณ์ทางธรรมชาติหลายๆ ชนิดรวมไปถึงการแจกแจงข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายวัน, รายเดือน, และรายปี ซึ่งฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ที่ใช้การแจกแจงแบบแกมม่า คือ

$$f(x) = \frac{|\beta|}{\Gamma(\alpha)}(\beta x)^{\alpha-1}\exp\{-\beta x\} \quad (7)$$

เมื่อ α คือ พารามิเตอร์รูปร่าง และ β คือ พารามิเตอร์ขนาดของการกระจายข้อมูล

วิธีความน่าจะเป็นไปได้สูงสุด (Maximum likelihood method)

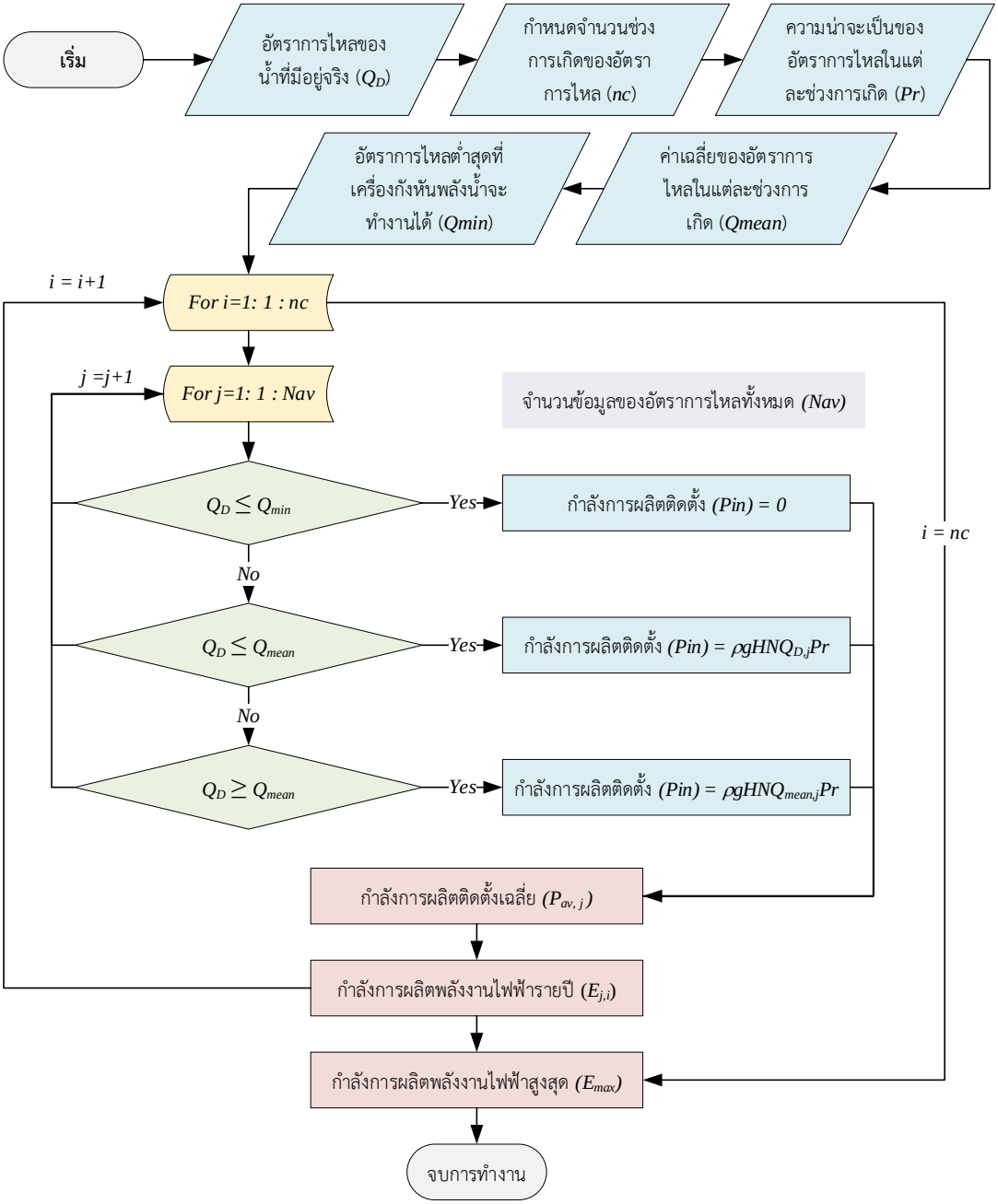
วิธีการหาพารามิเตอร์ต่างๆจากการประมาณค่าของการกระจายข้อมูลที่ดี สามารถหาได้จาก วิธีความน่าจะเป็นไปได้สูงสุด (maximum likelihood method) ถ้ากำหนดให้ชุดข้อมูล n เป็นตัวแปรอิสระ $\{x_1, \dots, x_n\}$ ของตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง x, เมื่อนำทั้งหมดมาร่วมกันในฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ก็จะได้เป็นสมการ

$$L = \sum_{i=1}^{n} f(x_i \mid \theta) \quad (8)$$

เมื่อ θ คือ เวกเตอร์ของพารามิเตอร์การกระจายข้อมูล ค่าความเป็นไปได้สูงสุด ของเวกเตอร์ θ จะเป็นตัวเพิ่มความน่าจะเป็น จึงทำให้แนวโน้มความเป็นไปได้ของการกระจายข้อมูล $\{x_1, \dots, x_n\}$ มีความแม่นยำมากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยได้เริ่มจากการตรวจวัดระดับน้ำบริเวณฝายน้ำล้นของลุ่มน้ำแม่แปะในแต่ละวันเพื่อใช้ในการประเมินอัตราการไหลที่เกิดขึ้นจริง ในขณะเดียวกัน ข้อมูลย้อนหลังของกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำบ้านขุนแปะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับอัตราการไหลของน้ำที่เกิดขึ้นจริงด้วย อีกทั้งข้อมูลจากสถานวัดน้ำของกรมชลประทานที่ครอบคลุมพื้นที่ของตำบลขุนแปะ อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่ ถูกนำมาพิจารณาเปรียบเทียบแนวโน้มของการเกิดอัตราการไหลด้วยเช่นกัน เมื่อได้ข้อมูลทั้ง 3 ส่วน เครื่องมือทางสถิติศาสตร์ถูกนำมาใช้ในการหาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของข้อมูลด้วยฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น โดยใช้วิธีความน่าจะเป็นไปได้สูงสุดในการพิจารณาเลือกฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น จากนั้นสร้างชุดข้อมูลใหม่โดยอ้างอิงตามตัวแปรทั้งสองของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น ซึ่งในแต่ละช่วงการเกิดอัตราการไหลจะมีค่าความน่าจะเป็นที่แตกต่างกัน เมื่อเสร็จสิ้นการรวบรวมและการจัดเตรียมข้อมูลอัตราการไหลที่เกิดขึ้น ขั้นตอนต่อไปจะเข้าสู่อัลกอริทึมกระบวนการประเมินศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานน้ำที่ถูกเขียนชุดคำสั่งในโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานน้ำที่เกิดขึ้น

เมื่อได้ชุดข้อมูลใหม่ภายใต้ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ค่าอัตราการไหลที่เกิดขึ้นจะถูกกำหนดเป็นช่วงของการเกิดโดยใช้ค่าอัตราการไหลสูงสุดบวกกับค่าอัตราการไหลต่ำสุดหารด้วยจำนวนช่วงที่ต้องการ จากนั้นก็จะคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของอัตราการไหลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วง ซึ่งโปรแกรมจะเริ่มจากการเลือกค่าอัตราการไหลที่มีค่าความน่าจะเป็นสูงสุดของช่วงการเกิดขึ้น และหาค่าอัตราการไหลเฉลี่ยของช่วงนั้นๆ เพื่อใช้ในการคำนวณในลำดับถัดไป โดยค่าอัตราการไหลที่ถูกเลือกจะถูกตรวจสอบด้วยเงื่อนไขขอบเขตการทำงานของเครื่องกังหันพลังน้ำแต่ละชนิดเพื่อใช้คำนวณกำลังการผลิตติดตั้ง อัตราการไหลที่เกิดขึ้นภายใต้ค่าความน่าจะเป็นที่ต่ำกว่าก็จะถูกใช้ในการคำนวณลำดับถัดไป จนกระทั่งบรรลุวัตถุประสงค์ของการประเมินกำลังการผลิตติดตั้งที่ใช้ทรัพยากรน้ำอย่างคุ้มค่า

รวมไปถึงเครื่องกังหันพลังงานน้ำสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปี ภายใต้ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด ในกระบวนการสุดท้ายของอัลกอริทึมจะเป็นการประเมินกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุดรายปี ผลลัพธ์ของอัลกอริทึมจะประกอบไปด้วย อัตราการไหลของน้ำออกแบบ ขนาดกำลังผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้า ค่าประเมินกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้ารายปี

4.1 การตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำที่เกิดขึ้น

ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำที่เกิดขึ้นในลุ่มน้ำแม่แปะ ถูกตรวจวัดและจัดเก็บข้อมูลตลอดระยะเวลา 1 ปี ซึ่งการจัดเก็บข้อมูลจะใช้วิธีการตรวจวัดความสูงของระดับน้ำบริเวณสันฝายน้ำล้นของโรงไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณด้วยวิธีทางอ้อมเพื่อหาค่าอัตราการไหลด้วยเทคนิค Weir method วิธีการนี้จะให้ความแม่นนำของข้อมูลอยู่ ±1.7 ถึง ±3 เปอร์เซ็นต์ที่อัตราการไหลไม่เกิน 4 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยพื้นฐานของสมการที่ใช้ในการวัดอัตราการไหลของน้ำด้วยวิธีฝายน้ำล้นคือ

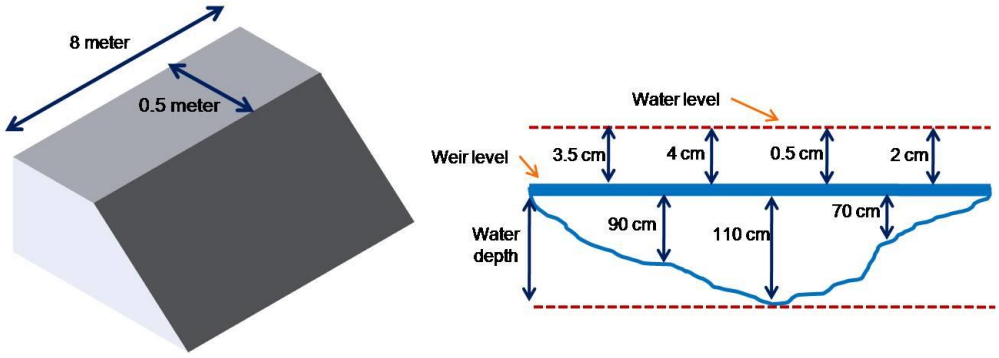
$$Q_{weir} = C_d b\sqrt{g}\left(H + \frac{V_1^2}{2g}\right) \approx C_d b\sqrt{g}H^{3/2} \quad (9)$$

C_d คือ สัมประสิทธิ์อัตราการไหล ซึ่งได้จากการทดลองที่ขึ้นอยู่กับรูปทรงของฝายและตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) สามารถหาได้จากสมการด้างล่างนี้:

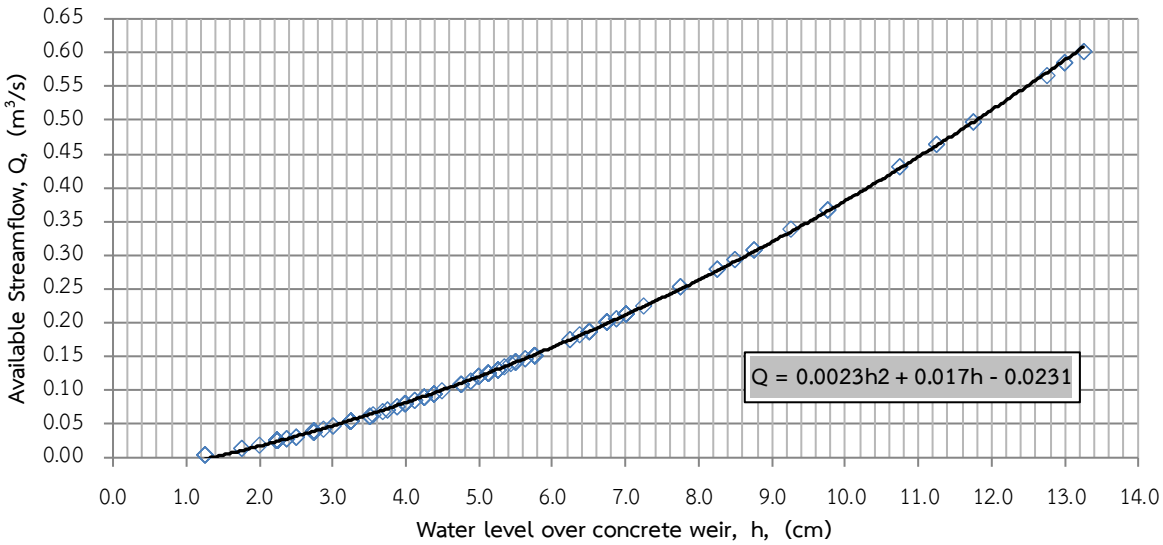
$$C_d \approx 0.544\left(1 - \frac{\delta/L}{H/L}\right)^{3/2} \quad (10)$$

$$\delta/L \approx 0.001 + 0.2\sqrt{\varepsilon/L} \quad (11)$$

เมื่อ Q_{weir} คือ อัตราการไหลของน้ำ (m^3/s), H คือ ความสูงของผิวน้ำบริเวณสันฝาย (m), Cd คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหล, b คือ ความยาวของฝาย (m), L คือ ความกว้างของสันฝาย (m), δ/L คือ อัตราส่วนระยะขจัด, และ ε คือ ความสูงเฉลี่ยของพื้นผิวขรุขระ (mm) ของคอนกรีตมีค่าประมาณ 0.015 mm ขนาดของฝายคอนกรีตและขนาดพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำได้แสดงในภาพที่ 2 ตำแหน่งการวัดความสูงของผิวน้ำบริเวณสันฝายจะแบ่งออกเป็น 4 ตำแหน่ง อย่างไรก็ตาม จำนวนของข้อมูลในการวัดมีความสำคัญมาก กับความน่าเชื่อถือและความแม่นยำของข้อมูลที่ใช้ในการประเมินศักยภาพของการผลิตพลังงานไฟฟ้า ดังนั้น การวัดความสูงของน้ำเพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลจะต้องกระทำซ้ำ ๆ เพื่อเพิ่มความถูกต้องของชุดข้อมูล ซึ่งการวัดความสูงของน้ำบริเวณสันฝาย จะแบ่งออกเป็นสองช่วงเวลาคือ ช่วงเวลาเช้า กับ ช่วงเวลาเย็น ของทุกๆ วันตลอดระยะเวลาหนึ่งปีเป็นอย่างต่ำ จากภาพที่ 2 จะเห็นว่าระดับความสูงของน้ำกับพื้นผิวฝายมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากพื้นผิวของฝายที่ชำรุดเกิดการหลุดล่อนจากกระแสน้ำที่ไหลล้นฝาย ทำให้เกิดการกัดเซาะของน้ำ ส่งผลต่อค่าระดับที่อ้างอิงจากพื้นผิวฝายถึงผิวน้ำ ทำให้มีค่าแตกต่างกันตามรูปแต่ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดยังคงเป็นจุดเดิมทุกครั้งที่ทำการตรวจวัด



ภาพที่ 2 ขนาดของฝายคอนกรีต และ ความสูงของผิวน้ำบริเวณสันฝาย และพื้นที่ตัดขวางของลุ่มน้ำ

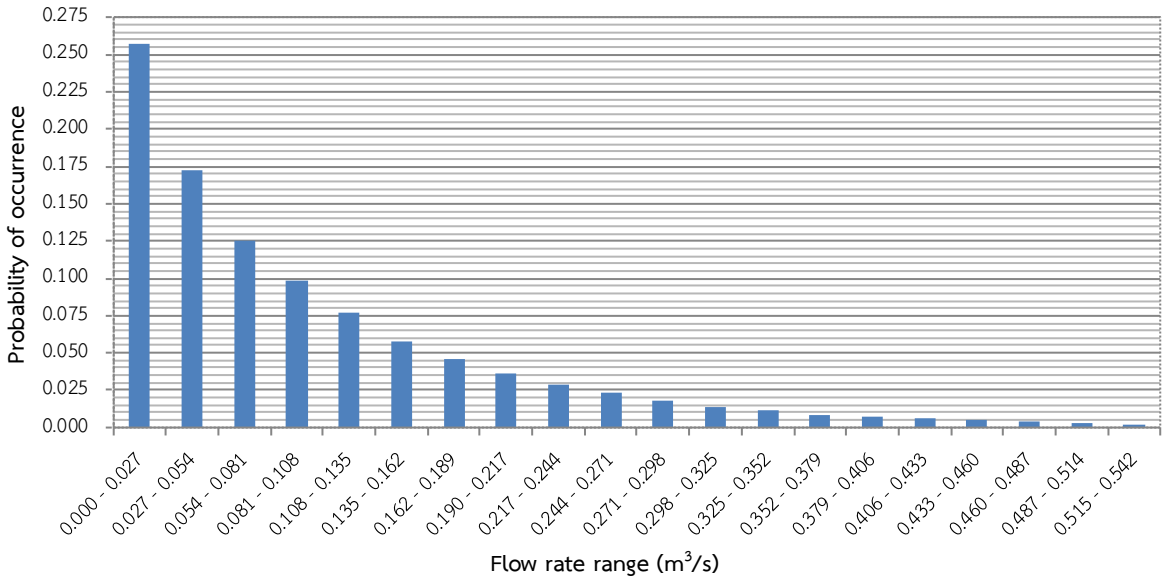


ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของระดับน้ำและอัตราการไหลที่เกิดขึ้น ของลุ่มน้ำแม่แปะ ที่ไหลเข้าสู่โรงไฟฟ้าฯ

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำที่ได้ทำการจัดเก็บ

จากการตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของผิวน้ำที่วัดได้บริเวณสันฝายกับค่าอัตราการไหลของน้ำที่เกิดขึ้น ตลอดระยะเวลา 1 ปี ที่แสดงอยู่ในภาพที่ 3 ชุดข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่า ช่วงของการเกิดอัตราการไหลของน้ำต่ำ ๆ มีความหนาแน่นมากหรือเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันบ่อยครั้งกว่า การเกิดอัตราการไหลของน้ำสูง ๆ ซึ่งจะอยู่ในช่วงระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยลบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อพิจารณากับชุดข้อมูลของสถานีวัดน้ำ P14 ของกรมชลประทาน พบว่า มีความคล้ายคลึงกันมากและมีแนวโน้มของการเกิดไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นเครื่องมือสำเร็จรูปทางสถิติศาสตร์ในโปรแกรม MATLAB ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลด้วยฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น พบว่าฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบแกมม่า มีความน่าจะเป็นสูงสุด มากกว่าฟังก์ชันการแจกแจงแบบไวย์บูลและล็อกปกติ โดยมีค่าเบี่ยงเบนของค่าขนาดพารามิเตอร์ 0.106 และค่าพารามิเตอร์รูปร่าง 0.013 ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาความผิดพลาดที่เกิดจากการตรวจวัดและการขาดหาย

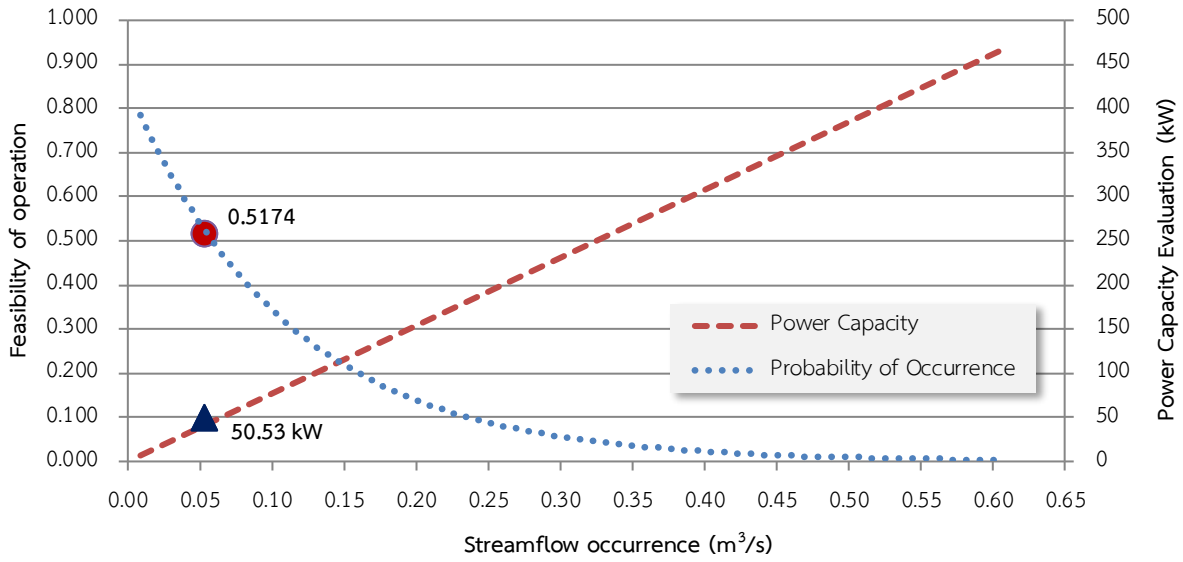
ของข้อมูล อีกทั้งเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับชุดข้อมูลฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบแกมม่า จึงถูกนำมาใช้สร้างการกระจายของชุดข้อมูลอัตราการไหลใหม่ และพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลใหม่มีค่าต่ำกว่า ชุดข้อมูลที่ได้ทำการจัดเก็บ หมายความว่าความแปรปรวนของชุดข้อมูลใหม่ต่ำ และเมื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ของความเป็นไปได้ ดังแสดงในภาพที่ 4 การกระจายตัวของชุดข้อมูลมีความสมบูรณ์และถูกต้องมากขึ้น



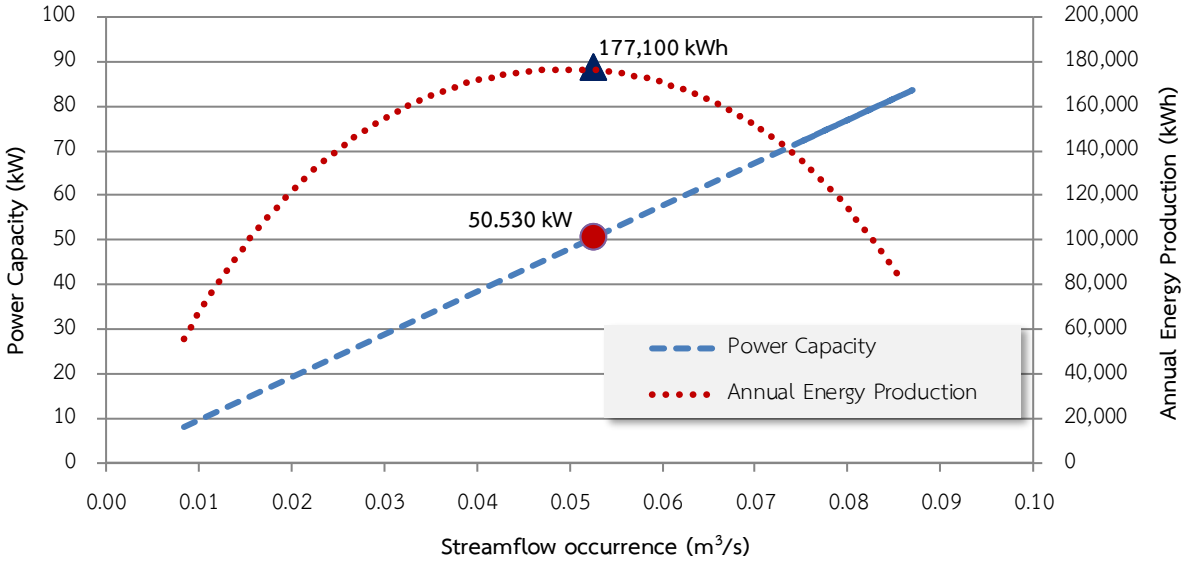
ภาพที่ 4 ความน่าจะเป็นของช่วงการเกิดอัตราการไหลของลุ่มน้ำแม่แปะ ที่ไหลเข้าสู่โรงไฟฟ้าฯ

ผลการศึกษาวิจัย

จากกราฟแท่งแสดงชุดข้อมูลใหม่ของความน่าจะเป็นของช่วงการเกิดอัตราการไหลในลุ่มน้ำแม่แปะ ดังแสดงในภาพที่ 4 ค่าพิสัยอัตราการไหลช่วง 0.000 ถึง 0.0270 ลูกบาศก์เมตาต่อวินาที มีความน่าจะเป็นสูงสุดที่จะเกิดขึ้นในชุดข้อมูลนี้ โดยค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลจากค่าพิสัยดังกล่าวเท่ากับ 0.0135 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ที่ความเป็นไปได้ 25 เปอร์เซ็นต์หรือคิดเป็น 92 วันต่อปีที่จะเกิดช่วงอัตราการไหลนี้ ซึ่งค่าค่าเฉลี่ยดังกล่าวจะเป็นค่าเริ่มต้นในอัลกอริทึมประเมินศักยภาพการผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 1 ค่าพิสัยของอัตราการไหลที่มีลำดับสูงขึ้นแต่มีความเป็นไปได้ของการเกิดที่ต่ำกว่าค่าแรกจะถูกพิจารณาในลำดับถัดไปและจะคำนวณซ้ำไปเรื่อยๆ ตามเงื่อนไขของอัลกอริทึม ผลลัพธ์ของแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้ากับค่าความเป็นไปได้ที่เครื่องกังหันพลังน้ำสามารถทำกำลังการผลิตสูงสุด 50 กิโลวัตต์ได้ตลอดทั้งปี ดังแสดงในภาพที่ 5 ในขณะที่ช่วงเวลาอื่นๆ เครื่องกังหันก็ยังคงทำงานต่อเนื่อง ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตอัตราการไหลต่ำสุดที่เครื่องกังหันจะทำงานได้ ซึ่งผลลัพธ์ของอัลกอริทึมแสดงให้เห็นว่าโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำบ้านขุนแปะสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าจ่ายเข้าสู่ระบบได้ถึง 177,100 หน่วยต่อปี ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไปได้ที่จะผลิตกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 50 kW ตลอดทั้งปี



ภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับกำลังการผลิตติดตั้งและปริมาณพลังงานไฟฟ้า

6. อภิปรายผลการศึกษาวิจัย

การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานน้ำต้องอาศัยการแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์จากการไหลของน้ำตามธรรมชาติผ่านใบกังหันพลังน้ำที่เชื่อมต่อกับเพลาเพื่อสร้างพลังงานกล ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบกำลังการผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าคืออัตราการไหลของน้ำจริง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของโรงไฟฟ้า การศึกษาข้อมูลในอดีตของโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กมากในประเทศไทยพบว่า มีตัวชี้วัดประสิทธิภาพการใช้งาน (Plant Capacity Factor) ที่ต่ำ เนื่องจากการกำหนดกำลังการผลิตติดตั้งไม่สอดคล้องกับอัตราการไหลจริง เพื่อแก้ไขปัญหานี้ การศึกษานี้ได้นำเสนอแนวทางใหม่ในการวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานน้ำสำหรับประเมินความเหมาะสมของกำลังการผลิตติดตั้ง โดยมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างคุ้มค่าและตอบสนองต่อความต้องการพลังงานอย่างยั่งยืน

การวิจัยได้พัฒนาอัลกอริทึมในโปรแกรม MATLAB โดยใช้ข้อมูลการไหลของน้ำจากลุ่มน้ำแม่แปะ รวมถึงข้อมูลย้อนหลังของการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าบ้านขุนแปะ และข้อมูลจากสถานีวัดน้ำ เพื่อวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการเกิดอัตราการไหลจริง อัลกอริทึมนี้ออกแบบมาเพื่อประเมินศักยภาพพลังงานน้ำและกำลังการผลิตติดตั้งอย่างแม่นยำและเหมาะสมที่สุด ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลเฉลี่ยต่ำมีแนวโน้มเกิดขึ้นตลอดทั้งปี ซึ่งช่วยให้เครื่องกังหันสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยผลลัพธ์จากอัลกอริทึมใกล้เคียงกับค่าการผลิตเฉลี่ยของโรงไฟฟ้าฯ การศึกษานี้จึงบรรลุวัตถุประสงค์ในการพัฒนาแนวทางใหม่ที่สามารถใช้เป็นขั้นตอนสำคัญในการวางแผนก่อนการตัดสินใจก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำในอนาคต เพื่อให้มั่นใจว่าการใช้ทรัพยากรธรรมชาติเกิดประโยชน์สูงสุด พร้อมทั้งสอดคล้องกับนโยบายพลังงานทดแทนและการพัฒนาอย่างยั่งยืนของประเทศ

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

(1) ยิ่งมีจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มากก็จะทำให้ผลลัพธ์ของอัลกอริทึม มีความแม่นยำขึ้น

(2) ชุดข้อมูลอัตราการไหลที่เกิดขึ้นจริง มีความสัมพันธ์กับข้อมูลสภาพภูมิอากาศและปริมาณน้ำฝน เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือของข้อมูลจึงควรจัดเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง และควรใช้ข้อมูลย้อนหลังมากกว่า 5 ปี ร่วมกับการวิเคราะห์

2. ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

(1) ควรประยุกต์อัลกอริทึมใช้กับแหล่งข้อมูลของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำอื่นๆ เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้ ก่อนการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำฯ

(2) ควรประยุกต์อัลกอริทึมประเมินศักยภาพการผลิตให้สามารถพิจารณาเลือกชนิดของเครื่องกังหันที่เหมาะสมกับข้อมูลอัตราการไหลและความสูงหัวน้ำที่จะติดตั้งโครงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่มอบโอกาสและความไว้วางใจให้ทุนสนับสนุนดำเนินโครงการวิจัยฯ อีกทั้งอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานกับหน่วยงานต่างๆ ทั้งภายในและภายนอก ให้การสนับสนุนข้อมูลทางเทคนิค, และให้การดูแลตลอดระยะเวลาในการดำเนินโครงการวิจัย อีกทั้งขอขอบคุณ อธิการบดีมหาวิทยาลัยศรีปทุม คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ที่ให้การสนับสนุน ส่งเสริมให้เกิดความร่วมมือทางด้านงานวิจัยกับหน่วยงานภายนอก

เอกสารอ้างอิง

Anagnostopoulos, J. S., & Papantonis, D. E. (2007). Optimal sizing of run-of-river small hydropower plants. *Energy Conversion and Management, 48*(10), 2663–2670.

Cavalcanti, D. L. O. , Reis, L. F. R. , (2017) Maximum Design Flow Estimates for Large Basins Using the Local Frequency Analysis (LFA) and the Most Probable Maximum Hydrograph (MPMH) Methods – a Critical Analysis. *Water Resource Manage*, *31*, 127–141

Gernaat, D. E. H. J., Bogaart, P. W., & Vuuren, D. P. V. (2017) High-resolution assessment of global technical and economic hydropower potential. *Nature Energy*, *2*, 821–828.

Laodee, P., Ketjoy, N., Sukjai, S., Chamsa-ard, W., & Sonsaree, S. (2013), The Community development with Pico-hydro power plantsin Thailand. *Journal of Community Development Research*, *5*(2), 15-30.

Liucci, L., Valigi, D. & Casadei, S., (2014) A New Application of Flow Duration Curve (FDC) in Designing Run-of-River Power Plants. *Water Resource Manage*, *28*, 881–895.

Niadas, I.A., & Mentzelopoulos, P.G., (2008) Probabilistic Flow Duration Curves for Small Hydro Plant Design and Performance Evaluation. *Water Resource Manage*, *22*, 509–523.

Norasretpanya, P., Jittasamroeng, K., & Sintunavarat, W. (2022), Efficiency Analysis of Hydroelectric Power Plant Establishment for Medium Reservoirs: A Case Study of Lampang Province. *Thai Journal of Operations Research*, *10*(1), 128-139.

Paish, O. (2002) Small Hydropower: technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 6*(6), 537-556.

Phethuayluk, S. (2014), Potential of Hydroelectricity in Phatthalung Province. *Burapha Science Journal*, *19*(2), 122-138.

Tang, S., Chen, J., Sun, P., Li, Y., Yu, P., & Chen, E. (2019) Current and future hydropower development in Southeast Asia countries (Malaysia, Indonesia, Thailand and Myanmar). *Energy Policy*, *129*, 239-249.