

การปรับปรุงระบบการจัดการจ่ายน้ำประปาเพื่อรองรับกับความต้องการใช้น้ำ ในอนาคตของพื้นที่เจ้าพระยาฝั่งตะวันตก

Improving the Water Distribution System to Support a Future Water Demand in the Western area of Chao Phaya River

พงศ์ธร หงษา¹ และ เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์^{2,*}

¹สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์,

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Pongthon Hongsa¹ and Muanmas Wichiensin^{2,*}

¹Infrastructure Engineering and Management Division, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Kasetsart University, Ladyao, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University,
Ladyao, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

*Corresponding Author E-mail: fengmms@ku.ac.th

Received: Jul 27, 2023; Revised: Jan 29, 2024; Accepted: Feb 01, 2024

บทคัดย่อ

การเติบโตของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลส่งผลให้ปริมาณความต้องการใช้น้ำในพื้นที่ให้บริการสำนักงาน
ประปาสาขามหาสวัสดิ์และบางบัวทอง มีโอกาสสูงขึ้นตามการคาดการณ์ของการประปานครหลวง เป็นเหตุให้ปริมาณ
แรงดันน้ำในระบบโครงข่ายท่อประปาลดลงจนถึงจุดที่ไม่เหมาะสมกับการให้บริการ การศึกษานี้ใช้แบบจำลองที่ปรับแก้
และเปรียบเทียบสมมูลปริมาณน้ำและแรงดันแล้วมาประยุกต์ใช้เพื่อหาแนวทางปรับปรุงระบบการจ่ายน้ำประปาในอีก 5 ปี
ข้างหน้าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณความต้องการการใช้น้ำ การศึกษาได้เสนอตำแหน่งที่ตั้งของโรงสูบน้ำแห่งใหม่ใน
พื้นที่ศึกษา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของการสูบน้ำ ทั้งนี้ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการสูบน้ำ
น้ำประปาสูงสุดควรมีการตั้งโรงสูบน้ำเพื่อเพิ่มแรงดันน้ำให้เพียงพอ การศึกษานี้ได้หาตำแหน่งของโรงสูบน้ำ
น้ำประปาโดยใช้ตัวชี้วัดเป็นแรงดันน้ำเฉลี่ยที่ได้รับอิทธิพลจากโรงสูบน้ำที่เพิ่มใหม่โดยเปรียบเทียบทั้งหมด 5 ตำแหน่ง
ในพื้นที่ สมมติฐานของรูปแบบการสูบน้ำคือ กำหนดให้แต่ละโรงสูบน้ำมีแรงดันจ่ายและรูปแบบการสูบน้ำ
เท่ากัน คือให้โรงสูบน้ำจ่ายน้ำด้วยแรงดันเฉลี่ย 8 เมตร และใช้รูปแบบค่าตัวคูณแรงดันน้ำในแต่ละช่วงเวลาของโรงสูบน้ำ
จ่ายน้ำเพชรเกษมเป็นหลัก ผลการเปรียบเทียบแรงดันน้ำของตำแหน่งโรงสูบน้ำ พบว่าตำแหน่งโรงสูบน้ำที่ทำให้
ค่าแรงดันเฉลี่ยทั้งระบบสูงสุด และเกิดการกระจายแรงดันน้ำในพื้นที่ได้ดีที่สุด คือ บริเวณปลายท่อประปาที่อยู่ใน
บริเวณถนนทางหลวงหมายเลข 345 กม.5 + 735.00

คำสำคัญ: ปริมาณความต้องการใช้น้ำในอนาคต, ตำแหน่งโรงสูบน้ำ

Abstract

Bangkok and its vicinities' city areas are expanding and are requiring the higher water supply from the Maha Sawat and Bang Bua Thong service areas of the Metropolitan Waterworks Authority. As a result, the existing water network system's water pressure may decrease and be inadequate to supply the water to the service areas. The study utilizes the water pipe network model, EPANET, of the Maha Sawat and Bang Bua Thong service areas that has been calibrated previously. The model was satisfyingly calibrated and accepted by balancing the water volume and pressure level. In this research, the model is used to evaluate the existing pipe network system of the study area under the future water demand condition in the next five years. Then, the model is used to define optimal location of a new pumping station that needs to increase the water distribution system efficiency and its stability. Five proposed location that need to increase the water distribution system are assumed to use the same pumping pattern and supply pressure. Each pumping station supplies a pressure head at least eight meters and use the water pressure multipliers from the Phet Kasem pumping station for each period. By using the average water pressure and the contour pressure of water distribution area as an indicator comparing the five pumping locations individually, the result showed that the best location of the new pumping station is located on Highway No.345 km.5+735.00.

Keyword: Future water demand, Pumping station location

1. บทนำ

ปัจจุบันในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล มีการเติบโตของจำนวนประชากรและที่พักอาศัยอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะพื้นที่จังหวัดนนทบุรีฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา ประกอบด้วย อำเภอมหาสวัสดิ์ และ อำเภอบางบัวทอง เป็นเหตุให้รัฐบาลเร่งรัดโครงการต่างๆ ที่เป็นโครงสร้างพื้นฐาน อาทิเช่น ถนน ขนส่งระบบราง ระบบระบายน้ำ ระบบไฟฟ้า ระบบน้ำประปา รวมถึงโครงการ Mixed use ขนาดใหญ่ เพื่อรองรับต่อความต้องการของประชากรในพื้นที่

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ต้องพัฒนาไปพร้อมกันแบบคู่ขนาน และถูกออกแบบให้สอดคล้องไปด้วยกัน ดังนั้นระบบโครงข่ายท่อประปาซึ่งเป็นหนึ่งในโครงสร้างพื้นฐานด้านสาธารณูปโภค ก็ต้องมีการออกแบบการปรับปรุงและพัฒนาาระบบโครงข่ายท่อประปา ให้เพียงพอต่อความต้องการ และสอดคล้องกับโครงสร้างพื้นฐานอื่นด้วย

การประปานครหลวงเป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจสังกัดกระทรวงมหาดไทย ดำเนินกิจการองค์กรให้บริการน้ำประปาในเขตพื้นที่ 3 จังหวัด ประกอบด้วย กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ รวมพื้นที่ให้บริการ 3,195 ตารางกิโลเมตร [1] จากสถิติมีปริมาณน้ำจ่ายเฉลี่ยประมาณ 5.80 ล้านลูกบาศก์

เมตรต่อวัน สถิติการเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณน้ำจ่ายสูงสุดต่อวันระหว่างปี พ.ศ. 2560–2565 พบว่าปริมาณน้ำจ่ายมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นจาก 5.60 ล้านลูกบาศก์เมตร เป็น 6.12 ล้านลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 9.28 ทั้งนี้ เนื่องจากปริมาณความต้องการในการใช้น้ำที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงการเกิดการสูญเสียในระบบ จากการแตกรั่ว ส่งผลให้ปริมาณเสดความดันเฉลี่ยรวมทั้งพื้นที่ลดลงจาก 9.95 ม. เป็น 6.70 ม. คิดเป็นร้อยละ 32.66

จากรายงานแผนบริหารการประปานครหลวง ระยะ 20 ปีของฝ่ายนโยบายและยุทธศาสตร์ เมื่อเดือน เมษายน ปี พ.ศ. 2563 [2] ได้รายงานการคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำในพื้นที่ฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา สำหรับปี พ.ศ. 2570 อยู่ที่ 1,345,550 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำในปี พ.ศ. 2565 จำนวน 1,253,587 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน แล้วมีปริมาณเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 7.34 และ จากการตรวจสอบปริมาณการจ่ายน้ำที่เข้าสู่ระบบของโรงสูบน้ำมหาสวัสดิ์ต่อวัน [3] เปรียบเทียบระหว่าง พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2565 พบว่าปริมาณการจ่ายน้ำเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม 445,416 ลูกบาศก์เมตร เป็น 629,239 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 41.27 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจำลองระบบโครงข่ายท่อประปาให้มีความสอดคล้องและหาวิธีรับมือกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดย

การศึกษานี้ได้ศึกษาระบบท่อประปาในพื้นที่ให้บริการของสำนักงานประปาสาขามหาสวัสดิ์และบางบัวทอง โดยใช้แบบจำลองระบบโครงข่ายท่อประปาของการประปานครหลวง ที่ผ่านการปรับเทียบจนน่าเชื่อถือแล้วของ P.Hongsa and M. Wichiensin [4] เป็นเครื่องมือวิเคราะห์พฤติกรรมทางชลศาสตร์ในท่อประปา โดยนำมาประยุกต์หาผลกระทบจากปริมาณความต้องการใช้น้ำที่จะเพิ่มขึ้นนี้รวมถึงให้แนวทางในการพัฒนาปรับปรุงระบบโครงข่ายท่อประปา ต่อไป

2. จุดประสงค์และขอบเขตของงาน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายท่อประปา กรณีศึกษาผลกระทบของระบบโครงข่ายท่อประปาจากปริมาณความต้องการใช้น้ำที่เพิ่มในพื้นที่ให้บริการของสำนักงานประปาสาขามหาสวัสดิ์ และสาขาบางบัวทอง รูปที่ 1 โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองระบบโครงข่ายท่อประปา รูปที่ 2 วิเคราะห์ผลกระทบในกรณีความต้องการใช้น้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 7.34 เปอร์เซ็นต์ พร้อมทั้งศึกษาเลือกศึกษาแนวทางการปรับปรุงระบบโครงข่ายท่อประปา ในกรณีการเพิ่มโรงสูบน้ำในพื้นที่ตอนบนของพื้นที่ศึกษา และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลอง เพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งของโรงสูบน้ำที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้กำหนดให้ปริมาณแรงดัน และรูปแบบค่าตัวคูณแรงดันน้ำของแต่ละชั่วโมงในหนึ่งวันเท่ากันทุกกรณี โดยใช้ของโรงสูบน้ำเพชรเกษม โดยแสดงในหัวข้อวิธีการดำเนินการวิจัยต่อไป

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1987 Todini and Pilati [5] เสนอวิธีการวิเคราะห์ระบบท่อประปาโดยอาศัยพฤติกรรมการไหลของน้ำในท่อ ด้วยความสัมพันธ์ของอัตราการไหล แรงดันน้ำ และการสูญเสียแรงดันน้ำ จากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งของโครงข่ายท่อ แก้ปัญหาด้วยวิธี Gradient method ต่อมา เมื่อเทคโนโลยีถูกพัฒนาจนคอมพิวเตอร์สามารถวิเคราะห์ระบบโครงข่ายท่อประปาที่มีความซับซ้อนได้ จึงมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายท่อประปา หลายโปรแกรมที่เป็นที่นิยมใช้ เช่น โปรแกรม

STONER, WaterGEM และ EPANET เป็นต้น โดยโปรแกรม STONER และ WaterGEMS เป็นโปรแกรมที่มีลิขสิทธิ์ จำเป็นต้องเสียค่าบริการ ส่วน EPANET เป็นโปรแกรมที่ไม่มีค่าบริการ ดังนั้นในการจำลองและวิเคราะห์ระบบท่อประปาโดยทั่วไปคนจึงนิยมใช้ โปรแกรม EPANET ซึ่งไม่มีค่าบริการในการใช้งานมากกว่า โดย EPANET พัฒนาขึ้นโดย United States Environmental Protection Agency (US EPA) เมื่อปี ค.ศ. 2000 เป็นโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์โครงข่ายได้โดยไม่จำกัดขนาดของโครงข่าย ทำให้ได้รับความนิยมในหมู่นักวิจัย

ทฤษฎีชลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นการไหลในระบบท่อน้ำปิด ประกอบด้วย การจำแนกชนิดการไหล สมการการไหลต่อเนื่อง สมการพลังงาน สมการโมเมนตัม สมดุลพลังงาน การสูญเสียพลังงาน และการรั่วไหลในระบบท่อประปา ซึ่งอ้างอิงจาก A. L. Simon and S.F. Korom [6]

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์โครงข่ายท่อประปาของประเทศไทย ส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยสำหรับหน่วยงานการให้บริการน้ำประปา เกี่ยวข้องกับระบบท่อประปาของการประปานครหลวงเป็นส่วนใหญ่ และการประปาส่วนภูมิภาค ตั้งแต่ช่วง 20 ปีที่ผ่านมา งานวิจัยโครงการของการประปานครหลวง (กปน.) นคร [7] ศึกษาโครงข่ายท่อประปาของการประปานครหลวงฝั่งตะวันตกที่โรงสูบน้ำท่าพระ และธนบุรีมหาสวัสดิ์ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ EPANET โดยใช้ข้อมูลท่อ 432 เส้นท่อ จุดบรรจบ 407 จุด และโรงสูบน้ำ 5 แห่ง และหาแนวทางแก้ปัญหาเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน กรณีโรงสูบน้ำหยุดจ่ายน้ำ ผลการศึกษาชี้ทางแก้ไขได้ โดยการปรับการทำงาน of เครื่องสูบน้ำของโรงสูบน้ำข้างเคียง และควบคุมที่เกี่ยวกับในพื้นที่ ในช่วงเวลาเดียวกัน สุทธิศักดิ์ [8] ใช้แบบจำลอง EPANET จำลองสภาพการไหลประปาในพื้นที่สำนักงานประปาสาขาทุ่งมหาเมฆ ประกอบด้วยข้อมูลท่อจำนวนมากขึ้น กรณีศึกษาปิดซ่อมท่อที่ส่งผลให้บริเวณตอนใต้ของพื้นที่มีน้ำไหลอ่อน ไม่สามารถจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ได้ เสนอทางแก้ไขได้โดยผันปริมาณน้ำจากโรงสูบน้ำจ่ายน้ำอื่นเข้ามาในระบบ โดยการปรับประตูน้ำเข้าอย่างเหมาะสม ซึ่งจะช่วยบรรเทาปัญหาน้ำไหลอ่อนได้

ต่อมา ปารินทร์ [9] ได้จำลองสภาพการไหลภายใต้แรงดันในท่อประปาในพื้นที่สำนักงานประปาสาขามหาสวัสดิ์ของ กปน. โดยนำเข้าข้อมูลเส้นท่อและข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจากระบบภูมิสารสนเทศ (GIS) จากนั้นนำแบบจำลองมาประยุกต์ใช้โดยการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นท่อที่มีลักษณะเป็นคอขวดและเส้นท่อที่ไม่เชื่อมโยงกันเพื่อแก้ปัญหาแรงดันน้ำที่ไม่เหมาะสม และได้เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อความยาวท่อในแต่ละแบบจำลอง ต่อมา สิริระ [10] ศึกษาโครงข่ายท่อประปาของการประปานครหลวง สาขาประจวบคีรีขันธ์ ด้วยโปรแกรม EPANET ได้ประยุกต์ใช้ในกรณีการปรับปรุงเส้นท่อโดยการเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ได้พิจารณาคำนวณงบประมาณที่ต้องใช้ในการดำเนินการปรับปรุงท่อประปา และผลประโยชน์สูงสุดในการปรับปรุงท่อประปาโดยพิจารณาเปรียบเทียบแต่ละตำแหน่ง ในเวลาเดียวกัน ชลิต [11] ใช้ EPANET สำหรับระบบโครงข่ายท่อประปาของการประปานครหลวงสาขา พญาไท โดยนำเข้าข้อมูลเส้นท่อและข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจากระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ และกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ เท่ากับ 0.03 มม. จากผลการวิเคราะห์แบบจำลอง ช่วงเวลาต่างๆ นอกจากจะช่วยให้ทราบถึงพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบแล้ว ยังสามารถนำไปใช้ประกอบการพิจารณาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปิดซ่อมท่อประปาเพื่อให้ประชาชนได้รับผลกระทบน้อยที่สุด

สำหรับงานแบบจำลองของการประปาส่วนภูมิภาค ภูริพัฒน์ [12] ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ EPANET พื้นที่บริการสำนักงานประปาสมุทรสาคร ศึกษา กรณีที่ปริมาณการใช้น้ำเพิ่มขึ้นใน 5 ปีข้างหน้าและจะต้องยกเลิกการใช้น้ำบาดาล ผลการทดสอบพบว่า ระบบประปาเดิมที่มีเพียงแหล่งจ่ายน้ำ 1 แห่ง ไม่สามารถรองรับกับสถานการณ์ดังกล่าวในอนาคตได้ จึงได้ทดสอบเพิ่มแหล่งจ่ายน้ำอีก 1 แห่ง ผลสรุปคือ แหล่งจ่ายน้ำใหม่และแหล่งจ่ายน้ำเดิม สามารถรองรับกรณีความต้องการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการยกเลิกการใช้น้ำบาดาลได้

3.1 ทฤษฎีการไหล

พฤติกรรมการไหลภายใต้ความดัน แสดงได้ดังสมการที่ (1) ดังนี้

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (1)$$

Re = ค่า Reynolds number

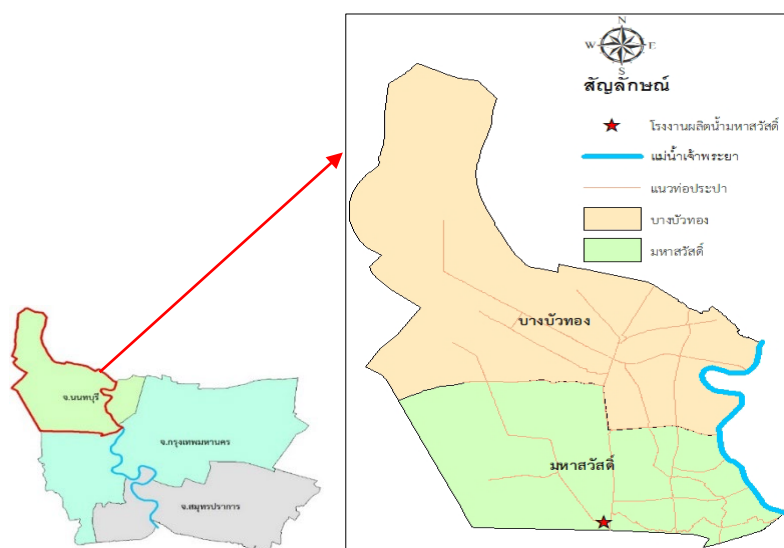
ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

V = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ (m/s)

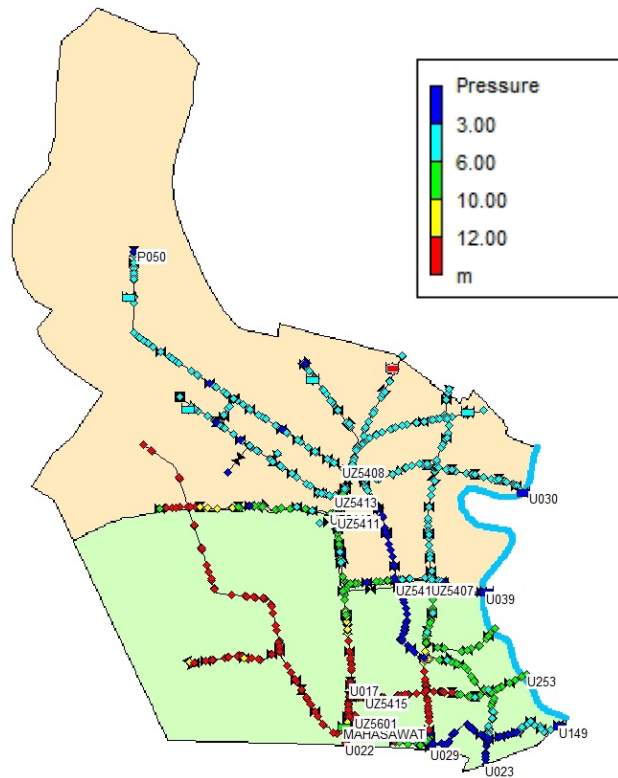
D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

μ = ความหนืดพลศาสตร์ (Dynamic viscosity) ของของไหล (N.s/m^2)

ν = ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic viscosity) ของของเหลว



รูปที่ 1 พื้นที่ให้บริการน้ำประปาการประปานครหลวงสำนักงานประปาสยามมหาสวัสดิ์ และสาขาบางบัวทอง



รูปที่ 2 แบบจำลองโครงข่ายท่อประปาในโปรแกรม EPANET

3.2 หลักสมมูลพลังงาน

เป็นไปตามสมการที่ (2)

$$E_{in} = E_{out} \quad (2)$$

- E_{in} = เสดความดันที่หน้าตัดทางเข้า (m)
 E_{out} = เสดความดันที่หน้าตัดทางออก (m)
 $E_{in} = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}$
 $E_{out} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_L$
 $Z_{1,2}$ = เสดระดับ ณ ตำแหน่งทางเข้า-ทางออก (m)
 P = ค่าความดัน (N/m^2)
 γ = น้ำหนักจำเพาะของของเหลว (N/m^3)
 $\frac{P_1}{\gamma}, \frac{P_2}{\gamma}$ = เสดความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้า - ทางออก (Pressure Head) (m)
 $\frac{v_1^2}{2g}, \frac{v_2^2}{2g}$ = เสดความเร็ว ณ ตำแหน่งทางเข้า - ทางออก (Velocity Head) (m)
 v = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ (m/s)
 g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s^2)
 h_L = เสดสูญเสียรวม (Total Head Loss) (m)

3.3 สมการการไหลต่อเนื่อง

อัตราการไหลเข้าออกหน้าตัดเท่ากัน ดังสมการที่ (3)

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (3)$$

- Q_{in} = อัตราการไหลเข้าที่หน้าตัดควบคุมทางเข้า (m^3/s)
 Q_{out} = อัตราการไหลออกที่หน้าตัดควบคุมทางออก (m^3/s)

3.4 สมการโมเมนตัม

ผลรวมของแรงที่หน้าตัด แสดงดังสมการที่ (4)

$$\Sigma F = \rho Q (V_{out} - V_{in}) \quad (4)$$

- ΣF = ผลรวมของแรง ($kg \cdot m/s^2$)
 Q = อัตราการไหล (m^3/s)
 V_{out} = ความเร็วที่หน้าตัดทางออก (m/s)
 V_{in} = ความเร็วที่หน้าตัดทางเข้า (m/s)

สมการโมเมนตัมใช้สำหรับคำนวณหาแรงที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราโมเมนตัมเนื่องจากหน้าตัดเปลี่ยนหรือความเร็วเปลี่ยนขนาดหรือทิศทาง

3.5 การสูญเสียพลังงานหลัก

แสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$V = 0.85CR^{0.63}S^{0.54} \quad (5)$$

V = ความเร็วของการไหลในท่อ (m/s)

C = สัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นกับชนิดของท่อ

R = รัศมีชลศาสตร์ = พื้นที่หน้าตัด/เส้นรอบรูป (m)

S = ค่าความลาดชันการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานท่อ

โดยที่ค่าความลาดชันเป็นดังสมการที่ (6)

$$S = \frac{H_f}{L} \quad (6)$$

$$S = \frac{H_f}{L}$$

L = ความยาวท่อ (m)

H_f = การสูญเสียหลักเนื่องจากความเสียดทาน (m)

3.6 ทฤษฎีการสูญเสียพลังงานรองในท่อ

ค่าการสูญเสียเป็นไปดังสมการ (7)

$$H_m = \frac{KV^2}{2g} \quad (7)$$

H_m = ค่าการสูญเสียพลังงานรองเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ (m)

K = สัมประสิทธิ์ของความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์

V = ความเร็วของการไหล (m/s)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s^2)

3.7 การรั่วในเส้นท่อที่จุดต่อระบบ

ค่าสัมประสิทธิ์การไหล เป็นดังสมการ (8)

$$Q = CP^\gamma \quad (8)$$

C = ค่าสัมประสิทธิ์การไหล

γ = เลขยกกำลังของแรงดัน (ใช้ $\gamma = 0.5$)

3.8 การวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำ

วิเคราะห์โดยวิธี Gradient Method [5] โดยให้ระบบท่อมีย่านวนจุดแยกทั้งหมด N จุด แสดงได้ ดังสมการที่ (9)

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^n \quad (9)$$

i = Node ใด ๆ

j = Node ที่ถัดไปจาก Node i

h_{ij} = Head Loss (m) จาก Node i ไป j

H_i, H_j = ค่า Head ที่จุดต่าง ๆ (Nodal Head) (m)

r = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Resistance Coefficient)

Q_{ij} = อัตราการไหล (m^3/s) จาก i ไป j

m = สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (Minor Loss Coefficient)

n = Pump Curve Coefficient

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนี้ขึ้นอยู่กับสมการที่ใช้คำนวณค่า Head Loss เขียนได้ดังสมการที่ (10)

$$h_{ij} = -\omega^2(h_0 - r(\frac{Q_{ij}}{\omega})^n) \quad (10)$$

h_0 = ค่า Head ของเครื่องสูบน้ำ (m)

ω = ความเร็วสัมพัทธ์ที่กำหนด (m/s)

โดยสมการการไหลรอบ Node ใด ๆ เป็นดังสมการที่ (11)

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \text{ for } i = 1, \dots, N \quad (11)$$

D_i = ความต้องการน้ำหรือน้ำที่ไหลเข้า (m^3) ที่จุด i

คำนวณต่อแบบวนซ้ำ ค่า Head ที่ได้ในครั้งใหม่เขียนได้ ดังสมการที่ (12)

$$[A][H] = [F] \quad (12)$$

[A] = Jacobian Matrix ขนาด N x N

[H] = Vector Matrix ของตัวที่ไม่ทราบค่า คือ Nodal Head

[F] = Vector Matrix ของเทอมที่อยู่ฝั่งขวาของสมการ

สำหรับค่าในแนวเส้นทแยงมุมของ [A] หาได้ตามสมการที่ (13)

$$A_{ii} = \sum_j p_{ij} \quad (13)$$

ส่วนที่ไม่ใช่แนวเส้นทแยงมุมของ [A] มีค่าดังสมการที่ (14)

$$A_{ij} = -p_{ij} \quad (14)$$

p_{ij} คือส่วนกลับของค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของค่า Head Loss คำนวณได้ตามสมการที่ (15)

$$p_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|} A_{ij} = -p_{ij} \quad (15)$$

ส่วน [F] มีค่าเท่ากับอัตราการไหลสุทธิที่ไม่สมดุลในแต่ละจุด คำนวณได้ตามสมการที่ (16)

$$F_i = (\sum_j Q_{ij} - D_i) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f \quad (16)$$

โดยจุด f เป็นจุดรอบข้างที่ติดกับจุด i ที่ไม่ใช่จุด j ค่าเวกเตอร์ปรับแก้อัตราการไหล y_{ij} คำนวณได้จากสมการที่ (17)

$$y_{ij} = p_{ij}(r|Q_{ij}|^n + m|Q_{ij}|^2) \text{sng}(Q_{ij}) \quad (17)$$

โดย $\text{sng}(x) =$ เครื่องหมายบอกทิศทาง เป็น 1 เมื่อ $x > 0$ นอกจากนี้ใช้ค่า -1

เมื่อกำหนดค่า Head ค่าใหม่ แล้วหาอัตราการไหลค่าใหม่ได้ดังสมการที่ (18) ดังนี้

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - p_{ij}(H_i - H_j)) \quad (18)$$

คำนวณซ้ำจนอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงในรอบใหม่มีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมรับ

4. วิธีดำเนินการวิจัย

จากงานศึกษาแบบจำลองโครงข่ายท่อประปาของการประปานครหลวงของ P. Hongsa and M. Wichiansin [4] ซึ่งใช้

ข้อมูลจากพื้นที่ศึกษานี้ เพื่อปรับแก้แบบจำลองโดยได้ปรับเทียบปริมาณน้ำของโครงข่าย ปรับเทียบแรงดันที่จุดเครื่องวัด และปรับรูปแบบของการใช้น้ำที่จุดเครื่องวัด พื้นที่ใ้เฝ้าระวังน้ำสูญเสีย รวมถึงปรับแก้การตั้งค่าวาล์วประคบน้ำ ทั้งหมดนี้ทำโดยวิธีการลองผิดลองถูกด้วยการปรับค่าสัมประสิทธิ์น้ำสูญเสีย ผลหลังการปรับแก้ได้ค่าสัมประสิทธิ์น้ำสูญเสียของทั้งโครงข่าย เท่ากับ 2.249821

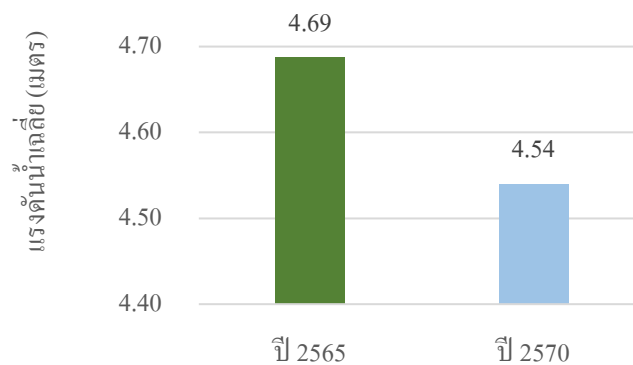
จากปรับเทียบค่าอัตราการไหลเฉลี่ย ค่าจากแบบจำลองเท่ากับ 25,837.353 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ส่วนค่าจริงในสนาม 25,837.348 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.0002 คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 3.317 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 3.829 และค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น เท่ากับ 0.99 สำหรับผลการสอบเทียบแรงดันน้ำตามจุดเครื่องวัด ประกอบด้วย จุดเครื่องวัดพื้นที่ใ้เฝ้าระวังน้ำสูญเสียทั้ง 101 จุด และจุดเครื่องวัดมิเตอร์หลักท่อประปาทั้ง 10 จุด ด้วยการปรับ Throttle Control Valve (TCV) ในท่อประปาและการปรับ Pressure Reducing Valve (PRV) บริเวณจุดเครื่องวัดพื้นที่ใ้เฝ้าระวังน้ำสูญเสีย ผลที่ได้จากการปรับเทียบแบบจำลองกับค่าในสนาม คือได้ค่าความแตกต่างของแรงดันเฉลี่ย เป็น 0.15 เมตร ความคลาดเคลื่อนเป็นร้อยละ 3.04 คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน คือ 0.289 รากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 0.653 และค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น เท่ากับ 0.946 ผลการปรับเทียบแสดงว่าแบบจำลองอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

จากการคาดการณ์ปริมาณการใช้น้ำในพื้นที่ฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา สำหรับปี พ.ศ. 2570 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2565 ร้อยละ 7.34 ผู้ศึกษาได้นำแบบจำลองระบบของ P. Hongsa and M. Wichiansin [4] ที่ได้ปรับเทียบแล้วข้างต้น มาประยุกต์ใช้ศึกษากรณีที่ต้องการปรับปรุงระบบสูบน้ำประปาในพื้นที่ฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งเป็นพื้นที่บริการสาขามหาสวัสดิ์ และบางบัวทอง

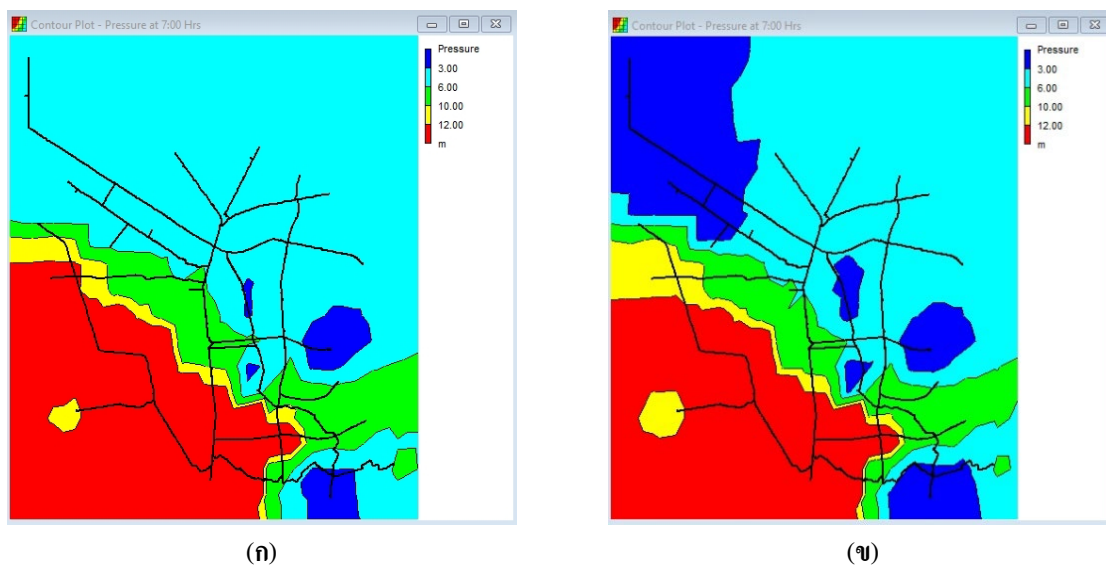
จากการนำแบบจำลองดังกล่าวมาปรับเพิ่มความต้องการใช้น้ำให้เพิ่มขึ้นจากเดิมตามค่าที่การประปานครหลวงได้คาดการณ์ คือ ร้อยละ 7.34 เพื่อศึกษาผลกระทบ

ต่ออิทธิพลของแรงดันน้ำในพื้นที่ แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกราฟแสดงปริมาณแรงดันน้ำเฉลี่ยทั้งระบบ และกราฟระดับชั้นของแรงดันน้ำในพื้นที่ ณ ช่วงเวลา 7.00 น. (peak hour) ผลปรากฏว่าในกรณีที่การประปาฯ หลวงไม่ดำเนินการใดๆ ตลอดระยะเวลา 5 ปี จากการวิเคราะห์ ผลปรากฏว่าแรงดันน้ำเฉลี่ยทั้งระบบเปลี่ยนแปลงจาก 4.69 เมตร เป็น 4.54 เมตร ซึ่งลดลงไป 0.15 เมตร คิดเป็นร้อยละ 3.20 ดังรูปที่ 3 และจากผลการแสดงกราฟแบ่งตามระดับชั้นของแรงดันน้ำในพื้นที่ ดังรูปที่ 4 ซึ่งเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองก่อนและหลังการเพิ่มความต้องการใช้น้ำพบว่าพื้นที่ทางตอนบนของแบบจำลองเกิดการขยายตัว

ของพื้นที่น้ำไหลอ่อน เนื่องจากมีพื้นที่ที่แรงดันน้ำต่ำกว่า 3 เมตร เพิ่มมากขึ้น สาเหตุเพราะเป็นพื้นที่ที่อยู่บริเวณปลายท่อ และอยู่ห่างไกลจากโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ ซึ่งเป็นจุดน้ำเข้าหลักของพื้นที่ศึกษา อีกทั้งไม่มีจุดน้ำเข้าในบริเวณดังกล่าว ดังนั้นจึงได้นำแบบจำลองมาทดลองด้วยการเพิ่มโรงสูบน้ำไปยังพื้นที่ตอนบนบริเวณปลายท่อของโครงข่ายท่อประปา ซึ่งในการนี้การเพิ่มโรงสูบน้ำในพื้นที่ศึกษาจึงเป็นอีกหนึ่งแนวทางในแผนระยะสั้นเพื่อปรับปรุงพัฒนาระบบโครงข่ายท่อประปา เพื่อรองรับการขยายตัวอย่างรวดเร็วของเศรษฐกิจและสังคม รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบสูบน้ำประปา



รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบแรงดันน้ำเฉลี่ย พ.ศ. 2565 และ พ.ศ. 2570 หลังจากการเพิ่มปริมาณการใช้น้ำร้อยละ 7.34



รูปที่ 4 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณแรงดันน้ำตามระดับชั้น ณ เวลา 7.00 น. (peak hour) ระหว่างปี (ก) พ.ศ. 2565 และ (ข) พ.ศ. 2570

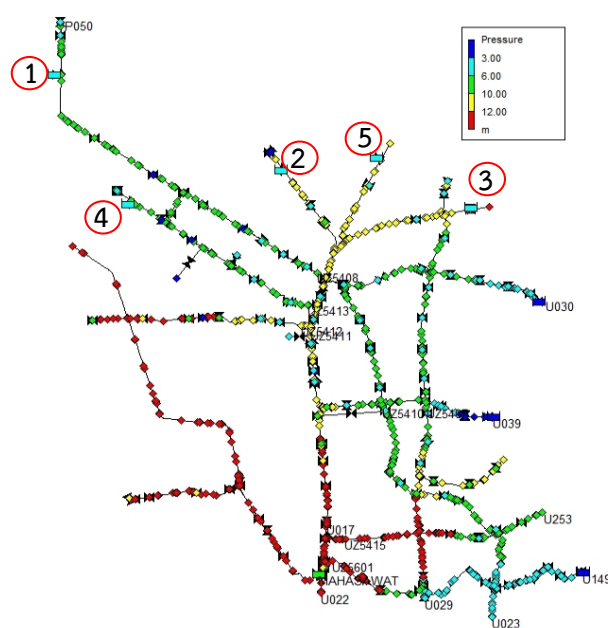
5. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการดำเนินการวิจัย ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองทำให้ทราบว่าในอีก 5 ปีข้างหน้าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้น้ำ ในตอนบนของพื้นที่ศึกษาจะเกิดพื้นที่น้ำไหลอ่อน คือ มีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นของพื้นที่แรงดันน้ำต่ำกว่า 3 ม. ดังนั้นจึงพิจารณาให้มีการปรับปรุงระบบโครงข่ายท่อประปา โดยการเลือกบริเวณที่จะเพิ่มโรงสูบน้ำที่เหมาะสมที่สุด โดยการกำหนดให้ตำแหน่งที่จะเพิ่มโรงสูบน้ำอยู่ในบริเวณตอนบนของพื้นที่ศึกษา และเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดจากทั้งหมด 5 ตำแหน่ง คือ 1. บริเวณถนนบางกรวย-ไทรน้อย กม. 28 + 400.00 2. ถนนทางหลวงหมายเลข 340 (บางบัวทอง-สุพรรณบุรี) กม. 4+500.00 3. บริเวณถนนทางหลวงหมายเลข 345 กม.5+735.00 4. บริเวณถนน รพช.นบ.3001 (บ้านกล้วย-ไทรน้อย) ผังตรงข้ามหมู่บ้านดิเอ็มดินัน และ 5. ถนนกาญจนาภิเษก(วงแหวนรอบนอกด้านตะวันตก) กม. 53+230.00 โดยตำแหน่งระบุบนโครงข่ายได้ **ดังรูปที่ 5** ส่วนในการกำหนดค่าแรงดันน้ำที่โรงสูบน้ำของ EPANET จะต้องกำหนดแรงดันที่โรงสูบน้ำเป็นแรงดันคงที่ และกำหนดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยรูปแบบตัวคูณแรงดัน ในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมต้องกำหนดให้เป็นค่าเท่ากันทั้ง 5 ตำแหน่ง ซึ่งในการทดสอบแบบจำลองได้เลือกใช้รูปแบบค่าตัวคูณแรงดันน้ำในแต่ละช่วงเวลาของโรงสูบน้ำเพชร

เกษม ซึ่งเป็น โรงสูบน้ำที่มีอิทธิพลต่อแรงดันน้ำบริเวณพื้นที่
ฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา แสดงดังตารางที่ 1

จากการวิเคราะห์แบบจำลองภายหลังการเพิ่มตำแหน่งที่ตั้งของโรงสูบน้ำโดยทดสอบแบบจำลองให้มีการสูบน้ำที่ละตำแหน่งจากทั้ง 5 ตำแหน่ง เพื่อพิจารณาคำแนะนำโรงสูบน้ำที่เหมาะสมที่สุดในพื้นที่ศึกษา ด้วยการพิจารณาจากกราฟแท่งเปรียบเทียบแรงดันน้ำเฉลี่ยทั้งระบบที่ลดลงจากการเพิ่มความต้องการใช้น้ำ กับแรงดันน้ำเฉลี่ยใหม่ภายหลังเพิ่มโรงสูบน้ำในแต่ละตำแหน่ง โดยแสดงผลเป็นกราฟ ดังรูปที่ 6 ประกอบกับการพิจารณาข้อมูลกราฟระดับชั้นของแรงดันน้ำ โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอิทธิพลแรงดันน้ำจากการทดสอบการจ่ายน้ำของโรงสูบน้ำที่ละตำแหน่งจากทั้ง 5 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 7 พบว่าตำแหน่งของโรงสูบน้ำตำแหน่งที่ 3 ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณถนนทางหลวงหมายเลข 345 กม. 5+735.00 เป็นตำแหน่งที่มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ให้ค่าแรงดันน้ำเฉลี่ยทั้งระบบสูงที่สุด คือ 4.91 เมตร และมีผลของการกระจายแรงดันน้ำในพื้นที่ได้ดีที่สุด

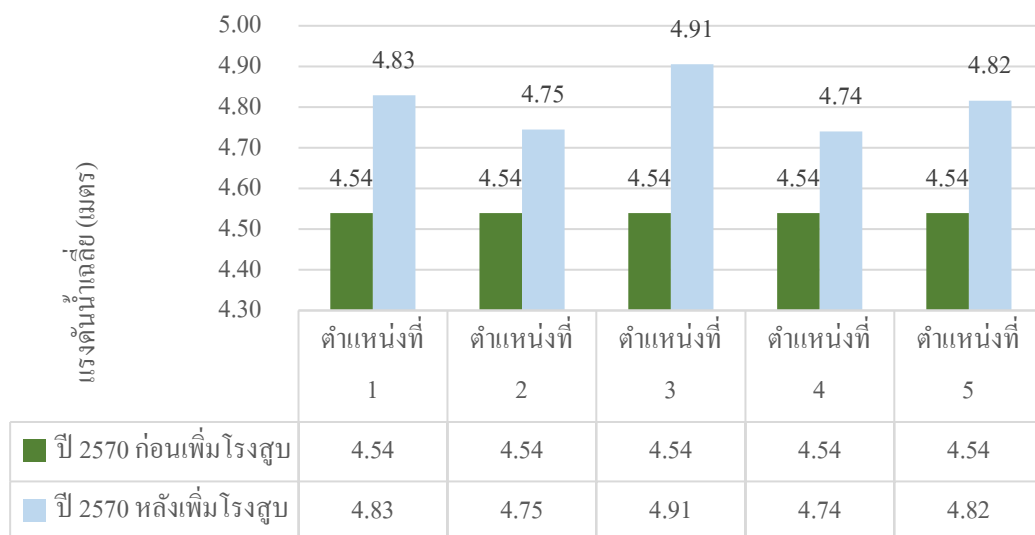
อีกหนึ่งข้อสังเกต เนื่องจากลักษณะของท่อประปาที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย จึงทำให้ตำแหน่งที่ 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ในบริเวณกึ่งกลางของพื้นที่แรงดันน้ำต่ำ ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดการกระจายแรงดันน้ำไปยังปลายท่อบริเวณโดยรอบได้ดีกว่าตำแหน่งอื่น



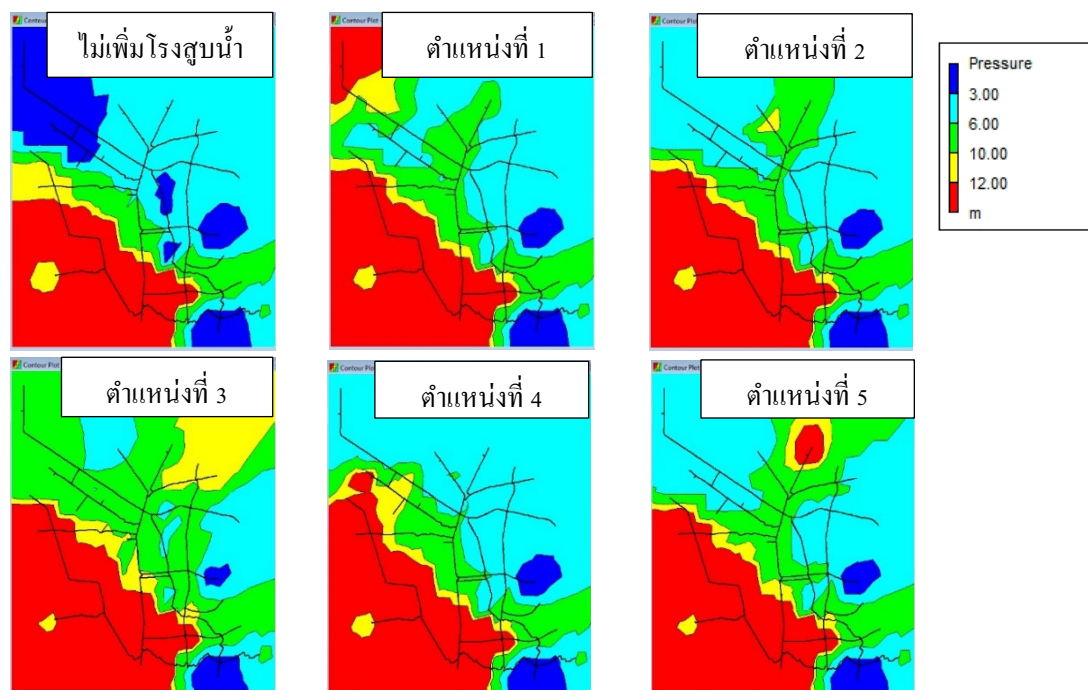
รูปที่ 5 ตำแหน่งที่กำหนดเพื่อทดสอบตั้งโรงสูบน้ำ 5 ตำแหน่ง

ตารางที่ 1 รูปแบบค่าตัวคูณแรงดันน้ำในแต่ละช่วงเวลาของโรงสูบน้ำเพชรเกษม

Hour	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00
Pattern	0.39	0.37	0.35	0.35	0.42	0.62	1.14	1.65	1.70	1.64	1.49	1.27
Hour	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00
Pattern	1.03	0.89	0.85	0.86	0.93	1.16	1.35	1.33	1.30	1.16	0.97	0.78



รูปที่ 6 กราฟแท่งเปรียบเทียบแรงดันน้ำเฉลี่ยของแบบจำลองปี 2570 และภายหลังจากเพิ่มโรงสูบน้ำ 5 ตำแหน่ง



รูปที่ 7 กราฟระดับชั้นเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอิทธิพลแรงดันน้ำในปี 2570 ในกรณีไม่เพิ่มโรงสูบน้ำและกรณีเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมของโรงสูบน้ำจากทั้งหมด 5 แห่ง

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ระบบจ่ายน้ำประปาและให้ข้อเสนอแนะแก่การประปานครหลวงในการเตรียมพร้อมรองรับความต้องการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้นในระยะเวลา 5 ปี คือเปรียบเทียบปริมาณความต้องการใช้น้ำของปี พ.ศ.2565 และ พ.ศ.2570 โดยการหาแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพเพื่อจัดเตรียมแผนโครงการบุคลากร และงบประมาณ เพื่อรับมือกับการเปลี่ยนแปลงนี้ การศึกษานี้วิเคราะห์โครงข่ายท่อประปาโดยใช้แบบจำลองที่ปรับเทียบด้วยข้อมูลเดือนธันวาคมปี พ.ศ.2564 สามารถจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นกับระบบโครงข่ายท่อประปาได้อย่างเหมาะสม การศึกษานี้ได้เสนอวิธีการเพิ่มโรงสูบน้ำในพื้นที่ และหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด 1 จาก 5 ตำแหน่ง ด้วยตัวชี้วัดที่เป็นปริมาณแรงดันน้ำเฉลี่ย และกราฟระดับชั้นของการกระจายตัวแรงดันน้ำ

เมื่อนำค่าประมาณการความต้องการใช้น้ำในอนาคตมาตรวจสอบพบว่า หลังการเพิ่มปริมาณความต้องการใช้น้ำทำให้แรงดันเฉลี่ยทั้งระบบลดลงจาก 4.69 เมตร เป็น 4.54 เมตร ทั้งนี้ การเพิ่มโรงสูบน้ำในระบบเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถปรับปรุงระบบโครงข่ายท่อประปา โดยหากวิเคราะห์หาตำแหน่งตั้งโรงสูบน้ำพบว่าภายหลังการทดสอบเพิ่มโรงสูบน้ำแห่งใหม่ที่ 5 ตำแหน่ง คือ 1. บริเวณถนนบางกรวย-ไทรน้อย กม. 28+400.00 2. ถนนทางหลวงหมายเลข 340 (บางบัวทอง-สุพรรณบุรี) กม. 4+500.00 3. บริเวณถนนทางหลวงหมายเลข 345 กม.5+735.00 4. บริเวณถนน รพช.นบ. 3001 (บ้านกล้วย-ไทรน้อย) สี่ตรงข้ามหมู่บ้านดิแฮมินตัน และ 5.ถนนกาญจนาภิเษก (วงแหวนรอบนอกด้านตะวันตก) กม.53+230.00 สรุปได้ว่า การเพิ่มโรงสูบน้ำที่ ตำแหน่งที่ 3 (บริเวณถนนทางหลวงหมายเลข 345 กม.5+735.00) เป็นตำแหน่งที่มีประสิทธิภาพที่สุด เนื่องจากสามารถเพิ่มแรงดันน้ำเฉลี่ยทั้งพื้นที่ได้มากที่สุด รวมถึงได้ผลของการกระจายแรงดันน้ำในพื้นที่ได้ดีที่สุด

7. ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้พิจารณาเฉพาะในแง่วิศวกรรม หากดำเนินการจริงสมควรประเมินความเหมาะสมของโครงการในด้านอื่นร่วมด้วย เช่น ความสะดวกในการเวนคืนตาม

ข้อกำหนดกฎหมายการใช้ประโยชน์ที่ดิน มูลค่าการลงทุนในการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำจากโรงงานผลิตน้ำมายังสถานีนั้นๆ และการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ และการเงินของทางเลือกนั้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] *Water Distribution Control Department: Power BI Water Distribution Data*, Metropolitan Waterworks Authority, 2021 [Online]. Available: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiaNjRIODkzNmUyYTBhYi00ZjY2LTgzMzAtMDAwMDQzNjRjOTg5IiwidCI6IjhlYzZzMzMGU1LTJfJmJmUjNGQ1Yi05Nzg2LW1Nzk4MjFjNmM3NCIsImMiOiJEWfQ%3D%3D&pageName=ReportSection>.
- [2] Metropolitan Waterworks Authority, "MWA 20 years management plan," Metropolitan Waterworks Authority, Thailand, Final Rep., 2020.
- [3] Metropolitan Waterworks Authority, "Water Distribution Pumping Station Annual Report, 2017– 2022," Metropolitan Waterworks Authority, Thailand, Final Rep., 2022.
- [4] P. Hongsa and M. Wichiensin, "Water Distribution Model of Metropolitan Waterworks Authority," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 46, no. 1, pp. 67–79, 2023, doi: 10.14456/kmuttrd.2023.5.
- [5] E. Todini and S. Pilati, "A gradient algorithm for analysis of pipe networks," in *Computer Applications in Water Supply*, Taunton, United Kingdom: Research Studies Press Ltd, 1988, ch. 1, pp. 1–20.
- [6] A. L. Simon and S. F. Korom, "Flow in Pipes," in *Hydraulics*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1997, ch. 4, sec. 4.5, pp. 130–173.
- [7] N. Sanyasiri, "Water Distribution System Modeling for Metropolitan Waterworks Authority's West Bank by EPANET Mathematical Model," M. S. Thesis, Water Resour. Eng. Dept., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2003.

-
- [8] S. Lapprasert, "Pipe Network Modeling for MWA Thungmahamek Branch Office by EPANET," M.S. Thesis, Water Resour. Eng. Dept., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2003.
- [9] P. Kalantranon, "Pipe Network Analysis by EPANET 2.0 Mathematical Model case study for MWA Nonthaburi Branch Office," M.S. Thesis, Water Resour. Eng. Dept., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2011.
- [10] S. Uaybhorn, "Analysis of Water Pressure Problems in Waterworks Pipeline using EPANET 2.0 Mathematical Model," M.S. Thesis, Eng. Manag. Dept., Dhurakit Pundit Univ., Bangkok, Thailand, 2017.
- [11] C. Wongtham, "Study on EPANET Model Application for main pipe network in Phaya Thai Branch Office of Metropolitan Waterworks Authority," M.S. Thesis, Water Resour. Eng. Dept., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2018.
- [12] P. Saiklai, "Pipe Network Modeling for PWA Samutsakorn Waterworks Office by EPANET 2.0 Mathematical Model," M.S. Thesis, Water Resour. Eng. Dept., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2008.