ดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนสำหรับระบบประปา

CHLORINE RESILIENCE INDEX FOR WATER DISTRIBUTION NETWORKS

พรนภัส คงบูชาเกียรติ[1,*], อดิชัย พรพรหมินทร์[1] และ สุรชัย ลิปิวัฒนาการ[1]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร
[*]Corresponding author address: pornnapus.ko@ku.th

บทคัดย่อ

คลอรีนเป็นหนึ่งในสารเคมีที่นิยมใช้ในระบบจ่ายน้ำประปา เนื่องด้วยความสามารถในการคงอยู่ในระบบ ที่ช่วยป้องกันเชื้อโรค โดยมีค่าต่ำสุดที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลกให้ไม่น้อยกว่า 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ค่าที่มากเกินไปจะส่งผลให้น้ำประปามีกลิ่น และรสคลอรีน รวมทั้งอาจก่อให้เกิดสารก่อมะเร็ง การพิจารณาค่าคลอรีนจากค่าดัชนีทำให้การบริหารจัดการดีขึ้น ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอดัชนีความยืดหยุ่นด้านคลอรีนในระบบจ่ายน้ำประปา โดยนำมาประยุกต์กับพื้นที่จ่ายน้ำประปา DMA170605 ในสำนักงานประปา สาขาสมุทรปราการ ผลการศึกษาพบว่าค่าดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนในภาพรวมมีค่าเท่ากับ 0.77 แสดงว่าในพื้นที่นี้มีคลอรีนอยู่ที่ระดับ 77% ของปริมาณที่เหมาะสม และเมื่อพิจารณาค่าดัชนียืดหยุ่นของคลอรีนตามเวลาพบว่ามีค่าผันแปรอยู่ระหว่าง 0.67 และ 0.84 โดยที่ในช่วง 01.00-04.00 น. เป็นช่วงที่มีค่าความยืดหยุ่นต่ำ เนื่องจากเป็นช่วงที่จ่ายคลอรีนค่อนข้างต่ำ และเมื่อทำการทดสอบกรณีไม่มีน้ำสูญเสียพบว่าค่าดัชนีความยืดหยุ่นในภาพรวมมีค่าเท่ากับ 0.49 ลดลง 0.28 (36%) ค่าดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนตามเวลาลดลงเหลืออยู่ระหว่าง 0.39 และ 0.56 แสดงว่าการลดลงของน้ำสูญเสียมีผลทำให้ดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนต่ำลง ซึ่งทำให้ผู้ใช้น้ำอาจมีความเสี่ยงต่อเชื้อโรคมากขึ้น เนื่องจากอายุน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำสูญเสียน้อยลง ดังนั้นเมื่อมีกิจกรรมการลดน้ำสูญเสียหลักในพื้นที่จ่ายน้ำประปาอาจจำเป็นต้องพิจารณาการจ่ายคลอรีนเข้าพื้นที่ใหม่ เพื่อให้ความเข้มข้นของคลอรีนอยู่ในระดับที่เหมาะสม

***คำสำคัญ**: ดัชนีความยืดหยุ่น, คลอรีน, ระบบจ่ายน้ำประปา*

Abstract

Chlorine is one of the most used chemicals in water distribution systems because of its residual capability to protect against contamination. World health organization recommends a minimum chlorine concentration of 0.2 mg/L in the water distribution systems. However, the excessive chlorine concentration can cause unpleasant odor and taste and potentially cause cancers. Management of chlorine concentration through index is better and easier to understand. This research aimed to propose a chlorine resilience index (CRI) for water distribution systems. We applied the index to a district metering area (DMA170605) in the Samutprakarn branch. The results showed that the overall CRI value of the DMA was 0.77. The 0.77 value indicated that this DMA had chlorine mass at 77% of the appropriate level. For temporal CRI, we found that the CRI values varied between 0.67 and 0.84. The CRI values were low during 01.00-04.00 because chlorine feeding was low during the nighttime. For the case of without water loss, we found that the CRI value was 0.49, a decrease of 0.28 (36%) from the DMA with water loss. Temporal CRIs were dropped to be between 0.39 and 0.56. This implied that water loss reduction could decrease the chlorine resilience index, which may expose users to higher risks of contamination. This is due to the increasing of water ages with decreasing water loss. Therefore, whenever there are extensive water loss reduction activities in the water distribution systems, it is necessary to reconsider chlorine feeding into the system to have an appropriate chlorine concentration level.

***Keywords:** Resilience Index, Chlorine, Water distribution systems*

1. คำนำ

ระบบประปาเป็นระบบสาธารณูปโภคพื้นฐานที่ขาดไม่ได้ โดยระบบจ่ายน้ำเป็นส่วนหนึ่งของระบบประปา ซึ่งระบบจ่ายน้ำที่ดีควรคำนึงถึงปริมาณน้ำที่จ่าย แรงดันที่เพียงพอ และคุณภาพน้ำที่ดี โดยปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในระบบจ่ายน้ำคือ น้ำสูญเสีย แรงดันต่ำ และคุณภาพน้ำที่ไม่ดี [1] สำหรับปัญหาคุณภาพน้ำจะนิยมใช้คลอรีนที่ใช้เป็นสารในการกำจัดเชื้อโรคในน้ำเป็นตัวควบคุมคุณภาพน้ำ โดยที่ระบบจ่ายน้ำควรออกแบบให้น้ำมีการหมุนเวียนในระบบมากที่สุด และให้น้ำมีอายุน้ำในท่อที่น้อยที่สุด [2] เนื่องจากการสลายตัวของคลอรีนนั้นขึ้นอยู่กับอายุของน้ำ เมื่ออายุน้ำเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้

ปริมาณคลอรีนคงเหลืออิสระก็จะลดลง ซึ่งอาจทำให้ผู้ใช้น้ำบางส่วนได้รับน้ำที่มีความเข้มข้นคลอรีนคงเหลืออิสระต่ำกว่ามาตรฐานขององค์กรอนามัยโลก คือ ไม่น้อยกว่า 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร [3] ทำให้มีเชื้อโรคและสารปนเปื้อนตกค้างอยู่ในน้ำ แต่หากความเข้มข้นคลอรีนคงเหลืออิสระสูงเกินไปจะทำให้น้ำมีรสชาติ และกลิ่นคลอรีน รวมทั้งอาจก่อให้เกิดสารพลอยได้ที่ก่อให้เกิดมะเร็ง

การพิจารณาค่าคลอรีนจากความเข้มข้นเพียงอย่างเดียว อาจไม่สามารถบ่งบอกถึงสถานะของคลอรีนในระบบจ่ายน้ำ ดังนั้นการใช้ค่าดัชนีเข้ามาช่วยจะทำให้การบริหารจัดการดีขึ้น อย่างไรก็ตามยังไม่มีดัชนีด้านคลอรีนโดยตรง แต่หนึ่งในดัชนีที่นิยมใช้ คือดัชนีความยืดหยุ่น (Resilience Index) [4] ซึ่งเป็นดัชนีความยืดหยุ่นที่พิจารณาสัดส่วนของพลังงานทางชลศาสตร์ส่วนเกินและพลังงานชลศาสตร์ที่มีอยู่ ซึ่งสามารถบอกถึงความยืดหยุ่นของระบบด้านชลศาสตร์ เมื่อมีเหตุการณ์ล้มเหลว

งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีน (Chlorine Resilience Index, CRI) จากดัชนีความยืดหยุ่นด้านชลศาสตร์ (Resilience Index) โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อวิเคราะห์ความยืดหยุ่นของคลอรีนในระบบจ่ายน้ำ และผลกระทบของน้ำสูญเสียต่อความยืดหยุ่นของคลอรีน

2. ดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีน

ดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีน (Chlorine Resilience Index, CRI) พัฒนามาจากดัชนีความยืดหยุ่นทางชลศาสตร์ (Resilience Index, I_r) โดยที่ดัชนีความยืดหยุ่นทางชลศาสตร์เป็นดัชนีที่พิจารณาพลังงานทางชลศาสตร์ส่วนเกินในรูปของสัดส่วนของพลังงานชลศาสตร์ที่มีอยู่ โดยพลังงานทางชลศาสตร์ส่วนเกินนี้สามารถใช้เพื่อบ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือทางชลศาสตร์ของโครงข่ายน้ำประปาได้ [4] ดังแสดงสมการที่ (1)

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} q_i^*(h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^{n_r} Q_k H_k - \sum_{i=1}^{n_n} q_i^* h_i^*} \quad (1)$$

โดยค่า q_i^* และ h_i^* คือ อัตราการใช้น้ำ (ลบ.ม./ชม.) และเฮด (ม.) ขั้นต่ำของผู้ใช้น้ำรายที่ i ตามลำดับ และ h_i คือ เฮด (ม.) ของผู้ใช้น้ำรายที่ i โดย n_n คือ จำนวนผู้ใช้น้ำทั้งหมด Q_k และ H_k ค่าอัตราการไหล (ลบ.ม./ชม.) และเฮด(ม.) ที่จ่ายเข้าพื้นที่ลำดับที่ k ตามลำดับ n_r คือ จำนวนแหล่งจ่ายน้ำเข้าพื้นที่

ดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีน (Chlorine Resilience Index, CRI) พัฒนาโดยเปลี่ยนค่าพลังงานเป็นปริมาณของคลอรีนในระบบจ่ายน้ำประปา ทำให้ค่า CRI บ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือของปริมาณคลอรีนส่วนเกินที่เอาไว้สำหรับรองรับระบบเมื่อเกิดปัญหาท่อประปาแตกรั่ว ดังแสดงสมการที่ (2)

$$CRI = \frac{\sum_{t=1}^{24}\sum_{i=1}^{n} Q_{i,t}C_{i,t} - \sum_{t=1}^{24}\sum_{i=1}^{n} Q_{i,t}C_{min}}{\sum_{t=1}^{24}\sum_{i=1}^{n} Q_{i,t}C_{target} - \sum_{t=1}^{24}\sum_{i=1}^{n} Q_{i,t}C_{min}} \quad (2)$$

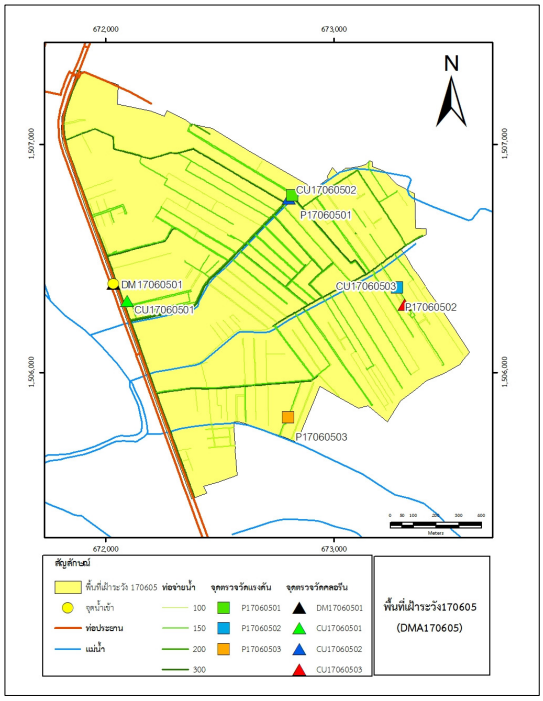
เมื่อค่า $Q_{i,t}$ และ $C_{i,t}$ คือ อัตราการใช้น้ำ (ลบ.ม./ชม.) และความเข้มข้นของคลอรีนคงเหลืออิสระ (มก./ล.) ของผู้ใช้น้ำรายที่ i ที่ชั่วโมง t ตามลำดับ n คือ จำนวนผู้ใช้น้ำทั้งหมด ค่า C_{min} คือ ค่าความเข้มข้นของคลอรีนคงเหลืออิสระต่ำสุด กำหนดให้เท่ากับ 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร ตามมาตรฐานองค์การอนามัยโลก [3] และ C_{target} คือ ค่าเป้าหมายของความเข้มข้นของคลอรีนคงเหลืออิสระ ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 0.6 มิลลิกรัม/ลิตร ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มของประเทศออสเตรเลีย [5] เนื่องจากเป็นค่าสูงสุดที่ไม่เกิดกลิ่นและรสคลอรีนในน้ำประปา

ค่า CRI ที่น้อยกว่า 0 แสดงว่าระบบจ่ายน้ำมีปริมาณคลอรีนโดยรวมน้อยกว่าค่าต่ำสุด และไม่มีความน่าเชื่อถือ ค่า CRI ที่ใกล้ 0 หมายถึง ค่าความเข้มข้นของคลอรีนคงเหลืออิสระเฉลี่ยเข้าใกล้ระดับความปลอดภัยต่ำสุด และค่าที่ใกล้ 1 หมายถึง ความเข้มข้นของคลอรีนคงเหลืออิสระเฉลี่ยเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย อย่างไรก็ตามค่าที่มากกว่า 1 แสดงว่าปริมาณคลอรีนคงเหลืออิสระสูงกว่าค่าเป้าหมาย ทั้งนี้เนื่องจากค่าคลอรีนสูงสุดที่ปลอดภัยกำหนดโดย US EPA คือ 4.0 มิลลิกรัม/ลิตร [6] ทำให้ค่า CRI ไม่ควรเกิน 9.5

3. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ คือ พื้นที่เฝ้าระวัง DMA170605 ของสำนักงานประปาสาขาสมุทรปราการ เป็นพื้นที่ที่มีแรงดันต่ำ โดยแรงดันเฉลี่ยที่เข้าพื้นที่คือ 7.14 เมตร มีการส่งน้ำเข้าพื้นที่ 1 จุด (DM17060501) ดังแสดงรูปที่ 1 มีพื้นที่ให้บริการ 1.76 ตารางกิโลเมตร ผู้ใช้น้ำ 4,812 ราย น้ำจ่ายเข้าพื้นที่ 354,888 ลบ.ม./เดือน น้ำขาย 137,640 ลบ.ม./เดือน และน้ำสูญเสียเท่ากับ 217,248 ลบ.ม./เดือน (61.22%) และมีความยาวท่อจ่ายน้ำรวม 51.12 กิโลเมตร โดยท่อส่วนใหญ่เป็นท่อชนิด PVC คิดเป็นความยาวรวม 39.88 กิโลเมตร ซึ่งเป็น 78.01% ของความยาวท่อทั้งหมด

พื้นที่เฝ้าระวัง DMA170605 มีการสำรวจค่าแรงดันภาคสนามจำนวน 3 จุด และสำรวจค่าปริมาณคลอรีนคงเหลืออิสระ จำนวน 3 จุด จุดตรวจวัดแรงดันในพื้นที่แสดงด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยม ได้แก่ จุด P17060501 P17060502 และ P17060503 โดยในการตรวจวัดใช้อุปกรณ์ Pressure Data Logger รุ่น PrimeLog 1P และ PrimeLog 2i ซึ่งเป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูลแรงดัน ส่วนจุดตรวจวัดค่าปริมาณคลอรีนคงเหลืออิสระ แสดงด้วยสัญลักษณ์สามเหลี่ยม โดยมีการตรวจวัดที่จุดน้ำเข้าจำนวน 1 จุด ได้แก่ จุด DM17060501 และตรวจวัดภายในพื้นที่ 3 จุด ได้แก่ จุด CU17010501 CU17060502 และ CU17060503 โดยใช้เครื่องวัดคลอรีน (Free Chlorine Meter) Hanna รุ่น HI 701 ซึ่งวันที่ทำการสำรวจค่าคือ วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2562

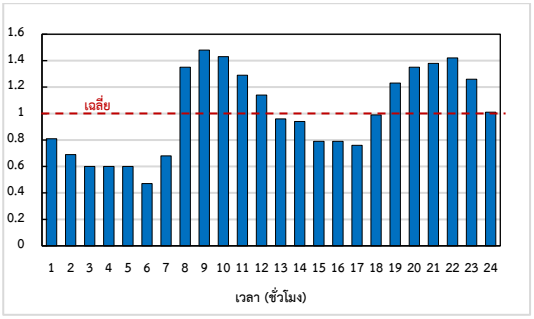


รูปที่ 1 พื้นที่เฝ้าระวัง DMA170605

4. วิธีการ

4.1. การจำลองระบบโครงข่ายท่อประปา

การจำลองระบบโครงข่ายท่อประปา ได้ใช้โปรแกรม EPANET [7] โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานของการประปานครหลวง ได้แก่ ข้อมูลการใช้น้ำรายเดือนมาเฉลี่ยเป็นการใช้น้ำรายชั่วโมง ข้อมูลมาตรผู้ใช้น้ำ ข้อมูลเส้นท่อ ข้อมูลการจ่ายน้ำ และแรงดัน และข้อมูลรูปแบบการใช้น้ำรายชั่วโมง (Demand Pattern) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณอัตราการใช้น้ำของผู้ใช้แต่ละประเภทใน 1 วัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1 แสดงดังในรูปที่ 2 และจะต้องทำการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน



รูปที่ 2 ตัวอย่างรูปแบบการใช้น้ำรายชั่วโมง (Demand Pattern) ของผู้ใช้น้ำประเภทบ้านพักอาศัย

4.1.1. การสอบเทียบแบบจำลองด้านชลศาสตร์

การสอบเทียบแบบจำลองด้านชลศาสตร์ เป็นการสอบเทียบอัตราการไหล และแรงดันน้ำ เพื่อให้สามารถจำลองโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำได้เหมือนกับพื้นที่ศึกษามากที่สุด ซึ่งจะนำมาสอบเทียบกับจุดตรวจวัดแรงดันในพื้นที่ ตัวแปรที่ใช้ในการปรับแก้แบบจำลองด้านอัตราการไหล คือรูปแบบความต้องการใช้น้ำ (Demand Pattern) และปริมาณน้ำสูญเสีย โดยปรับให้ปริมาณการใช้น้ำรวมน้ำสูญเสียในแต่ละชั่วโมงรวมกันเท่ากับปริมาณน้ำจ่ายเข้าพื้นที่ ทั้งนี้สัมประสิทธิ์น้ำสูญเสียจากท่อรั่ว (Emitter Coefficient, C) จะอาศัยสมการ

$$Q = CP^{N_1} \tag{3}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลรั่ว (ลบ.ม./ชม.) C คือ สัมประสิทธิ์น้ำสูญเสียจากท่อรั่ว P คือ แรงดันน้ำ (ม.) และ N_1 คือ Leakage Exponent ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 1 [8] หลังจากปรับแก้อัตราการไหลจนได้ค่าที่ใกล้เคียงจุดตรวจวัดแล้ว จึงปรับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระเส้นท่อ โดยการปรับแก้ค่า C ในสมการที่ (3) เพื่อให้ได้แรงดันที่ใกล้เคียงกับจุดที่ทำการตรวจวัด

4.1.2. การสอบเทียบแบบจำลองด้านคุณภาพน้ำ

การสลายตัวของคลอรีนคงเหลืออิสระ ในโครงข่ายท่อประปามักจะเกิดการสลายตัวด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First Order Kinetics) โดยแบบจำลองจะคำนวณปฏิกิริยาคลอรีน (Reaction rate, R) ดังสมการที่ (4)

$$R = K_b C + \frac{A}{V} K_w C \tag{4}$$

โดย K_b และ K_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสลายตัวในมวลน้ำ (Bulk Decay Coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์อัตราการทำปฏิกิริยากับผนังท่อ (Wall Reaction Rate Coefficient) ตามลำดับ A/V คือ พื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของท่อ (ม.$^{-1}$)

โดยค่า K_b ได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากรายงานของการประปานครหลวง [9] และค่า K_w ใช้เป็นตัวปรับแก้ แล้วจึงนำผลของคลอรีนคงเหลืออิสระที่ได้จากแบบจำลองมาเทียบกับผลการสำรวจในพื้นที่

ในการสอบเทียบทั้ง 2 ขั้นตอน จะนำผลการสอบเทียบมาแสดงได้จากค่าทางสถิติ 2 ค่า ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error, MAE) ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$r = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{\sqrt{n(\sum_{i=1}^{n} x_i^2) - (\sum_{i=1}^{n} x_i)^2}\sqrt{n(\sum_{i=1}^{n} y_i^2) - (\sum_{i=1}^{n} y_i)^2}} \tag{6}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |y_i - x_i|}{n} \tag{7}$$

โดยค่า x_i และ y_i คือค่าจากการตรวจวัด และค่าจากแบบจำลอง

ตามลำดับ และ n คือจำนวนค่าที่ตรวจวัด

สำหรับกรณีศึกษาที่ไม่มีน้ำสูญเสียเกิดขึ้นในโครงข่าย จะกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์น้ำสูญเสียจากท่อรั่วเท่ากับ 0 และกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของคลอรีนที่จุดจ่ายน้ำเข้าคงเดิม

4.2. การวิเคราะห์ค่าดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีน

เมื่อทำการสอบเทียบแบบจำลองทั้ง 2 ขั้นตอนแล้ว จะทำการจำลองเป็นระยะเวลา 10 วัน โดยใช้รูปแบบการใช้น้ำเดิม และนำผลค่าคลอรีนคงเหลืออิสระ จากแบบจำลอง 24 ชั่วโมงสุดท้ายมาใช้ โดยในการวิเคราะห์ค่าดัชนียืดหยุ่นของคลอรีนจะแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ สถานการณ์แบบมีน้ำสูญเสีย และไม่มีน้ำสูญเสีย และแบ่งการวิเคราะห์ออกมาดังนี้

1) กรณีวิเคราะห์แบบภาพรวม จะใช้ผลความเข้มข้นของคลอรีนคงเหลืออิสระ และค่าความต้องการใช้น้ำ (Demand) ของผู้ใช้น้ำในแต่ละรายในชั่วโมงมาคำนวณ ซึ่งจะรวมผลคูณของความต้องการใช้น้ำทุกชั่วโมงกับค่าความเข้มข้นของคลอรีนคงเหลืออิสระต่ำสุด สูงสุด และของผู้ใช้น้ำแต่ละรายในทุกชั่วโมงรวมกัน แล้วนำมาคำนวณตามสมการที่ (2) จะได้ภาพรวมดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีน 24 ชั่วโมงของพื้นที่นั้น

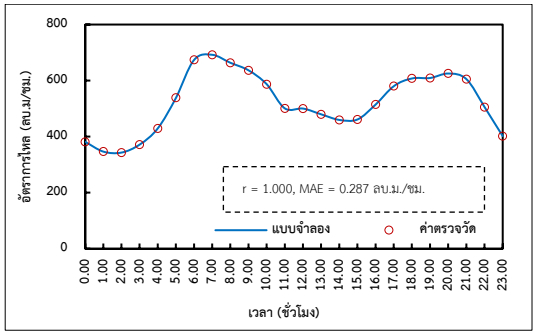
2) กรณีวิเคราะห์เป็นแบบรายชั่วโมง จะใช้ผลคูณของค่าความต้องการใช้น้ำรายชั่วโมง กับผลรวมความเข้มข้นของคลอรีนคงเหลืออิสระรายชั่วโมง ต่ำสุด และสูงสุดมาคำนวณ แล้วนำมาคิดตามสมการที่ (2)

5. ผลการศึกษา

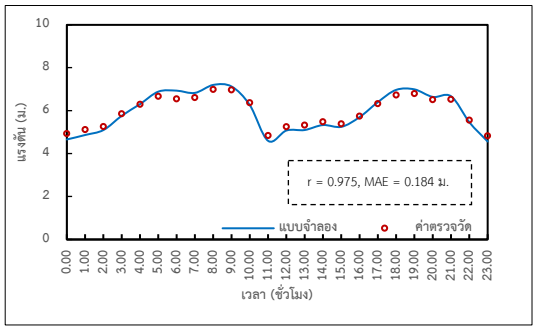
5.1. แบบจำลองระบบจ่ายน้ำประปา

5.1.1. การสอบเทียบแบบจำลองด้านชลศาสตร์

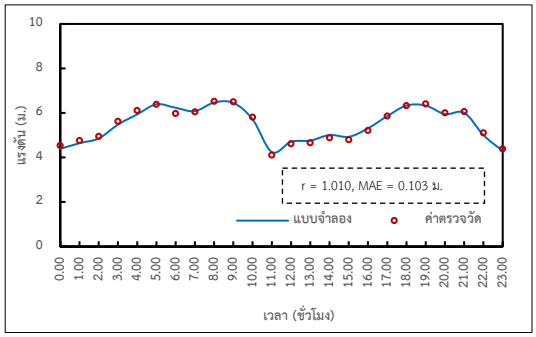
ผลจากการปรับแก้แบบจำลองด้านชลศาสตร์พบว่ากรณีศึกษาโครงข่ายท่อประปา โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การรั่วของท่อ (C) เท่ากับ 0.0060 เมตร^2/ชั่วโมง จะทำให้ได้ค่าอัตราการไหลที่จุดน้ำเข้าพื้นที่ของแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำการตรวจวัดทุกเวลา โดยพบว่ากราฟอัตราการไหลมีแนวโน้มขึ้นลงเป็นไปตามค่าที่ตรวจวัดในทุกช่วงเวลา ซึ่งค่าทางสถิติจากการสอบเทียบค่าอัตราการไหล ได้แก่ r เท่ากับ 1.000 และค่า MAE เท่ากับ 0.29 ลบ.ม./ชม. แสดงดังในรูปที่ 3 และในส่วนของค่าแรงดัน พบว่าค่าแรงดันที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 3 จุด มีค่าสอดคล้องกับค่าตรวจวัดเป็นอย่างมาก โดยกราฟมีลักษณะขึ้นลงไปในทางเดียวกัน และมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ตัวอย่างแสดงดังในรูปที่ 4



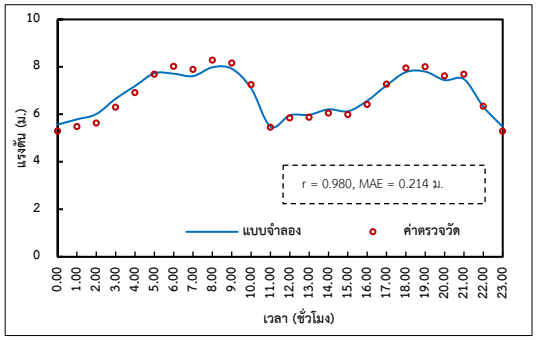
รูปที่ 3 ผลการสอบเทียบอัตราการไหลที่จุดน้ำเข้า



ก) จุด P17060501



ข) จุด P17060502



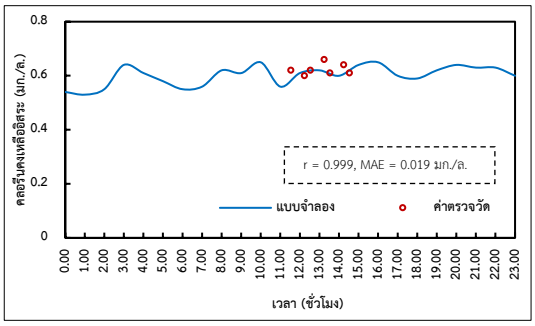
ค) จุด P17060503

รูปที่ 4 ผลการสอบเทียบแรงดัน

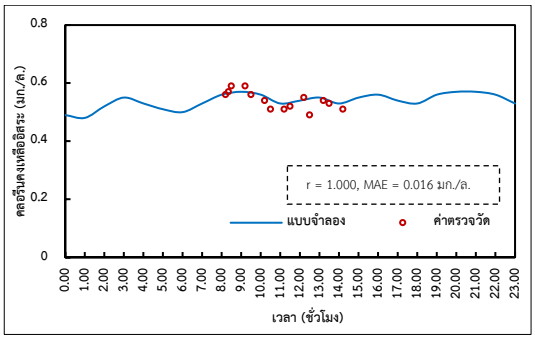
5.1.2. การสอบเทียบแบบจำลองด้านคุณภาพน้ำ

ผลที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองด้านคุณภาพน้ำ คือค่าคลอรีนคงเหลืออิสระ โดยกำหนดอัตราการสลายตัวของคลอรีนคงเหลืออิสระที่ทำปฏิกิริยากับมวลน้ำเท่ากับ -0.3769 วัน$^{-1}$ พบว่า

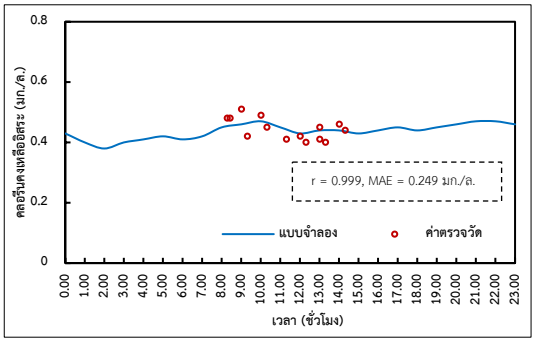
ได้ค่า K_w เท่ากับ -0.21 ม./วัน และผลการจำลองคุณภาพน้ำ พบว่าค่าความเข้มข้นคลอรีนคงเหลืออิสระที่ได้จากแบบจำลองมีลักษณะขึ้นลงใกล้เคียงกับค่าที่จุดตรวจวัดทั้ง 3 จุด โดยรูปที่ 5 แสดงผลการสอบเทียบค่าคลอรีนคงเหลืออิสระ



ก) จุด CU17060501



ข) จุด CU17060502

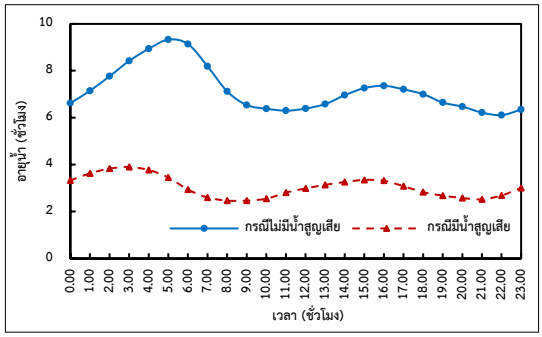


ค) จุด CU17060503

รูปที่ 5 ผลการสอบเทียบแบบจำลองด้านคุณภาพน้ำ

5.2. ผลการวิเคราะห์อายุน้ำ

อายุน้ำ คือ เวลาที่น้ำเดินทางจากจุดจ่ายน้ำ จนถึงผู้ใช้น้ำแต่ละราย โดยในที่นี้จะวิเคราะห์อายุน้ำในกรณีที่มีน้ำสูญเสีย และไม่มีน้ำสูญเสียของตำแหน่งตรวจวัดที่อยู่ไกลที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่ากรณีที่ไม่มีน้ำสูญเสีย อายุน้ำจะสูงกว่ากรณีมีน้ำสูญเสียทุกเวลา โดยอายุน้ำต่างกันเฉลี่ยเท่ากับ 4.14 ชั่วโมง ดังนั้นผลกระทบจากน้ำสูญเสียจะทำให้อายุน้ำลดลง

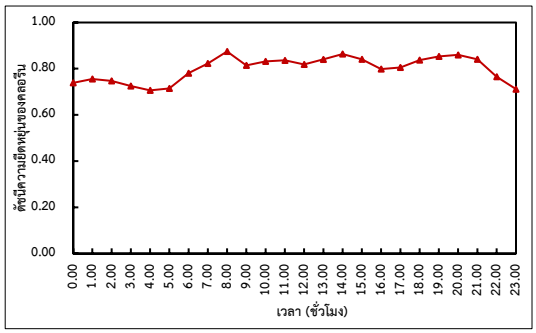


รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลจากการจำลองคุณภาพน้ำ ด้านอายุน้ำ ที่จุด CU17060503

5.3. ผลดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีน

5.2.1. ภาพรวมของพื้นที่เฝ้าระวัง

จากการคำนวณดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีน พบว่ามีภาพรวมค่าดัชนีความยืดหยุ่นเท่ากับ 0.804 หรือ 80.4% จากค่าเป้าหมายที่ต้องการ และมีค่าดัชนีความยืดหยุ่นรายชั่วโมง แสดงดังในรูปที่ 7 โดยจะเห็นว่าค่าดัชนียืดหยุ่นคลอรีนมีค่าสูงที่สุดในเวลา 8.00 น. (0.875) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำมาก และค่าดัชนียืดหยุ่นคลอรีนมีต่ำสุดในเวลา 4.00 น. (0.707) โดยมีค่าเฉลี่ยค่าดัชนียืดหยุ่นของคลอรีนในช่วงกลางวัน (6.00-22.00 น.) เท่ากับ 0.828 และเฉลี่ยในช่วงกลางคืน (23.00-5.00 น.) เท่ากับ 0.728



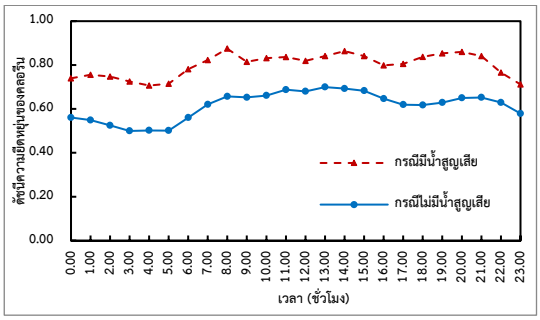
รูปที่ 7 ดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนรายชั่วโมง

5.2.2. ผลกระทบของน้ำสูญเสียต่อค่าดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีน

ในกรณีไม่มีน้ำสูญเสียพบว่ามีภาพรวมค่าดัชนีความยืดหยุ่นเท่ากับ 0.622 และจากรูปที่ 8 มีค่าสูงสุดที่เวลา 13.00 น. (0.699) และต่ำสุดที่เวลา 3.00 น. (0.499) โดยมีค่าเฉลี่ยค่าดัชนียืดหยุ่นของคลอรีนในช่วงกลางวัน (6.00-22.00 น.) เท่ากับ 0.649 และเฉลี่ยในช่วงกลางคืน (23.00-5.00 น.) เท่ากับ 0.531

ภาพรวมของกราฟทั้ง 2 กรณีจะพบว่าค่าดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนในกรณีไม่มีน้ำสูญเสียจะต่ำกว่ากรณีปกติทุกช่วงเวลา เนื่องจากอายุน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการสลายตัวของคลอรีน โดย

ลดลง 0.105 คิดเป็น 13.06% แสดงว่าเมื่อน้ำสูญเสียลดลง ถ้าความเข้มข้นของคลอรีนที่จุดจ่ายน้ำยังเท่าเดิม ความน่าเชื่อถือด้านปริมาณคลอรีนจะลดลง ส่วนค่าดัชนีความยืดหยุ่นรายชั่วโมงกรณีมีน้ำสูญเสีย และไม่มีน้ำสูญเสีย จะเห็นว่าค่าดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนมีค่าต่างกันในช่วงกลางวันแคบกว่าช่วงกลางคืน และในช่วงกลางคืนในกรณีมีน้ำสูญเสีย ค่าดัชนียืดหยุ่นคลอรีนที่น้อย จะยิ่งน้อยลงไปอีก เนื่องจากการลดลงของน้ำสูญเสียไปเพิ่มผลกระทบมากขึ้น ดังนั้นการลดน้ำสูญเสีย แม้จะมีประโยชน์ในการประหยัดน้ำและเพิ่มแรงดัน แต่ส่งผลกระทบเชิงลบต่อความน่าเชื่อถือด้านคลอรีน ดังนั้นจึงอาจจำเป็นต้องปรับการจ่ายคลอรีนเข้าพื้นที่เพื่อรักษาความน่าเชื่อด้านคลอรีน



รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนรายชั่วโมง

6. สรุป

ดัชนีความยืดหยุ่นคือดัชนีที่บ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือของระบบ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีน โดยรวมค่าเป้าหมายเข้าไปในดัชนี ทำให้สามารถบอกสถานะของการดำเนินการด้านคลอรีนเพิ่มเติมจากค่าความน่าเชื่อถือ

เมื่อประยุกต์ค่าดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนต่อพื้นที่เฝ้าระวัง พบว่าค่าดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนในภาพรวมมีค่าเท่ากับ 0.804 แสดงว่าในพื้นที่นี้มีคลอรีนอยู่ที่ระดับ 80.4% ของปริมาณที่เหมาะสม ดังนั้นการใช้ค่าดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนทำให้เข้าใจภาพรวมของระบบด้านคลอรีนได้ง่ายขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าดัชนียืดหยุ่นของคลอรีนตามเวลา พบว่าระหว่าง 01.00-04.00 น. เป็นช่วงที่มีค่าความยืดหยุ่นต่ำ เนื่องจากมีการจ่ายคลอรีนค่อนข้างต่ำ ทำให้ค่าดัชนีความยืดหยุ่นตามเวลาของคลอรีนสามารถช่วยสนับสนุนการจ่ายคลอรีนตามความเหมาะสมได้

เมื่อทำการทดสอบกรณีไม่มีน้ำสูญเสียพบว่าค่าดัชนีความยืดหยุ่นในภาพรวมมีค่าเท่ากับ 0.622 ซึ่งลดลง 13.06% เนื่องจากอายุน้ำเพิ่มขึ้น และค่าดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนรายชั่วโมงลดลงทุกเวลาเมื่อเทียบกับกรณีที่มีน้ำสูญเสีย แสดงว่าการลดลงของน้ำสูญเสียทำให้ดัชนีความยืดหยุ่นของคลอรีนต่ำลง ซึ่งส่งผลให้ความน่าเชื่อถือลดลง และผู้ใช้น้ำอาจมีความเสี่ยงต่อเชื้อโรคมากขึ้น ดังนั้นเมื่อมีกิจกรรมลดน้ำสูญเสียปริมาณมาก การประปานครหลวงควรพิจารณาตรวจวัดค่าความเข้มข้นคลอรีน และอาจปรับการจ่ายคลอรีนเข้าพื้นที่ให้เหมาะสม

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโดยทุนวิจัยระดับปริญญาโท/เอก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Lipiwattanakarn, S., S. Kaewsang, C. Makpiboon, J. Changklom, Pornprommin A. (2021). Water Quality Audit in Drinking Water Distribution Networks. Journal of Water Resources Planning Management. **147**(3) 04020113, DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001332.

[2] อดิชัย พรพรหมินทร์. (2561). ชลศาสตร์ระบบจ่ายน้ำประปา. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 168.

[3] Kunming L.U. (2006). World Health Organization (WHO), Guidelines for Drinking Water Quality, (2004), Brief Introduction of “Water Safety Plan”. Water Purification Technology, (6), 7.

[4] Todini E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. Urban water, 2(2), 115-122.

[5] NHMRC. (2011). Australian drinking water guidelines paper 6 national water quality management strategy. National Health and Medical Research Council, National Resource Management Ministerial Council, Commonwealth of Australia, Canberra, 7-5.

[6] USEPA. (2004). The Effectiveness of Disinfectant Residuals in the Distribution System. Environmental Protection. Washington DC.

[7] Rossman L.A. (2000). EPANET 2 USERS MANUAL. CINCINNATI, OH, USA, 1-200.

[8] วีรวัตร ขอประเสริฐ และคณะ. 2556. การจัดการแรงดันเพื่อควบคุมน้ำสูญเสียในพื้นที่เฝ้าระวังการประปา สาขาลาดพร้าว. การประชุมวิชาการแหล่งน้ำครั้งที่ 5. เชียงราย, 5-6 กันยายน พ.ศ. 2554, NCWRE 90, 10 หน้า.

[9] การประปานครหลวง. 2563. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยพัฒนาแบบจำลอง EPANET เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพบริหารจัดการแรงดันและคุณภาพน้ำในระบบท่อประธานและท่อจ่ายน้ำ.