

การศึกษาปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในระบบท่อจ่ายน้ำประปา

A Study of Free Residual Chlorine in a Water Distribution System

ศุภรักษ์ แก้วแสง อติชัย พรพรหมินทร์ และ สุรัชย์ ลิปิวัฒนาการ*¹

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

email : fengsuli@ku.ac.th¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้จำลองปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในระบบท่อจ่ายน้ำประปา โดยพื้นที่ศึกษาอยู่ในพื้นที่รับผิดชอบของสำนักงานประปาสาขาลาดพร้าว การประปานครหลวง และได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ 1) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่สถานีสูบน้ำลาดพร้าวกับจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 ผลการศึกษาพบว่าระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในการเดินทางจากสถานีสูบน้ำลาดพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ศึกษาประมาณ 30 นาที 2) การศึกษาการกระจายตัวของคลอรีนในระบบท่อจ่ายน้ำในพื้นที่เฝ้าระวัง ถึงระดับจุดผู้ใช้น้ำ ทั้งนี้พบว่าโปรแกรม EPANET มีข้อจำกัดในเรื่องการคำนวณอายุน้ำ คือค่าอายุน้ำในแต่ละเส้นท่อต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1 นาที จึงทำให้ต้องมีการรวมเส้นท่อที่อายุน้ำไม่ผ่านเกณฑ์เข้าด้วยกันก่อนวิเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่าอายุน้ำกับอัตราการไหลของน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวังมีความสัมพันธ์ผกผันอย่างชัดเจน คือในช่วงเวลากลางคืนที่อัตราการไหลมีค่าลดลงและต่ำสุด ณ เวลา 4.00 น. นั้น อายุน้ำจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดย ณ จุดวัดคลอรีนไกลสุดภายในพื้นที่ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.5 ชั่วโมง ณ เวลา 5.00 น. รวมทั้งพบว่าปริมาณคลอรีนที่จุดจ่ายน้ำเข้าอยู่ในช่วง 0.20-1.00 มก./ลิตร ได้สลายตัว และคงเหลือ ณ จุดวัดไกลสุดอยู่ในช่วง 0.05-0.60 มก./ลิตร

คำสำคัญ

คลอรีน โครงข่ายท่อ น้ำประปา อายุน้ำ คุณภาพน้ำ

ABSTRACT

This research analyzes free residual chlorine in a water distribution system. The study area is in the service area of Lad Phrao branch office, Metropolitan Waterworks Authority (MWA). The study is divided into two parts as follows. 1) The study of a relationship between the amount of free residual chlorine at Lad Phrao pumping station and at the inlet of district metering area (DMA) 12-03-05. From the results, it was found that the period of free residual chlorine travelling

from Lad Phrao pumping station to the inlet of the DMA takes approximately 30 minutes. 2) The study of the chlorine distribution in the water distribution system in the DMA 12-03-05 to customer level. We found that the program EPANET has limitations on the water age calculation. The water age of each pipe must be greater than or equal to 1 minute, so pipe which did not meet the criteria will be merged before a water quality analysis. The results showed that the water age and the flow rate at the inlet of district metering area clearly has an inverse relationship. At night, when flow rate decreases and has the lowest value at 4:00 a.m., the water age increases and at the furthest chlorine measurement point in DMA the peak water age is equal to 4.5 hours at 5.00 a.m. It is also found that while the concentration of chlorine at the DMA inlet is in the range of 0.20 - 1.00 mg/liter, the chlorine decayed and remained at the furthest measurement point in the range of 0.05 to 0.60 mg/liter.

Keywords

chlorine, pipe network, tap water, water age, water quality

1. บทนำ

คลอรีนเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ทั่วไปในกระบวนการผลิตน้ำประปา ซึ่งการประปานครหลวง (กปน.) ได้ใช้คลอรีนในกระบวนการผลิตน้ำประปา เพราะมีราคาถูก ประสิทธิภาพดี ควบคุมง่าย และคงทนอยู่ในน้ำได้นาน ปริมาณคลอรีนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการตรวจสอบคุณภาพน้ำประปาซึ่งตามมาตรฐานองค์การอนามัยโลกได้กำหนดไว้ว่าควรมีปริมาณคลอรีนคงเหลือถึงผู้ใช้น้ำไม่ต่ำกว่า 0.2 มก./ลิตร [1] มีหลายงานวิจัยได้ใช้แบบจำลอง EPANET ในการศึกษาเรื่องปริมาณคลอรีนคงเหลือในระบบโครงข่ายท่อประปา เช่น งานวิจัยของภาคภูมิ (2548) [2] ได้วิเคราะห์ปริมาณคลอรีนคงเหลือในระบบท่อในพื้นที่สำนักงานประปาสาขาภาษีเจริญ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสลายตัว (Bulk decay coefficient, k_b) เฉลี่ยเท่ากับ $-1.39 \text{ ม.}^2/\text{วัน}$ ที่ทำให้คลอรีนคงเหลือใกล้เคียงกับค่าจริงในสนาม และพบว่าปริมาณคลอรีนคงเหลือลดลงเมื่อปริมาณความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Castro *et al.* (2010) [3] ได้ศึกษาการสลายตัวของคลอรีนในระบบโครงข่ายท่อประปา โดยการ

ศึกษาได้ใช้ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในการหาค่า k_b และค่าสัมประสิทธิ์อัตราการทำปฏิกิริยากับผนังท่อ (Wall reaction rate coefficient, k_w) ผลการศึกษาพบว่าค่า k_b เท่ากับ -0.3432 วัน^{-1} และได้ค่า k_w เท่ากับ $-0.0070 \text{ ฟุต/วินาที}$ ($-184.343 \text{ เมตร/วัน}$) ที่ทำให้คลอรีนคงเหลือใกล้เคียงกับค่าจริงในสนามงานวิจัยของ Nagataniet *al.* (2008) [4] ได้จำลองการสลายตัวของคลอรีนในระบบประปาที่ Sakishima ประเทศญี่ปุ่น โดยการศึกษาได้ใช้ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในการหาค่า k_b และใช้ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ในการหาค่า k_w ผลการทดลองได้ค่า k_b เท่ากับ -0.274 วัน^{-1} ผลการศึกษาพบว่าค่า k_w เท่ากับ $-4.0 \text{ มก./ม.}^2/\text{วัน}$ ที่ทำให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในแบบจำลองสอดคล้องกับค่าจริงในสนาม อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมามีการศึกษาที่มีความละเอียดในระดับท่อจ่ายน้ำเท่านั้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาคุณภาพน้ำโดยใช้แบบจำลอง EPANET ที่มีความละเอียดสูงสุดในระดับผู้จ่ายน้ำ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้ 1) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคง

เหลือที่สถานีสูบน้ำบาดาลพร้าวกับจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 โดยนำข้อมูลการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือจากระบบตรวจสอบคุณภาพน้ำประปาระยะไกลของการประปานครหลวง และข้อมูลตรวจวัดจริงจากจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่มาหาความสัมพันธ์เบื้องต้น 2) การศึกษาการกระจายตัวของคลอรีนในระบบท่อจ่ายน้ำในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 โดยนำข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือจากการตรวจวัดจริงในพื้นที่มาเป็นข้อมูลในการสร้างและสอบเทียบแบบจำลอง ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของคลอรีนได้ถึงระดับจุดผู้ใช้น้ำ

2. วิธีการ

2.1 การทบทวนงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

น้ำสูญเสียในกิจการประปา [5] สามารถพิจารณาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ 1) น้ำสูญเสียทางด้านเทคนิค (Real losses หรือ Physical loss) คือน้ำสูญเสียจริงที่เกิดจากสภาพทางกายภาพของระบบประปา ได้แก่การแตกรั่วของท่อประปาและน้ำไหลล้นในระบบกักเก็บ 2) น้ำสูญเสียจากการบริหารจัดการ (Apparent Losses หรือ Commercial loss) คือน้ำสูญเสียที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของมิเตอร์ ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล รวมถึงการลักใช้น้ำ โดยทั่วไปแล้วน้ำสูญเสียทางด้านเทคนิคจะมีสัดส่วนที่สูงกว่าน้ำสูญเสียจากการบริหารจัดการ

สำหรับการบริหารจัดการน้ำสูญเสียทางด้านเทคนิค จะนิยมใช้กลยุทธ์ 4 ด้าน ประกอบไปด้วย 1) การบริหารจัดการแรงดัน (Pressure Management) 2) การควบคุมน้ำสูญเสียเชิงรุก (Active Leakage Control) 3) ความรวดเร็วและคุณภาพการซ่อมท่อ (Speed and Quality of Repairs) 4) การบริหารจัดการโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure Management) กลยุทธ์แต่ละด้านมีหลักการเบื้องต้นในการบริหารจัดการน้ำสูญเสีย

เชิงเทคนิคที่แตกต่างกันไป หนึ่งในแนวทางการลดน้ำสูญเสียทางเทคนิคที่มีประสิทธิภาพคือ การควบคุมน้ำสูญเสียเชิงรุก ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการควบคุมน้ำสูญเสียโดยมุ่งเน้นควบคุมและค้นหาท่อแตกรั่วในระบบประปาเชิงรุก การจัดตั้งพื้นที่เฝ้าระวังก็เป็นอีกวิธีหนึ่งในการควบคุมน้ำสูญเสียเชิงรุก พื้นที่เฝ้าระวัง (District Metering Area, DMA) คือการแบ่งระบบจ่ายน้ำออกเป็นพื้นที่ย่อยๆ แยกจากกันตามหลักชลศาสตร์และติดตั้งมาตรวัดปริมาณน้ำและแรงดันบริเวณจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง เพื่อติดตามตรวจวัดอัตราการไหลและแรงดันบริเวณจุดเข้าพื้นที่เฝ้าระวังอย่างต่อเนื่อง ทำให้ทราบได้อย่างรวดเร็วทันทีว่ามีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลหรือแรงดัน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงแนวโน้มว่าอาจเกิดจากน้ำสูญเสียที่เพิ่มขึ้น

การศึกษานี้ได้พิจารณาน้ำสูญเสียทางด้านเทคนิคเป็นหลัก ซึ่งอัตราการไหลรั่วสามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์กับแรงดันได้

$$Q = CH^{N_1} \quad (1)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลรั่ว (ม.³/วินาที)

H = แรงดันน้ำ(ม.)

C = ค่าคงที่

N_1 = ค่ายกกำลัง

สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจเรียกว่าสมการ FAVAD (Fixed Variable Area Discharge) โดยมีหลายงานวิจัยที่ใช้สมการนี้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์แรงดันกับอัตราการรั่ว เช่น งานวิจัยของ May (1994) [6] ได้ทดสอบข้อมูลจากประเทศญี่ปุ่นและสหราชอาณาจักร รวมทั้งที่อื่นๆ ทั่วโลกพบว่า N_1 ตามทฤษฎีของการไหลผ่านรูเปิด (Orifice flow) จะเท่ากับ 0.5 โดยมีข้อสมมติฐานว่าขนาดของรูเปิดต้องไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันน้ำทำให้อัตราการสูญเสียแปรผันกับแรงดันน้ำยกกำลัง 0.5 แต่จากงานวิจัยต่างๆ พบว่าแรงดันน้ำมีผลให้พื้นที่หน้าตัดของรูรั่วมีขนาดขยายเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่นงานวิจัย

ของ Van Zyl (2004) [7] และ Miranda *et al.* (2011) [8] เป็นต้น โดยค่า N_1 จะผันแปรระหว่าง 0.5 ถึง 2.5 นอกจากนี้ Clayton *et al.* (2007) [9] ยังพบว่าชนิดวัสดุท่อและลักษณะของรอยแตกมีความสัมพันธ์กับค่า N_1 ด้วย สำหรับในพื้นที่ของ กปน. งานวิจัยของ วีรวัตร และคณะ (2556) [10] ได้ทดลองเพื่อหาค่า Leakage Exponent (N_1) ในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 และ 12-04-08 พบว่าค่ายกกำลังในพื้นที่ที่มีค่าประมาณ 1.0 และงานวิจัยของศุภรักษ์และคณะ (2556) [11] ได้ศึกษาลักษณะของรอยแตกที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและอัตราการไหลรั่วของท่อ PVC โดยจำลอง 3 ลักษณะ คือการแตกรั่วแบบรูปกลม ตามแนวขวาง และตามแนวยาว พบว่าลักษณะของรอยแตกมีผลต่ออัตราการไหลรั่วของท่อ PVC โดยการแตกรั่วแบบรูปกลม ตามแนวขวาง และตามแนวยาว มีค่ายกกำลัง N_1 เฉลี่ย เท่ากับ 0.535, 0.611 และ 0.680 ตามลำดับ โดยค่า N_1 มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเป็นการแตกตามแนวยาว

$$Q = CP^P \quad (2)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลรั่ว (ม.³/ชม.)

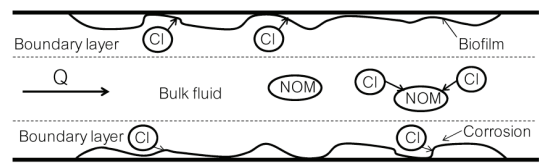
P = แรงดันน้ำ (ม.)

C = สัมประสิทธิ์อัตราการไหลของ Emitter (Emitter Coefficient)

γ = ค่ายกกำลังแรงดันของ Emitter (Emitter Exponent)

ปฏิกิริยาเคมีของคลอรีนอิสระที่เกิดขึ้นภายในเส้น

ท่อสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) ปฏิกิริยาคลอรีนในมวลน้ำ (Bulk Fluid) 2) ปฏิกิริยาคลอรีนกับผนังท่อ (Boundary layer) ดังแสดงในภาพที่ 1 คลอรีนอิสระ (HOCl) จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) ในมวลน้ำ และขณะเดียวกันก็เคลื่อนที่สัมผัสกับชั้นขอบเขตของผนังท่อซึ่งทำปฏิกิริยา Oxidation กับ Biofilm และวัสดุท่อ



ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาในในมวลน้ำสารอินทรีย์ธรรมชาติ และปฏิกิริยาที่ผนังท่อเมื่อเกิดปฏิกิริยา Oxidation กับ Biofilm และวัสดุท่อ

สมการที่ใช้ในการคำนวณปฏิกิริยาคลอรีนในมวลน้ำและผนังท่อ ดังสมการที่ (3)

$$\frac{dC}{dt} = k_b C^{m_1} + \frac{A}{V} k_w C^{m_2} \quad (3)$$

โดยที่ C = ปริมาณคลอรีนอิสระ (มก./ลิตร)

k_b = ค่าสัมประสิทธิ์การสลายตัวในมวลน้ำ (Bulk decay coefficient) มีหน่วยเป็น วัน⁻¹กรณีที่ทำปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

k_w = ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการทำปฏิกิริยากับผนังท่อ (Wall reaction rate coefficient) มีหน่วยเป็น ม./วัน สำหรับกรณีปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และ มก./ม.²/วัน สำหรับกรณีปฏิกิริยาอันดับศูนย์

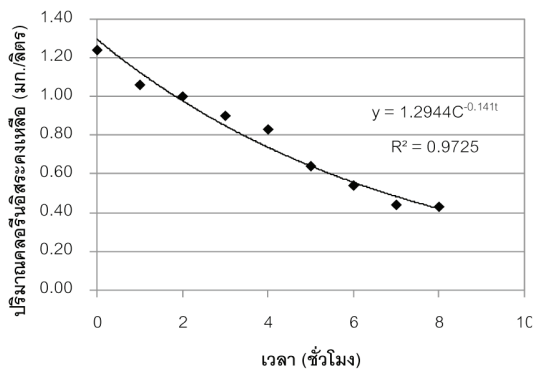
A/V = พื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของท่อ (มม.⁻¹) ในกรณีท่อกลมจะเท่ากับสี่ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (4/D)

m_1 = อันดับปฏิกิริยาสำหรับ Bulk Reaction

m_2 = อันดับปฏิกิริยาสำหรับ Wall Reaction

t = เวลาในการเคลื่อนที่ (Transportation Time) (ชั่วโมง)

การประปานครหลวง [12] ได้มีการทดลอง Bottle test ที่ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน ณ วันที่ 22 กุมภาพันธ์ 2556 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและคลอรีนอิสระคงเหลือในน้ำประปา ได้ค่า k_b เท่ากับ -0.1414 ชม.^{-1} แสดงได้ดังภาพที่ 2 หรือเท่ากับ -3.384 วัน^{-1}



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือต่อเวลา โดยได้ค่า $k_b = -3.384 \text{ วัน}^{-1}$
ที่มา : การประปานครหลวง (2556)

Nagataniet al. (2008) [4] ได้จำลองการสลายตัวของคลอรีนในระบบประปาที่ Sakishima ประเทศญี่ปุ่น โดยการศึกษาได้ใช้ปฏิริยาอันดับหนึ่งในการหาค่า k_b และใช้ปฏิริยาอันดับศูนย์ในการหาค่า k_w และได้ทดลอง Bottle test ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาค่า k_b ผลการทดลองได้ค่า k_b เท่ากับ -0.274 วัน^{-1} ผลการศึกษาพบว่าค่า k_w เท่ากับ $-4.0 \text{ มก./ม.}^2/\text{วัน}$ ที่ทำให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในแบบจำลองสอดคล้องกับค่าในสนาม

2.2 ขั้นตอนการศึกษา

2.2.1 พื้นที่ศึกษา

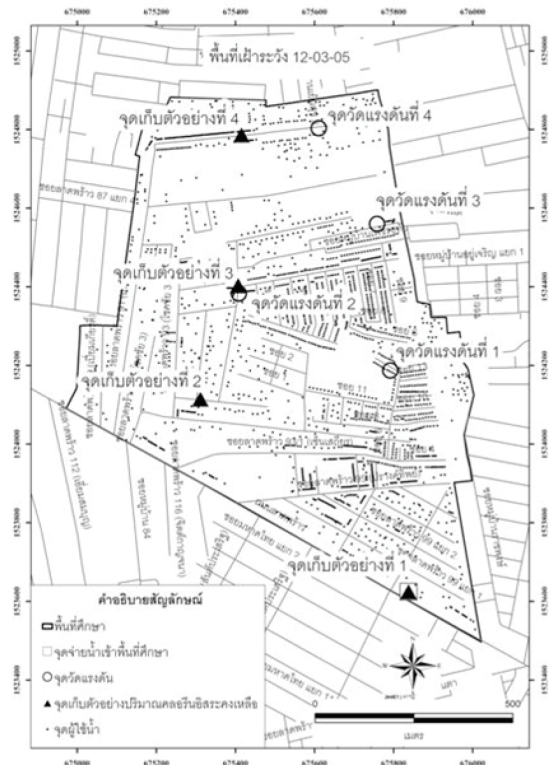
งานวิจัยนี้ได้เลือกพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 ในพื้นที่ประปาสาขาลาดพร้าวเป็นพื้นที่ศึกษารายละเอียดขอบเขตพื้นที่เฝ้าระวังแสดงในภาพที่ 3 ปัจจุบันมีจำนวนผู้ใช้น้ำจำนวน 1,968 ราย แยกเป็นผู้ใช้น้ำรายเล็ก 1,943 ราย ผู้ใช้น้ำรายใหญ่ 22 ราย และผู้ใช้น้ำราชการ 3 ราย ระบบท่อจ่ายน้ำในพื้นที่เฝ้าระวังมี

ความยาว 20,938 เมตร รายละเอียดวัสดุ อายุท่อเฉลี่ยและความยาวรวมของท่อในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 แสดงไว้ในตารางที่ 1 หัวดับเพลิงจำนวน 16 ตัว จุดน้ำเข้าพื้นที่ 1 จุดข้อมูลเดือนธันวาคม 2556 มีปริมาณน้ำเข้า 110,928 ลบ.ม. ปริมาณน้ำจำหน่าย 77,533 ลบ.ม. และเปอร์เซ็นต์น้ำสูญเสีย 30.11 %

ตารางที่ 1 วัสดุ อายุท่อเฉลี่ย และความยาวรวมของท่อในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05

วัสดุ	อายุท่อเฉลี่ย (ปี)	ความยาว (เมตร)
Asphalt Cement (AC)	28	1,883
Cast Iron (CI)	14	1,786
Polybutylene (PB)	4	72
Poly Vinyl Chlorine (PVC)	12	16,683
Steel (ST)	13	514
ความยาวรวม		20,938

ภาพที่ 3 ขอบเขตพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05



2.2.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) ข้อมูล GIS โครงข่ายท่อจ่าย จุดจ่ายน้ำเข้าหัวดับเพลิง จุดผู้ใช้น้ำและขอบเขต DMA
- 2) ข้อมูลปริมาณการใช้น้ำและรูปแบบการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำ
- 3) ข้อมูลอัตราการไหล (Q) และค่าแรงดัน (H) บริเวณจุดน้ำจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง (District Metering, DM)
- 4) ข้อมูลแรงดันภายในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 ได้ใช้ข้อมูลตรวจวัดแรงดันภาคสนามบนหัวดับเพลิงที่กระจายอยู่ในพื้นที่เฝ้าระวังจำนวน 4 จุด ดังแสดงในภาพที่ 3 จากงานวิจัยของ วีรวัตร และคณะ (2556) [10]
- 5) ข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือรายชั่วโมง ณ สถานีสูบน้ำลาดพร้าว จากระบบตรวจสอบคุณภาพน้ำประปาระยะไกล
- 6) ข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือตัวแทนในพื้นที่เฝ้าระวัง เป็นการเก็บข้อมูลภาคสนาม โดยใช้เครื่องมือ Pocket Colorimeter เก็บตัวอย่างน้ำจากจุดที่ต่อโดยตรงจากท่อประปายังไม่เข้าถึงพักน้ำของผู้ใช้น้ำ 3 จุด และจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ศึกษา 1 จุด ในวันที่ 9 ธันวาคม 2555 เวลา 7.00 นาฬิกา ถึง 18.00 นาฬิกา เก็บข้อมูลทุกๆ 30 นาที ดังภาพที่ 3

2.2.3 การขึ้นแบบจำลอง

การขึ้นแบบจำลองโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำประปาในการศึกษานี้มีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- 1) ใช้โปรแกรม shp2epa [13] เพื่อแปลงไฟล์ GIS เป็นไฟล์นามสกุล .inp
- 2) นำเข้าไฟล์นามสกุล .inp จากข้อ 1 ในโปรแกรม Microsoft Excel ที่มีการพัฒนา Macro [14] เพื่อขึ้นโครงข่ายระบบท่อ
- 3) นำไฟล์จากข้อ 2 มาเปิดในโปรแกรม EPANET และแก้ไขโครงข่ายบางส่วนที่มีปัญหาเรื่องการเชื่อมต่อจนสามารถรันโปรแกรมได้

2.2.4 การสอบเทียบแบบจำลองชล-ศาสตร์

เมื่อขึ้นแบบจำลองเรียบร้อยแล้วจึงสอบเทียบทางด้านชลศาสตร์ โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำขาย ปริมาณน้ำสูญเสียและข้อมูลแรงดันของเดือนเมษายน 2556 โดยมีขั้นตอนการสอบเทียบดังนี้

- 1) ป้อนค่าปริมาณการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำเข้าไปในแบบจำลอง ส่วนปริมาณน้ำสูญเสีย (30.11%) จะถูกนำเข้าโดยใช้ Emitter function ดังแสดงในสมการ (1) โดยใช้ค่า Emitter exponent (N_1) เท่ากับ 1 จากงานวิจัยของวีรวัตรและคณะ [10] และปรับแก้ค่า Emitter coefficient (C) เพื่อให้ปริมาณน้ำเข้ารวม (ปริมาณน้ำใช้รวมกับน้ำสูญเสีย) เท่ากับค่าที่วัดได้ที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ โดยสมมติใช้ค่า C ในแบบจำลองเท่ากันทุก node ของแบบจำลอง

- 2) สอบเทียบแรงดันน้ำในพื้นที่ศึกษา โดยปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระท่อ (C_{HW}) เพื่อให้แรงดันในแบบจำลองสอดคล้องกับแรงดันที่วัดได้จริงในสนามที่กระจายอยู่ในพื้นที่จำนวน 4 จุดดังแสดงในภาพที่ 3

2.2.5 การสอบเทียบแบบจำลองคุณภาพน้ำ

เมื่อสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์เรียบร้อยแล้วจึงสอบแบบจำลองคุณภาพน้ำโดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำเข้ารูปแบบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ (จุดเก็บตัวอย่างที่ 1) โดยข้อมูลที่นำเข้าเป็นข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากภาคสนาม ช่วงเวลา 7.00-18.00 นาฬิกา วันที่ 9 ธันวาคม 2556 ส่วนรูปแบบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในชั่วโมงอื่นๆ ได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่สถานีสูบน้ำลาดพร้าวกับจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ในการต่อขยายรูปแบบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่

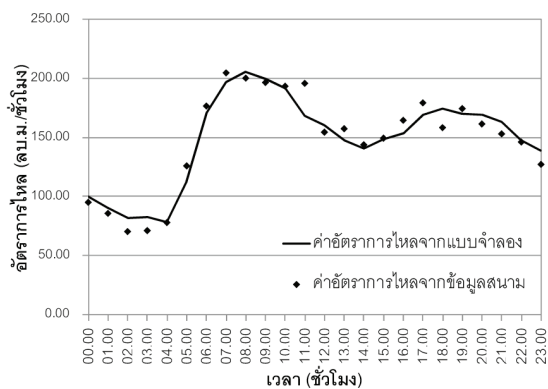
- 2) นำเข้าค่า k_d โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่า k_d เท่ากับ -3.384 วัน^{-1} จากผลการทดลอง Bottle test ที่ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน

ณ วันที่ 22 กุมภาพันธ์ 2556 [1] โดยใช้ลำดับปฏิบัติการที่หนึ่งในการคำนวณค่า k_b และ k_w แสดงดังสมการ (3) แล้วปรับแก้ค่า k เพื่อหาค่าเหมาะสมที่ทำให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลภาคสนามในพื้นที่ศึกษาจำนวน 3 จุด (จุดเก็บตัวอย่างที่ 2-4) ดังแสดงในภาพที่ 3

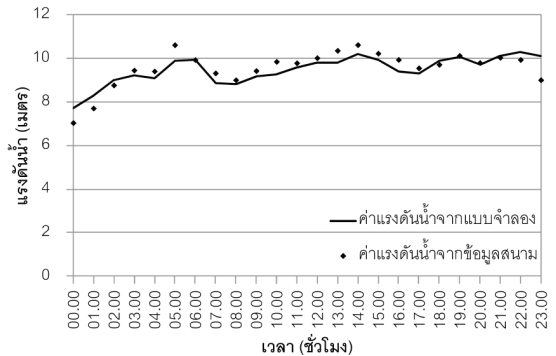
3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ผลการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์

ผลจากการสอบเทียบ ได้ค่า C เท่ากับ 0.002027 m^2/s ซึ่งทำให้ค่าปริมาณน้ำเข้าพื้นที่ศึกษาในแบบจำลองใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุดดังภาพที่ 4 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของอัตราการไหลที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ศึกษาระหว่างแบบจำลองกับจุดตรวจวัดเท่ากับ 0.9722 ส่วนการสอบเทียบแรงดันน้ำในพื้นที่ศึกษาได้ค่า r เฉลี่ย 4 จุด เท่ากับ 0.8022 แสดงตัวอย่างที่จุดวัดแรงดันที่ 1 ดังภาพที่ 5 และได้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระท่อเฉลี่ยเท่ากับ 127.43 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ปรับแก้มีความสอดคล้องกับพื้นที่จริง



ภาพที่ 4 กราฟการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ ระหว่างแบบจำลองกับจุดตรวจวัด



ภาพที่ 5 ตัวอย่างกราฟการเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่จุดวัดแรงดันที่ 1 ระหว่างแบบจำลองกับจุดตรวจวัด

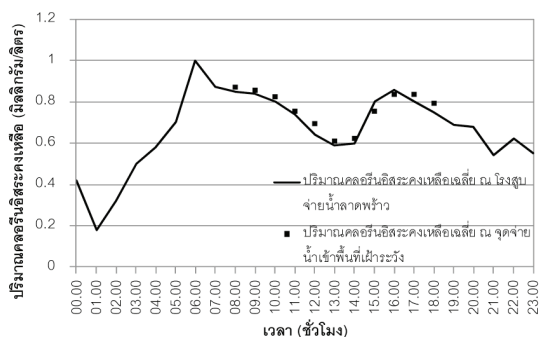
3.2 ข้อจำกัดของแบบจำลอง EPANET ในการจำลองคุณภาพน้ำ

จากการวิเคราะห์แบบจำลองคุณภาพน้ำพบว่าแบบจำลอง EPANET มีข้อจำกัดในเรื่องการคำนวณอายุน้ำ โดยค่าอายุน้ำที่แบบจำลองสามารถคำนวณได้ละเอียดสุดคือที่ Water quality time step เท่ากับ 1 นาที (0.01667 ชั่วโมง) ซึ่งทำให้น้ำในเส้นท่อที่มีอายุต่ำกว่า 1 นาที แบบจำลอง EPANET จะปรับให้อายุน้ำในท่อนั้นเป็น 1 นาทีซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อายุน้ำในแบบจำลอง EPANET คลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องปรับแก้ความยาวของท่อที่มีอายุน้ำต่ำกว่า 1 นาทีเสียก่อน โดยวิธีการปรับแก้ นั่นคือการเชื่อมต่อความยาวของท่อเส้นที่มีอายุน้ำต่ำกว่า 1 นาทีกับท่อที่อยู่ติดกัน และมีคุณสมบัติท่อเช่นเดียวกัน

3.3 ผลการสอบเทียบแบบจำลองคุณภาพน้ำ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่สถานีสูบน้ำจ่ายน้ำลาดพร้าวกับจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 พบว่าระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือแพร่กระจายจากสถานีสูบน้ำลาดพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง (จุดเก็บตัวอย่างที่ 1) ใช้เวลาประมาณ 30 นาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่น้อยมาก และค่าปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือทั้งสองจุดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีรากของค่าคลาดเคลื่อน

กำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 3.21×10^{-2} มก./ลิตร และมีค่า r เท่ากับ 0.9722 แสดงดังภาพที่ 6 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต่อขยายรูปแบบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือโดยใช้ค่าที่สถานีสูบน้ำบาดาลพร้าวเป็นตัวแทนข้อมูลในช่วงเวลาที่ไม่ได้ตรวจวัดจากภาคสนาม



ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ โรงสูบน้ำบาดาลพร้าว และ ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ฝักระวัง ในวันที่ 9 ธันวาคม 2556

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอายุน้ำกับอัตราการไหลของน้ำเข้าพื้นที่ฝักระวังพบว่ามีความสัมพันธ์ผกผันอย่างชัดเจน คือช่วงเวลากลางคืนอัตราการไหลมีค่าลดลง และต่ำสุดในเวลา 4.00 นาฬิกา ในขณะที่อายุน้ำ ณ จุดวัดคลอรีนภายในพื้นที่ 3 จุด (จุดเก็บตัวอย่างที่ 2-4) เพิ่มขึ้น และสูงสุดในเวลา 5.00 นาฬิกา มีค่าเท่ากับ 4.5 ชั่วโมง ที่จุดไหลสูงสุด และพบว่าปริมาณคลอรีนที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่อยู่ในช่วง 0.20-1.00 มก./ลิตร ซึ่งได้สลายตัว และคงเหลือที่จุดวัดคลอรีนไหลสูงสุด (จุดเก็บตัวอย่างที่ 4) อยู่ในช่วง 0.05-0.60 มก./ลิตร

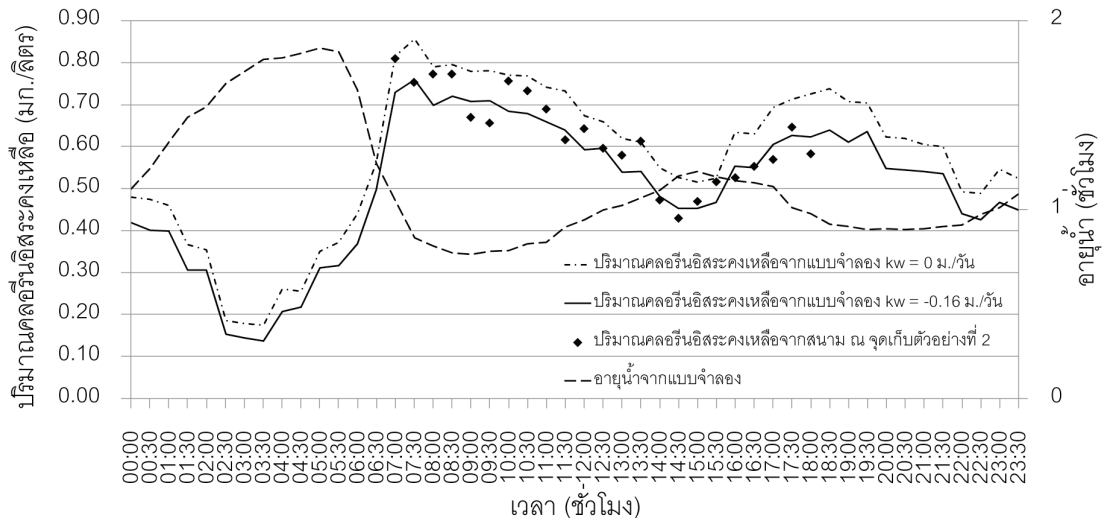
จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยใช้ค่า k_b เท่ากับ -3.384 วัน^{-1} [12] และทดลองใช้ค่า k_w เท่ากับ 0.0ม./วัน และปรับแก้ค่า k_w พบว่าค่า k_w เท่ากับ -0.16 ม./วัน ทำให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือของแบบจำลองมีค่าสอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัด โดยมีค่า r และ RMSE เฉลี่ย 4 จุดเท่ากับ 0.907 และ 0.047 มก./ลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งให้ค่าความสัมพันธ์ที่ดีกว่าการ

ใช้ค่า k_w เท่ากับ 0.0ม./วัน ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าค่า k_w ที่สอบเทียบได้นั้นต่ำประมาณ 1150 เท่าของค่า k_w ของ Castro *et al.* (2010) [3] แต่ค่า k_b ของกปน. นั้นกลับสูงประมาณ 10 เท่าของค่า k_b ของ Castro *et al.* (2010) [3] และ Nagataniet *al.* (2008) [4] ทั้งนี้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือยังแปรผกผันกับอายุน้ำอย่างเห็นได้ชัดเจน แสดงดังภาพที่ 7 8 และ 9

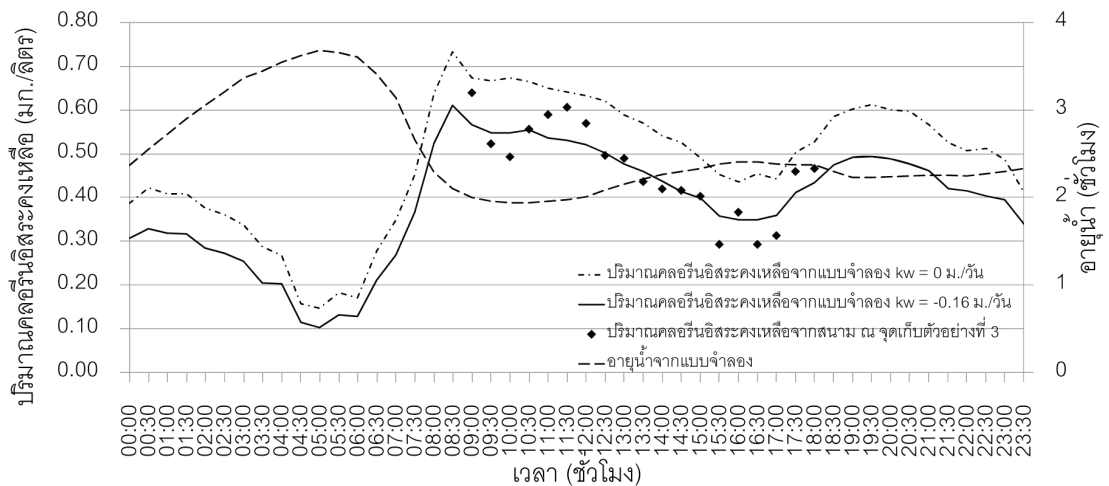
ตารางที่ 2 แสดงค่า r และ RMSE กรณีที่ k_w เท่ากับ 0.0 และ -0.16 ม./วัน

จุดตรวจวัด	$k_w = 0.0\text{ม./วัน}$		$k_w = -0.16 \text{ ม./วัน}$	
	r	RMSE (มก./ลิตร)	r	RMSE (มก./ลิตร)
1	0.901	0.041	0.901	0.041
2	0.910	0.077	0.919	0.044
3	0.903	0.111	0.927	0.042
4	0.888	0.141	0.882	0.059
ค่าเฉลี่ย	0.900	0.092	0.907	0.047

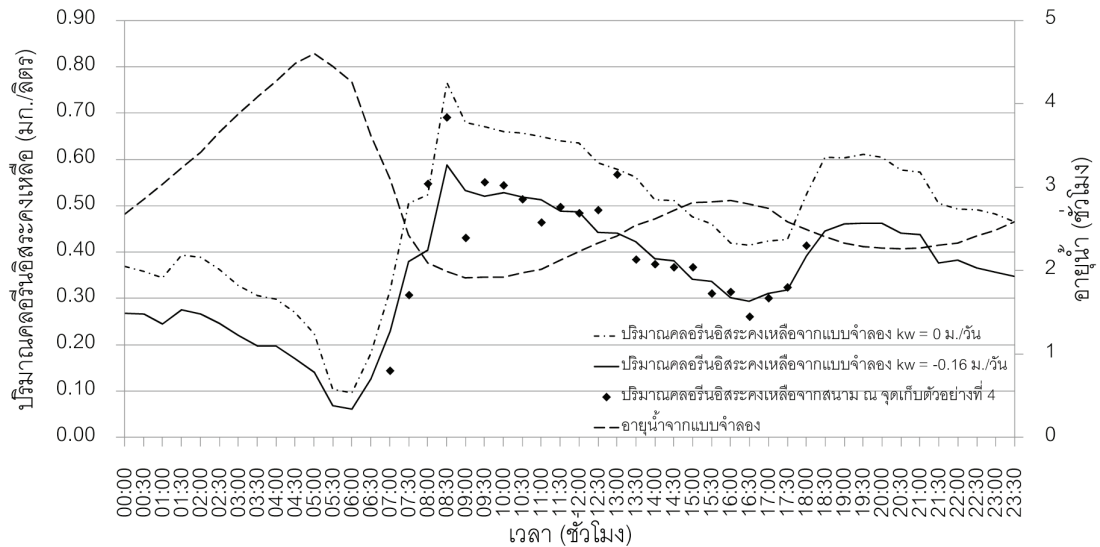
เมื่อเฉลี่ยความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ (ดังภาพที่ 6) มีค่าเท่ากับ 0.67 มก./ลิตร พบว่าเมื่อน้ำเดินทางไปยังจุดเก็บตัวอย่างที่ 4 (ดังภาพที่ 9) ซึ่งไกลจากจุดจ่ายน้ำมากที่สุด พบว่าค่าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.47 มก./ลิตร (ลดลง 0.20 มก./ลิตร) สำหรับกรณีไม่พิจารณาปฏิกิริยาที่ผิวท่อ ($k_w = 0.0$) และค่าเฉลี่ยเหลือเท่ากับ 0.35 มก./ลิตร (ลดลง 0.32มก./ลิตร) สำหรับกรณีพิจารณาปฏิกิริยาที่ผิวท่อ ($k_w = -0.16$) แสดงให้เห็นว่าในงานวิจัยนี้ปฏิกิริยาที่ผิวท่อมิอิทธิพลต่อการสลายตัวของคลอรีนในสเกลที่เทียบเคียงกับปฏิกิริยาในมวลน้ำ และจากการใช้ลำดับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง สำหรับค่า k_b และ k_w ตามสมการ (3) ซึ่งทำให้สมการอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งเชิงเส้นตรง (First-order differential linear equation) จึงทำให้อัตราการสลายตัวของความเข้มข้นคลอรีนคงเหลือนั้นขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้น ณ เวลานั้นๆ



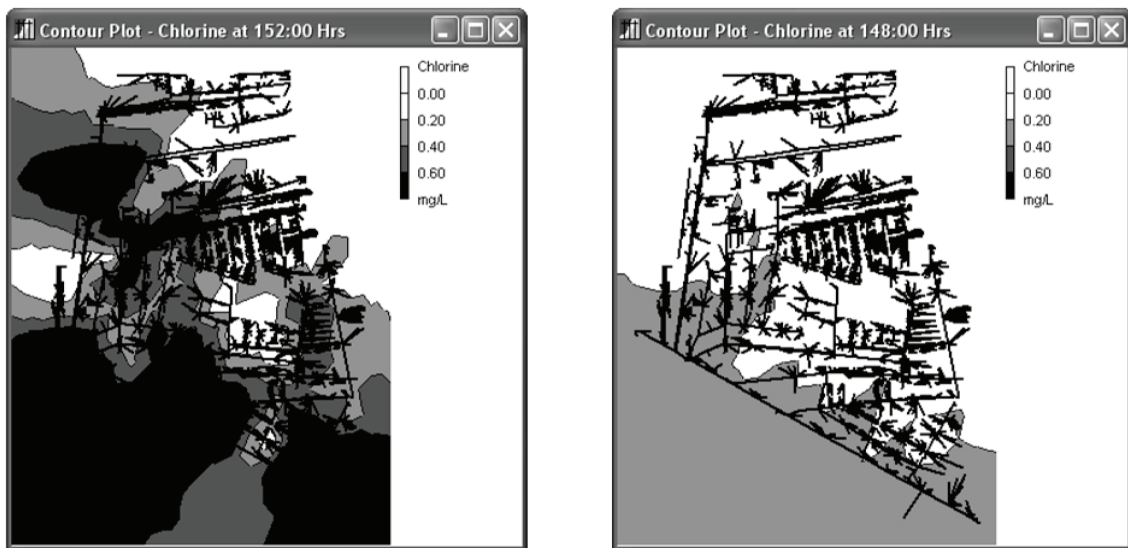
ภาพที่ 7 กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่วัดได้จริงจากสนามจุดที่ 2 และแบบจำลอง



ภาพที่ 8 กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่วัดได้จริงจากสนามจุดที่ 3 และแบบจำลอง



ภาพที่ 9 กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่วัดได้จริงจากสถานีจุดที่ 4 และแบบจำลอง



(a) ช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูงสุด

เวลา 8.00 นาฬิกา

(b) ช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำต่ำสุด

เวลา 4.00 นาฬิกา

ภาพที่ 10 การกระจายตัวของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่ฝักระวัง 12-03-05

3.4 ผลการศึกษาการกระจายตัวของคลอรีน

ผลการศึกษาการกระจายตัวของคลอรีนพบว่าช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูงสุด ณ วันที่ 9 ธันวาคม 2556 เป็นช่วงที่มีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือกระจายตัวในพื้นที่สูง โดยมีปริมาณปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเฉลี่ย 0.50 มก./ลิตร ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานองค์การอนามัยโลก [1] คือ 0.2 มก./ลิตร แต่อย่างไรก็ตามยังมีกลุ่มผู้ใช้ น้ำบางส่วนได้รับปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือต่ำกว่า 0.2 มก./ลิตร แสดงดังภาพที่ 10 (a) และช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำต่ำสุด เป็นช่วงที่มีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือกระจายตัวในพื้นที่ต่ำ โดยมีปริมาณปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเฉลี่ย 0.20 มก./ลิตร แสดงดังภาพที่ 10 (b)

4. สรุป

แบบจำลองระบบท่อจ่ายน้ำประปาในการศึกษานี้สามารถจำลองระบบท่อจ่ายน้ำถึงระดับจุดผู้ใช้น้ำทั้งด้านชลศาสตร์และคุณภาพน้ำในพื้นที่ที่มีแรงดันน้ำต่ำและน้ำสูญเสียสูงได้โดยใช้โปรแกรม EPANET ผลการศึกษพบว่าในการจำลองทางด้านชลศาสตร์ ผลการสอบเทียบสมมูลน้ำได้ค่าสัมประสิทธิ์ Emitter coefficient (C) เท่ากับ 0.002027 $\text{m}^2/\text{ชม.}$ ซึ่งเป็นตัวแทนการจำลองน้ำสูญเสีย และการสอบเทียบแรงดันได้สัมประสิทธิ์ความขรุขระท่อฮาเซน-วิลเลียม (C_{HW}) เฉลี่ยเท่ากับ 127.43 และพบว่าอายุน้ำกับอัตราการไหลของน้ำเข้าพื้นที่เป้าหมายมีความสัมพันธ์ผกผันอย่างชัดเจน คือในช่วงเวลากลางคืนที่มีการใช้น้ำต่ำซึ่งทำให้อัตราการไหลมีค่าลดลงนั้นพบว่า อายุน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งระบบ โดย ณ จุดวัดคลอรีนภายในพื้นที่ที่อยู่ไกลสุดสามารถคำนวณอายุได้เท่ากับ 4.5 ชั่วโมง และพบว่าปริมาณคลอรีนที่จุดจ่ายน้ำเข้าอยู่ในช่วง 0.20-1.00 มก./ลิตร ได้สลายตัวและคงเหลือที่จุดวัดคลอรีนไกลสุดอยู่ในช่วง 0.05-0.60 มก./ลิตร ส่วนผลการสอบเทียบคุณภาพน้ำได้ใช้ค่า k_b เท่ากับ -3.384 วัน^{-1} จากการทดสอบ Bottle test ของ กปน. และสอบเทียบค่า k_w ได้เท่ากับ -0.16

ม./วัน ซึ่งพบว่าค่า k_b และ k_w ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าแตกต่างจากผลงานวิจัยในระบบประปาพื้นที่อื่นเป็นอย่างมาก ดังนั้นใช้การจำลองคุณภาพน้ำในพื้นที่ใดๆ ควรมีการสำรวจตรวจวัดคุณภาพน้ำกับพื้นที่จริงเพื่อสามารถปรับแก้พารามิเตอร์ได้ถูกต้อง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากการประปา นครหลวงประจำปีงบประมาณ 2556 และทางคณะวิจัยขอขอบพระคุณการประปานครหลวงที่สนับสนุนและอนุเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ขอบพระคุณคุณวิโรจน์ ศรีอุบล เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นางสาวจันจิรา ประดับวงศ์ นางสาวอรกช สังข์พิชัย นางสาวอุษณากร รักดีรักษพงษ์ นายอริป จามน้อยพรหม นิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ช่วยในตรวจวัดข้อมูลภาคสนาม ดร.กัญจน์นรี ช่วงช่ำ อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคุณทัศนีย์ แก้ววงศ์วัฒนา ที่ได้ให้ข้อมูลอุปกรณ์ในการตรวจวัดคลอรีนภาคสนาม

6. เอกสารและสิ่งอ้างอิง

1. World Health Organization.2008. Guidelines for Drinking-water Quality. Volume 1. World Health Organization, Switzerland.
2. ภาควิชา วิศวกรรม. 2548. การวิเคราะห์การไหลและคลอรีนตกค้างในโครงข่ายระบบท่อประปาด้วยโปรแกรม Epanet และ GIS ซอฟต์แวร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
3. Castro P. and Neves M. 2010. Chlorine decay in water distribution systems, Case study-Lousadanet work. Environmental 2010: Situation and Perspectives for European Union 1 (1): 1-6.

4. Nagatani T., Yasuhara K., Murata K., Takeda M., Nakamura T., Fuchigami T. and Terashima K. 2008. Residual Chlorine Decay Simulation in water Distribution System. The 7th International Symposium on Water Supply Technology, Japan.
5. American Water Works Association. 2009. M 36 Water Audits and Loss Control Programs. 3th edition, United States of American.
6. May, J. 1994 Leakage, Pressure and Control. BICS International Conference on Leakage Control Investigation in Underground Assets, London.
7. Van Zyl J.E. 2004. The effect of pressure on leaks in water distribution system, Proceedings of the 2004 Water Institute of Southern Africa (WISA) Biennial Conference, p. 1104-1109.
8. Miranda S., Molari L., Scalet G. and Ubertini F. (2011) A simplified beam model to estimate leakage in longitudinally cracked pressurized pipes. Journal of Structural Engineering, 1:1-35.
9. Clayton C.R.I. and Van Zyl J.E. (2007). The effect of pressure on leakage in water distribution systems. Proc. I.C.E. Water Management, 160, (WM2), 109-114
10. วีรวัตร ขอบประเสริฐ และคณะ. 2556. การจัดการแรงดันเพื่อควบคุมน้ำสูญเสียในพื้นที่ใฝ่การวางการประปาสาขาลาดพร้าว. การประชุมวิชาการแหล่งน้ำครั้งที่ 5. เชียงราย, 5-6 กันยายน พ.ศ. 2554, NCWRE 90, 10 หน้า.
11. ศุภรักษ์ แก้วแสง และคณะ 2556. ลักษณะของรอยแตกที่มีผลต่ออัตราการไหลรั่วของท่อ PVC. การประชุมวิชาการแหล่งน้ำครั้งที่ 5, เชียงราย, 5-6 กันยายน พ.ศ. 2554, NCWRE 21, 7 หน้า.
12. การประปานครหลวง. 2556. รายงานผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและคลอรีนอิสระคงเหลือในน้ำประปา (Bottle test), ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิตฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน, 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556, 1 หน้า.
13. WWW.ZONUMS.COM, 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2557.
14. อติชัย พรพรหมินทร์ และคณะ 2554. การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายท่อจ่ายน้ำความละเอียดสูงสำหรับกิจการประปาขนาดใหญ่, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16, ชลบุรี, 18 – 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554, WRE041, 9 หน้า.