



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

ปริญญานี้

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การจำลองคุณภาพน้ำของระบบโครงข่ายท่อประปาด้วยแบบจำลอง EPANET

Water Quality Simulation of a Water Distribution Network System
by EPANET Model

นามผู้วิจัย

นางสาวศุภรัักษ์ แก้วแสง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อดิษฐ์ พรพรมินทร์, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นภาพร เปี่ยมสง่า, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การจำลองคุณภาพน้ำของระบบโครงข่ายท่อประปาด้วยแบบจำลอง EPANET

Water Quality Simulation of a Water Distribution Network System by EPANET Model

โดย

นางสาวศุภรักษ์ แก้วแสง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อขอความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศุภรักษ์ แก้วแสง 2557: การจำลองคุณภาพน้ำของระบบโครงข่ายท่อประปาด้วย
แบบจำลอง EPANET ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)
สาขาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ ภาควิศวกรรมทรัพยากรน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์อดิษฐ์ พรพรหมินทร์, D.Eng.
90 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้ได้จำลองคุณภาพน้ำของโครงข่ายระบบท่อประปาถึงระดับจุดผู้ใช้น้ำด้วย
แบบจำลองคณิตศาสตร์ EPANET 2.0 เพื่อนำมาใช้ในการบริหารจัดการคุณภาพน้ำในพื้นที่เฝ้า
ระวัง 12-03-05 สำนักงานประปาสาขาลาดพร้าว การสอบเทียบแบบจำลองทางด้านชลศาสตร์
ได้ใช้ข้อมูลแรงดันน้ำที่วัดจากภาคสนามมาทำการตรวจสอบ ส่วนการสอบเทียบแบบจำลอง
คุณภาพน้ำได้ใช้ข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่วัดจากภาคสนามมาทำการตรวจสอบ เมื่อ
สอบเทียบแบบจำลองแล้วจึงนำไปประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการคุณภาพน้ำในพื้นที่เฝ้าระวัง

ผลการจำลองคุณภาพน้ำของโครงข่ายระบบท่อประปาในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05
พบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ EPANET 2.0 สามารถใช้ในการจำลองคุณภาพน้ำของโครงข่าย
ระบบท่อประปาในพื้นที่เฝ้าระวังได้ดี จากการสอบเทียบแรงดันน้ำที่วัดจากภาคสนามจำนวน 4
จุด กับค่าแรงดันน้ำที่ประมวลได้จากแบบจำลอง ได้ค่ารากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย
(RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เฉลี่ย 4 จุด เท่ากับ 0.6059 เมตร และ 0.8022
ตามลำดับ และได้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระท่อฮาเซน-วิลเลียม (C_{HW}) เฉลี่ยเท่ากับ 127.43
ส่วนการสอบเทียบแบบจำลองคุณภาพน้ำได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสลายตัว (k_b) เท่ากับ -3.384
วัน⁻¹ จากการทดสอบ Bottle test ของ การประปานครหลวง และทำการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์
อัตราการทำปฏิกิริยากับผนังท่อ (k_w) ได้เท่ากับ -0.16 ม./วัน ที่ทำให้ปริมาณคลอรีนอิสระ
คงเหลือในแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลที่วัดจากภาคสนามจำนวน 3 จุด โดยมีรากของค่า
คลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เฉลี่ย 4 จุดเท่ากับ
0.047 มก./ลิตร และ 0.907 ตามลำดับ และนำแบบจำลองที่สอบเทียบแล้วไปประยุกต์ใช้กับ
กรณีศึกษา คือ การบริหารจัดการคลอรีนอิสระคงเหลือโดยทำการปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีน
ตั้งต้นและรูปแบบคลอรีนรายชั่วโมงที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ศึกษา เพื่อให้ปริมาณคลอรีนอิสระ
คงเหลือ ณ จุดตรวจวัดไกลสุดได้รับปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเกินค่ามาตรฐานองค์การ
อนามัยโลกคือ 0.2 มก./ลิตร

Suparak Kaewsang 2014: Water Quality Simulation of a Water Distribution Network System by EPANET Model. Master of Engineering (Water Resources Engineering), Major Field: Water Resources Engineering, Department of Water Resources Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Adichai Pornprommin, D.Eng. 90 pages.

This thesis is to simulate water quality of a water distribution network system at customer level by using a mathematical model EPANET 2.0 in order to manage water quality in a district metering area (DMA) 12-03-05 of Lad Phrao branch office. The hydraulic model calibration used the water pressure from field data to adjust the model. The water quality model calibration used free residual chlorine measurements from field data to adjust the model. When the model is calibrated, it is then applied for the management of water quality in the district metering area.

Results of simulation of the water quality of a water distribution network system in the district metering area 12-03-05 showed that the mathematical model of EPANET 2.0 can be used to simulate a water quality of the pipe network in the district metering area with satisfactory. Comparing 4 measuring points of water pressure from field data with water pressure from the model, the average of root-mean-square error (RMSE) and correlation coefficient (r) were 0.6059 m and 0.8022, respectively, and the average of pipe roughness Hazen-William coefficients (C_{HW}) was 127.43. The water quality model calibration using the bulk decay coefficient (k_b) equal to -3.384 day^{-1} from the bottle test of Metropolitan Waterworks Authority and the wall reaction coefficient (k_w) is calibrated to -0.16 m/day . Comparing 3 measuring points of free residual chlorine from field data with free residual chlorine from the model, the average of root-mean-square error (RMSE) and correlation coefficient (r) were 0.047 mg/liter and 0.907, respectively. The calibrated model was applied to a case study is which managed by adjusting the chlorine concentration and chlorine hourly pattern at the inlet of the DMA to having free residual chlorine at the furthest measurement point not less than the standard World Health Organization of 0.2 mg/liter.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อดิษฐ์ พรพรหมินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและ ผศ.สุรัชย์ ลิปิวัฒนาการ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและ มอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ขอขอบคุณสำนักงานสาขาลาดพร้าว ที่ช่วยในการเก็บข้อมูลภาคสนาม และขอขอบพระคุณ คุณวิโรจน์ ศรีอุฐู เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นางสาวจันจิรา ประดับวงศ์ นางสาวอรกช สังข์พิชัย นางสาวอุษณากร ภักดีรักษพงศ์ นายอธิป จามน้อยพรหม นิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ช่วยในตรวจวัดข้อมูลภาคสนาม ดร.กัญจน์นรี ชวงช้า อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และคุณทัศนีย์ แก้ววงศ์วัฒนา ที่ได้ให้ยืมอุปกรณ์ในการตรวจวัด คลอรีนภาคสนาม เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

คุณประโยชน์อันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบความดีทั้งปวงแต่บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ผู้มีพระคุณ คณาจารย์ทุกท่าน และเพื่อนๆ ของข้าพเจ้าทุกท่าน ที่คอยเป็น กำลังใจและให้คำปรึกษามาโดยตลอด

ศุภรักษ์ แก้วแสง

พฤษภาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	37
ผลการศึกษาและวิจารณ์	52
สรุปและข้อเสนอแนะ	70
สรุป	70
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	74
ภาคผนวก	78
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดัน (Pressure Logger)	79
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการใช้อุปกรณ์วัดคลอรีนอิสระคงเหลือ	81
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	90

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	วัสดุ อายุท่อเฉลี่ย และความยาวรวมของท่อ ในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05	4
2	ตารางสมมูลน้ำสากล	11
3	มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง (ตามข้อเสนอแนะขององค์การอนามัยโลก ปี 2006)	13
4	ค่าสัมประสิทธิ์ C ของสูตร Hazen – Williams สำหรับท่อชนิดต่างๆ	31
5	ข้อมูลอัตราการไหลและค่าแรงดันน้ำจุดน้ำจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง	40
6	ข้อมูลตรวจวัดแรงดันภาคสนามบนหัวดับเพลิงที่กระจายอยู่ในพื้นที่เฝ้าระวัง จำนวน 4 จุด	43
7	ข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือรายชั่วโมง ณ สถานีสูบน้ำจ่ายน้ำลาดพร้าว 12-03-05 วันที่ 9 ธันวาคม 2556	44
8	ข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่ทำการตรวจวัดจากภาคสนามใน พื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 ณ วันที่ 9 ธันวาคม 2556	46
9	ค่า r และค่า RMSE ของจุดตรวจวัดแรงดัน 4 จุด ภายในพื้นที่ศึกษา	53
10	ค่า r และ RMSE กรณีที่ k_w เท่ากับ 0.0 และ -0.16 ม./วัน	57

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	พื้นที่ให้บริการสำนักงานประปาสาขาลาดพร้าว	3
2	ขอบเขตพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05	5
3	กลยุทธ์ 4 ด้านสำหรับการบริหารจัดการน้ำสูญเสียทางด้านเทคนิค	9
4	ปฏิกิริยาในมวลน้ำกับ Natural Organic Matter (NOM) และปฏิกิริยาที่ผนังท่อ เมื่อเกิดปฏิกิริยา Oxidation กับ Biofilm และวัสดุท่อ	17
5	ความสัมพันธ์ของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือต่อเวลา โดยได้ค่า $k_d = -3.384 \text{ วัน}^{-1}$	19
6	ระบบเฝ้าระวังคุณภาพน้ำประปาแบบรายงานผลเป็นปัจจุบัน (Real-time tap water quality monitoring system)	20
7	แผนที่แสดงตำแหน่งตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือน้ำประปา โรงงานผลิตน้ำ สถานีสูบน้ำและน้ำประปาแบบจ่ายน้ำ เดือนธันวาคม 2556	21
8	แผนที่แสดง Chlorine Contours น้ำประปาโรงงานผลิตน้ำ สถานีสูบน้ำ และน้ำประปาแบบจ่ายน้ำ เดือนมิถุนายน 2556	22
9	ปรากฏการณ์ชลศาสตร์และพลังงานเมื่อเกิดการไหลในท่อ	28
10	แผนผังสำหรับคำนวณสูตรของ Hazen – Williams	32
11	แผนผังแสดงวิธีการศึกษา	37
12	ข้อมูลโครงข่ายท่อจ่าย จุดจ่ายน้ำเข้า หัวดับเพลิง จุดผู้ใช้น้ำและขอบเขต DMA	38
13	รูปแบบการใช้น้ำของพื้นที่ศึกษาแบบบ้านพักอาศัย	41
14	จุดเก็บข้อมูลคลอรีนและแรงดัน	42
15	ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันบนหัวดับเพลิง	42
16	การตรวจวัดข้อมูลคลอรีนภาคสนาม	45
17	ขั้นตอนการใช้โปรแกรม shp2epa เพื่อทำการแปลงไฟล์ GIS เป็นไฟล์นามสกุล .inp	47
18	ขั้นตอนการรัน Macro ในโปรแกรม Microsoft office excel	48
19	โครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำประปาเมื่อเปิดด้วยโปรแกรม EPANET	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	กราฟการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ระหว่างแบบจำลองกับจุดตรวจวัด	52
21	การเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่จุดตรวจวัดที่ 1 กับแบบจำลอง	53
22	การเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่จุดตรวจวัดที่ 2 กับแบบจำลอง	54
23	การเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่จุดตรวจวัดที่ 3 กับแบบจำลอง	54
24	การเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่จุดตรวจวัดที่ 4 กับแบบจำลอง	55
25	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ โรงสูบน้ำลาดพร้าวและ ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ใฝ่ระวังในวันที่ 9 ธันวาคม 2556	56
26	กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่วัดได้จริงจากสนามจุดที่ 2 และแบบจำลอง	58
27	กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่วัดได้จริงจากสนามจุดที่ 3 และแบบจำลอง	58
28	กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่วัดได้จริงจากสนามจุดที่ 4 และแบบจำลอง	59
29	การกระจายตัวของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่ใฝ่ระวัง 12-03-05 ช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูงสุด เวลา 8.00 นาฬิกา	60
30	การกระจายตัวของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่ใฝ่ระวัง 12-03-05 ช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำต่ำสุด เวลา 4.00นาฬิกา	61
31	การเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นกรณีไม่ปรับแก้ความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นกับกรณีศึกษา (ปรับแก้ความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้น)	63
32	กรณีศึกษาการกระจายตัวของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่ใฝ่ระวัง 12-03-05 ช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูงสุด เวลา 8.00 นาฬิกา	64
33	กรณีศึกษาการกระจายตัวของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่ใฝ่ระวัง 12-03-05 ช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำต่ำสุด เวลา 4.00 นาฬิกา	65
34	จุดตรวจวัดข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือภาคสนามเพิ่มเติม	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ โรงสูบน้ำบาดาลพร้าว และ ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05-01 (DM-12-03-05-01) ในวันที่ 3 มิถุนายน 2557 ระยะทางจากสถานีสูบน้ำบาดาลพร้าว 5.8 กิโลเมตร	68
36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ โรงสูบน้ำบาดาลพร้าว และ ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-10-01 (DM-12-03-10-01) ในวันที่ 4 มิถุนายน 2557 ระยะทางจากสถานีสูบน้ำบาดาลพร้าว 7.2 กิโลเมตร	68
37	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ โรงสูบน้ำบาดาลพร้าว และ ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-02-07-02 (DM-12-02-07-02) ในวันที่ 5 มิถุนายน 2557 ระยะทางจากสถานีสูบน้ำบาดาลพร้าว 5.5 กิโลเมตร	69
ภาพผนวกที่		
ข1	การเปิดเครื่อง Pocket Colorimeter II	82
ข2	การนำน้ำตัวอย่างใส่ในหลอดปริมาณ 10 มิลลิลิตร	83
ข3	การเติมสาร DPD free chlorine reagent	83
ข4	การเขย่าสารละลายให้เข้ากัน	84
ข5	การเปิดเครื่อง Portable Turbidity and Chlorine meter HI 93414	84
ข6	การเลือกโหมดการวัดค่า Free Chlorine	85
ข7	การนำน้ำตัวอย่างใส่ในหลอดและเขย่าหลอดให้สะอาด	85
ข8	การนำหลอดใส่ตัวเครื่องและปิดฝาเครื่อง	85
ข9	การตั้งค่าศูนย์ (ZERO)	86
ข10	การเติมสารเคมี HI- 93701 ลงในหลอดน้ำตัวอย่าง	86
ข11	การนำตัวอย่างเข้าสู่ตัวเครื่อง และการอ่านค่า	87
ข12	ขั้นตอนการตั้งค่าอุปกรณ์ในการวัดคลอรีน	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข13	ขั้นตอนการตั้งค่าศูนย์ (ZERO)	89
ข14	ขั้นตอนการตรวจวัดน้ำตัวอย่างเพื่อหาปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ	89



อธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C	=	สัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นกับชนิดของท่อ
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
DM	=	จุดน้ำจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง (District Meter, DM)
DMA	=	พื้นที่เฝ้าระวัง (District Metering Area)
FAVAD	=	Fixed and variable area discharge
GIS	=	ระบบภูมิสารสนเทศ
H	=	แรงดัน
h_f	=	การสูญเสียหลัก
k_b	=	ค่าสัมประสิทธิ์การสลายตัวในมวลน้ำ (Bulk decay coefficient)
k_w	=	ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการทำปฏิกิริยากับผนังท่อ (Wall reaction rate coefficient)
m_1	=	อันดับปฏิกิริยาสำหรับ Bulk Reaction
m_2	=	อันดับปฏิกิริยาสำหรับ Wall Reaction
N_1	=	ค่ายกกำลังแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลรั่ว กับแรงดัน
R	=	รัศมีชลศาสตร์
Re	=	Reynolds number
S	=	ค่าการสูญเสียหัวแรงดันเนื่องจากความเสียดทานหนึ่งหน่วยความยาวท่อ
t	=	เวลาในการเคลื่อนที่
V	=	ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ
กปน.	=	การประปานครหลวง
ม. ³ /วินาที	=	ลูกบาศก์เมตร/วินาที
มก./ลิตร	=	มิลลิกรัม/ลิตร
มม.	=	มิลลิเมตร
ลบ.ม.	=	ลูกบาศก์เมตร

การจำลองคุณภาพน้ำของระบบโครงข่ายท่อประปาด้วยแบบจำลอง EPANET

Water Quality Simulation of a Water Distribution Network System by EPANET Model

คำนำ

คลอรีนเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ทั่วไปในกระบวนการผลิตน้ำประปา ซึ่งการประปานครหลวง (กปน.) ได้ใช้คลอรีนในกระบวนการผลิตน้ำประปา เพราะมีราคาถูก ประสิทธิภาพดี ควบคุมง่าย คงทนอยู่ในน้ำได้นาน และคลอรีนมีสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์และฆ่าเชื้อโรคได้ดี ในช่วงพีเอชของน้ำประปา (6.5-8.0) อีกทั้งยังมีปริมาณคงเหลือเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่อาจเข้าสู่ระบบเส้นท่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปี 2556 กปน. ได้ใช้คลอรีนจำนวน 8,022 ตัน ในกระบวนการผลิตน้ำประปา คิดเป็นเงิน 76,869,950 บาท ซึ่งปริมาณคลอรีนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการตรวจสอบคุณภาพน้ำประปาซึ่งตามมาตรฐานองค์การอนามัยโลกได้กำหนดไว้ว่าควรมีปริมาณคลอรีนคงเหลือถึงผู้ใช้น้ำไม่ต่ำกว่า 0.2 มก./ลิตร

มีหลายงานวิจัยได้ใช้แบบจำลอง EPANET ในการศึกษาเรื่องปริมาณคลอรีนคงเหลือในระบบโครงข่ายท่อประปาในระดับท่อจ่ายน้ำ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการศึกษาที่มีความละเอียดในระดับท่อจ่ายน้ำเพียงเท่านั้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้สร้างแบบจำลองคุณภาพน้ำที่มีความละเอียดสูงถึงระดับจุดผู้ใช้น้ำโดยใช้แบบจำลอง EPANET โดยทำการศึกษา 2 ส่วน ดังนี้ 1) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่สถานีสูบน้ำลาดพร้าวกับจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 โดยหาความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่างข้อมูลการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือจากระบบตรวจสอบคุณภาพน้ำประปาระยะไกลของการประปานครหลวงและข้อมูลตรวจวัดจริงจากจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ 2) การศึกษาการกระจายตัวของคลอรีนในระบบท่อจ่ายน้ำในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 โดยนำข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือจากการตรวจวัดจริงในพื้นที่มาเป็นข้อมูลในการสร้างและสอบเทียบแบบจำลอง ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของคลอรีนได้ถึงระดับจุดผู้ใช้น้ำได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างแบบจำลองคุณภาพน้ำของโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำประปาและทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ได้แก่ อายุน้ำและปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือถึงระดับจุดผู้ใช้น้ำ
2. เพื่อศึกษาการกระจายตัวของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือของโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำประปาในพื้นที่เฝ้าระวังถึงระดับจุดผู้ใช้น้ำ

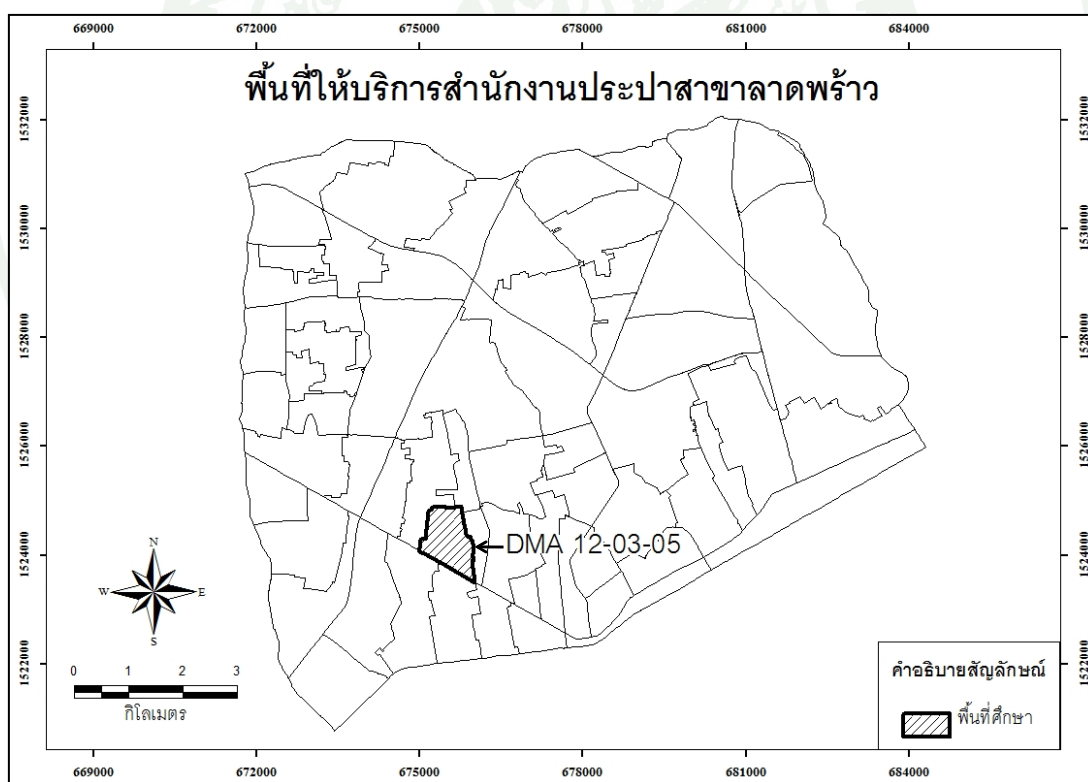
ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาเฉพาะโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำประปาในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 สำนักงานประปาสาขาลาดพร้าว
2. จำลองระบบท่อจ่ายน้ำขนาดท่อตั้งแต่ 50 มม. ถึง 300 มม. โดยถือว่าพื้นที่ศึกษามีสภาพภูมิประเทศเป็นที่ราบจึงไม่พิจารณาความแตกต่างของระดับท่อ

การตรวจเอกสาร

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ประปาสาขาลาดพร้าวมีพื้นที่รับผิดชอบทั้งสิ้น 96.34 ตารางกิโลเมตร แสดงดังภาพที่ 1 ปัจจุบันมีจำนวนผู้ใช้น้ำรวมทั้งสิ้น 143,814 ราย โดยแยกเป็นผู้ใช้น้ำรายเล็ก 141,609 ราย ผู้ใช้น้ำรายใหญ่ 1,945 ราย และผู้ใช้น้ำราชการ 260 ราย ระบบท่อในพื้นที่ประกอบด้วย ท่อประธาน 94 กิโลเมตร และท่อจ่ายน้ำ 2,150 กิโลเมตร การใช้น้ำโดยเฉลี่ยของพื้นที่ประปาสาขาลาดพร้าวอยู่ระหว่าง 303,000 ถึง 353,000 ลบ.เมตรต่อวัน พื้นที่ประปาสาขาลาดพร้าว แบ่งพื้นที่ออกเป็น 7 Zone ซึ่งประกอบด้วย 65 DMA (District Metering Area) มีสถานีสูบ-จ่ายน้ำเพียงแห่งเดียวคือ สถานีสูบ-จ่ายน้ำลาดพร้าว โดยมีปริมาณน้ำสูบจ่ายเฉลี่ย 350,000 ลบ.เมตรต่อวัน และมีแรงดันน้ำจ่ายเฉลี่ย 17.6 เมตร (การประปานครหลวง, 2556ค)



ภาพที่ 1 พื้นที่ให้บริการสำนักงานประปาสาขาลาดพร้าว

พื้นที่ฝักระวังในพื้นที่ประปาสาขาลาดพร้าวที่ใช้เป็นพื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่พื้นที่ฝักระวัง 12-03-05 แสดงดังภาพที่ 2 ปัจจุบันมีจำนวนผู้ใช้น้ำจำนวน 1,968 ราย แยกเป็นผู้ใช้น้ำรายเล็ก 1,943 ราย ผู้ใช้น้ำรายใหญ่ 22 ราย และผู้ใช้น้ำราชการ 3 ราย ระบบท่อจ่ายน้ำในพื้นที่ฝักระวังมีความยาว 20,938 เมตร รายละเอียดวัสดุ อายุท่อเฉลี่ย และความยาวรวมของท่อในพื้นที่ฝักระวัง แสดงไว้ในตารางที่ 1 มีหัวดับเพลิงจำนวน 16 ตัว จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ 1 จุด จากข้อมูลเดือนธันวาคม 2556 พบว่ามีปริมาณน้ำเข้าในพื้นที่ 110,928 ลบ.เมตร ปริมาณน้ำจำหน่าย 77,533 ลบ.เมตร และเปอร์เซ็นต์น้ำสูญเสีย 30.11 %

ตารางที่ 1 วัสดุ อายุท่อเฉลี่ย และความยาวรวมของท่อ ในพื้นที่ฝักระวัง 12-03-05

วัสดุ	อายุท่อเฉลี่ย (ปี)	ความยาวรวม (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

ที่มา: การประปานครหลวง (2556จ)



ภาพที่ 2 ขอบเขตพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05

น้ำสูญเสีย

น้ำสูญเสียในกิจการประปา สามารถพิจารณาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ 1) น้ำสูญเสียทางด้านเทคนิค (Real losses หรือ Physical loss) คือน้ำสูญเสียจริงที่เกิดจากสภาพทางกายภาพของระบบประปา ได้แก่การแตกรั่วของท่อประปาและน้ำไหลล้นในระบบกักเก็บ 2) น้ำสูญเสียจากการบริหารจัดการ (Apparent Losses หรือ Commercial loss) คือน้ำสูญเสียที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของมิเตอร์ ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล รวมถึงการลักใช้น้ำ โดยทั่วไปแล้ว น้ำสูญเสียทางด้านเทคนิคจะมีสัดส่วนที่สูงกว่าน้ำสูญเสียจากการบริหารจัดการ การศึกษานี้จึงได้พิจารณาน้ำสูญเสียทางด้านเทคนิคเป็นหลัก ซึ่งอัตราการไหลรั่วสามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์กับแรงดันได้ดังนี้

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

เมื่อ Q = อัตราการไหลรั่ว (เมตร³/วินาที)

H = แรงดันน้ำ (เมตร)

C = ค่าคงที่

N_1 = ค่ายกกำลัง

สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจเรียกว่าสมการ FAVAD (Fixed Variable Area Discharge) โดยมีหลายงานวิจัยที่ใช้สมการนี้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์แรงดันกับอัตราการไหลรั่ว เช่นงานวิจัยของ May (1994) ได้ทดสอบข้อมูลจากประเทศญี่ปุ่นและสหราชอาณาจักร รวมทั้งที่อื่นๆ ทั่วโลก พบว่าค่า N_1 ตามทฤษฎีของการไหลผ่านรูเปิด (Orifice flow) จะเท่ากับ 0.5 โดยมีข้อสมมติฐานว่าขนาดของรูเปิดต้องไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันน้ำทำให้อัตราการสูญเสียแปรผันกับแรงดันน้ำยกกำลัง 0.5 แต่จากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าแรงดันน้ำมีผลให้พื้นที่หน้าตัดของรูรั่วมีขนาดขยายเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Van Zyl (2004) และ Miranda *et al.* (2011) เป็นต้น โดยค่า N_1 จะผันแปรระหว่าง 0.5 ถึง 2.5 นอกจากนี้ Clayton and Van Zyl (2007) ยังพบว่าชนิดวัสดุท่อและลักษณะของรอยแตกมีความสัมพันธ์กับค่า N_1 ด้วย สำหรับในพื้นที่ของ กปน. งานวิจัยของ วีรวรร และคณะ (2556ข) ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่า Leakage Exponent (N_1) ในพื้นที่ใฝ่ระวัง 12-03-05 และ 12-04-08 พบว่าค่ายกกำลังในพื้นที่ที่มีค่าประมาณ 1.0 และงานวิจัยของ ศุภรักษ์ และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาลักษณะของรอยแตกที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและอัตราการไหลรั่วของท่อ PVC โดยทำการจำลองลักษณะการแตกรั่ว 3 ลักษณะ คือการแตกรั่วแบบ

รูปกลม การแตกรั่วตามแนวขวาง การแตกรั่วตามแนวยาว ผลการทดลองพบว่าลักษณะของรอยแตกมีผลต่ออัตราการไหลรั่วของท่อ PVC โดยจากลักษณะการแตกรั่ว 3 ลักษณะ คือการแตกรั่วแบบรูปกลม การแตกรั่วตามแนวขวาง และการแตกรั่วตามแนวยาว มีค่ายกกำลัง N_1 เฉลี่ย เท่ากับ 0.535, 0.611 และ 0.680 ตามลำดับ โดยค่า N_1 มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อรอยแตกเป็นการแตกตามแนวยาว

การจำลองการไหลรั่วด้วยแบบจำลอง EPANET

สำหรับการจำลองการไหลรั่วด้วยแบบจำลอง EPANET สามารถใช้ Emitter function จำลองได้เนื่องจากมีสมการสอดคล้องกับสมการการไหลรั่ว โดยที่ Emitter คือฟังก์ชันที่สามารถใช้เพื่อจำลองการไหลผ่านระบบชลประทานน้ำหยด ระบบสปริงเกอร์ ระบบที่มีน้ำรั่วไหล และระบบอื่นๆ ที่อัตราการไหลแปรผันกับแรงดัน ซึ่งอัตราการไหลผ่านรูจะแปรผันกับแรงดันที่ตำแหน่งรูนั้นๆ แสดงได้ดังสมการ (2)

$$Q = CP^{\gamma} \quad (2)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลรั่ว (เมตร³/วินาที)
 P = แรงดันน้ำ (เมตร)
 C = สัมประสิทธิ์อัตราการไหลของ Emitter (Emitter Coefficient)
 γ = ค่ายกกำลังแรงดันของ Emitter (Emitter Exponent)

กลยุทธ์ 4 ด้านสำหรับการบริหารจัดการน้ำสูญเสียทางด้านเทคนิค

สำหรับการบริหารจัดการน้ำสูญเสียทางด้านเทคนิค จะนิยมใช้กลยุทธ์ 4 ด้าน ดังแสดงในภาพที่ 3 อันประกอบไปด้วย

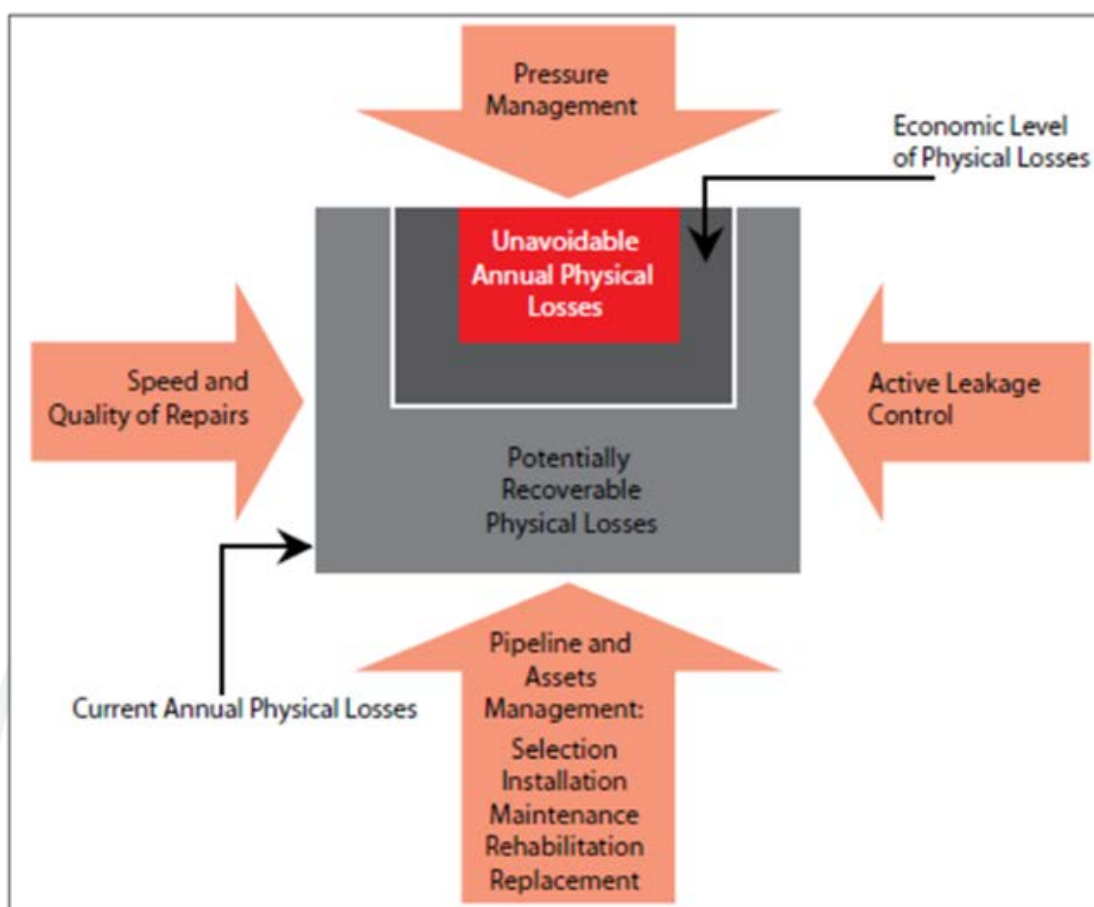
1. การบริหารจัดการแรงดัน (Pressure Management)
2. การควบคุมน้ำสูญเสียเชิงรุก (Active Leakage Control)
3. ความรวดเร็วและคุณภาพการซ่อมท่อ (Speed and Quality of Repairs)

4. การบริหารจัดการโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure Management)

กลยุทธ์แต่ละด้านมีหลักการเบื้องต้นในการบริหารจัดการน้ำสูญเสียเชิงเทคนิคที่ต่างกันไป การบริหารจัดการแรงดัน มีวัตถุประสงค์ในการควบคุมแรงดันน้ำในระบบประปาให้เหมาะสม เพื่อเป็นการลดน้ำสูญเสียที่เกิดจากแรงดันน้ำส่วนเกินในระบบประปา รวมไปถึงลดความเสี่ยงต่อการแตกรั่วที่เพิ่มขึ้นจากแรงดันผันแปร การควบคุมน้ำสูญเสียเชิงรุก มีวัตถุประสงค์ในการควบคุมน้ำสูญเสียโดยมุ่งเน้นควบคุมและค้นหาท่อแตกรั่วในระบบประปาเชิงรุก เช่น การติดตั้งพื้นที่เฝ้าระวัง การใช้เทคนิคและเทคโนโลยีใหม่ๆ ในการค้นหาท่อแตกรั่ว เป็นต้น ความรวดเร็วและคุณภาพการซ่อมท่อ เป็นกลยุทธ์ที่ต่อเนื่องจากการควบคุมน้ำสูญเสียเชิงรุก กล่าวคือ เมื่อพบว่าท่อแตกรั่วแล้ว การเข้าซ่อมท่ออย่างรวดเร็วจะเป็นการลดน้ำสูญเสีย และการควบคุมคุณภาพการซ่อมท่อจะลดปัญหาท่อแตกรั่วซ้ำได้ ส่วนการบริหารจัดการโครงสร้างพื้นฐาน จะเป็นการบริหารจัดการท่อประปาและอุปกรณ์ประกอบ เริ่มตั้งแต่การออกแบบ การติดตั้ง การบำรุงรักษา และการปรับเปลี่ยน มุ่งเน้นให้การบริหารจัดการท่อประปามีความเหมาะสมเชิงวิศวกรรมและเชิงเศรษฐศาสตร์

พื้นที่เฝ้าระวัง

การจัดตั้งพื้นที่เฝ้าระวัง (District Metering Area, DMA) เป็นหนึ่งในกลยุทธ์ที่นิยมใช้ในการควบคุมน้ำสูญเสีย โดยระบบ DMA คือ การแบ่งโครงข่ายระบบจ่ายน้ำขนาดใหญ่ออกเป็นพื้นที่ย่อยที่แยกออกจากกันอย่างชัดเจนทางศาสตร์ ซึ่งจะมีการติดตั้งมาตรวัดน้ำที่จุดน้ำเข้า/ออกพื้นที่ย่อยดังกล่าว (District Meter, DM) เพื่อให้สามารถทราบข้อมูลทางศาสตร์และนำมาวิเคราะห์ประกอบการเฝ้าระวังและการดำเนินยุทธวิธีต่างๆ ในการลดน้ำสูญเสียภายในพื้นที่ย่อยนั้น ระบบ DMA เป็นเครื่องมือที่สำคัญที่สามารถช่วยควบคุมน้ำสูญเสียทางด้านเทคนิคได้ 2 กลยุทธ์จากกลยุทธ์ทั้งหมด 4 กลยุทธ์สำหรับการบริหารจัดการน้ำสูญเสียทางด้านเทคนิค (ภาพที่ 3) ได้แก่ การช่วยลดเวลาในการทราบถึงเหตุการณ์ท่อแตกรั่วที่เกิดขึ้นใหม่ด้วยการวิเคราะห์การไหลกลางคืน (Night flow analysis) และการเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาท่อแตกรั่วเชิงรุก (Active leakage detection) นอกจากนี้ ระบบ DMA ยังช่วยในการวิเคราะห์สมดุลน้ำอย่างละเอียดได้ด้วย



ภาพที่ 3 กลยุทธ์ 4 ด้านสำหรับการบริหารจัดการน้ำสูญเสียทางด้านเทคนิค

ที่มา: Farley *et al.* (2008)

สมดุลน้ำในกิจการประปา

การทำสมดุลน้ำเป็นขั้นตอนแรกที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับกิจการประปาที่จะเรียนรู้และใช้ประกอบการกำหนดกลยุทธ์ในการบริหารจัดการน้ำสูญเสีย สถาบัน International Water Association (IWA) ได้กำหนดหลักการและขั้นตอนวิธีการในการประเมินปริมาณน้ำที่ไม่ก่อให้เกิดรายได้ที่ชัดเจน และได้ถูกนำไปใช้งานในกิจการประปาต่างๆ ทั่วโลก อาทิ ออสเตรเลีย นิวซีแลนด์ แอฟริกาใต้ และในบางรัฐของสหรัฐอเมริกา ธนาคารโลก (World Bank) ได้นำหลักการดังกล่าวไปใช้ในการประเมินการให้การสนับสนุนทางการเงินแก่กิจการประปา และได้ปรับเปลี่ยนเทอม “Apparent losses” เป็น “Commercial losses” เพื่อแสดงให้เห็นว่าการสูญเสียปริมาณน้ำในส่วนนี้เป็นการสูญเสียน้ำเพื่อการค้าที่มีมูลค่าเทียบเท่าน้ำจำหน่าย และได้ปรับเปลี่ยนเทอม “Real losses” เป็น “Physical losses” เพื่อแสดงให้เห็นว่าเป็นการสูญเสียปริมาณน้ำในเชิงกายภาพจึงมีมูลค่าเทียบเท่าน้ำผลิต ดังแสดงในตารางที่ 2

สำหรับการวิเคราะห์สมดุลน้ำในพื้นที่เฝ้าระวัง จะไม่ได้ดำเนินการตามตารางสมดุลน้ำสากลทั้งหมด เนื่องจากตารางดังกล่าวออกแบบมาเพื่อวิเคราะห์สมดุลน้ำของกิจการประปาเป็นหลัก แต่จะใช้หลักการเดียวกัน โดยไม่พิจารณาถึงน้ำสูญเสียจากการบริหารจัดการ การคำนวณ และวิเคราะห์สมดุลน้ำในพื้นที่เฝ้าระวังมีสมการดังนี้

$$\%Loss_{DMA} = (\sum SIV_{DMA} - \sum SALE_{DMA}) / \sum SIV_{DMA} \quad (3)$$

โดยที่	$Loss_{DMA}$	=	ปริมาณน้ำสูญเสียใน DMA
	SIV_{DMA}	=	ปริมาณน้ำเข้าใน DMA
	$SALE_{DMA}$	=	ปริมาณน้ำจำหน่ายใน DMA

ตารางที่ 2 สมดุลน้ำสากล

System Input Volume	Authorized Consumption	Billed Authorized Consumption	Billed Metered Consumption	Revenue
			Billed Unmetered Consumption	Water
		Unbilled Authorized Consumption	Unbilled Metered Consumption	Non- Revenue Water
			Unbilled Unmetered Consumption	
	Water Losses	Commercial Losses	Unauthorized Consumption	
			Metering Inaccuracies and Data Handling Errors	
		Physical Losses	Leakage on Transmission and/or Distribution Mains	
			Leakage and Overflows at Utility's storage Tanks	
Leakage on Service Connections up to Point of Customer Metering				

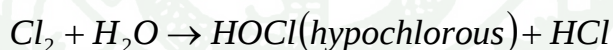
ที่มา: International Water Association and World Bank (2013)

คลอรีนและอายุน้ำ

คลอรีนเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ทั่วไปในกระบวนการผลิตน้ำประปา เรียกว่าวิธีการนี้ว่าคลอรีเนชัน (Chlorination) คลอรีนมีสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์และมีปริมาณคงเหลือเพื่อทำปฏิกิริยากำจัดสิ่งปนเปื้อนที่อาจเข้าสู่ระบบเส้นท่อได้ ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัวของคลอรีนขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของคลอรีนในมวลน้ำและผนังท่อ ทั้งนี้การสลายตัวของคลอรีนขึ้นกับระยะเวลาที่น้ำเดินทางจากจุดน้ำเข้าไปถึงจุดผู้ใช้น้ำ ระยะเวลาระหว่างที่น้ำเดินทางไปถึงผู้ใช้น้ำเรียกว่า อายุ น้ำ ซึ่งอายุน้ำขึ้นกับความเร็วและอัตราการไหลในโครงข่ายท่อจ่ายน้ำ ถ้าอายุน้ำสูงมากจะส่งผลให้ปริมาณคลอรีนคงเหลือลดลง กปน. ได้ใช้คลอรีนในกระบวนการผลิตน้ำประปา ดังนั้น กปน. จึงมีการควบคุมปริมาณคลอรีนที่ต้นทาง เช่น โรงสูบน้ำจ่าย ให้มีปริมาณคลอรีนสูงในระดับประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้ยังมีปริมาณคลอรีนคงเหลือถึงผู้ใช้น้ำตามมาตรฐานองค์การอนามัยโลก คือ ไม่น้อยกว่า 0.20 มก./ต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 3

ปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำ

การเติมคลอรีนลงในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแตกตัวเป็น HOCl และ OCl⁻ ที่เรียกว่า คลอรีนอิสระ (Free Available Chlorine) ซึ่งทั้ง 2 ชนิดเป็นสารสำหรับฆ่าเชื้อโรค



กรด HOCl แตกตัวในน้ำจะให้ hydrogen ion และ hypochlorite ion ดังสมการ



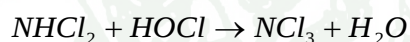
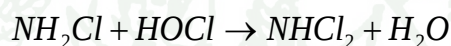
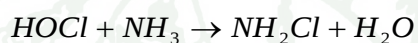
Cl₂, HOCl และ OCl⁻ เรียกว่าคลอรีนอิสระคงเหลือ (Free residual chlorine) ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือชนิดใดจะมากหรือน้อยกว่ากันอยู่ที่ สภาพ pH ของน้ำ ที่ pH ของน้ำต่ำกว่า 1.0 คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของคลอรีนก๊าซ (Cl₂) ทั้งหมดและจะระเหยสู่บรรยากาศ ที่ pH 1.0 ถึง 3.5 คลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปของก๊าซและ HOCl ที่ pH ในช่วง 3.5 ถึง 5.5 คลอรีนอิสระจะอยู่ในรูป HOCl ทั้งหมด ที่ pH ในช่วง 5.5 ถึง 9 จะอยู่ในรูปของ HOCl และ OCl⁻ และที่ pH ตั้งแต่ 9 ขึ้นไปจะอยู่ในรูป OCl⁻

ตารางที่ 3 มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง (ตามข้อเสนอแนะขององค์การอนามัยโลก ปี 2006)

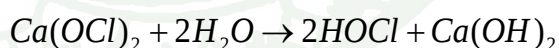
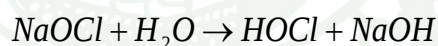
พารามิเตอร์	คำแนะนำ WHO 2006	หน่วย (units)
คุณสมบัติทางแบคทีเรีย (Bacteriological Quality)		
แบคทีเรียชนิด อีโคไล (E. coli)	ไม่พบ/100 มก.	พบ-ไม่พบ/100 มก.
คุณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ (Physical and Chemical Quality)		
สีปรากฏ (Appearance color)	15	True color unit
ความขุ่น (Turbidity)	5	NTU
รสและกลิ่น (Taste and odour)	ไม่เป็นที่ยอมรับ	-
สารหนู (Arsenic)	0.01	มก./ลิตร
แคดเมียม (Cadmium)	0.003	มก./ลิตร
โครเมียม (Chromium)	0.05	มก./ลิตร
ไซยาไนด์ (Cyanide)	0.07	มก./ลิตร
ตะกั่ว (Lead)	0.01	มก./ลิตร
ปรอท (Inorganic Mercury)	0.006	มก./ลิตร
เซเลเนียม (Selenium)	0.01	มก./ลิตร
ฟลูออไรด์ (Fluoride)	1.5	มก./ลิตร
คลอไรด์ (Chloride)	250	มก./ลิตร
ทองแดง (Copper)	2	มก./ลิตร
เหล็ก (Iron)	0.3	มก./ลิตร
แมงกานีส (Manganese)	0.4	มก./ลิตร
โซเดียม (Sodium)	200	มก./ลิตร
ซัลเฟต (Sulfate)	250	มก./ลิตร
สังกะสี (Zinc)	3	มก./ลิตร
ปริมาณมวลสารที่ละลายทั้งหมด (Total dissolved solids)	1000	มก./ลิตร
ไนเตรทในรูปไนเตรท (Nitrate as NO ₃ -)	50	มก./ลิตร
ไมโครซิสติน-แอลอาร์ (Microcystin-LR)	0.001	มก./ลิตร
คลอรีนอิสระคงเหลือ (Free Residual Chlorine)	> 0.2	มก./ลิตร

ที่มา: การประปานครหลวง (2556ก)

คลอรีนอิสระในรูป HOCl มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมากกว่าคลอรีนในรูป OCl⁻ ถึง 100 เท่า ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูง ควรจะมีคลอรีนในรูปของ HOCl เหลืออยู่ในน้ำ ตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก สำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำทั้งแบบที่เรียวและไวรัส โดยทั่วไป ปริมาณคลอรีนอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ต้องไม่ต่ำกว่า 0.5 มก./ลิตร โดยที่ pH ของน้ำต้องไม่สูงกว่า 8 และความขุ่นต้องไม่เกิน 1 NTU ในน้ำประปาซึ่งผลิตจากน้ำผิวดิน ส่วนมากจะมีแอมโมเนียเหลืออยู่ในน้ำเมื่อทำปฏิกิริยากับคลอรีน (HOCl) จะได้คลอรีนอิสระคงเหลืออีกชนิดหนึ่งเรียกว่า คลอรามิน หรือ Combined residual chlorine ได้แก่โมโนคลอรามิน (NH₂Cl) ไดคลอรามิน (NHCl₂) และไตรคลอรามิน (NCl₃) Combined residual chlorine มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคต่ำ แต่คงทนอยู่ในน้ำได้ยาวนานกว่า



คลอรีนอิสระทั้ง Free residual chlorine และ Combined residual chlorine รวมกันเรียกว่าคลอรีนคงเหลือทั้งหมด (Total residual chlorine) สำหรับคลอรีนน้ำและคลอรีนผงปฏิกิริยาในน้ำเป็นไปตามสมการข้างล่าง



การใช้คลอรีนน้ำและคลอรีนผง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คลอรีนก๊าซ จะเห็นว่าการใช้คลอรีนน้ำและผงจะทำให้แนวโน้มของค่า pH เป็นไปในทางที่สูงขึ้น เนื่องจากตามสมการเคมีจะมีตัวเกิดขึ้น แต่การใช้คลอรีนก๊าซจะทำให้แนวโน้มของค่า pH ในน้ำต่ำลงเนื่องจากมีกรดเกิดขึ้น ดังนั้นการใช้คลอรีนก๊าซฆ่าเชื้อโรคตามทฤษฎีแล้วจะมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้คลอรีนรูปอื่น แต่ในทางปฏิบัตินั้นผลไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะปริมาณคลอรีนที่ใช้้น้อยมากผลกระทบต่อ pH ของน้ำจึงค่อนข้างน้อย คลอรีนในน้ำประปาทั่วไปจะมีทั้ง Free residual chlorine (HOCl และ OCl⁻) และ Combined residual chlorine

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำ

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำได้แก่

1. pH ของน้ำ ดังได้กล่าวไว้แล้ว ถ้า pH สูง คลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปของ OCl^- ในเปอร์เซ็นต์ค่อนข้างสูง ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อโรคต่ำลงมาก ยิ่งในกรณีน้ำจากระบบหล่อเย็นซึ่งส่วนใหญ่ pH เกือบถึง 9 ประสิทธิภาพการทำลายเชื้อโรคเกือบจะหมดไป ดังนั้นการเติมคลอรีนในน้ำหล่อเย็นจะมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อต่ำมาก
2. อุณหภูมิ อุณหภูมิมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำด้วยเหตุผลหลัก 2 ประการได้แก่ ปริมาณชนิดของคลอรีนอิสระคงเหลือ กรณีที่อุณหภูมิของน้ำต่ำคลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของ HOCl มาก ซึ่งมีประสิทธิภาพสูง ในทางกลับกัน ถ้าอุณหภูมิของน้ำสูง คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของ HOCl น้อย อีกประการหนึ่งก็คือ อุณหภูมิสูงจะทำให้คลอรีนสลายตัวได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพของคลอรีนต่ำลงด้วย
3. เวลา ถ้าเวลาที่สัมผัสคลอรีนในน้ำ (Contact time) นานขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีนสูงขึ้น ในทางกลับกันถ้าเวลาที่สัมผัสคลอรีนในน้ำน้อยลงประสิทธิภาพจะต่ำลง
4. ความเข้มข้น เช่นเดียวกับเวลาถ้าความเข้มข้นของคลอรีนสูงประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคจะสูง โดยทั่วไปเมื่อต้องการจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ปัจจัยที่ควรพิจารณาคือค่าความเข้มข้นของคลอรีนที่เหลือกับเวลาสัมผัส
5. สารอินทรีย์ในน้ำ ในกรณีที่น้ำมีสารอินทรีย์สูงจะทำให้คลอรีนมีประสิทธิภาพด้อยลง เนื่องจากคลอรีนที่เติมลงไปจะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ก่อนทำให้เหลือคลอรีนที่จะไปฆ่าเชื้อโรคน้อย นอกจากนี้ปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำยังทำให้เกิดสารจำพวก THMs (Trihalomethane) ซึ่งเป็นพิษต่อร่างกาย ดังนั้นในกรณีที่น้ำมีสารอินทรีย์สูง (วัดได้ในรูปของ TOC) จะต้องกำจัดสารอินทรีย์ให้เหลือน้อยก่อนที่จะมีการเติมคลอรีน เพื่อที่จะไม่สิ้นเปลืองคลอรีน และไม่ก่อให้เกิดสารพิษ ในกรณีที่ไม่ต้องกำจัดสารอินทรีย์ก่อน เนื่องจากความยุ่งยากในการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตอาจเปลี่ยนสารฆ่าเชื้อโรคจากคลอรีนเป็นชนิดอื่นซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ เช่น คลอรีนไดออกไซด์ ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน

ข้อดีของคลอรีน

คลอรีนมีข้อได้เปรียบสารอื่นๆ ที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำหลายประการได้แก่

1. ราคาถูกเหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจของสังคมไทยเมื่อเทียบกับสารที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคชนิดอื่นๆ เช่น โอโซน คลอรีนไดออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น
2. หาซื้อง่ายมีจำหน่ายทั่วไป
3. มีให้เลือกใช้หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นคลอรีนก๊าซ คลอรีนน้ำและคลอรีนผงซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำผลิต
4. การเติมคลอรีนลงในน้ำค่อนข้างง่ายและไม่ยุ่งยากซับซ้อน

ข้อเสียของคลอรีน

คลอรีนถึงแม้จะมีข้อดีหลายอย่างแต่ก็มีข้อด้อยเช่นกันได้แก่

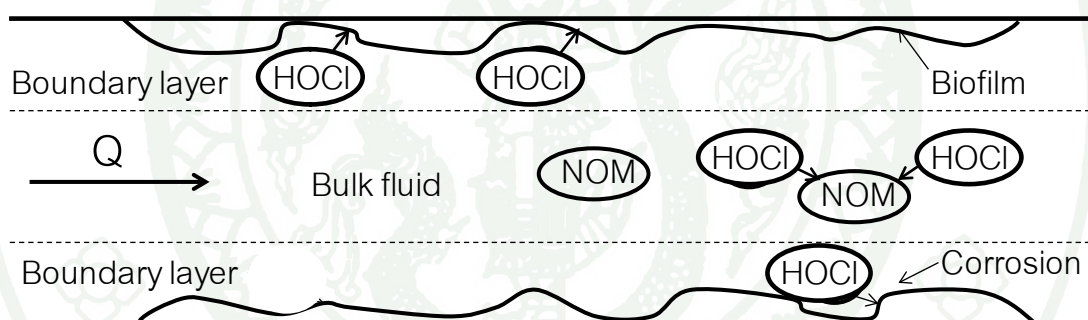
1. กรณีที่น้ำมีปริมาณสารอินทรีย์สูงจะทำให้สิ้นเปลืองคลอรีนมาก เพราะคลอรีนส่วนหนึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ นอกจากนี้คลอรีนที่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์จะให้ผลิตภัณฑ์พลอยได้พวก THMs ซึ่งเป็นสารพิษ เป็นโทษต่อร่างกาย
2. ในกรณีที่น้ำมีค่า pH สูงเกิน 8 ขึ้นไปประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคจะลดลงเนื่องจากคลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปของ OCI^- ดังนั้นการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนต้องปรับ pH ไม่ให้สูงเกินไป
3. คลอรีนไม่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ Protozoa จำพวก Giardia sp และ Cryptosporidium sp

ปฏิกิริยาเคมีของคลอรีนอิสระที่เกิดขึ้นภายในเส้นท่อ

ปฏิกิริยาเคมีของคลอรีนอิสระที่เกิดขึ้นภายในเส้นท่อสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. ปฏิกิริยาคลอรีนในมวลน้ำ (Bulk fluid)
2. ปฏิกิริยาคลอรีนกับผนังท่อ (Boundary layer)

ดังแสดงในภาพที่ 4 คลอรีนอิสระ (HOCl) จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) ในมวลน้ำและขณะเดียวกันก็เคลื่อนที่สัมผัสกับชั้นขอบเขตของผนังท่อซึ่งทำปฏิกิริยา Oxidation กับ Biofilm และวัสดุท่อ



ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาในมวลน้ำกับ Natural Organic Matter (NOM) และปฏิกิริยาที่ผนังท่อ เมื่อเกิดปฏิกิริยา Oxidation กับ Biofilm และวัสดุท่อ

สมการที่ใช้ในการคำนวณปฏิกิริยาคลอรีนในมวลน้ำและผนังท่อ แสดงดังสมการที่ (4)

$$\frac{dC}{dt} = k_b C^{m_1} + \frac{A}{V} k_w C^{m_2} \quad (4)$$

โดยที่ C = ปริมาณคลอรีนอิสระ (มก./ลิตร)

k_b = ค่าสัมประสิทธิ์การสลายตัว (Bulk decay coefficient) มีหน่วยเป็น วัน⁻¹ สำหรับกรณีที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

k_w = ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการทำปฏิกิริยากับผนังท่อ (Wall reaction rate coefficient) มีหน่วยเป็น เมตร/วัน สำหรับกรณีปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และ มก./เมตร²/วัน สำหรับกรณีปฏิกิริยาอันดับศูนย์

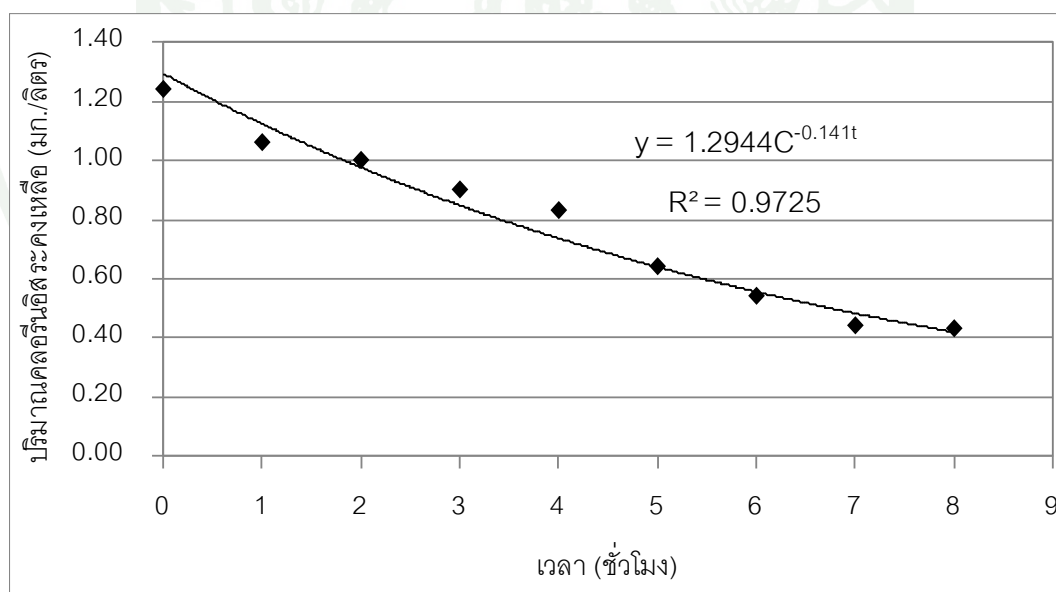
AV = พื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของท่อ (เมตร⁻¹) ในกรณีท่อกลมจะเท่ากับสี่ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ $\left(\frac{4}{D}\right)$

m_1 = อันดับปฏิกิริยาสำหรับ Bulk Reaction

m_2 = อันดับปฏิกิริยาสำหรับ Wall Reaction

t = เวลาในการเคลื่อนที่ (Transportation Time) (วัน)

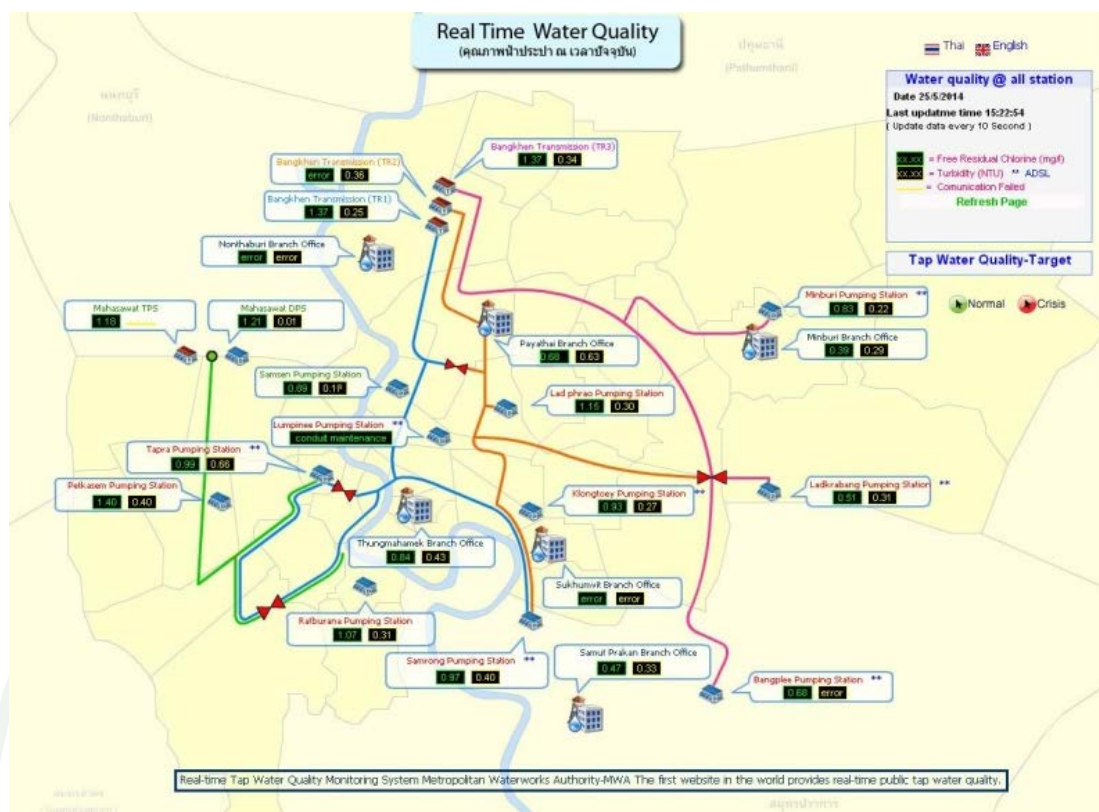
การประปานครหลวง (2556ง) ได้มีการทดลอง Bottle test ที่ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน ณ วันที่ 22 กุมภาพันธ์ 2556 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและคลอรีนอิสระคงเหลือในน้ำประปา ได้ค่า k_b เท่ากับ -0.141 ชม.^{-1} หรือเท่ากับ -3.384 วัน^{-1} แสดงได้ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือต่อเวลา โดยได้ค่า $k_b = -3.384 \text{ วัน}^{-1}$

ที่มา: การประปานครหลวง (2556ง)

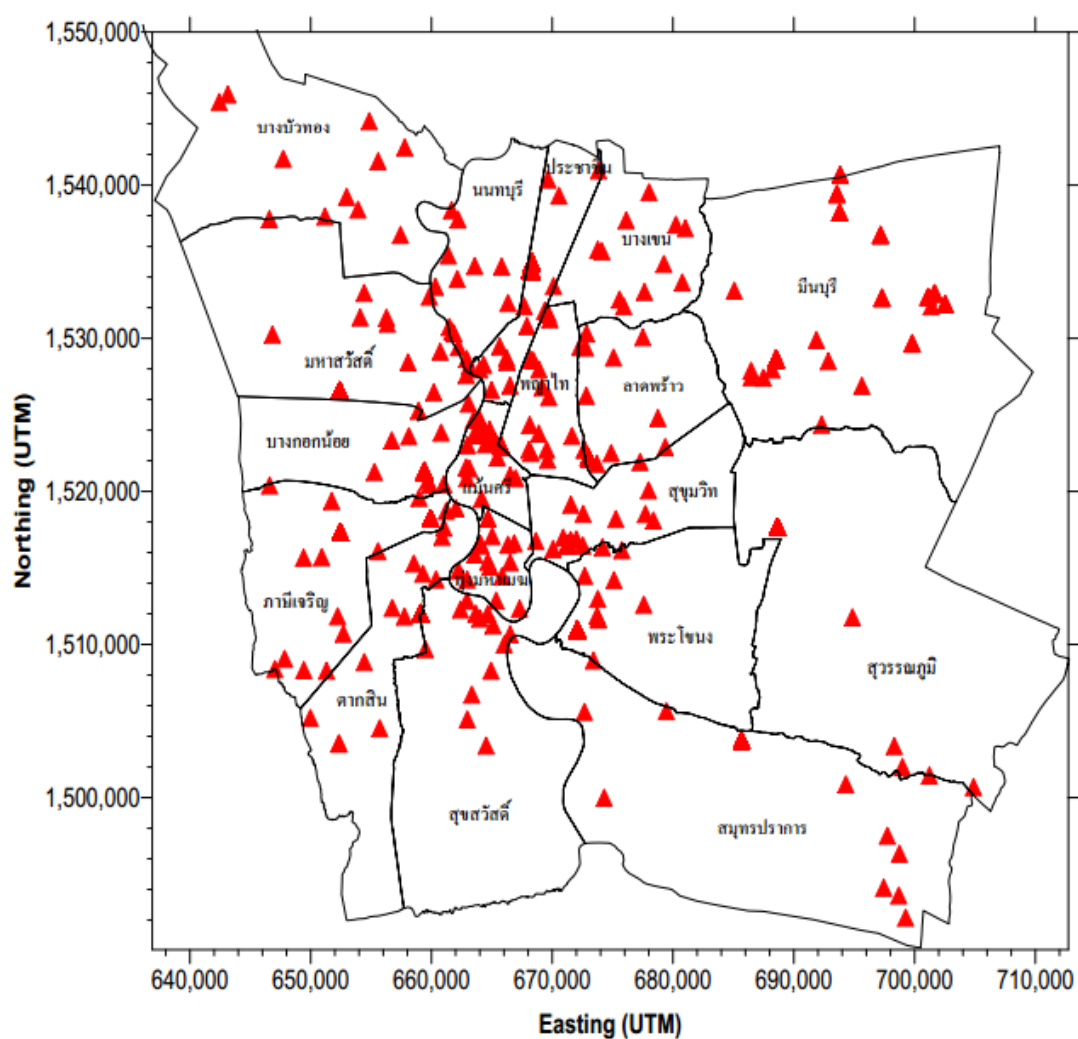
การประปานครหลวงมีการควบคุมคุณภาพน้ำโดยใช้คลอรีนในกระบวนการผลิตน้ำประปาและควบคุมให้น้ำประปามีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือตามเกณฑ์แนะนำขององค์การอนามัยโลก คือไม่น้อยกว่า 0.2 มก./ลิตร การควบคุมให้น้ำมีคุณภาพเดียวกันทั้งเส้นท่อ ตั้งแต่โรงผลิตจนถึงผู้ใช้น้ำเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับ เนื่องจากเส้นท่อของ กปน. ทั้งระบบมีความยาวมาก ขณะที่คลอรีนจะเกิดการสลายตัวไปหากอยู่ในเส้นท่อเป็นระยะเวลานาน จึงทำให้การเติมคลอรีน ณ โรงงานผลิตน้ำประปาเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ กปน. จึงนำระบบจ่ายคลอรีนอัตโนมัติ ปลายสาย (Automatic chlorination booster system) ซึ่งเป็นระบบเฝ้าระวังและควบคุมคุณภาพน้ำมาใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำ กปน. และมีการรายงานผลเป็นระบบบันทึกข้อมูลแบบปัจจุบัน (Real-time) ระบบประมวลผลข้อมูลเป็นรายชั่วโมง สำหรับรายงานเป็นไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ต นอกจากนี้ระบบจ่ายคลอรีนอัตโนมัติปลายสายแล้วยังมีระบบเฝ้าระวังคุณภาพน้ำประปาแบบรายงานผลเป็นปัจจุบัน (Real-time tap water quality monitoring system) ระบบนี้เป็นการดึงข้อมูลจากตัววัดคุณภาพน้ำที่ประจำอยู่ตามสถานีสูบส่งและสูบน้ำจำนวน 20 แห่ง แสดงดังภาพที่ 6 เข้ามาสู่ระบบประมวลผลและนำข้อมูลรายงานขึ้นสู่อินเทอร์เน็ตให้ประชาชนทราบทางเว็บไซต์ของ กปน. โดยแสดงเป็นค่าต่อเนื่องและเปลี่ยนไปทุกๆ 10 วินาที สามารถเข้าดูข้อมูลได้ตลอดเวลา



ภาพที่ 6 ระบบเฝ้าระวังคุณภาพน้ำประปาแบบรายงานผลเป็นปัจจุบัน
(Real-time tap water quality monitoring system)

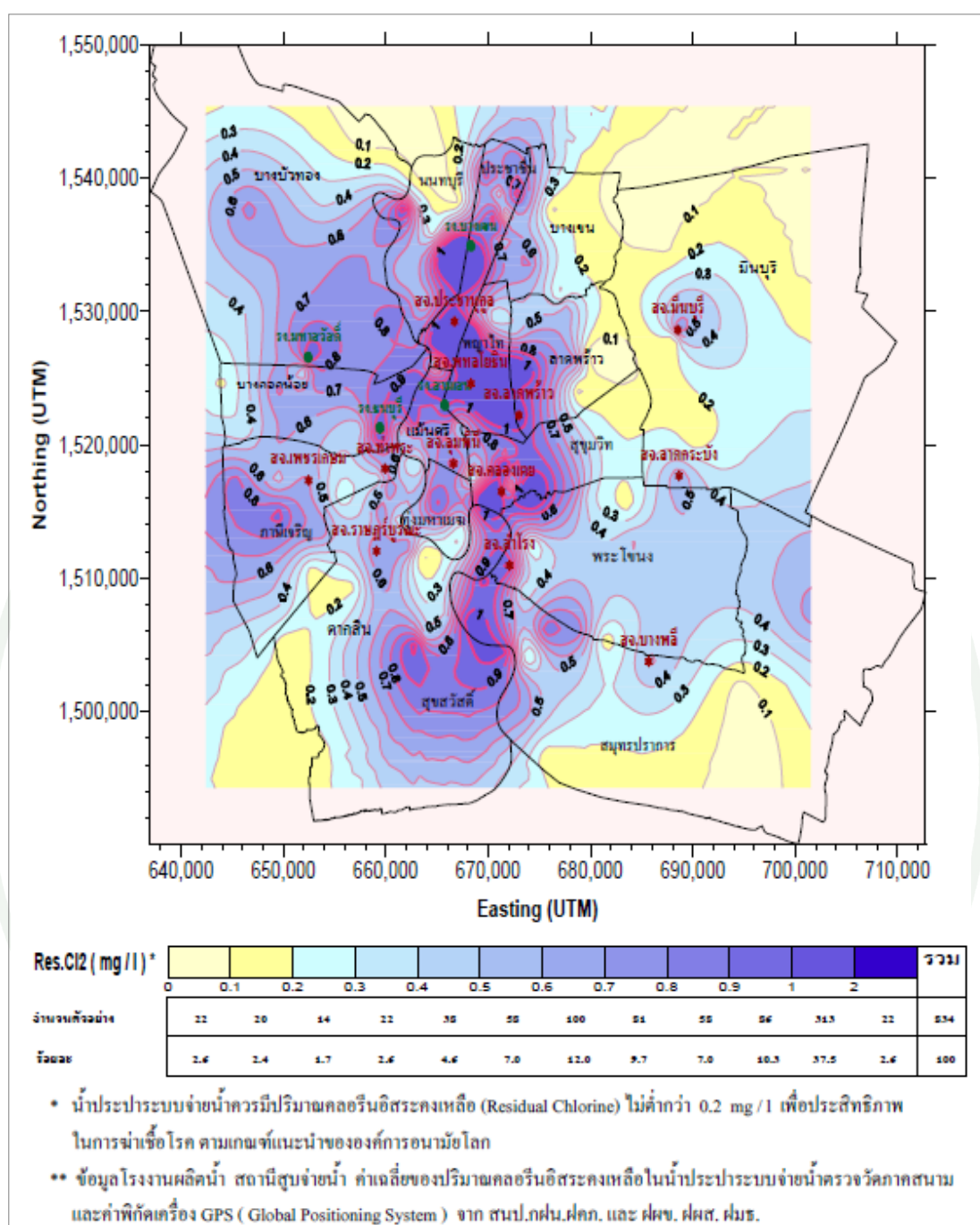
ที่มา: การประปานครหลวง (2556ก)

นอกจากนี้ กปน. ยังได้มีการสำรวจวัดข้อมูลคลอรีนอิสระคงเหลือภาคสนามเพื่อตรวจสอบคุณภาพน้ำของผู้ใช้น้ำในโรงเรียน สถานที่พักการ โรงแรม โรงพยาบาล และศูนย์บริการสาธารณสุขต่างๆ โดยมีจุดตรวจวัดดังแสดงในภาพที่ 7 และสามารถแสดงเส้นชั้นปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ (Chlorine contour) ได้ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 7 แผนที่แสดงตำแหน่งตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือน้ำประปาโรงงานผลิตน้ำ
สถานีสูบน้ำและน้ำประปาแบบจ่ายน้ำ เดือนธันวาคม 2556

ที่มา: การประปานครหลวง (2556ก)



ภาพที่ 8 แผนที่แสดง Chlorine Contours น้ำประปาโรงงานผลิตน้ำ สถานีสูบน้ำ และน้ำประปาในระบบจ่ายน้ำ เดือนมิถุนายน 2556

ที่มา: การประปานครหลวง (2556ก)

แบบจำลองโครงข่ายท่อ

แบบจำลอง EPANET

แบบจำลอง EPANET เป็นแบบจำลองที่พัฒนาโดยหน่วยงาน Environmental Protection Agency ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ในการจำลองระบบท่อภายใต้แรงดัน ซึ่งสามารถจำลองได้ทั้งทางด้านชลศาสตร์และคุณภาพน้ำ และสามารถจำลองแบบช่วงเวลาได้ โครงข่ายท่อสามารถจำลองประตุน้ำ ถึงพักน้ำ และจำลองการไหลที่ขึ้นกับแรงดันได้ รวมทั้งสามารถคำนวณหาความเข้มข้นสารเคมีบนโครงข่ายท่อและอายุน้ำได้ มากกว่านั้น สามารถปรับข้อมูลนำเข้าและควบคุมการทำงานของระบบด้วย Simple Controls, Rule-Based Controls หรือจากการเขียนโปรแกรมเสริมควบคุมการทำงานได้ ข้อดีที่สำคัญ คือ เป็นโปรแกรมที่ไม่มีลิขสิทธิ์ (Public Domain Software) จึงสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ซึ่งงานวิจัยที่ใช้โปรแกรม EPANET มีจำนวนมาก หลายงานวิจัยในต่างประเทศที่ใช้โปรแกรม EPANET ในการวิเคราะห์ ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างงานวิจัยบางส่วน เช่น ด้านการประเมินน้ำสูญเสีย (Tabesh et al., 2009) ด้านการบริหารจัดการแรงดัน (Nazif et al., 2010; Karadirek et al., 2012) ด้านการปรับปรุงระบบท่อประปา (Tabesh et al., 2010) ด้านการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้น้ำกับแรงดัน (Siew & Tanyimboh, 2012) ด้านการบริหารจัดการคุณภาพน้ำ (Behzadian et al. 2012; Fisher et al., 2011) เป็นต้น

นอกจากงานวิจัยในต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยได้มีงานวิจัยที่ใช้โปรแกรม EPANET อย่างกว้างขวางในทุกขนาดโครงข่ายท่อ เช่น ระดับอุโมงค์ส่งน้ำและท่อส่งน้ำ (สายัณห์, 2546), ระดับท่อประธานและท่อจ่ายน้ำ (นคร, 2546; สุทธิศักดิ์, 2547; ภาสกร, 2548; อนุพงษ์, 2548) และระดับท่อจ่ายน้ำและท่อบริการ (อดิชัย และคณะ, 2554) เป็นต้น ซึ่งการพัฒนาแบบจำลองของงานวิจัยในประเทศไทยนั้น ในปัจจุบัน นักวิจัยหลายท่านสามารถขึ้นแบบจำลองจากฐานข้อมูล GIS และสามารถเขียนโปรแกรม Optimization สั่งการโปรแกรม EPANET ในการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับปัญหาต่างๆ ได้อีกด้วย

แบบจำลองปริมาณสารคลอรีนคงเหลือในระบบท่อเป็นส่วนต่อยอดจากโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านชลศาสตร์ ซึ่งการพัฒนาแบบจำลองทางชลศาสตร์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสนามจะมีส่วนอย่างมากที่ทำให้การคำนวณและวิเคราะห์แบบจำลองปริมาณสารคลอรีนคงเหลือในระบบท่อแม่นยำและถูกต้องมากขึ้น การเคลื่อนที่ การผสม และการสลาย ของสารคลอรีน

คงเหลือในระบบท่อ ขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของน้ำและอัตราการไหลในระบบท่อ เวลา และสัมประสิทธิ์ทางชลศาสตร์

การวิเคราะห์แบบจำลองคุณภาพน้ำ โดยปกติแบบจำลองจะใช้ สมการการเคลื่อนที่ แบบ 1 มิติเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ การก่อตัวและการสลายไป ของสารคลอรีนในระบบท่อ แสดงดังสมการ (5) ซึ่งแสดงความเข้มข้นของคลอรีนในระบบท่อขึ้นกับระยะทางการเคลื่อนที่ (x) และเวลา (t) โดยสมการมีเงื่อนไขว่าไม่คิดการกระจายตัวแบบ Longitudinal Dispersion และเกิดการผสมแบบสมบูรณ์ Completely Mixed

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{Q_i \partial C_i}{A_i \partial x} + \theta(C_i), i \quad (5)$$

เมื่อ	C_i	=	ความเข้มข้นของคลอรีนในระบบท่อ (มวล/ปริมาตร)
	Q_i	=	อัตราการไหลในระบบท่อ (ปริมาตร/เวลา)
	A_i	=	พื้นที่หน้าตัดของท่อ (พื้นที่)
	$\theta(C_i), i$	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยา (มวล/ปริมาตร/เวลา)

แบบจำลอง AQUIS

แบบจำลอง AQUIS เป็นแบบจำลองที่พัฒนาโดยบริษัท 7-Technologies ประเทศเดนมาร์ก ใช้ในการจำลองระบบท่อภายใต้แรงดัน สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งทางด้านชลศาสตร์และคุณภาพน้ำได้เช่นกัน สามารถนำเข้าข้อมูลจากฐานข้อมูล GIS ผ่านโปรแกรมที่เรียกว่า Model Management และสามารถเชื่อมต่อข้อมูลกับระบบ SCADA ทำให้สามารถจำลองสถานการณ์ปัจจุบันแบบ online ได้ ปัจจุบันมีโมดูลย่อยที่น่าสนใจ เช่น leak detection, pump optimization, production optimization, pressure optimization เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเป็นโปรแกรมมีลิขสิทธิ์ จึงมีค่าใช้จ่ายและการปรับแก้และเพิ่มเติมองค์ประกอบต่างๆ กระทำได้ยากหรือไม่สามารถกระทำได้

แบบจำลอง WaterGEMS

แบบจำลอง WaterGEMS เป็นแบบจำลองที่พัฒนาโดยบริษัท Bentley Systems ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ในการจำลองระบบท่อภายใต้แรงดัน สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งทางด้านชลศาสตร์ และคุณภาพน้ำได้เช่นกัน สามารถนำเข้าข้อมูลจากฐานข้อมูล CAD และฐานข้อมูล GIS มีความสามารถคล้ายกับ AQUIS และยังสามารถทำสอบเทียบอัตโนมัติ (Auto Calibration) หาขนาดท่อที่เหมาะสมและการวางแผนการเปลี่ยนท่อได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเป็นโปรแกรมมีลิขสิทธิ์ จึงมีค่าใช้จ่ายและการปรับแก้และเพิ่มเติมองค์ประกอบต่างๆ กระทำได้ยากหรือไม่สามารถกระทำได้

แบบจำลอง Pipe2012

แบบจำลอง Pipe2012 เป็นแบบจำลองที่พัฒนาโดยบริษัท KY Pipe ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ในการจำลองระบบท่อภายใต้แรงดัน สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งทางด้านชลศาสตร์ และคุณภาพน้ำได้เช่นกัน สามารถนำเข้าข้อมูลจากฐานข้อมูล CAD และฐานข้อมูล GIS มีความสามารถคล้ายกับ AQUIS และ WaterGEMS และยังมีโมดูลที่น่าสนใจ เช่น EPA-Surge ซึ่งสามารถจำลองสถานการณ์แรงดันน้ำกระแทกในระบบโครงข่ายท่อได้ด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเป็นโปรแกรมมีลิขสิทธิ์ จึงมีค่าใช้จ่ายและการปรับแก้และเพิ่มเติมองค์ประกอบต่างๆ กระทำได้ยากหรือไม่สามารถกระทำได้

นิยามการไหลในท่อภายใต้แรงดัน

วินูลย์ (2529) ได้อธิบายการไหลในท่อภายใต้แรงดัน หมายถึง การไหลที่หน้าตัดของของเหลวไหลเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อ จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีความต่างศักย์ของแรงดันที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในรูปความสูง หรืออาจมีการเพิ่มพลังงานหรือเพิ่มแรงดันของการไหลโดยอาศัยเครื่องมือกล ได้แก่ เครื่องสูบน้ำซึ่งทำหน้าที่ถ่ายเทพลังงานกลให้เป็นพลังงานชลศาสตร์ (hydraulic energy) แก่น้ำ ทำให้สามารถยกระดับพลังงานการไหลได้ตามต้องการ

การไหลในท่อภายใต้แรงดัน มี 2 ประเภทคือ การไหลคงที่ และการไหลไม่คงที่ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการไหลและพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการไหล ได้แก่ ความเร็วของการไหล (V) ความ

หนืดของการไหล (μ) และขนาดของท่อ (D) ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ที่เรียกว่า Reynolds number (R_e) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$R_e = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (6)$$

โดยที่ R_e = ค่า Reynolds number

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัม/เมตร³)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เมตร)

V = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ (เมตร/วินาที)

μ = ความหนืดจลน์ (Dynamic viscosity) ของของไหล
(นิวตัน.วินาที/เมตร²)

ν = ความหนืดเปรียบเทียบ (Kinematic viscosity) ของของเหลว

โดยที่ $R_e < 2000$ การไหลในท่อเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) เส้นแนวการไหลจะราบเรียบ

$2000 < R_e < 4000$ การไหลเป็นช่วงของการเปลี่ยนแปลง (Transition) จากการไหลแบบราบเรียบ สู่อการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) เส้นแนวการไหลพริ้วไหว

$R_e > 4000$ การไหลในท่อเป็นแบบปั่นป่วนสมบูรณ์

สำหรับการหาความเร็วการไหลในเส้นท่อจะใช้สมการ Hazen-Williams และ สมการของ Darcy-Weisbach โดยมีรายละเอียดดังนี้

สมการพื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์การไหลในท่อภายใต้ความดัน

การวิเคราะห์การไหลที่เป็นกรไหลคงที่จะอาศัยสมการพื้นฐาน 3 สมการ คือ

1. สมการการไหลต่อเนื่อง (Continuity equation) รูปสมการทั่วไป คือ

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

เมื่อ $Q_{in} =$ อัตราการไหลเข้าที่หน้าตัดควบคุมทางเข้า (เมตร³/วินาที)
 $Q_{out} =$ อัตราการไหลออกที่หน้าตัดควบคุมทางออก (เมตร³/วินาที)

2. สมการพลังงาน (Energy or Bernoulli's equation)

$$E_{in} = E_{out} \quad (7)$$

เมื่อ $E_{in} =$ พลังงานรวมทั้งหมดที่ทางเข้า $= Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g}$
 $E_{out} =$ พลังงานรวมทั้งหมดที่ทางออก $= Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f$

โดยที่ $h_f =$ การสูญเสียหลักเนื่องจากความฝืด (เมตร)
 $P_1, P_2 =$ ความดันสถิตของการไหล ณ ตำแหน่งที่สนใจ (เมตร)
 $V_1, V_2 =$ ความเร็วของการไหล ณ ตำแหน่งที่สนใจ (เมตร/วินาที)
 $Z_1, Z_2 =$ ความสูงของตำแหน่งที่สนใจเทียบกับระดับอ้างอิง (เมตร)
 $\rho =$ ความสูงของตำแหน่งที่สนใจเทียบกับระดับอ้างอิง (กิโลกรัม/เมตร³)
 $g =$ ความเร่งเข้าสู่จุดศูนย์กลางโลก (เมตร/วินาที²)

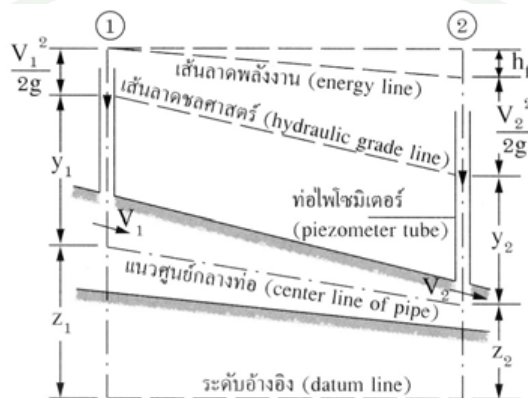
3. สมการโมเมนตัม (Momentum equation) รูปสมการทั่วไป คือ

$$\Sigma F = \rho Q(V_{out} - V_{in}) \quad (8)$$

เมื่อ $\Sigma F =$ แรงลัพธ์ที่คงตัวกระทำต่อวัตถุมวล (นิวตัน)
 $V_{out} =$ ความเร็วของการไหลที่หน้าตัดทางออก (เมตร/วินาที)
 $V_{in} =$ ความเร็วของการไหลที่หน้าตัดทางเข้า (เมตร/วินาที)
 $\rho =$ ความสูงของตำแหน่งที่สนใจเทียบกับระดับอ้างอิง (กิโลกรัม/เมตร³)
 $Q =$ อัตราการไหลเข้าที่หน้าตัดควบคุมทางเข้า (เมตร³/วินาที)

ในการวิเคราะห์ส่วนใหญ่แล้วมักใช้สมการการไหลต่อเนื่องและสมการพลังงานเป็นหลัก ส่วนสมการโมเมนตัมจะใช้ก็ต่อเมื่อต้องการคำนวณหาแรงที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราโมเมนตัมเนื่องจากหน้าตัดหรือความเร็วเปลี่ยนขนาดและทิศทางเท่านั้น

เส้นลาดชลศาสตร์ (Hydraulic grade line, HGL) คือเส้นที่แสดงระดับพลังงานความดัน $\frac{P}{\rho g}$ เหนือแนวศูนย์กลางของเส้นท่อ ส่วน เส้นลาดพลังงาน (Energy grade line, EGL) คือ ระยะของหัวพลังงานในท่อม $\frac{V^2}{2g}$ ที่เพิ่มขึ้นเหนือเส้น HGL แสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 9 ปรากฏการณ์ชลศาสตร์และพลังงานเมื่อเกิดการไหลในท่อ

ที่มา: Ven Te Chow (1986)

การสูญเสียพลังงานในท่อ

การสูญเสียพลังงานในเส้นท่อ จำแนกได้ 2 ลักษณะ คือการสูญเสียหลัก (Major losses) ที่เกิดจากแรงเสียดทานของการไหลตามแนวยาวของเส้นท่อ และการสูญเสียรอง (Minor losses) ที่เกิดจากอุปกรณ์ประกอบ เช่น ข้อต่อ ข้องอ ข้อลด ปากทางเข้า เป็นต้น

1. การสูญเสียหลัก (Major losses, h_f)

1.1 สมการของ Darcy-Weisbach

ค่าการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความฝืด (h_f) ในเส้นท่อกลม มีค่าเท่ากับการสูญเสียหลัก (h_f) สามารถคำนวณได้จากสูตรของ Darcy-Weisbach ดังนี้

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (9)$$

เมื่อ	h_f	=	การสูญเสียหลักเนื่องจากความฝืด (เมตร)
	f	=	สัมประสิทธิ์ของความฝืด
	L	=	ความยาวของท่อ (เมตร)
	D	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (เมตร)
	V	=	ความเร็วของการไหลในท่อ (เมตร/วินาที)
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที ²)

1.2 สมการของ Hazen-Williams

ในงานบางอย่างโดยเฉพาะอย่างยิ่งงานระบบท่อประปา วิศวกรส่วนใหญ่เลือกใช้สูตร Hazen-Williams ที่สามารถนำมาใช้งานได้สะดวกไม่ยุ่งยากเหมือนสูตรของ Darcy-Weisbach และให้ค่าถูกต้องพอสมควร สมการของ Hazen-Williams ใช้คำนวณหาการสูญเสียหลัก (Major losses, h_f) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นกับชนิดของท่อ (C) มาคิดตามวัสดุท่อ รูปสมการทั่วไปคือ

$$\text{ระบบ SI} \quad V = 0.85 C R^{0.63} S^{0.54} \quad (10)$$

$$\text{ระบบอังกฤษ} \quad V = 1.318 C R^{0.63} S^{0.54} \quad (11)$$

โดยที่ V = ความเร็วของการไหลในท่อ (เมตร/วินาที, ฟุต/วินาที)

C = สัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นกับชนิดของท่อ

R = รัศมีไฮดรอลิก (เมตร, ฟุต)

S = ค่าการสูญเสียหัวแรงดันเนื่องจากความฝืดต่อหนึ่งหน่วยความยาวท่อ $\left(\frac{h_f}{L} \right)$

ฉะนั้นรูปสมการหาการสูญเสียหลัก ของสมการของ Hazen-Williams คือ

$$\text{ระบบ SI} \quad h_f = \left(\frac{V^{1.85}}{(0.85C)^{1.85} R^{1.17}} \right) L \quad (12)$$

ระบบอังกฤษ
$$h_f = \left(\frac{V^{1.85}}{(1.318C)^{1.85} R^{1.17}} \right) L \quad (13)$$

โดยที่ L = ความยาวของท่อที่พิจารณา (เมตร, ฟุต)

เมื่อท่อมีอายุใช้งานเพิ่มขึ้นค่า C จะลดลง รายละเอียดค่าสัมประสิทธิ์ C ของสูตร Hazen-Williams สำหรับท่อชนิดต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4 และรายละเอียดแผนผังสำหรับคำนวณสูตรของ Hazen-Williams แสดงไว้ในภาพที่ 8

1.2 การสูญเสียรอง (Minor losses)

การสูญเสียรอง (Minor losses) คือ ค่าการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ในระบบท่อ เช่น ข้อต่อ ประตูน้ำ หรือเกิดจากการที่ทำให้แนวการไหลมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียส่วนน้อย จึงเรียกว่าการสูญเสียรอง สามารถคำนวณได้โดยสมการ

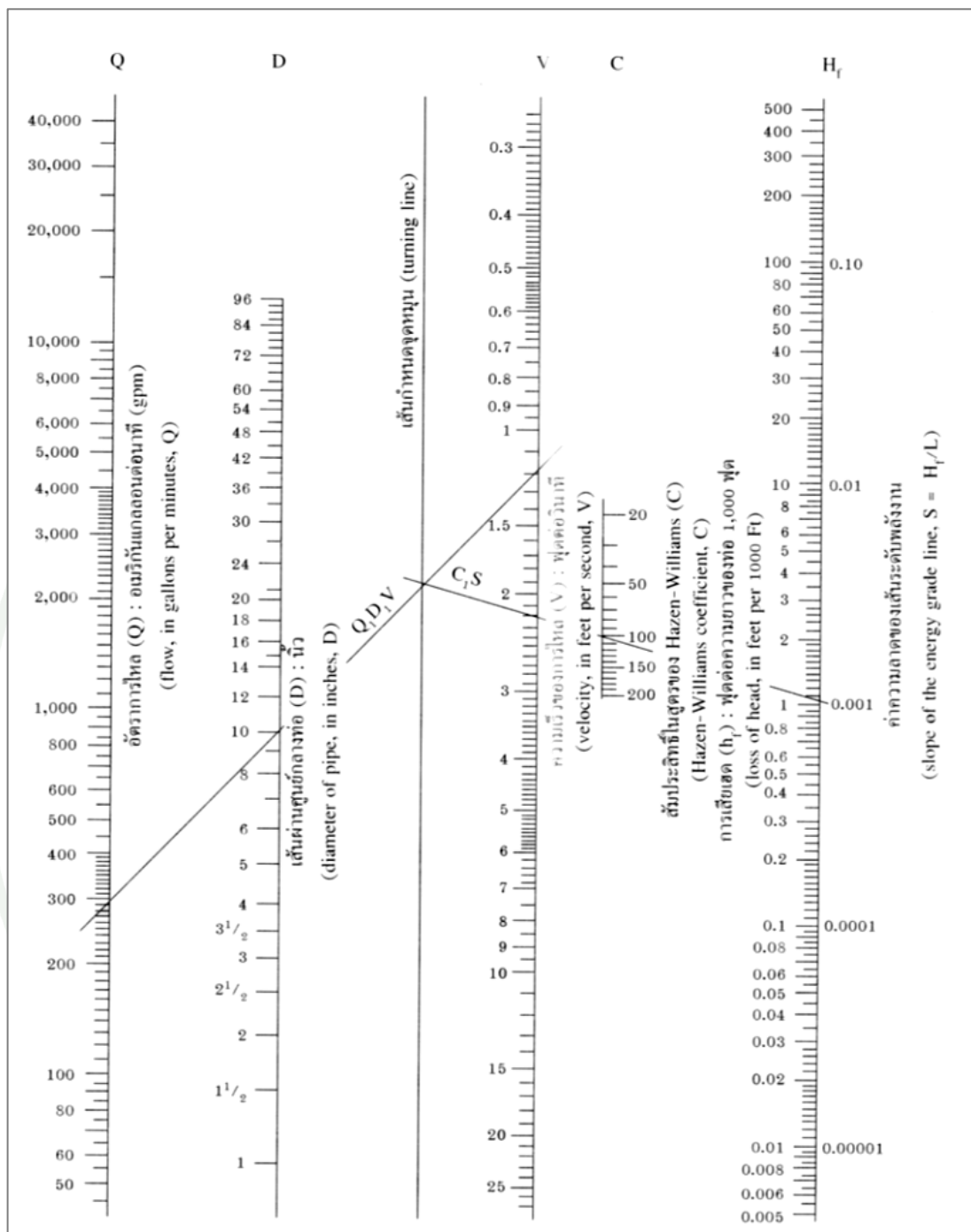
$$h_m = \frac{KV^2}{2g} \quad (14)$$

เมื่อ	h_m	=	ค่าการสูญเสียหัวแรงดันเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ (เมตร)
	k	=	สัมประสิทธิ์ของความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์
	V	=	ความเร็วของการไหล (เมตร/วินาที)
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที ²)

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ C ของสูตร Hazen-Williams สำหรับท่อชนิดต่างๆ

ชนิดของท่อ	ค่า C
ท่อซีเมนต์ใยหิน, PVC	140
ท่อทองเหลือง	130-140
ท่ออิฐก่อ	100
ท่อเหล็กหล่อ	
ใหม่และไม่ดัด	130
เก่าและไม่ดัด	40-120
ดัดด้วยซีเมนต์	130-150
ดัดด้วยสีน้ำมันดิน	140-150
ทาด้วยสีน้ำมันดิน	115-135
ท่อคอนกรีต หรือดัดด้วยคอนกรีต	
หล่อด้วยแบบเหล็ก	140
หล่อด้วยแบบไม้	120
หล่อโดยการหมุนด้วยแรงเหวี่ยง	135
ท่อทองเหลือง	130-140
สายดับเพลิง (ดัดด้วยยาง)	135
ท่อเหล็กชุบสังกะสี	120
ท่อแก้ว	140
ท่อตะกั่ว	130-140
ท่อพลาสติก	140-150
ท่อเหล็กเหนียว	
ดัดด้วยสีน้ำมันดิน	145-150
ใหม่ ไม่ดัด	140-150
ม้วนต่อด้วยหมุดย้ำ	110
ท่อดีบุก	130
ท่อดินเหนียว	100-140

ที่มา: วิกุลย์ (2529)



ภาพที่ 10 แผนผังสำหรับคำนวณสูตรของ Hazen-Williams

ที่มา: David (1969)

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Castro *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาการสลายตัวของคลอรีนในระบบโครงข่ายท่อประปาที่หมู่บ้าน Lousada ในประเทศโปรตุเกส โดยใช้แบบจำลอง EPANET โดยการศึกษาได้ใช้ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในการหาค่า k_b และค่า k_w และทำการเก็บตัวอย่างน้ำประปาในพื้นที่ศึกษามาหาค่า k_b ในห้องทดลอง เมื่อได้ค่า k_b แล้วจึงทำการปรับแก้ค่า k_w ผลการศึกษาพบว่าค่า k_b เท่ากับ -0.3432 วัน^{-1} และได้ค่า k_w เท่ากับ $-0.0070 \text{ ฟุต/วินาที}$ ($-0.0021336 \text{ เมตร/วินาที}$) ที่ทำให้คลอรีนคงเหลือใกล้เคียงกับค่าจริงในสนาม

Nagatani *et al.* (2008) ได้จำลองการสลายตัวของคลอรีนในระบบประปาที่ Sakishima ประเทศญี่ปุ่น โดยการศึกษาได้ใช้ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในการหาค่า k_b และใช้ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ในการหาค่า k_w ผลการทดลองได้ค่า k_b เท่ากับ -0.274 วัน^{-1} ผลการศึกษาพบว่าค่า k_w เท่ากับ $-0.4 \text{ มก./เมตร}^2/\text{วัน}$ ที่ทำให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในแบบจำลองสอดคล้องกับค่าจริงในสนาม

Xin *et al.* (2003) ได้จำลองปริมาณคลอรีนคงเหลือในระบบท่อจ่ายน้ำ โดยใช้ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในการศึกษาปฏิกิริยาคลอรีนในมวลน้ำ ผลการศึกษาพบว่าค่า k_b แปรผันตามอุณหภูมิและมีค่าอยู่ในช่วง 3.01×10^{-2} ถึง 1.23 วัน^{-1} และพบว่าปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือขึ้นอยู่กับความเร็วการไหล ความยาวท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ อายุท่อ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายและอุณหภูมิ

ภาคภูมิ (2548) ได้ศึกษาสภาพการไหลและคลอรีนตกค้างในระบบท่อประปาด้วยโปรแกรม EPANET และ GIS ซอฟต์แวร์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลภายใต้แรงดันของโครงข่ายระบบท่อประปา และวิเคราะห์ปริมาณคลอรีนคงเหลือในพื้นที่สำนักงานประปาสาขาภาษีเจริญ โดยเลือกพื้นที่ศึกษาในพื้นที่ Zone 01, 03, 05 ซึ่งผลการสอบเทียบค่าแรงดันที่สถานีสอบเทียบจำนวน 12 สถานี พบว่าค่าแรงดันมีความคลาดเคลื่อนจากแรงดันที่วัดได้ในสนามเฉลี่ย 24 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลในระบบท่อ พบว่ากรณีมีการเพิ่มปริมาณความต้องการน้ำ 10, 20, 30 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้แรงดันในพื้นที่ที่มีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาที่เวลา 08.00-08.30 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูงสุด พบว่าบริเวณสถานีสูบน้ำจ่ายท่าพระ แรงดันลดต่ำลงเหลือ 2.6 เมตร และในการวิเคราะห์ปริมาณคลอรีนคงเหลือในระบบท่อ ใช้สถานีการสอบเทียบข้อมูลจำนวน 16 สถานี เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สลายตัวของคลอรีนคงเหลือในระบบท่อ (Bulk Coefficient) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สลายตัวของคลอรีนคงเหลือ

ในระบบท่อในพื้นที่ศึกษามีค่าเท่ากับ -1.39 และเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์มาวิเคราะห์ในกรณีศึกษามีผลทำให้คลอรินลดลงเหลือในระบบท่อบริเวณสถานีสูบน้ำท่าพระมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้บริเวณสถานีสูบน้ำท่าพระมีค่าคลอรินคงเหลือลดลงจนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.17 มก./ลิตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มการประปานครหลวง

วีรวัด (2556ก) ได้ศึกษาการจัดการแรงดันเพื่อควบคุมน้ำสูญเสียในพื้นที่เฝ้าระวัง ของสำนักงานประปาสาขาลาดพร้าว โดยใช้ข้อมูลตรวจวัดจริงจากพื้นที่เฝ้าระวัง 12-02-05, 12-02-06, 12-03-02, 12-03-04, 12-03-05, 12-04-08 และ 12-06-03 ในสำนักงานประปาสาขาลาดพร้าว มาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตัวแทนพื้นที่เฝ้าระวังกับอัตราการไหลรั่วที่ขึ้นกับแรงดัน เพื่อหาแนวทางการจัดการแรงดันเพื่อควบคุมน้ำสูญเสียในพื้นที่เฝ้าระวังได้อย่างเหมาะสม และคําค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยจำลองแรงดัน 2 สถานการณ์ คือ สถานการณ์แรงดันที่ตรวจวัดได้ในปี พ.ศ. 2556 และสถานการณ์แรงดันเป้าหมายในปี พ.ศ. 2560 ตามนโยบายเป้าหมายแรงดันรายปีของการประปานครหลวง และวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดน้ำสูญเสียและความคําค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งวาล์วลดแรงดัน 3 ประเภท คือ Fixed outlet PRV, Time-modulated PRV และ Flow-modulated PRV โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานของการไหลในท่อ Pressure step test และหลักการของ FAVAD (Fixed and variable area discharge) ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 12-04-08 และ 12-06-03 มีค่ายกกำลังแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลรั่วกับแรงดัน (N_1) เท่ากับ 0.9482, 1.1311 และ 1.1273 ตามลำดับ เมื่อจำลองหาอัตราน้ำสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงไปจากสถานการณ์เพิ่มแรงดันในปี พ.ศ. 2560 พบว่าอัตราน้ำสูญเสียจะยิ่งสูงขึ้นมากในพื้นที่เฝ้าระวังที่มีอัตราน้ำสูญเสียสูงอยู่แล้ว เมื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลดน้ำสูญเสีย และความคําค่าทางเศรษฐศาสตร์ของวาล์วแรงดันแต่ละประเภทพบว่า Flow-modulated PRV ลดปริมาณน้ำสูญเสียได้มากที่สุด และ Time-modulated PRV เหมาะสมในการติดตั้งมากที่สุด

May (1994) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอัตราน้ำรั่ว โดยมีการคิดปริมาณน้ำสูญเสียจากสาเหตุต่างๆ และสมมติให้รูรั่วเป็นแบบรูเปิด (orifice) ที่พื้นที่หน้าตัดของรูรั่วคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันน้ำ และได้ทดสอบข้อมูลจากประเทศญี่ปุ่น และสหราชอาณาจักร รวมทั้งที่อื่นๆ ทั่วโลก ผลการศึกษาพบว่าค่า N_1 ตามทฤษฎีของการไหลผ่านรูเปิด (Orifice flow) จะเท่ากับ 0.5 โดยมีข้อสมมติฐานว่าขนาดของรูเปิดไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันน้ำ ทำให้อัตราน้ำสูญเสียแปรผันกับแรงดันน้ำยกกำลัง 0.5

Clyton and Van Zyl (2007) ทำการศึกษาผลกระทบของแรงดันน้ำที่มีต่ออัตราการไหลรั่วในระบบท่อประปา จากปัจจัย 4 ปัจจัย ได้แก่ ชลศาสตร์ของการไหลผ่านรอยแตก (leak hydraulics) พฤติกรรมของชนิดวัสดุท่อ (Pipe material behavior) ชลศาสตร์ของดิน (Soil hydraulics) และอัตราการไหลในท่อ (Water demand) พบว่าพฤติกรรมของชนิดวัสดุท่อเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลให้ค่ายกกำลัง (leakage exponent, N_1) มีค่าสูงขึ้น รวมทั้งลักษณะของรอยแตกก็มีผลต่อค่ายกกำลังเช่นกัน โดยหากเป็นรอยแตกตามแนวยาวจะมีค่ายกกำลังที่สูงขึ้น

Miranda *et al.* (2011) ได้ทดลองหาสมการความสัมพันธ์ในการประเมินอัตราการไหลรั่วในท่อแตกตามยาว ในท่อหลายวัสดุชนิด และพบว่าค่ายกกำลัง (leakage exponent, N_1) ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลรั่วและแรงดันอยู่ระหว่าง 0.5-1.5

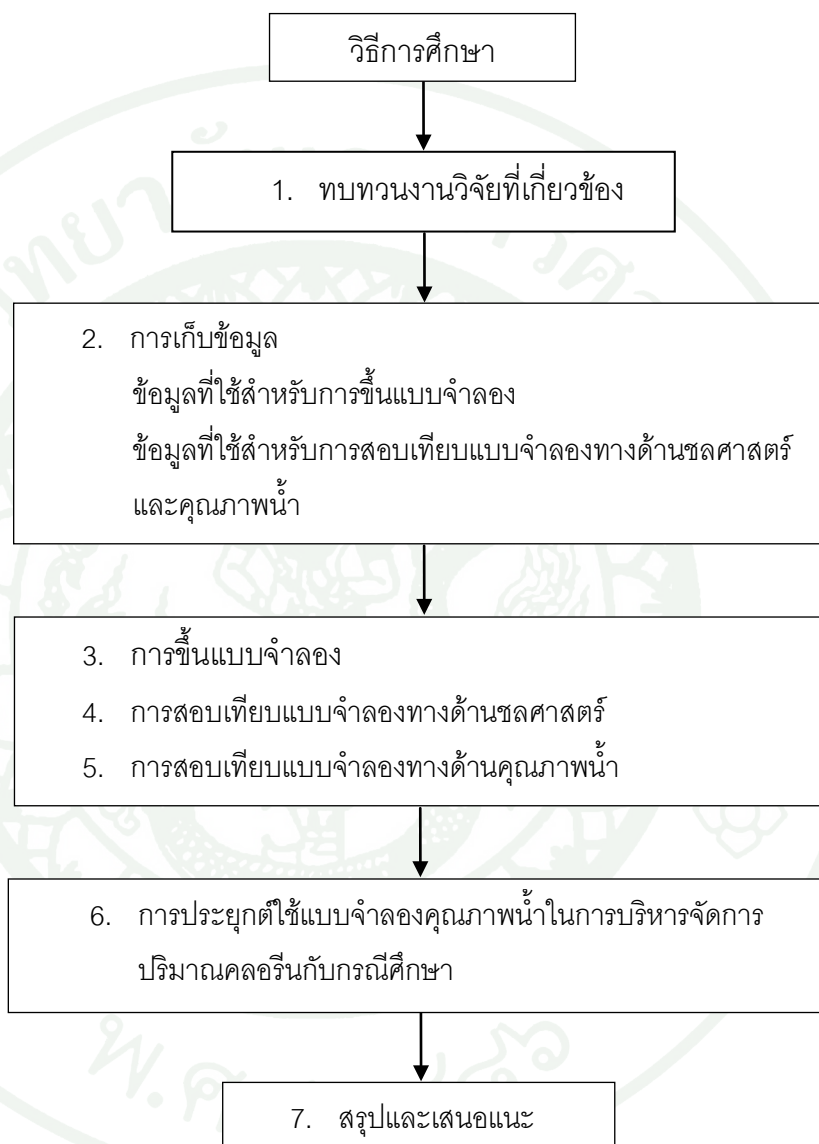
อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องพิมพ์ 1 ชุด
2. แบบจำลองคณิตศาสตร์ EPANET Version 2.0
3. แผนที่ระบบท่อประปาของพื้นที่ศึกษาและข้อมูลพื้นฐานของระบบท่อจากระบบ GIS
ของการประปานครหลวง
4. เครื่องมือวัดปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือและสารเคมี (DPD Free chlorine reagent)
สำหรับวัดปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่ศึกษา

วิธีการ

ขั้นตอนในการศึกษาสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 11



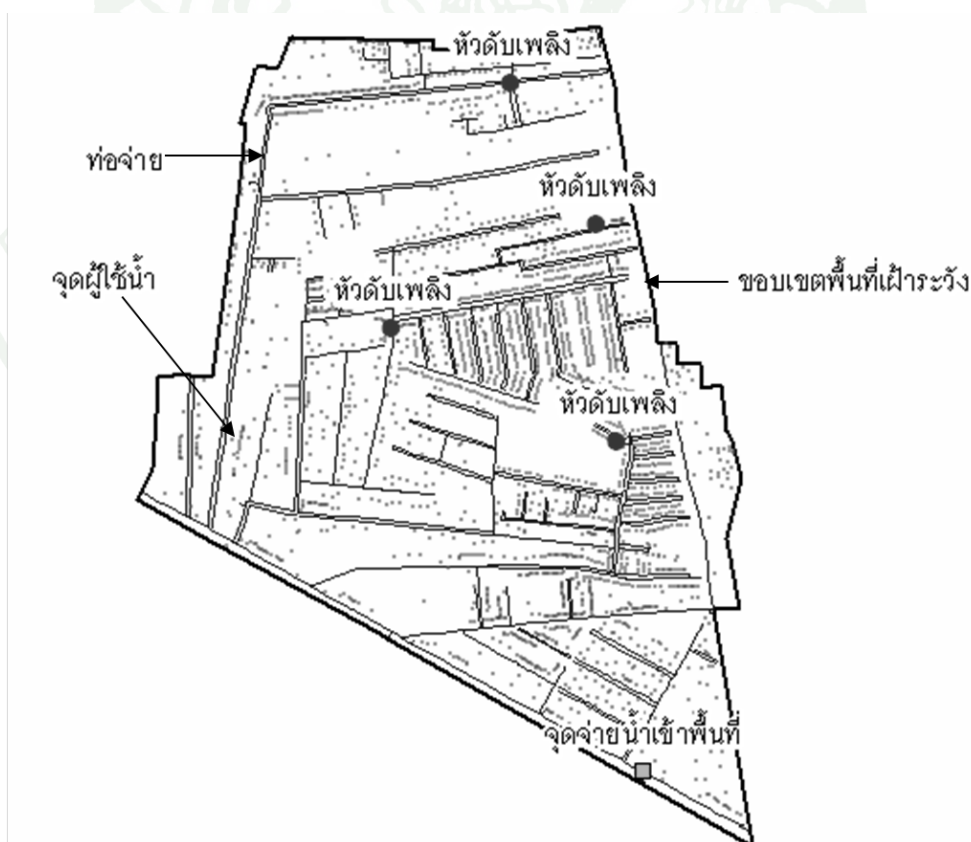
ภาพที่ 11 แผนผังแสดงวิธีการศึกษา

1. การศึกษาทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการจำลองคุณภาพน้ำของระบบโครงข่ายท่อประปาในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 สำนักงานประปาสาขาลาดพร้าว ได้ทำการรวบรวมและศึกษาทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดขอบเขตงานวิจัย รวมถึงการกำหนดวิธีในการศึกษา งานวิจัย โดยการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองคุณภาพน้ำของระบบโครงข่ายท่อประปา การใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสลายตัว ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการทำปฏิกิริยาที่ผนังท่อ อายุน้ำ ตัวแปรที่มีผลต่อการสลายตัวของคลอรีน การกระจายตัวของคลอรีน

2. การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ต้องใช้ในการศึกษา

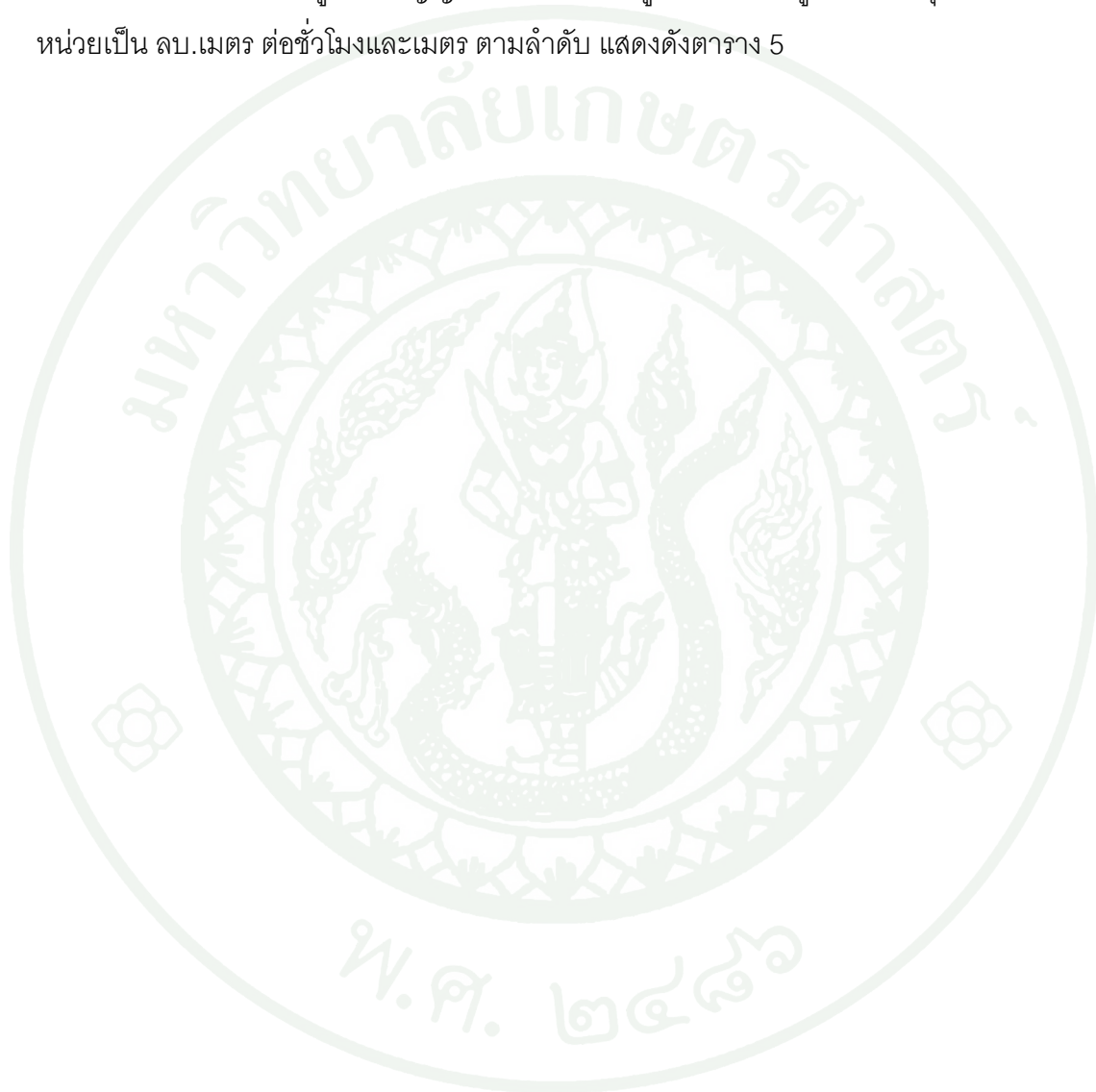
2.1 ข้อมูล GIS ประกอบด้วย โครงข่ายท่อจ่าย จุดจ่ายน้ำเข้า หัวดับเพลิง จุดผู้ใช้น้ำและขอบเขต DMA แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ข้อมูลโครงข่ายท่อจ่าย จุดจ่ายน้ำเข้า หัวดับเพลิง จุดผู้ใช้น้ำและขอบเขต DMA

2.2 ข้อมูลปริมาณการใช้น้ำรายเดือนของผู้ใช้น้ำในพื้นที่ฝักระวัง

2.3 ข้อมูลอัตราการไหล (Q) และค่าแรงดัน (H) บริเวณจุดน้ำจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ฝักระวัง (District Meter, DM) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้รับจากเครื่องตรวจวัดอัตราการไหลและแรงดัน ที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ฝักระวัง ผ่านตู้รับส่งสัญญาณระยะไกล ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลที่บันทึกทุกชั่วโมง โดยมีหน่วยเป็น ลบ.เมตร ต่อชั่วโมงและเมตร ตามลำดับ แสดงดังตาราง 5

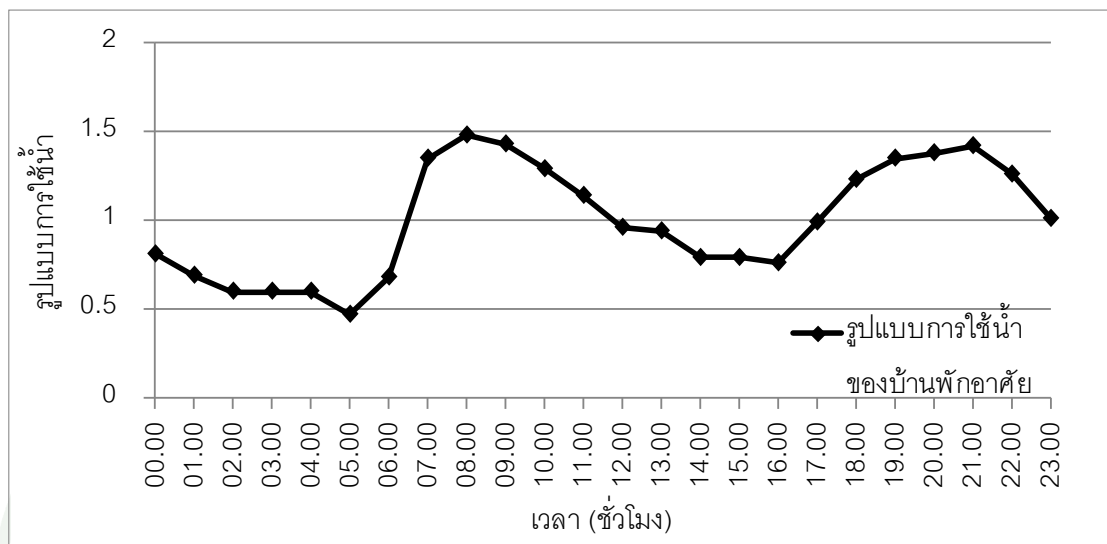


ตารางที่ 5 ข้อมูลอัตราการไหลและค่าแรงดันน้ำจุดน้ำจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ฝักระวัง

เวลา	วันที่ 22-28 เมษายน 2556		วันที่ 9 ธันวาคม 2556	
	อัตราการไหลเฉลี่ย	แรงดันน้ำเฉลี่ย	อัตราการไหลเฉลี่ย	แรงดันน้ำเฉลี่ย
	(ลบ.เมตร/ชม.)	(เมตร)	(ลบ.เมตร/ชม.)	(เมตร)
0:00	106.99	6.61	94.96	7.75
1:00	94.61	6.91	85.56	8.27
2:00	86.85	7.87	70.08	8.91
3:00	90.60	8.68	70.94	9.15
4:00	86.50	8.62	77.79	8.99
5:00	126.92	10.20	125.80	10.00
6:00	190.71	10.42	176.49	10.60
7:00	221.94	10.15	204.59	9.82
8:00	230.11	9.99	200.11	9.87
9:00	222.20	10.19	196.42	10.14
10:00	214.43	10.42	193.25	10.14
11:00	186.81	10.16	195.70	10.19
12:00	177.23	10.19	154.31	10.30
13:00	165.10	10.37	157.26	10.19
14:00	157.02	10.60	143.63	10.53
15:00	165.40	10.40	149.21	10.34
16:00	172.66	10.14	164.38	9.84
17:00	188.39	9.95	179.13	9.94
18:00	191.49	10.08	158.13	10.57
19:00	189.36	10.45	174.25	10.71
20:00	188.50	10.11	161.26	10.34
21:00	179.64	10.20	152.86	10.68
22:00	161.48	10.10	145.98	10.73
23:00	147.65	9.03	127.04	10.46
เฉลี่ย	164.27	9.66	148.30	9.94

ที่มา: การประปานครหลวง (2556ข)

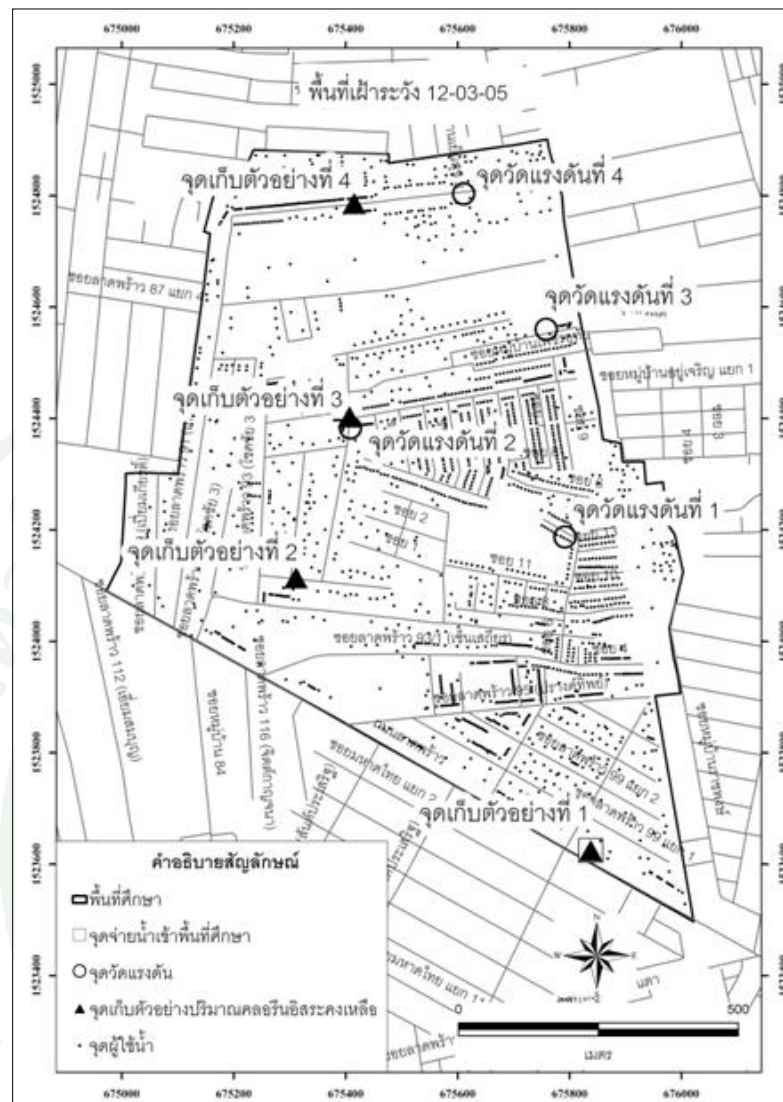
2.4 รูปแบบการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำรายชั่วโมงของผู้ใช้น้ำของพื้นที่เฝ้าระวัง แสดงดัง
ภาพที่ 13



ภาพที่ 13 รูปแบบการใช้น้ำของพื้นที่ศึกษาแบบบ้านพักอาศัย

2.5 ข้อมูลแรงดันภายในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 ได้ใช้ข้อมูลตรวจวัดแรงดันภาคสนามบนหัวดับเพลิงที่กระจายอยู่ในพื้นที่เฝ้าระวังจำนวน 4 จุด จากงานวิจัยของ วีรวัตรและคณะ (2556) ดังแสดงในภาพที่ 14 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันกับหัวดับเพลิงดังแสดงภาพที่ 15 และข้อมูลแรงดันแสดงดังตาราง 6 ส่วนวิธีการติดตั้งดังแสดงในภาคผนวก ก

2.6 ข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือรายชั่วโมง ณ สถานีสูบน้ำบาดาลพร้าว เป็นข้อมูลจากระบบตรวจสอบคุณภาพน้ำประปาระยะใกล้บันทึกเป็นรายชั่วโมง แสดงดังตาราง 7



ภาพที่ 14 จุดเก็บข้อมูลคลอรีนและแรงดัน



ภาพที่ 15 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันบนหัวดับเพลิง

ตารางที่ 6 ข้อมูลตรวจวัดแรงดันภาคสนามบนหัวดับเพลิงที่กระจายอยู่ในพื้นที่เฝ้าระวังจำนวน
4 จุด

เวลา	แรงดันเฉลี่ย (เมตร)			
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
0:00	6.86	6.55	6.23	6.79
1:00	7.53	7.24	6.90	7.45
2:00	8.58	8.31	7.94	8.50
3:00	9.27	8.97	8.59	9.17
4:00	9.22	8.92	8.55	9.15
5:00	10.43	10.09	9.72	10.42
6:00	9.75	9.32	9.09	9.94
7:00	9.14	8.70	8.61	9.42
8:00	8.82	8.43	8.47	9.20
9:00	9.24	8.93	8.85	9.51
10:00	9.67	9.36	9.31	9.86
11:00	9.60	9.37	9.26	9.74
12:00	9.84	9.58	9.43	9.92
13:00	10.18	9.91	9.76	10.23
14:00	10.44	10.18	10.04	10.46
15:00	10.04	9.76	9.67	10.13
16:00	9.76	9.49	9.32	9.84
17:00	9.37	9.09	8.89	9.51
18:00	9.53	9.22	8.96	9.68
19:00	9.94	9.64	9.37	10.08
20:00	9.62	9.30	9.05	9.80
21:00	9.86	9.52	9.32	10.01
22:00	9.75	9.43	9.24	9.87
23:00	8.83	8.47	8.31	8.89
เฉลี่ย	9.39	9.07	8.87	9.48

ที่มา: วีรวัตร (2556ก)

ตารางที่ 7 ข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือรายชั่วโมง ณ สถานีสูบน้ำจ่ายน้ำลาดพร้าว
12-03-05 วันที่ 9 ธันวาคม 2556

เวลา	ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ (มก./ลิตร)		
	สูงสุด	ต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย
0.00	0.44	0.40	0.42
1.00	0.33	0.02	0.18
2.00	0.33	0.32	0.32
3.00	0.54	0.47	0.50
4.00	0.59	0.57	0.58
5.00	0.75	0.65	0.70
6.00	1.13	0.88	1.00
7.00	0.90	0.84	0.87
8.00	0.86	0.84	0.85
9.00	0.85	0.82	0.84
10.00	0.80	0.80	0.80
11.00	0.77	0.70	0.74
12.00	0.65	0.63	0.64
13.00	0.61	0.57	0.59
14.00	0.63	0.57	0.60
15.00	0.84	0.71	0.80
16.00	0.87	0.85	0.86
17.00	0.82	0.79	0.80
18.00	0.76	0.74	0.75
19.00	0.69	0.68	0.69
20.00	0.68	0.67	0.68
21.00	0.62	0.47	0.54
22.00	0.64	0.59	0.62
23.00	0.59	0.52	0.55
เฉลี่ย	0.70	0.63	0.66

ที่มา: การประปานครหลวง (2556ก)

2.7 ข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือตัวแทนในพื้นที่เฝ้าระวัง เป็นการเก็บข้อมูลภาคสนามปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือตัวแทนในพื้นที่เฝ้าระวัง ได้ใช้เครื่องมือ Pocket Colorimeter ในการเก็บตัวอย่างคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่ศึกษา ดังแสดงในภาพที่ 16 โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากจุดที่ต่อโดยตรงจากท่อประปาและยังไม่เข้าถึงฟักน้ำของผู้ใช้น้ำจำนวน 3 จุด และจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ศึกษาจำนวน 1 จุด ดังแสดงในภาพที่ 14 ในวันที่ 9 ธันวาคม 2555 ระหว่างเวลา 7.00 นาฬิกา ถึง 18.00 นาฬิกา ทำการเก็บข้อมูลทุก 30 นาที โดยข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่ทำการตรวจวัดจากภาคสนามในพื้นที่เฝ้าระวังดังแสดงในตารางที่ 8 และมีวิธีการใช้อุปกรณ์แสดงในภาคผนวก ข



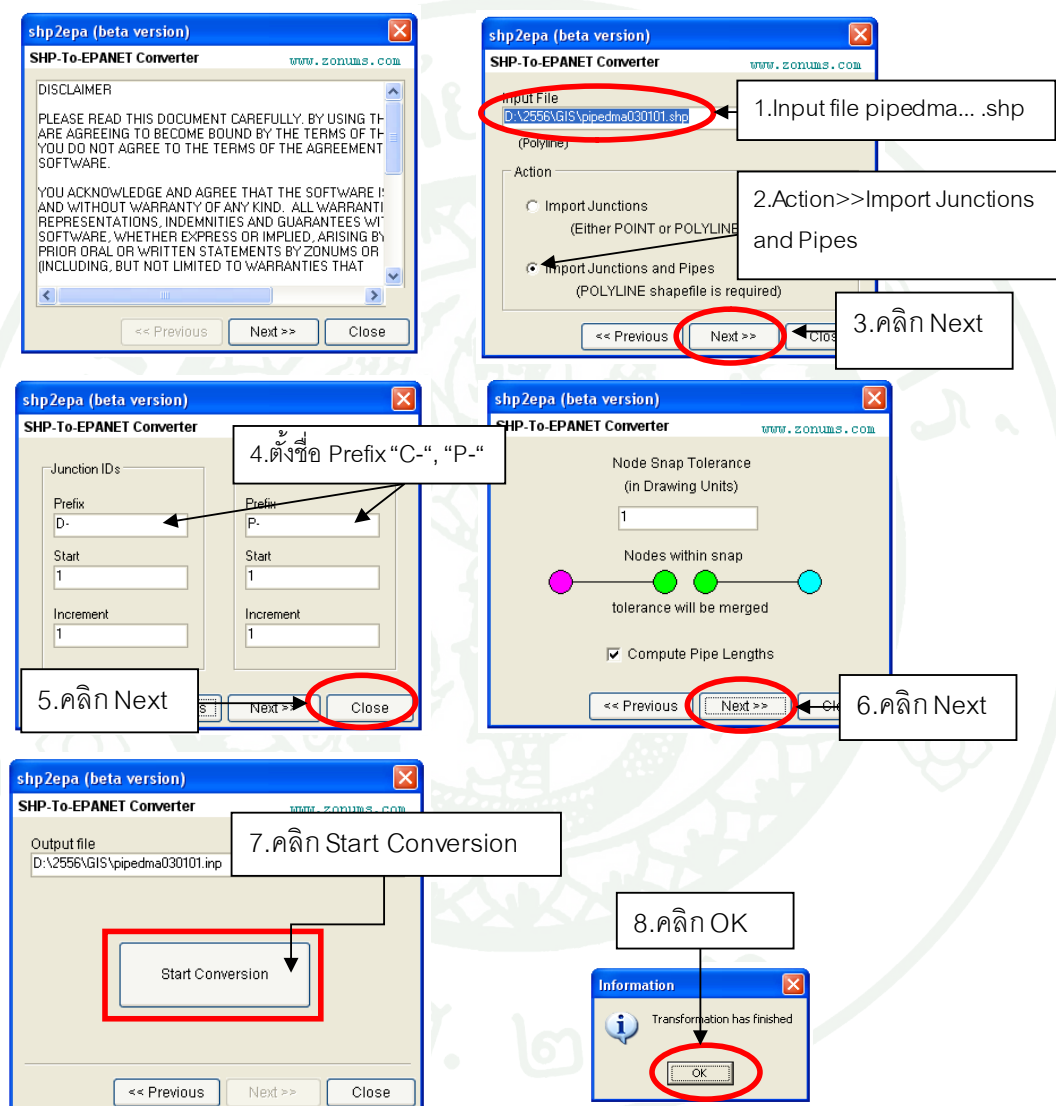
ภาพที่ 16 การตรวจวัดข้อมูลคลอรีนภาคสนาม

ตารางที่ 8 ข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่ทำการตรวจวัดจากภาคสนามในพื้นที่เฝ้าระวัง
12-03-05 ณ วันที่ 9 ธันวาคม 2556

เวลา	ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
7:00	1.03	0.81	-	0.14
7:30	1.10	0.75	-	0.31
8:00	0.88	0.77	-	0.55
8:30	0.86	0.77	-	0.69
9:00	0.85	0.67	0.64	0.43
9:30	0.86	0.66	0.52	0.55
10:00	0.84	0.76	0.49	0.54
10:30	0.81	0.73	0.56	0.51
11:00	0.80	0.69	0.59	0.46
11:30	0.71	0.62	0.61	0.50
12:00	0.74	0.64	0.57	0.48
12:30	0.65	0.60	0.50	0.49
13:00	0.64	0.58	0.49	0.57
13:30	0.58	0.61	0.44	0.38
14:00	0.60	0.47	0.42	0.37
14:30	0.65	0.43	0.42	0.37
15:00	0.74	0.47	0.40	0.37
15:30	0.77	0.52	0.29	0.31
16:00	0.85	0.53	0.37	0.31
16:30	0.83	0.55	0.29	0.26
17:00	0.83	0.57	0.31	0.30
17:30	0.84	0.65	0.46	0.32
18:00	0.79	0.58	0.47	0.41

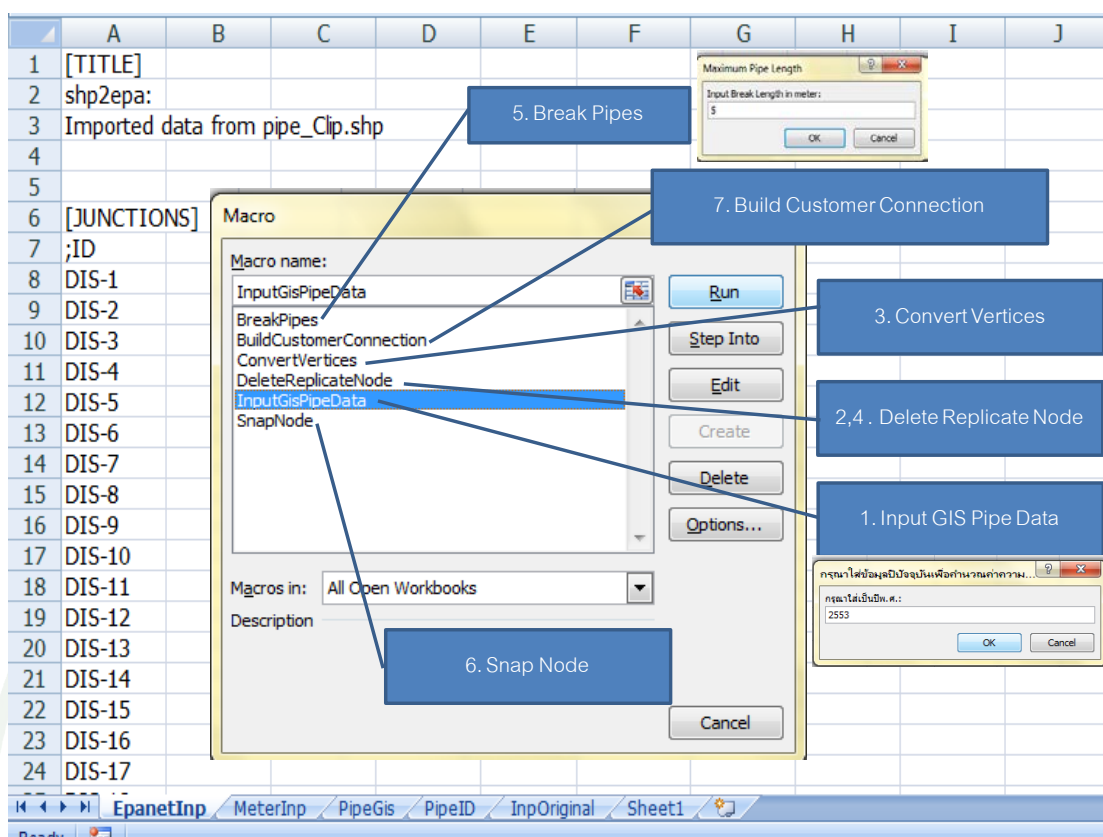
3. การขึ้นแบบจำลอง

3.1 ใช้โปรแกรม shp2epa เพื่อทำการแปลงไฟล์ GIS ของโครงข่ายท่อจ่ายและจุดผู้ใช้น้ำ เป็นไฟล์นามสกุล .inp โดยมีขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 17



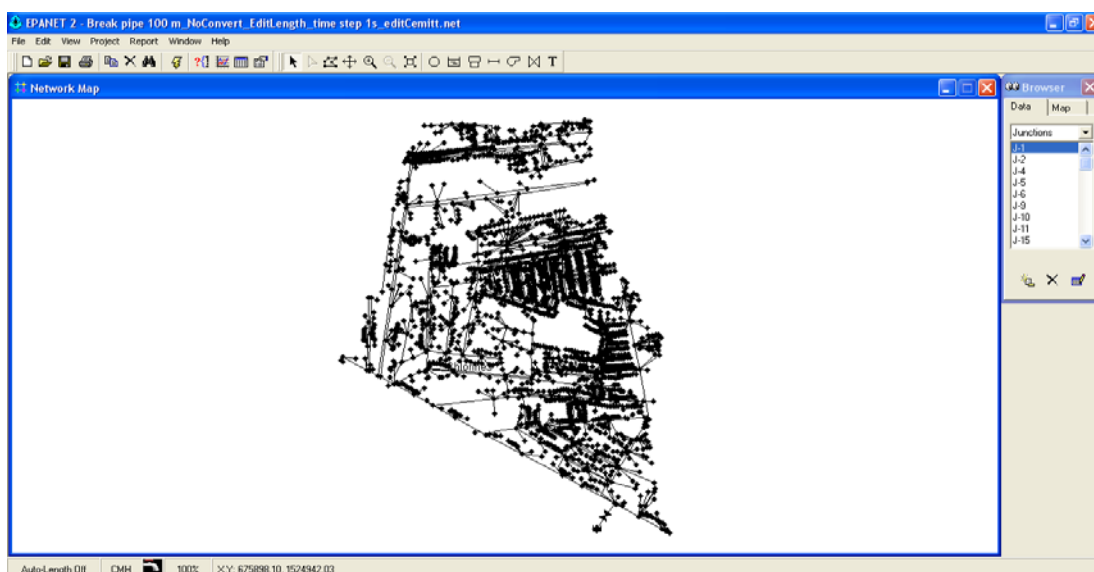
ภาพที่ 17 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม shp2epa เพื่อทำการแปลงไฟล์ GIS เป็นไฟล์นามสกุล .inp

3.2 นำเข้าไฟล์นามสกุล .inp จากข้อ 3.1 ในโปรแกรม Microsoft office excel ที่มีการพัฒนา Macro เพื่อทำการขึ้นโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำประปา โดยขั้นตอนการรัน Macro แสดงดังภาพที่ 18 โดยในขั้นตอนที่ 5 (Break pipe) จะทำการเบรกเส้นท่อทุก 100 เมตร เพื่อเป็นการลดจำนวนบัพ (node) ที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของอายุน้ำ



ภาพที่ 18 ขั้นตอนการรัน Macro ในโปรแกรม Microsoft office excel

3.3 นำไฟล์โครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำจากข้อ 3.2 มาเปิดด้วยโปรแกรม EPANET แสดงดังภาพที่ 19 และทำการทดลองรันโปรแกรมเพื่อแก้ไขโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำประปาบางส่วนที่มีปัญหาเรื่องการเชื่อมต่อ จนสามารถรันโปรแกรมได้



ภาพที่ 19 โครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำประปาเมื่อเปิดด้วยโปรแกรม EPANET

4. การสอบเทียบแบบจำลองทางศาสตร์

เมื่อสร้างแบบจำลองเรียบร้อยแล้วจึงทำการสอบเทียบทางด้านศาสตร์ โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำขาย ปริมาณน้ำสูญเสียและข้อมูลแรงดันของเดือนเมษายน 2556 โดยมีขั้นตอนการสอบเทียบดังนี้

4.1 ทำการป้อนค่าปริมาณการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำเข้าไปในแบบจำลอง ส่วนปริมาณน้ำสูญเสีย (30.11%) จะถูกนำเข้าโดยใช้ Emitter function ดังแสดงในสมการ (2) โดยใช้ค่า Emitter exponent (N_e) เท่ากับ 1 จากงานวิจัยของวีรวัตรและคณะ (2556) และทำการปรับแก้ค่า Emitter coefficient (C) เพื่อให้ปริมาณน้ำเข้ารวม (ปริมาณน้ำใช้รวมกับปริมาณน้ำสูญเสีย) เท่ากับค่าที่วัดได้ที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ โดยสมมติใช้ค่า C ในแบบจำลองเท่ากันทุก node ของแบบจำลอง ซึ่งมีจำนวน node ทั้งหมด 2,458 จุด

4.2 สอบเทียบแรงดันน้ำในพื้นที่ศึกษา โดยทำการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระท่อฮาเซน-วิลเลียม (C_{HW}) เพื่อให้แรงดันในแบบจำลองสอดคล้องกับแรงดันที่วัดได้จริงในสนามที่กระจายอยู่ในพื้นที่จำนวน 4 จุด

5. การสอบเทียบแบบจำลองคุณภาพน้ำ

เมื่อทำการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์เรียบร้อยแล้วจึงทำการสอบเทียบแบบจำลองคุณภาพน้ำโดยมีขั้นตอนดังนี้

5.1 นำเข้ารูปแบบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ (จุดเก็บตัวอย่างที่ 1) โดยข้อมูลที่นำเข้าเป็นข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากภาคสนาม ช่วงเวลา 7.00-18.00 นาฬิกา วันที่ 9 ธันวาคม 2556 ส่วนรูปแบบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในช่วงโมงอื่นๆ ที่ไม่ได้มีการตรวจวัดจะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่สถานีสูบน้ำลาดพร้าวกับจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ แล้วนำค่าความสัมพันธ์ที่ได้มาเป็นหลักในการต่อขยายรูปแบบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่

5.2 วิเคราะห์พจน์นี้ได้ใช้ค่า k_d เท่ากับ -3.384 วัน^{-1} จากการประมาณครหลง (2556) ที่ได้มีการทดลอง Bottle test ที่ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน ณ วันที่ 22 กุมภาพันธ์ 2556 โดยใช้ปฏิริยาอันดับหนึ่งในการคำนวณค่า k_d และ k_w แสดงดังสมการ (4) ทำการปรับแก้ค่า k_w เพื่อหาค่าเหมาะสมที่ทำให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลภาคสนามในพื้นที่ศึกษาจำนวน 3 จุด (จุดเก็บตัวอย่างที่ 2-4) ดังแสดงในภาพที่ 14

6. การประยุกต์ใช้แบบจำลองคุณภาพน้ำในการบริหารจัดการปริมาณคลอรีนกับกรณีศึกษา

เมื่อทำการขึ้นแบบจำลองและทำการสอบเทียบเรียบร้อยแล้วจึงทำการศึกษากรณีศึกษาทางด้านคุณภาพน้ำในพื้นที่ศึกษา โดยทำการปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นและรูปแบบคลอรีนรายชั่วโมงที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ศึกษา เพื่อให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ จุดตรวจวัดไกลสุด (จุดเก็บตัวอย่าง 4) ได้รับปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือตามค่ามาตรฐานองค์การอนามัยโลกคือไม่น้อยกว่า 0.2 มก./ลิตร

7. วิเคราะห์และสรุปผล

7.1 วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ การหาค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลของ Emitter (Emitter Coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระท่อฮาเซน-วิลเลียม (C_{HW})

7.2 วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองคุณภาพน้ำในพื้นที่ศึกษาและสรุปผลการปรับแก้ค่า

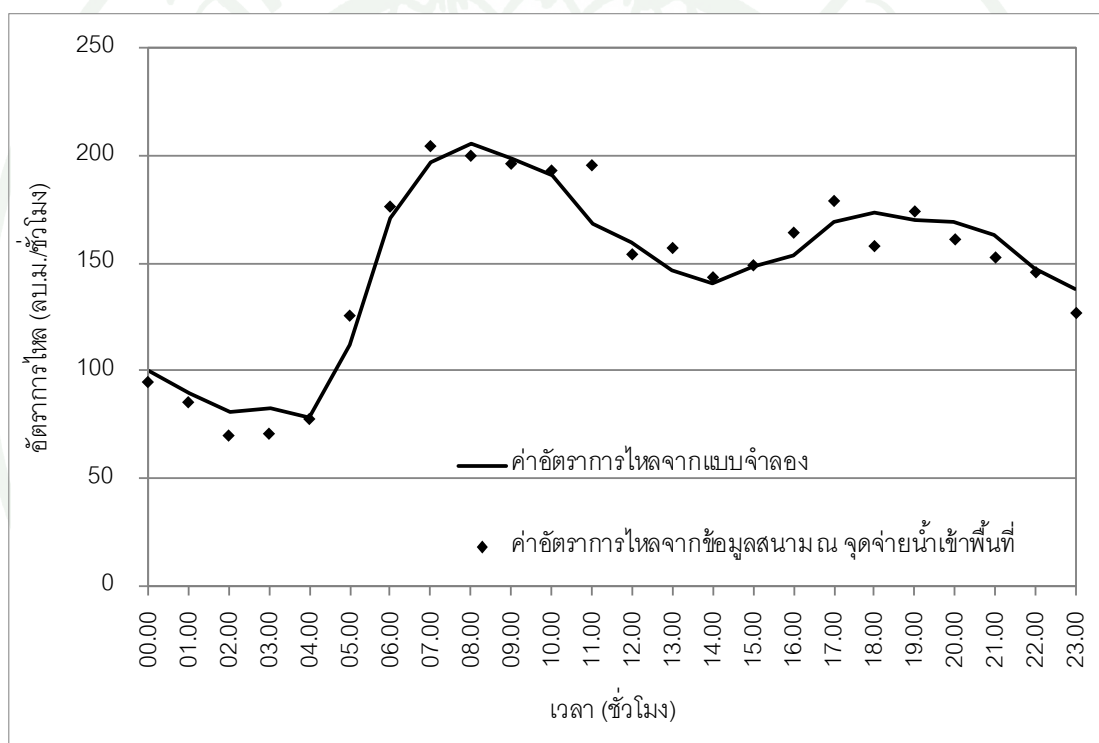
k_w

7.3 วิเคราะห์และสรุปผลการนิศึกษาด้านคุณภาพน้ำในพื้นที่ศึกษา

ผลการศึกษาและวิจารณ์

1. ผลการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์

ผลจากการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์ได้ค่า C เท่ากับ 0.002027 เมตร²/ชม. ที่ทำให้ค่าปริมาณน้ำเข้าพื้นที่ศึกษาในแบบจำลองใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของอัตราการไหลที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ศึกษาระหว่างแบบจำลองกับจุดตรวจวัดเท่ากับ 0.9722 ดังภาพที่ 20

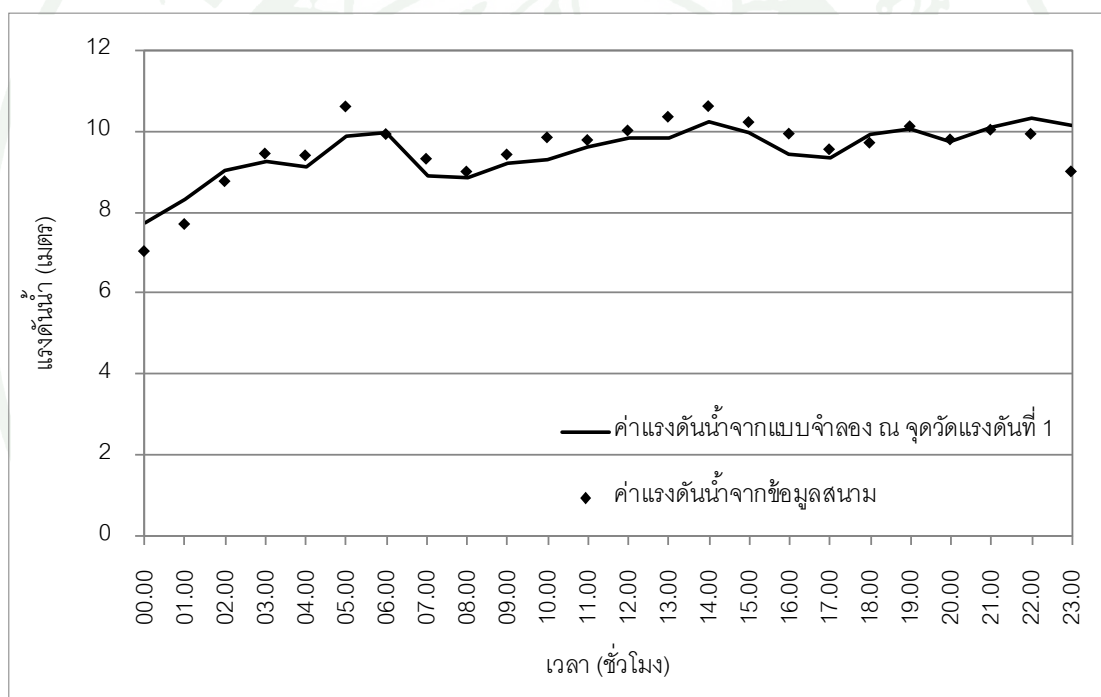


ภาพที่ 20 กราฟการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ ระหว่างแบบจำลองกับจุดตรวจวัด

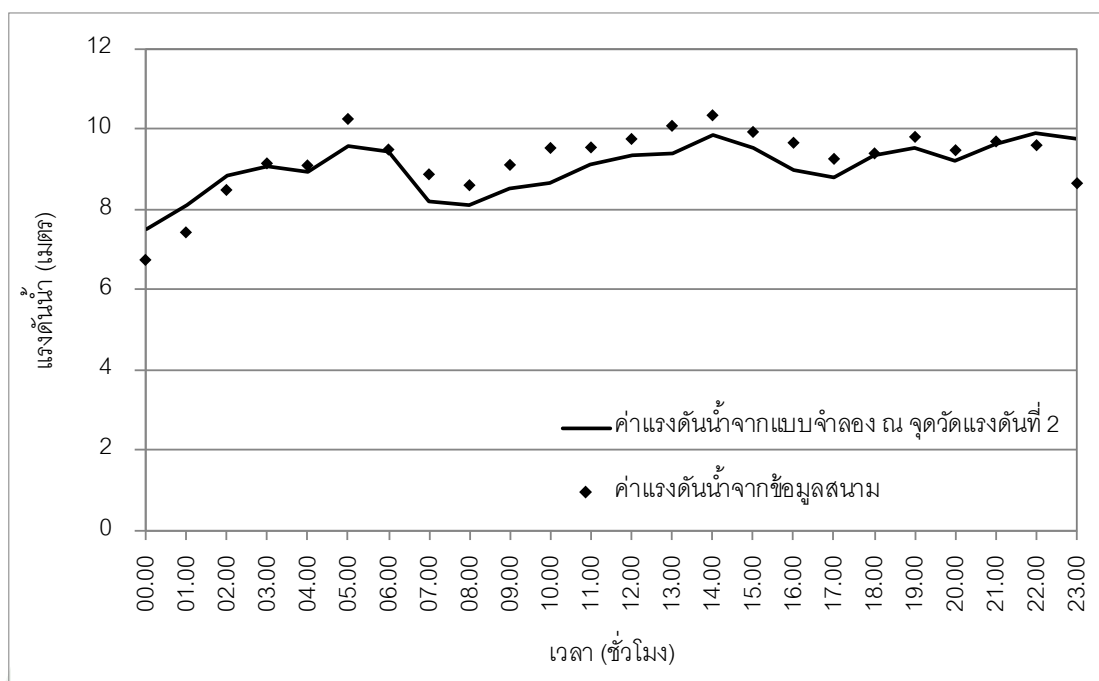
ส่วนการสอบเทียบแรงดันน้ำจำนวน 4 จุด ในพื้นที่ศึกษาได้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระท่อฮาเซน-วิลเลียม (C_{HW}) เฉลี่ยเท่ากับ 127.43 มีค่ารากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่า r เฉลี่ย 4 จุด เท่ากับ 0.6059 เมตร และ 0.8022 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 9 โดยกราฟเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่จุดวัดแรงดันทั้ง 4 จุดกับแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 21-24 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ปรับแก้มีความสอดคล้องกับพื้นที่จริง

ตารางที่ 9 ค่า r และค่า RMSE ของจุดตรวจวัดแรงดัน 4 จุด ภายในพื้นที่ศึกษา

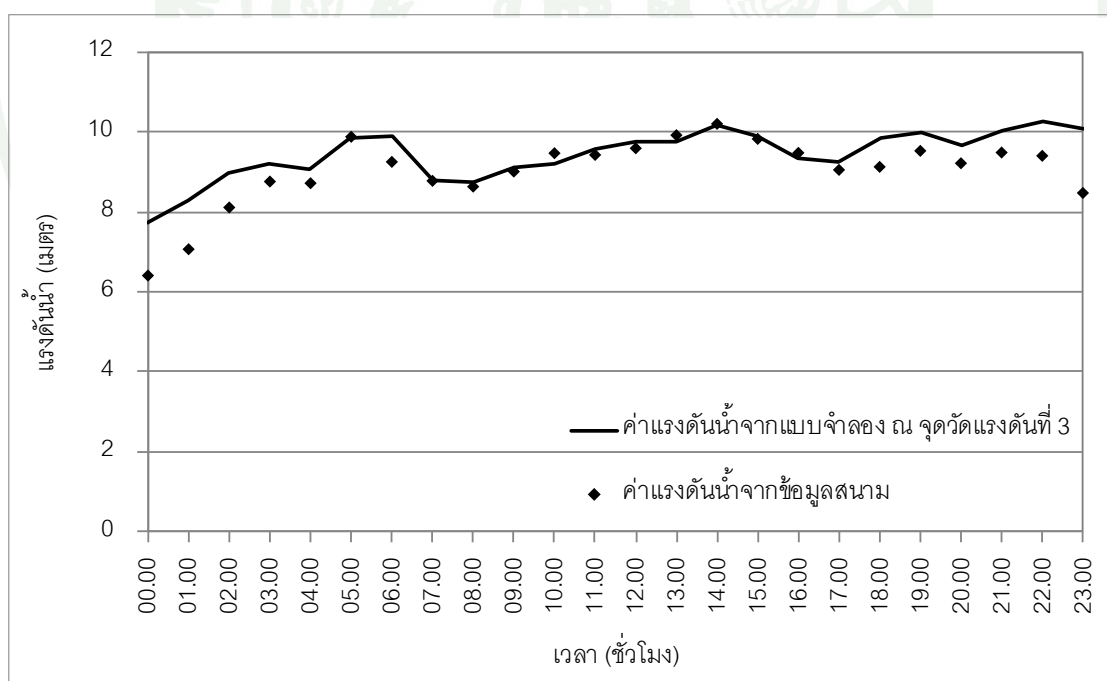
จุดตรวจวัด	r	RMSE (เมตร)
1	0.8538	0.4399
2	0.7890	0.5382
3	0.8283	0.6290
4	0.7378	0.8166
ค่าเฉลี่ย	0.8022	0.6059



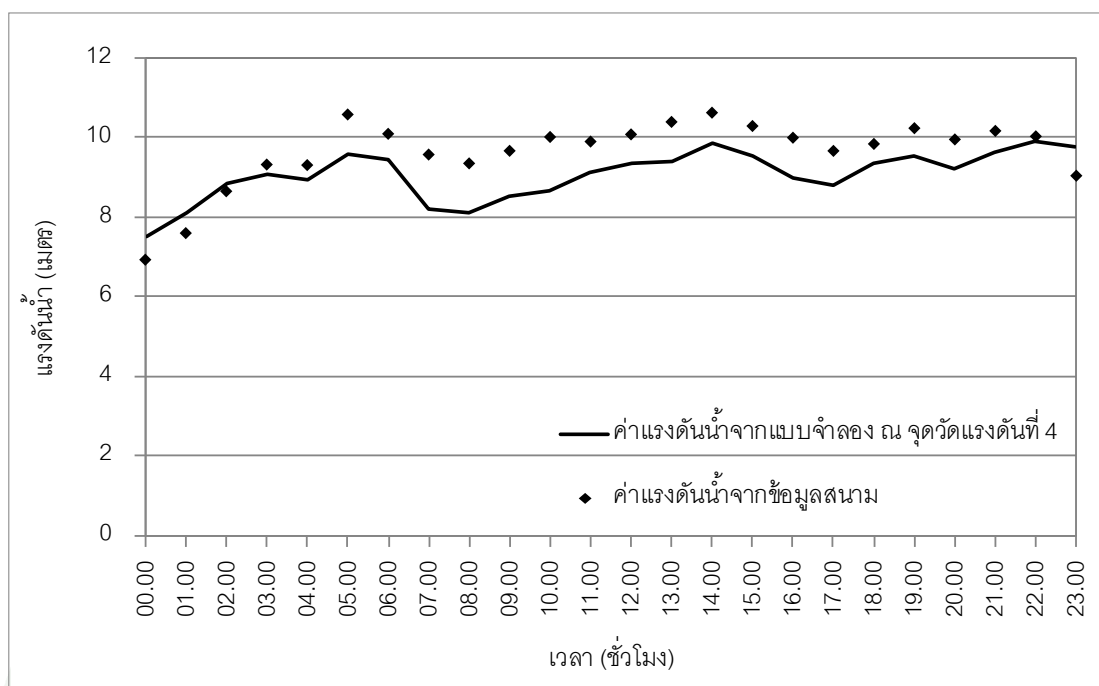
ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่จุดตรวจวัดที่ 1 กับแบบจำลอง



ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่จุดตรวจวัดที่ 2 กับแบบจำลอง



ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่จุดตรวจวัดที่ 3 กับแบบจำลอง



ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่จุดตรวจวัดที่ 4 กับแบบจำลอง

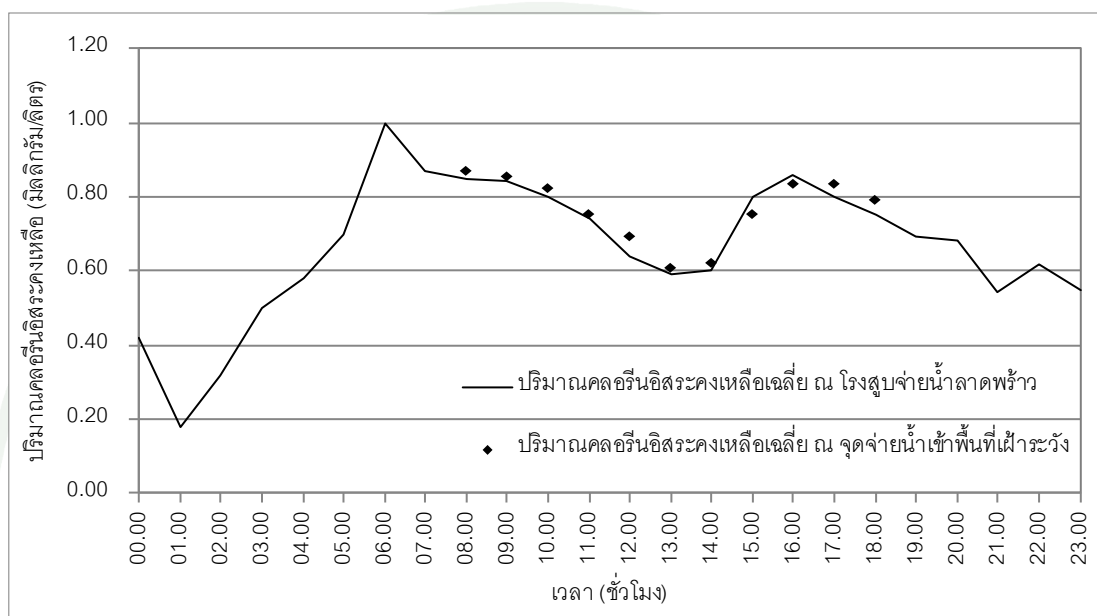
2. ข้อจำกัดของแบบจำลอง EPANET ในการจำลองคุณภาพน้ำ

จากการวิเคราะห์แบบจำลองคุณภาพน้ำพบว่าแบบจำลอง EPANET มีข้อจำกัดในเรื่องการคำนวณอายุน้ำโดยค่าอายุน้ำที่แบบจำลองสามารถคำนวณได้ละเอียดสุดคือที่ Water quality time step เท่ากับ 1 นาที (0.01667 ชั่วโมง) ทำให้เส้นท่อที่มีอายุน้ำต่ำกว่า 1 นาที แบบจำลอง EPANET จะปรับให้อายุน้ำในท่อนั้นเป็น 1 นาที ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อายุน้ำในแบบจำลอง EPANET คลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นก่อนทำการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องทำการปรับแก้ความยาวของท่อที่มีอายุน้ำต่ำกว่า 1 นาทีเสียก่อน โดยวิธีการปรับแก้คือการเชื่อมต่อความยาวของท่อเส้นที่มีอายุน้ำต่ำกว่า 1 นาทีกับท่อที่อยู่ติดกันและมีคุณสมบัติท่อเช่นเดียวกัน

3. ผลการสอบเทียบแบบจำลองคุณภาพน้ำ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่สถานีสูบน้ำจ่ายน้ำลาดพร้าวกับจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 พบว่าระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเคลื่อนตัวจากสถานีสูบน้ำจ่ายน้ำลาดพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง (จุดเก็บตัวอย่างที่ 1) ใช้เวลาประมาณ 30 นาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่น้อยมาก และค่าปริมาณคลอรีนอิสระ

คงเหลือทั้งสองจุดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีรากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 3.21×10^{-2} มก./ลิตร และมีค่า r เท่ากับ 0.9722 แสดงดังภาพที่ 25 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการต่อขยายรูปแบบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือโดยใช้ค่าที่สถานีสูบน้ำบาดาลพร้าวเป็นตัวแทนข้อมูลในช่วงเวลาที่ไม่ได้ทำตรวจวัดจากภาคสนาม



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ สถานีสูบน้ำบาดาลพร้าวกับจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง ในวันที่ 9 ธันวาคม 2556

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอายุน้ำกับอัตราการไหลของน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวังพบว่าอายุน้ำกับอัตราการไหลของน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวังมีความสัมพันธ์ผกผันอย่างชัดเจน คือ ในช่วงเวลากลางคืนที่อัตราการไหลมีค่าลดลงและต่ำสุด ณ เวลา 4.00 น. นั้น อายุน้ำจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดย ณ จุดวัดคลอรีนไกลสุดภายในพื้นที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.5 ชั่วโมง ณ เวลา 5.00 น. รวมทั้งพบว่าปริมาณคลอรีนที่จุดจ่ายน้ำเข้าอยู่ในช่วง 0.20-1.00 มก./ลิตร ได้สลายตัวและคงเหลือ ณ จุดวัดไกลสุดอยู่ในช่วง 0.05-0.60 มก./ลิตร

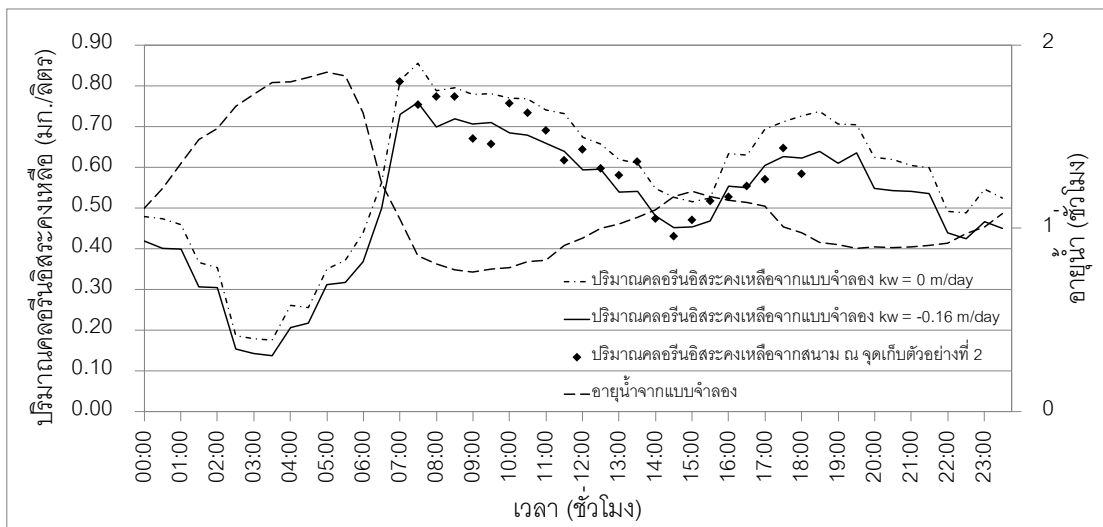
จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยใช้ค่า k_b เท่ากับ -3.384 วัน^{-1} และทดลองใช้ค่า k_w เท่ากับ 0.0 เมตร/วัน ได้ค่า r และ RMSE เฉลี่ย 4 จุดเท่ากับ 0.900 และ 0.092 มก./ลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 10 จากการวิเคราะห์ค่า RMSE พบว่า ณ จุดตรวจวัดที่อยู่ห่างไกลจากจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าค่าที่ตรวจวัดจากสนาม

เมื่อทำการปรับแก้ค่า k_w พบว่าค่า k_w เท่ากับ -0.16 เมตร/วัน ที่ทำให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือของแบบจำลองมีค่าสอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัด โดยมีค่า r และ RMSE เฉลี่ย 4 จุด เท่ากับ 0.907 และ 0.047 มก./ลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 10 ซึ่งให้ค่าความสัมพันธ์ที่ดีกว่าการใช้ค่า k_w เท่ากับ 0.0 เมตร/วัน ทั้งนี้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือยังแปรผกผันกับอายุน้ำ อย่างเห็นได้ชัดเจน แสดงดังภาพที่ 26, 27 และ 28

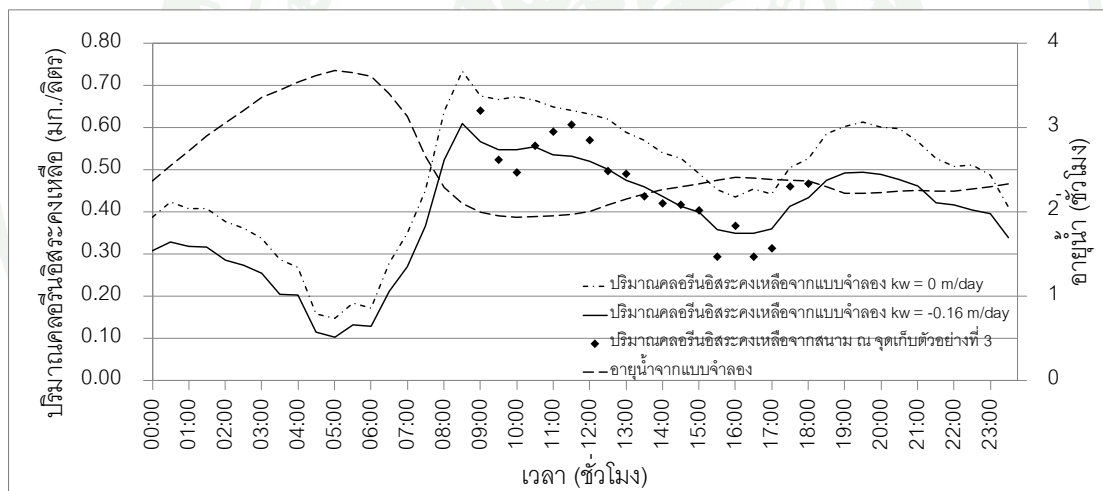
ตารางที่ 10 ค่า r และ RMSE กรณีที่ k_w เท่ากับ 0.0 และ -0.16 เมตร/วัน

จุดตรวจวัด	$k_w = 0.0$ เมตร/วัน		$k_w = -0.16$ เมตร/วัน	
	r	RMSE (มก./ลิตร)	r	RMSE (มก./ลิตร)
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

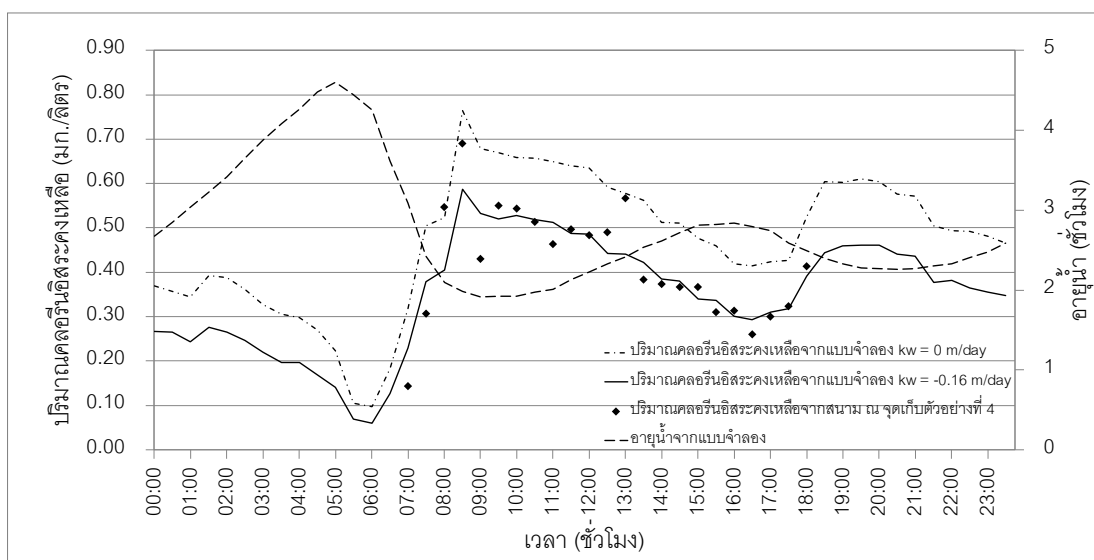
เมื่อทำการเฉลี่ยความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ มีค่าเท่ากับ 0.67 มก./ลิตร พบว่าเมื่อน้ำเดินทางไปถึงจุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ซึ่งไกลจากจุดจ่ายน้ำมากที่สุด พบว่าค่าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.47 มก./ลิตร (ลดลง 0.20 มก./ลิตร) สำหรับกรณีไม่พิจารณาปฏิกิริยาที่ผิวท่อ ($k_w = 0.0$) และค่าเฉลี่ยเหลือเท่ากับ 0.35 มก./ลิตร (ลดลง 0.32 มก./ลิตร) สำหรับกรณีพิจารณาปฏิกิริยาที่ผิวท่อ ($k_w = -0.16$ ม./วัน) แสดงให้เห็นว่าในงานวิจัยนี้ปฏิกิริยาที่ผิวท่อมีอิทธิพลต่อการสลายตัวของคลอรีนในสเกลที่เทียบเคียงกับปฏิกิริยาในมวลน้ำ และจากการใช้ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง สำหรับค่า k_b และ k_w ตามสมการ (4) ซึ่งทำให้สมการอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ชั้นที่หนึ่งเชิงเส้นตรง (First-order differential linear equation) จึงทำให้อัตราการสลายตัวของความเข้มข้นคลอรีนคงเหลือนั้นขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้น ณ เวลานั้นๆ



ภาพที่ 26 กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่วัดได้จริงจากสนามจุดที่ 2 และจากแบบจำลอง



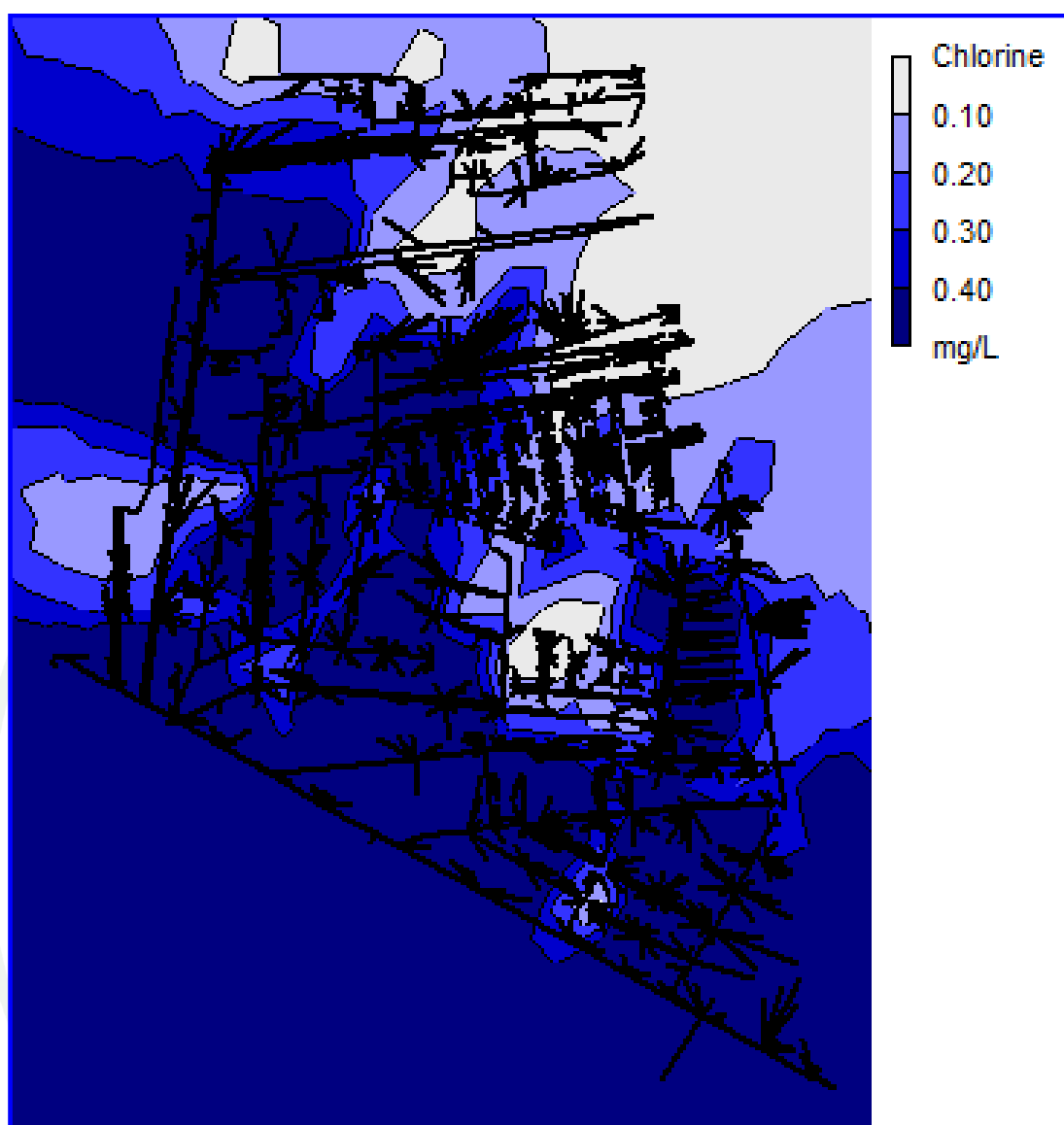
ภาพที่ 27 กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่วัดได้จริงจากสนามจุดที่ 3 และจากแบบจำลอง



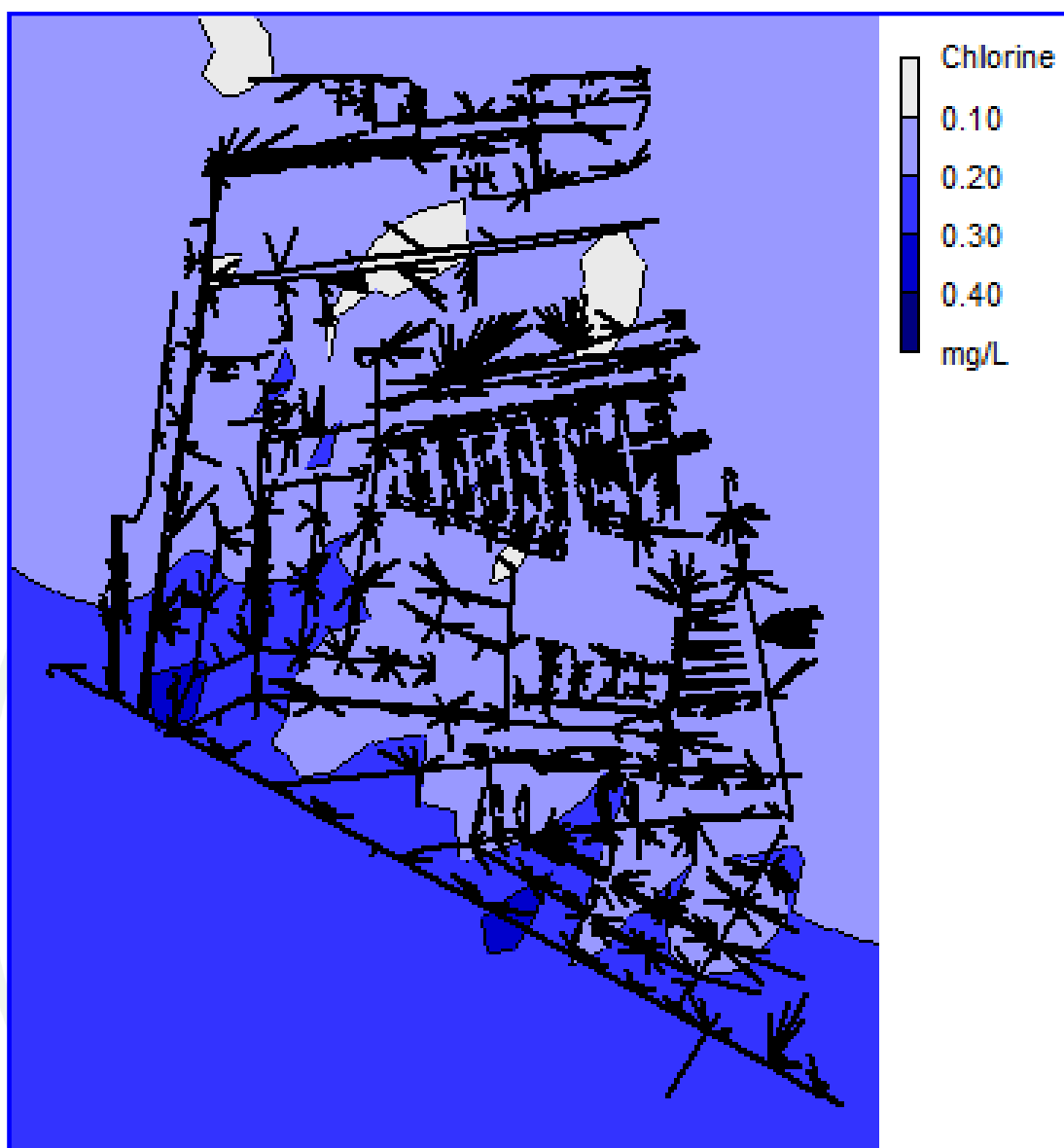
ภาพที่ 28 กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่วัดได้จริงจากสนามจุดที่ 4 และจากแบบจำลอง

4. ผลการศึกษาการกระจายตัวของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ

ผลการศึกษาการกระจายตัวของคลอรีนพบว่าช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูงสุดเวลา 8.00 นาฬิกา ณ วันที่ 9 ธันวาคม 2556 เป็นช่วงที่มีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือกระจายตัวในพื้นที่สูง โดยมีปริมาณปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเฉลี่ย 0.50 มก./ลิตร ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานองค์การอนามัยโลก คือ 0.2 มก./ลิตร อย่างไรก็ตามยังมีกลุ่มผู้ใช้น้ำบางส่วนที่ได้รับปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือต่ำกว่า 0.2 มก./ลิตร แสดงดังภาพที่ 29 และช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำต่ำสุด เป็นช่วงที่มีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือกระจายตัวในพื้นที่ต่ำ โดยมีปริมาณปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเฉลี่ย 0.20 มก./ลิตร แสดงดังภาพที่ 30



ภาพที่ 29 การกระจายตัวของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05
ช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูงสุด เวลา 8.00 นาฬิกา



ภาพที่ 30 การกระจายตัวของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่ไผ่ระวัง 12-03-05
ช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำต่ำสุด เวลา 4.00 นาฬิกา

5. การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการบริหารจัดการปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่เฝ้าระวังกับกรณีศึกษา

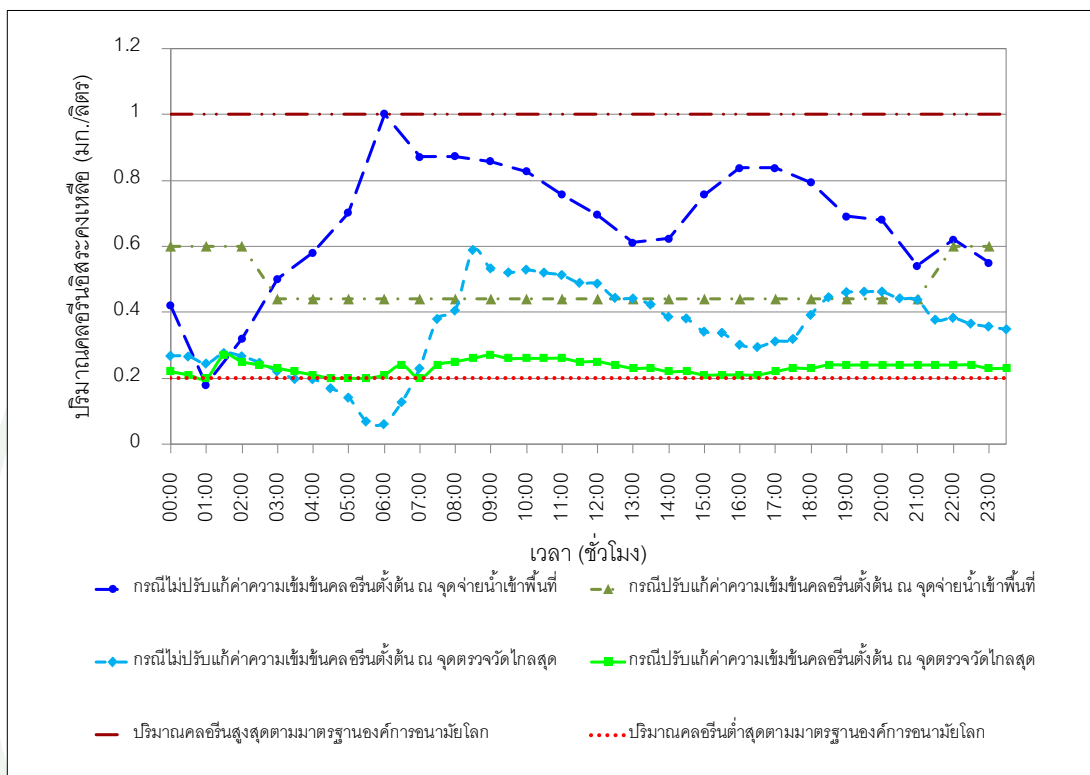
จากการศึกษากรณีศึกษาทางด้านคุณภาพน้ำในพื้นที่ศึกษา โดยทำการปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นและรูปแบบคลอรีนรายชั่วโมงที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ศึกษา เพื่อให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ จุดตรวจวัดไกลสุด (จุดเก็บตัวอย่าง 4) ได้รับปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือตามค่ามาตรฐานองค์การอนามัยโลกคือ 0.20 มก./ลิตร ในการปรับแก้ได้แบ่งช่วงเวลาเป็น 2 ช่วง ดังนี้

1. ช่วงเวลา 22.00-3.00 นาฬิกา (5 ชั่วโมง) จะทำการปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นเป็น 0.60 มก./ลิตร เนื่องจากเป็นช่วงเวลาก่อนที่อายุน้ำจะมีค่าสูงสุดคือ 4.5 ชั่วโมง และการปรับแก้ในช่วงเวลาดังกล่าวจะมีผลต่อปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ จุดตรวจวัดไกลสุดในช่วงเวลา 1.00-7.00 นาฬิกา ซึ่งช่วงเวลา 4.00-7.00 นาฬิกา มีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือต่ำกว่า 0.20 มก./ลิตร ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นในช่วงเวลานี้ให้มีค่าสูงถึง 0.60 มก./ลิตร เพื่อที่จะทำให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ จุดตรวจวัดไกลสุดในช่วงเวลา 4.00-7.00 นาฬิกา มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.20 มก./ลิตร แสดงดังภาพที่ 31

2. ช่วงเวลา 3.00-22.00 นาฬิกา (19 ชั่วโมง) จะทำการปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นเป็น 0.44 มก./ลิตร เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่อายุน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.7 ชั่วโมง และการปรับแก้ในช่วงเวลาดังกล่าวจะมีผลต่อปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ จุดตรวจวัดไกลสุดในช่วงเวลา 7.00-1.00 นาฬิกา ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเฉลี่ยมากกว่า 0.20 มก./ลิตร ดังนั้นการปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นในช่วงเวลานี้จึงไม่จำเป็นต้องมีค่าสูงถึง 0.60 มก./ลิตร ก็สามารถทำให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ จุดตรวจวัดไกลสุดในช่วงเวลา 7.00-1.00 นาฬิกา มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.20 มก./ลิตร แสดงดังภาพที่ 31

ผลการปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ศึกษา (จุดเก็บตัวอย่าง 1) พบว่าสามารถลดค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นลงได้เกือบทุกช่วงเวลา ยกเว้นช่วงเวลา 22.00-2.00 นาฬิกา ที่ต้องทำการเพิ่มค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้น โดยได้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นอยู่ในช่วง 0.44-0.60 มก./ลิตร และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.47 มก./ลิตร ส่วนกรณีไม่ปรับแก้ค่าความเข้มข้นตั้งต้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.18-1.00 มก./ลิตร โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.18 มก./ลิตร ณ เวลา 1.00 นาฬิกา มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.00 มก./ลิตร ณ เวลา 6.00 นาฬิกา และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.67

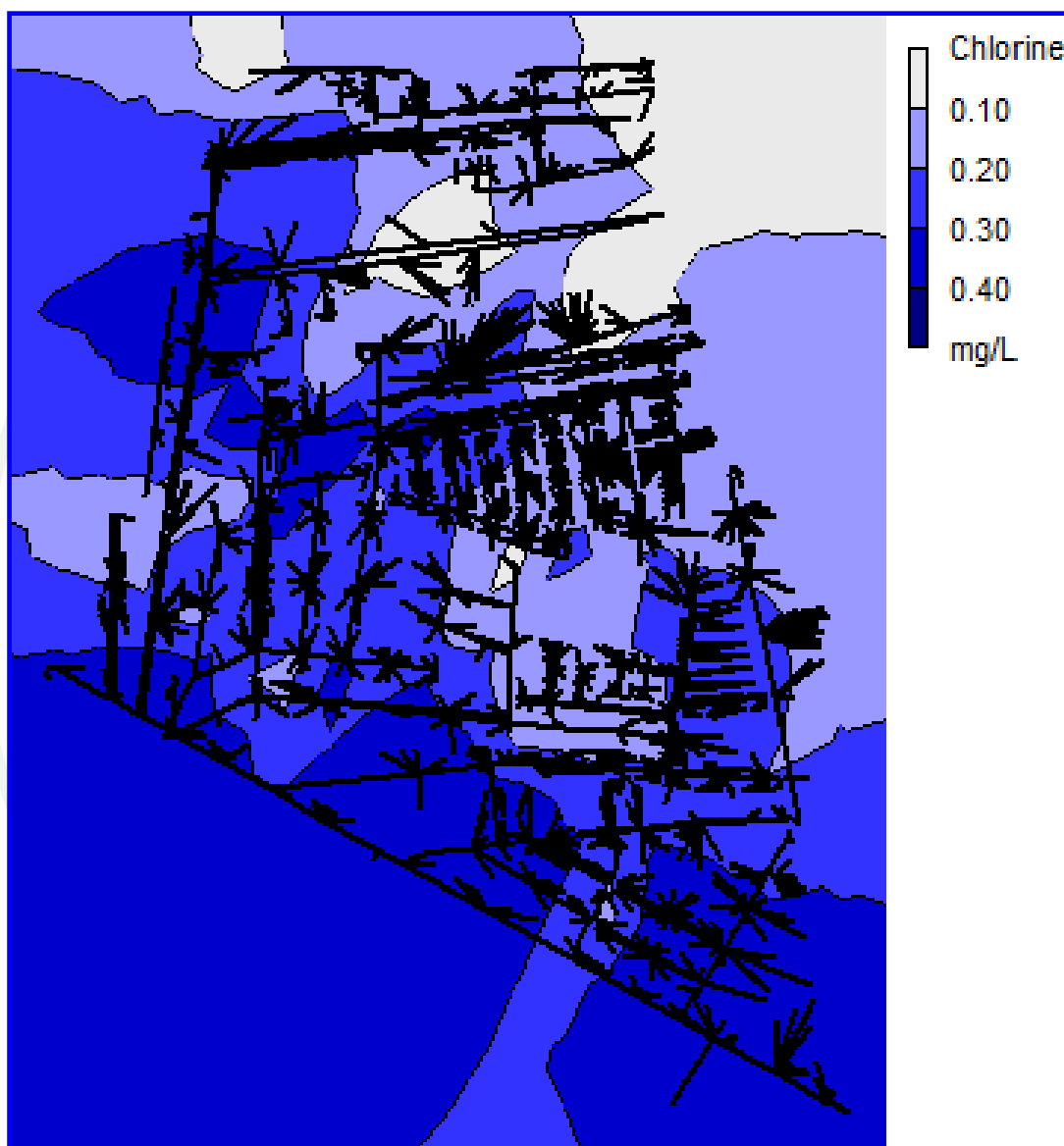
มก./ลิตร ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าสามารถลดค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นเฉลี่ยลงได้ถึง 0.20 มก./ลิตร (21.41 กก./วัน คิดเป็น 35% เป็นเงิน 71,665 บาทต่อปี) โดยที่จุดตรวจวัดไกลสุด (จุดเก็บตัวอย่าง 4) ยังได้รับปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ 0.20 มก./ลิตร



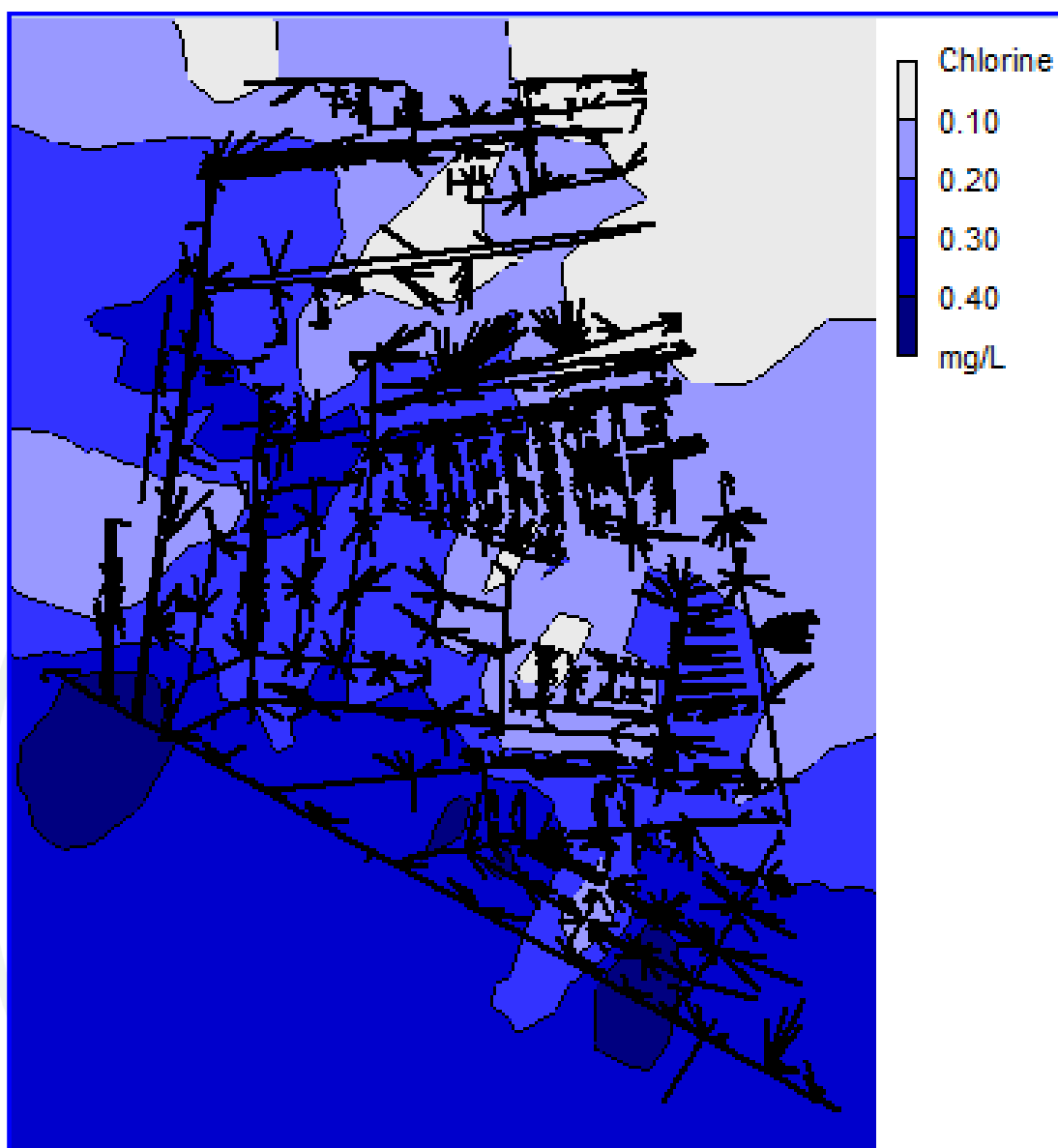
ภาพที่ 31 การเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นกรณีไม่ปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นกับกรณีศึกษา (ปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้น)

เมื่อทำการปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นแล้วจึงทำการศึกษาการกระจายตัวของคลอรีนในกรณีศึกษา พบว่าช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูงสุด (8:00 นาฬิกา) มีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเฉลี่ย 0.27 มก./ลิตร แสดงดังภาพที่ 32 ซึ่งลดลงจากกรณีไม่ปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้น (0.50 มก./ลิตร) 0.23 มก./ลิตร แต่ยังคงมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานองค์การอนามัยโลก (0.20 มก./ลิตร) และช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำต่ำสุด (4:00 นาฬิกา) มีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเฉลี่ย 0.27 มก./ลิตร แสดงดังภาพที่ 33 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่ปรับแก้ค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้น (0.20 มก./ลิตร) 0.07 มก./ลิตร

จากผลการศึกษาลำหรับกรณีศึกษาที่ได้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองคุณภาพน้ำของโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำประปา สามารถใช้เป็นเครื่องมือช่วยสนับสนุนการหาแนวทางในการบริหารจัดการคุณภาพน้ำตั้งแต่ต้นทางจนถึงปลายทางระดับจุดผู้ใช้น้ำภายในพื้นที่เฝ้าระวังได้



ภาพที่ 32 กรณีศึกษาการกระจายตัวของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่เฝ้าระวัง
12-03-05 ช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูงสุด เวลา 8.00 นาฬิกา

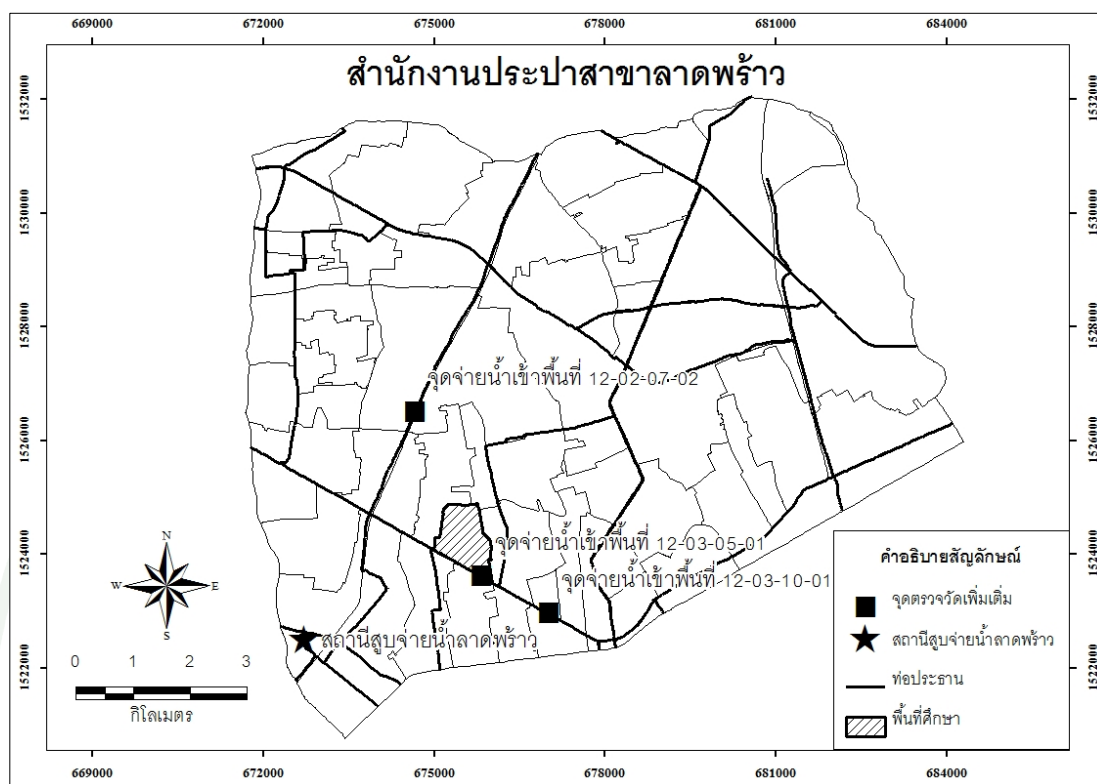


ภาพที่ 33 กรณีศึกษาการกระจายตัวของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่ฝักระวัง
12-03-05 ช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำต่ำสุด เวลา 4.00 นาฬิกา

6. ผลการตรวจวัดข้อมูลภาคสนามเพิ่มเติม

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการตรวจวัดข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือภาคสนามเพิ่มเติม โดยทำการตรวจวัดที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ฝักระวัง 12-03-05-01 (DM-12-03-05-01), 12-03-10-01 (DM-12-03-10-01) และ 12-02-07-02 (DM-12-02-07-02) แสดงดังภาพที่ 34 ระหว่างวันที่ 3-5

มิถุนายน 2557 เพื่อเป็นการตรวจสอบระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำบาดาลพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวังในแต่ละพื้นที่



ภาพที่ 34 จุดตรวจวัดข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือภาคสนามเพิ่มเติม

ผลการตรวจวัดข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือภาคสนามเพิ่มเติม ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05-01 แสดงดังภาพที่ 35 จากการวิเคราะห์ระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำบาดาลพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.5-3.0 ชั่วโมง ซึ่งในแต่ละชั่วโมงมีระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำบาดาลพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวังไม่เท่ากัน เช่น ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำบาดาลพร้าว ณ เวลา 5.00 นาฬิกา มาถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวังเวลา 8.30 นาฬิกา ใช้เวลาในการเดินทาง 3.0 ชั่วโมง และปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำบาดาลพร้าว ณ เวลา 7.00 นาฬิกา มาถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวังเวลา 9.00 นาฬิกา ใช้เวลาในการเดินทาง 1.5 ชั่วโมง เป็นต้น

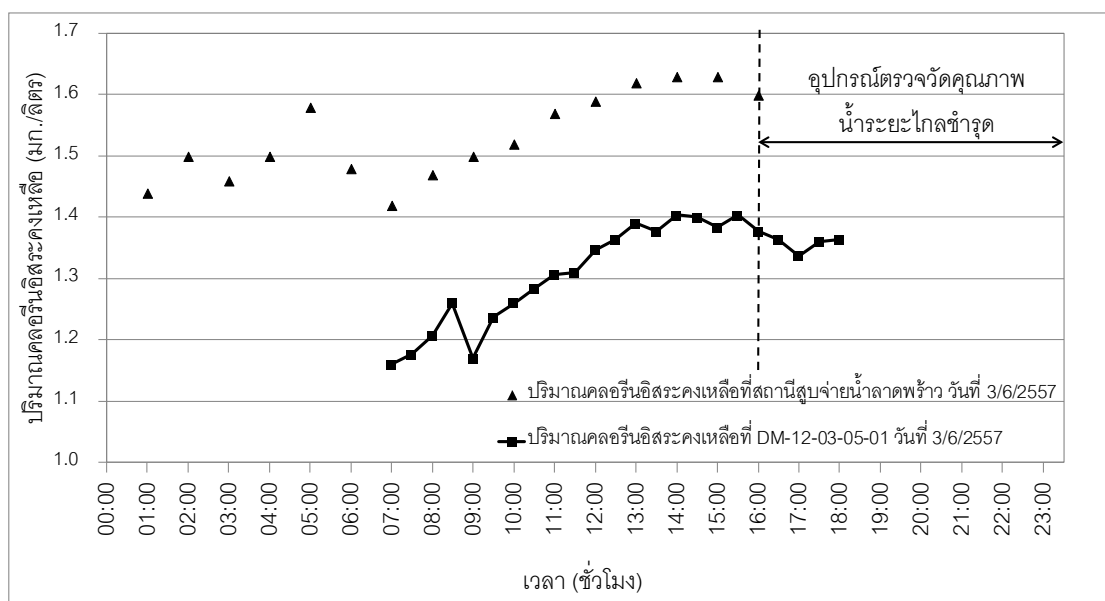
ส่วนในพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-10 ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำบาดาลพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ได้ เนื่องจากอุปกรณ์

ตรวจวัดคุณภาพน้ำระยะไกลซ้ำชุด จึงทำให้ข้อมูลช่วงเวลา 16.00 นาฬิกา วันที่ 3 มิถุนายน 2557 ถึง 12.00 นาฬิกา วันที่ 4 มิถุนายน 2557 ขาดหายไป แสดงดังภาพที่ 36

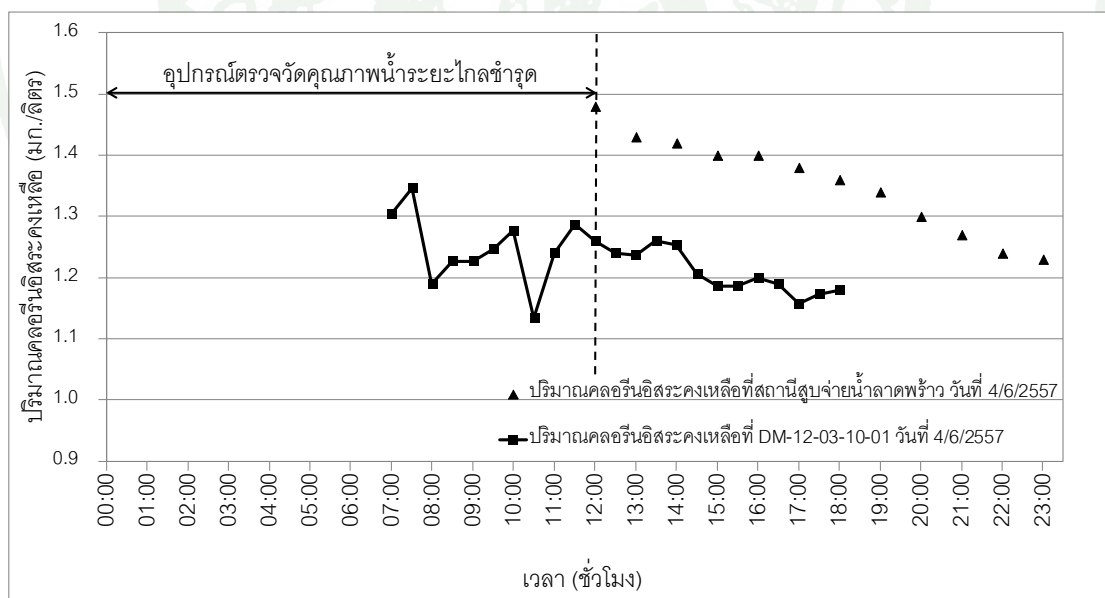
ผลการตรวจวัดข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือภาคสนามเพิ่มเติม ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-02-07-02 แสดงดังภาพที่ 37 มีผลคล้ายกับพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05 คือระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำลาดพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวังไม่เท่ากันในแต่ละชั่วโมง มีค่าอยู่ในช่วง 0.5-1.5 ชั่วโมง เช่น ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำลาดพร้าว ณ เวลา 6.00 นาฬิกา มาถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง เวลา 7.30 นาฬิกา โดยใช้เวลาในการเดินทาง 1.0 ชั่วโมง และปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำลาดพร้าว ณ เวลา 7.00 นาฬิกา มาถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง เวลา 8.00 นาฬิกา ใช้เวลาในการเดินทาง 0.5 ชั่วโมง เป็นต้น

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำลาดพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวังแต่ละพื้นที่และแต่ละชั่วโมงใช้ระยะเวลาไม่เท่ากันซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางและความเร็วของน้ำ

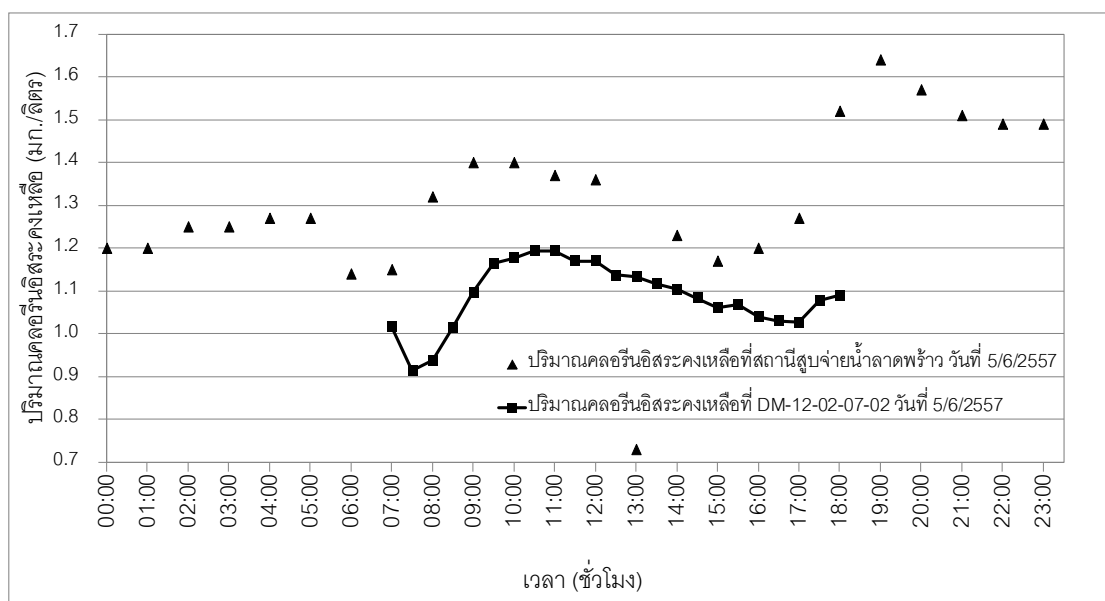
เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำลาดพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05-01 ในวันที่ 9 ธันวาคม 2556 (ประมาณ 30 นาที) และวันที่ 3 มิถุนายน 2557 (ประมาณ 0.5-3.5 ชั่วโมง) พบว่าระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำลาดพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวังมีค่าต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในแต่ละวันระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำลาดพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวังมีค่าต่างกัน แม้จะเป็นพื้นที่เดียวกันก็ตาม ดังนั้นในการศึกษาควรจะมีการตรวจวัดข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือภาคสนามของพื้นที่เฝ้าระวังนั้นหลายวัน เพื่อเป็นการหาค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำลาดพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง ซึ่งจะทำให้แบบจำลองมีความถูกต้องมากขึ้น



ภาพที่ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ โรงสูบน้ำจ่ายน้ำลาดพร้าว และ ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-05-01 ในวันที่ 3 มิถุนายน 2557 ระยะทางจากสถานีสูบน้ำจ่ายน้ำลาดพร้าว 5.8 กิโลเมตร



ภาพที่ 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ โรงสูบน้ำจ่ายน้ำลาดพร้าว และ ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-03-10-01 ในวันที่ 4 มิถุนายน 2557 ระยะทางจากสถานีสูบน้ำจ่ายน้ำลาดพร้าว 7.2 กิโลเมตร



ภาพที่ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ ณ โรงสูบน้ำบาดาลพร้าว และ ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่เฝ้าระวัง 12-02-07-02 ในวันที่ 5 มิถุนายน 2557 ระยะทางจากสถานีสูบน้ำบาดาลพร้าว 5.5 กิโลเมตร

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการสร้างแบบจำลองคุณภาพน้ำของโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำประปาโดยใช้โปรแกรม EPANET สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองในการศึกษานี้สามารถจำลองโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำถึงระดับจุดผู้ใช้น้ำทั้งด้านชลศาสตร์และคุณภาพน้ำในพื้นที่เป้าหมายได้โดยใช้โปรแกรม EPANET โดยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์

จากการจำลองทางด้านชลศาสตร์ โดยใช้ค่า Emitter exponent (N_1) เท่ากับ 1 จากงานวิจัยของวีรวีตรและคณะ (2556) และทำการปรับแก้ค่า Emitter coefficient (C) เพื่อให้ปริมาณน้ำเข้ารวม (ปริมาณน้ำใช้รวมกับปริมาณน้ำสูญเสีย) เท่ากับค่าที่วัดได้ที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ โดยสมมติใช้ค่า C ในแบบจำลองเท่ากันทุก node ของแบบจำลอง ซึ่งมีจำนวน node ทั้งหมด 2,458 จุด ผลการสอบเทียบสมมูลน้ำได้ค่าสัมประสิทธิ์ Emitter coefficient (C) เท่ากับ 0.002027 เมตร²/ชม. ซึ่งเป็นตัวแทนการจำลองน้ำสูญเสีย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของอัตราการไหลที่จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ศึกษาระหว่างแบบจำลองกับจุดตรวจวัดเท่ากับ 0.9722 ส่วนการสอบเทียบแรงดันน้ำจำนวน 4 จุด ในพื้นที่ศึกษาได้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระท่อฮาเซน-วิลเลียม (C_{HW}) เฉลี่ยเท่ากับ 127.43 มีค่ารากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เฉลี่ย 4 จุด เท่ากับ 0.6059 เมตร และ 0.8022 ตามลำดับ

2. การสอบเทียบแบบจำลองคุณภาพน้ำ

จากการศึกษาพบว่าโปรแกรม EPANET มีข้อจำกัดในเรื่องการคำนวณอายุน้ำ คือค่าอายุน้ำในแต่ละเส้นท่อต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1 นาที จึงทำให้ต้องมีการรวมเส้นท่อที่อายุน้ำไม่ผ่านเกณฑ์เข้าด้วยกันก่อนทำการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอายุน้ำกับอัตราการไหลของน้ำเข้าพื้นที่เป้าหมายพบว่าอายุน้ำกับอัตราการไหลของน้ำเข้าพื้นที่เป้าหมายมีความสัมพันธ์ผกผันอย่างชัดเจน คือในช่วงเวลากลางคืนที่อัตราการไหลมีค่าลดลงและต่ำสุด ณ เวลา 4.00 น. นั้น อายุน้ำจะมีค่าเพิ่ม

มากขึ้น โดย ณ จุดวัดคลอรีนไกลสุดภายในพื้นที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.5 ชั่วโมง ณ เวลา 5.00 น. รวมทั้งพบว่าปริมาณคลอรีนที่จุดจ่ายน้ำเข้าอยู่ในช่วง 0.20-1.00 มก./ลิตร ได้สลายตัวและคงเหลือ ณ จุดวัดไกลสุดอยู่ในช่วง 0.05-0.60 มก./ลิตร

จากการสอบเทียบแบบจำลองคุณภาพน้ำโดยใช้ค่า k_b เท่ากับ -3.384 วัน^{-1} และทดลองใช้ค่า k_w เท่ากับ 0.0 เมตร/วัน ได้ค่า r และ RMSE เฉลี่ย 4 จุดเท่ากับ 0.900 และ 0.092 มก./ลิตร ตามลำดับ และพบว่า ณ จุดตรวจวัดที่อยู่ห่างไกลจากจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่จะมีค่า RMSE เพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่าค่า k_w เท่ากับ -0.16 เมตร/วัน ที่ทำให้ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือของแบบจำลองมีค่าสอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัด โดยมีค่า r และ RMSE เฉลี่ย 4 จุดเท่ากับ 0.907 และ 0.047 มก./ลิตร ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าความสัมพันธ์ที่ดีกว่าการใช้ค่า k_w เท่ากับ 0.0 เมตร/วัน

ผลการตรวจวัดข้อมูลปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือภาคสนามเพิ่มเติม พบว่าระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำลาดพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ใ้ระหว่าง 12-03-05-01 และ 12-02-07-02 มีค่าอยู่ในช่วง 0.5-3.5 และ 1.0-2.0 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเดินทางจากสถานีสูบน้ำลาดพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ใ้ระหว่าง แต่ละพื้นที่และแต่ละชั่วโมงใช้ระยะเวลาไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางและความเร็วของน้ำ

3. การศึกษาการกระจายตัวของปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ

จากการศึกษาการกระจายตัวของคลอรีนสรุปได้ว่าช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูงสุดเวลา 8.00 นาฬิกา ของวันที่ 9 ธันวาคม 2556 เป็นช่วงที่มีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือกระจายตัวในพื้นที่สูง โดยมีปริมาณปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเฉลี่ย 0.50 มก./ลิตร อย่างไรก็ตามยังมีกลุ่มผู้ใช้น้ำบางส่วนที่ได้รับปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือต่ำกว่า 0.2 มก./ลิตร และช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำต่ำสุดเป็นช่วงที่มีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือกระจายตัวในพื้นที่ต่ำ โดยมีปริมาณปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเฉลี่ย 0.20 มก./ลิตร

4. การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการบริหารจัดการปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในพื้นที่เฝ้าระวังกับกรณีศึกษา

จากกรณีศึกษาสามารถสรุปได้ว่าสามารถลดค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้น ณ จุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ศึกษา (จุดเก็บตัวอย่าง 1) ได้เกือบทุกช่วงเวลา ยกเว้นช่วงเวลา 22.00-2.00 นาฬิกา ที่ต้องทำการเพิ่มค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้น สามารถทำการลดค่าความเข้มข้นคลอรีนตั้งต้นเฉลี่ยจาก 0.67 มก./ลิตร เหลือ 0.47 มก./ลิตร โดยที่จุดตรวจวัดไกลสุดยังคงได้รับปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 มก./ลิตร และพบว่าช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูงสุดเวลา 8.00 นาฬิกา มีปริมาณปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเฉลี่ย 0.27 มก./ลิตร และช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำต่ำสุดเวลา 4.00 นาฬิกามีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือเฉลี่ย 0.27 มก./ลิตร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองคุณภาพน้ำของโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำประปา สามารถใช้เป็นเครื่องมือช่วยสนับสนุนการหาแนวทางในการบริหารจัดการคุณภาพน้ำตั้งแต่ต้นทางจนถึงปลายทางระดับจุดผู้ใช้น้ำภายในพื้นที่เฝ้าระวังได้

ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองโครงข่ายระบบท่อจ่ายน้ำประปาในการศึกษาสามารถจำลองระบบท่อด้านชลศาสตร์และคุณภาพน้ำได้ด้วยโปรแกรม EPANET ถึงระดับจุดผู้ใช้น้ำ แต่เนื่องจากยังมีข้อเสนอแนะบางประการที่จะมีส่วนช่วยให้แบบจำลองโครงข่ายระบบท่อมีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นผลโดยตรงต่อความน่าเชื่อถือในการบริหารจัดการปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือภายในพื้นที่เฝ้าระวังและจะเป็นประโยชน์กับผู้ศึกษาวิจัยเพิ่มเติมต่อไป

1. การศึกษานี้ถือว่าพื้นที่ศึกษามีสภาพภูมิประเทศเป็นที่ราบจึงไม่พิจารณาความแตกต่างของระดับท่อ จึงพิจารณาให้ระดับท่อเท่ากันหมด ซึ่งถ้ามีการใช้ข้อมูลจุดระดับพื้นที่อ้างอิง (Reference Point) เพื่อกำหนดระดับความสูงของท่อจะช่วยให้ผลการประมวลทางด้านชลศาสตร์ถูกต้องมากขึ้น

2. การศึกษานี้ได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการทำปฏิกิริยากับผนังท่อ (Wall reaction rate coefficient, k_w) เท่ากันทั้งโครงข่ายระบบท่อประปาเนื่องจากท่อส่วนมากเป็นท่อ Poly Vinyl Chlorine (PVC) แต่ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการทำปฏิกิริยากับผนังท่อของท่อแต่ละชนิดจะมีค่าไม่

เท่ากัน หากต้องการให้แบบจำลองมีความละเอียดถูกต้องมากขึ้นจึงควรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์
อัตราการทำปฏิกิริยากับผนังท่อให้เหมาะสมสำหรับท่อแต่ละชนิด



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

การประปานครหลวง. 2556ก. **ข้อมูลคุณภาพน้ำ**. (Microsoft office excel) ฝ่ายคุณภาพน้ำ
การประปานครหลวง, กรุงเทพฯ.

_____. 2556ข. **ข้อมูลอัตราการไหลและค่าแรงดันน้ำ**. (Microsoft office excel).

สำนักงานประปาสาขาลาดพร้าว การประปานครหลวง, กรุงเทพฯ.

_____. 2556ค. **รายงานประจำปี 2555 การประปานครหลวง**. 76 หน้า

_____. 2556ง. **รายงานผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและคลอรีนอิสระ**

คงเหลือในน้ำประปา (Bottle test) วันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556.

ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน การประปานครหลวง,
กรุงเทพฯ. (อัดสำเนา)

_____. 2556จ. **รายงานระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์**. 39 หน้า

นคร แสณยาสิริ. 2546. **การจำลองระบบการจ่ายน้ำประปาของการประปานครหลวงฝั่ง**
ตะวันตกโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ EPANET. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคภูมิ พิระชัย. 2548. **การวิเคราะห์การไหลและคลอรีนตกค้างในโครงข่ายระบบท่อ**
ประปาด้วยโปรแกรม Epanet และ GIS ซอฟต์แวร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาสกร เจริญองอาจ. 2548. **การวางแผนปรับปรุงระบบท่อประปาอย่างเหมาะสมด้วยวิธีดีฟ**
เฟอเรนเชียลอีโวลูชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิบูลย์ บุญยธรโรกุล. 2529. **ปั๊มและระบบสูบน้ำ**. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

วีรวัตถ์ ขอบประเสริฐ. 2556ก. การจัดการแรงดันเพื่อควบคุมน้ำสูญเสียในพื้นที่เฝ้าระวัง
สำนักงานประปาสาขาลาดพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วีรวัตถ์ ขอบประเสริฐ และคณะ. 2556ข. การจัดการแรงดันเพื่อควบคุมน้ำสูญเสียในพื้นที่เฝ้าระวัง
การประปาสาขาลาดพร้าว. การประชุมวิชาการแหล่งน้ำครั้งที่ 5. เชียงราย, 5-6
กันยายน พ.ศ. 2554, NCWRE 90, 10 หน้า.

สายนันท์ น้ำเงิน. 2546. การศึกษาโครงข่ายส่งน้ำประปาของการประปานครหลวงโดยใช้
แบบจำลองคณิตศาสตร์ EPANET 2.0. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุทธิศักดิ์ ลาภประเสริฐ. 2547. การจำลองระบบสูบน้ำในพื้นที่สำนักงานประปาสาขาทุ่ง
มหาเมฆของการประปานครหลวงโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ EPANET 2.0.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุภรักษ์ แก้วแสง และคณะ. 2556. ลักษณะของรอยแตกที่มีผลต่ออัตราการไหลรั่วของท่อ PVC.
การประชุมวิชาการแหล่งน้ำครั้งที่ 5, เชียงราย, 5-6 กันยายน พ.ศ. 2554, NCWRE
21, 7 หน้า.

อดิษฐ์ พรพรมินทร์ และคณะ 2554. การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายท่อจ่ายน้ำความละเอียดสูง
สำหรับกิจการประปาขนาดใหญ่. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่
16. ชลบุรี, 18 – 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554, WRE041, 9 หน้า.

อนุพงษ์ เปรมปรี. 2548. การออกแบบระบบท่อจ่ายน้ำอย่างเหมาะสมด้วยวิธีดิฟเฟอเรน
เชียลอีโวลูชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

American Water Works Association. 2009. M 36 Water Audits and Loss Control
Programs. 3th edition, United States of American.

- Behzadian, K., M. Alimohammadnejad, A. Ardeshtir, F. Jalilsani and H. Vasheghani. 2012. A novel approach for water quality management in water distribution systems by multi-objective booster chlorination. **International Journal of Civil Engineering**, 10 (1) : 51-60.
- Castro, P. and Neves, M. 2010. Chlorine decay in water distribution systems, Case study-Lousada net work. **Environmental 2010: Situation and Perspectives for European Union 1** (1): 1-6.
- 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.
- David C.V. 1969. **Handbook of Applied Hydraulics**. Mc Graw-Hill, New York.
- Farley, M. Wyeth, G., Ghazali, Z.B., Istandar, A., Singh, S. 2008. **The Manager's Non-Revenue Water Handbook: A Guide to Understanding Water Losses**.
- Fisher, I., G. Kastl, A. Sathasivan, V. Jegatheesan. 2011. Suitability of Chlorine Bulk Decay Models for Planning and Management of Water Distribution Systems. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 41:20, 1843-1882.
- Karadirek, I. E., S. Kara, G. Yilmaz, A. Muhammetoglu, H. Muhammetoglu. 2012. **Implementation of Hydraulic Modelling for Water-Loss Reduction Through Pressure Management**. **Water Resour Manage** 26:2555–2568.
- Nagatani, T. *et al.* 2008. Residual Chlorine Decay Simulation in water Distribution System. **The 7th International Symposium on Water Supply Technology**, Japan.
- Nazif, S., M. Karamouz, M. Tabesh, A. Moridi. 2010. **Pressure Management Model for Urban Water Distribution Networks**. **Water Resour Manage** 24:437–458

May, J. 1994. Leakage, Pressure and Control. **BICS International Conference on Leakage Control Investigation in Underground Assets**, London.

Miranda, S., Molari, L., Scalet, G., Ubertini, F., 2011. A simplified beam model to estimate leakage in longitudinally cracked pressurized pipes. **Journal of Structural Engineering**, 1:1-35.

Siew, C., T. T. Tanyimboh. 2012. **Pressure-Dependent EPANET Extension**. *Water Resour Manage*. 26:1477–1498.

Tabesh, M., A. H. Asadiyani Yekta, R. Burrows. 2009. **An integrated model to evaluate losses in water distribution networks**. *J Water Resour Manage* 23:477–492.

Tabesh, M., M. R. Delavar, A. Delkhah. 2010. **Use of geospatial information system for renovation and replacement of water distribution systems**. *Int J Envi Eng Tech (IJEST)* 7(1):47–58.

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.

Ven Te Chow. 1986. **Open Chanel Hydraulics**. 22nd printing. Singapore : Mc Graw-Hill.

World Health Organization. 2008. **Guidelines for Drinking-water Quality**. Volume 1. World Health Organization, Switzerland.

Xin, L. 2003. Modeling of residual chlorine in water distribution system. **Journal of environmental science**. 15(1): 136-144.





ภาคผนวก ก
ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดัน (Pressure Logger)

ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดัน (Pressure Logger)

ขั้นตอนการติดตั้ง Pressure Logger

1. ตรวจสอบสภาพหัวดับเพลิงที่เลือกสำหรับติดตั้งอุปกรณ์
 - 1.1 ตรวจสอบประตุน้ำว่าอยู่ในสภาพใช้งานได้หรือไม่
 - 1.2 ทดสอบเปิดประตุน้ำ และตรวจสอบว่าหัวดับเพลิงรั่วหรือไม่
2. หากหัวดับเพลิงใช้งานได้ให้ทำการเปิดน้ำทิ้งเพื่อล้างท่อจนกว่าน้ำที่ออกจากหัวดับเพลิงเริ่มใส
3. เมื่อน้ำใสแล้วให้ทำการปิดประตุน้ำและปิดฝาครอบหัวดับเพลิงที่เจาะรูขนาด 1/8 นิ้ว
4. ตั้งค่าการทำงานของ Pressure data logger ให้ทำการวัดค่าแรงดันเฉลี่ยทุก 1 นาทีเป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง
5. ก่อนติดตั้ง Pressure data logger ให้ทำการ Auto Cal ที่ความดันบรรยากาศก่อน
6. ต่อสายแรงดันน้ำ Pressure Hose. ระหว่างหัวดับเพลิงและ data logger
7. อ่านและบันทึกค่าแรงดัน ณ เวลาติดตั้ง
8. วัดระยะจากพื้นถึง Pressure Transducer และบันทึกค่า
9. ถ่ายรูปอย่างน้อย 2 รูป คือระยะใกล้ให้เห็น Serial No. และระยะไกลให้เห็นสภาพพื้นที่โดยรอบ และตำแหน่งที่ใช้อ้างอิงได้ เช่นร้านค้าใกล้เคียงหรือชื่อซอย เป็นต้น
10. บันทึกชื่อรูปลงในแบบฟอร์ม
11. ให้อ่านและบันทึกค่าแรงดันก่อนถอด Data logger ออกจากหัวดับเพลิง



ขั้นตอนการใช้อุปกรณ์วัดคลอรีนอิสระคงเหลือ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดคลอรีนอิสระคงเหลือในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้อุปกรณ์ 3 รุ่นด้วยกัน ได้แก่ Pocket Colorimeter II, Portable Turbidity and Chlorine meter HI 93414 และ Colorimeter DR/890 ซึ่งแต่ละรุ่นจะมีวิธีการใช้ที่แตกต่างกันไป แต่มีขั้นตอนวิธีการเตรียมน้ำตัวอย่างเหมือนกัน ในการเก็บน้ำตัวอย่างภาคสนามจำเป็นต้องเปิดน้ำที่ค้างอยู่ภายในเส้นท่อทิ้งก่อนเพื่อให้ได้ค่าปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือที่ถูกต้อง

ขั้นตอนการใช้อุปกรณ์ Pocket Colorimeter II

1. กดปุ่มสีดำเพื่อเปิดเครื่อง แสดงดังภาพผนวกที่ ข1



ภาพผนวกที่ ข1 การเปิดเครื่อง Pocket Colorimeter II

2. นำน้ำตัวอย่างใส่ในหลอดปริมาณ 10 มิลลิลิตร แสดงดังภาพผนวกที่ ข2 และเขັดหลอดให้สะอาด



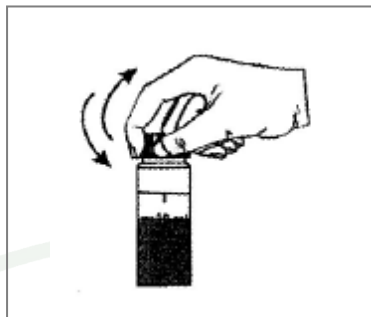
ภาพผนวกที่ ข2 การนำน้ำตัวอย่างใส่ในหลอดปริมาณ 10 มิลลิลิตร

3. นำหลอดตัวอย่างใส่ตัวเครื่องและปิดฝาเครื่อง
4. กดปุ่มสีฟ้าดังแสดงในภาพผนวกที่ ข1 เพื่อตั้งค่าศูนย์ (ZERO) จากนั้นเครื่องจะแสดงค่า 0.00
5. นำหลอดตัวอย่างออกจากตัวเครื่อง
6. เติมสาร DPD free chlorine reagent จำนวน 1 ชอง แสดงดังภาพผนวกที่ ข3



ภาพผนวกที่ ข3 การเติมสาร DPD free chlorine reagent

7. เขย่าสารละลายให้เข้ากัน ประมาณ 30 วินาที แสดงดังภาพผนวกที่ ข4



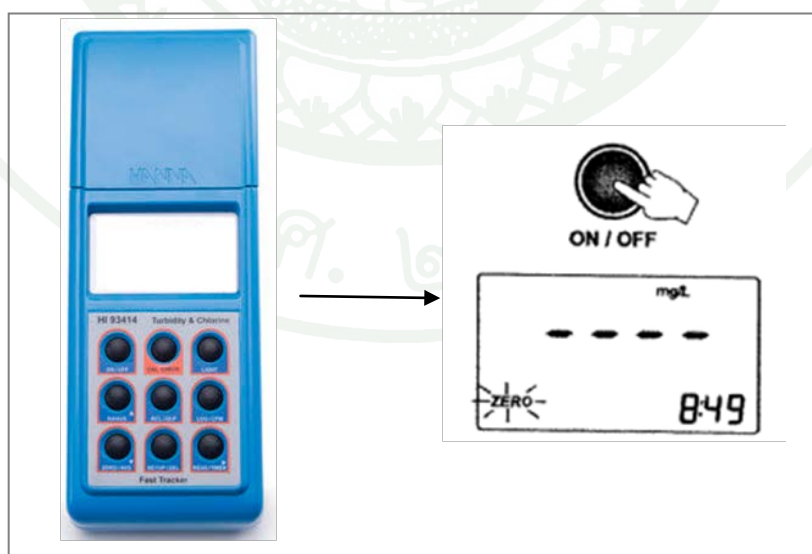
ภาพผนวกที่ ข4 การเขย่าสารละลายให้เข้ากัน

8. เช็ดหลอดตัวอย่างให้สะอาด จากนั้นนำเข้าสู่ตัวเครื่องปิดฝาและกดปุ่มสีเขียวที่มีเครื่องหมายถูกดังแสดงในภาพผนวกที่ ข1

9. จากนั้นเครื่องจะแสดงค่าปริมาณคลอรีน ในหน่วย มก./ลิตร

ขั้นตอนการใช้อุปกรณ์ HI 93414 Portable Turbidity and Chlorine

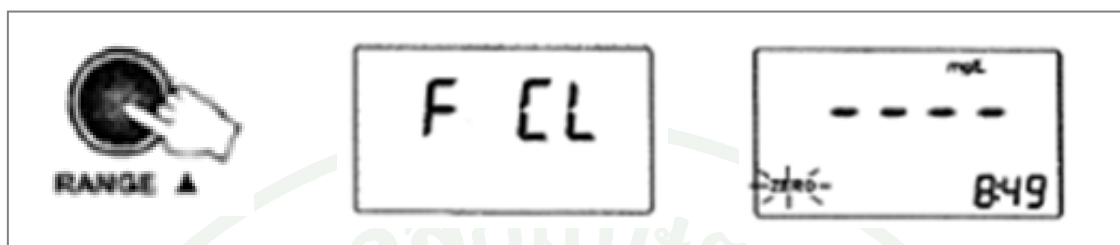
1. กดปุ่ม ON /OFF เพื่อทำการเปิดเครื่อง แสดงดังภาพผนวกที่ ข5



ภาพผนวกที่ ข5 การเปิดเครื่อง Portable Turbidity and Chlorine meter HI 93414

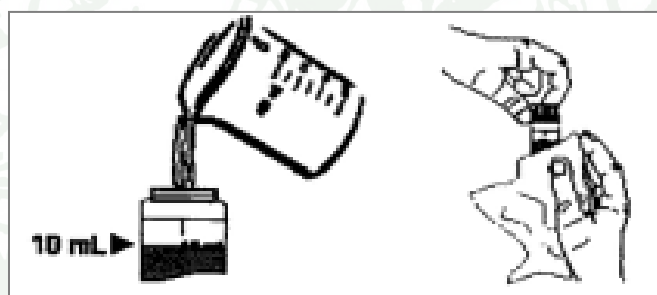
2. กดปุ่ม RANGE ให้หน้าจอแสดงโหมดการวัดค่า Free Chlorine แสดงดังภาพผนวกที่

๗6



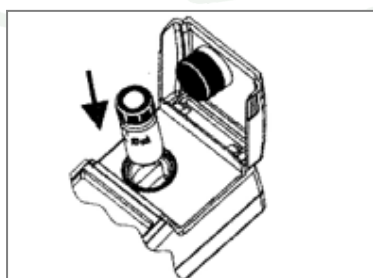
ภาพผนวกที่ ๗6 การเลือกโหมดการวัดค่า Free Chlorine

3. นำน้ำตัวอย่างใส่ในหลอดปริมาณ 10 มิลลิลิตร และเขັดหลอดให้สะอาด แสดงดังภาพผนวกที่ ๗7



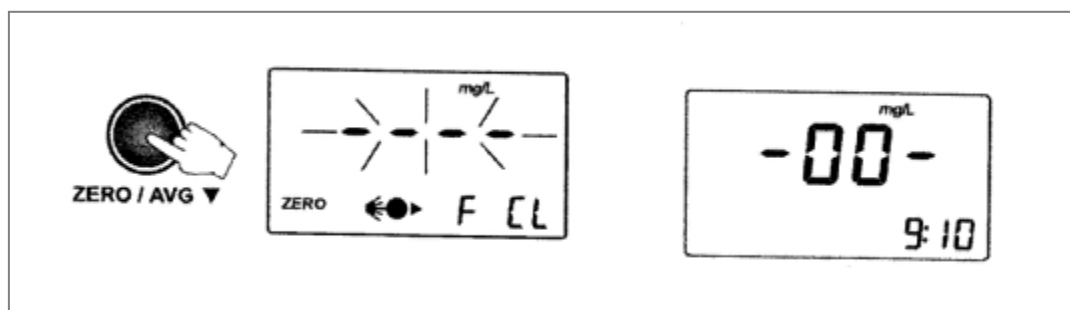
ภาพผนวกที่ ๗7 การนำน้ำตัวอย่างใส่ในหลอดและเขັดหลอดให้สะอาด

4. นำหลอดใส่ตัวเครื่อง และปิดฝาเครื่อง แสดงดังภาพผนวกที่ ๗8



ภาพผนวกที่ ๗8 การนำหลอดใส่ตัวเครื่องและปิดฝาเครื่อง

5. กดปุ่ม ZREO/AVG เพื่อตั้งค่าศูนย์ (ZERO) จากนั้นหลอดจะแสดงค่า -0.0- แสดงดังภาพผนวกที่ ข9

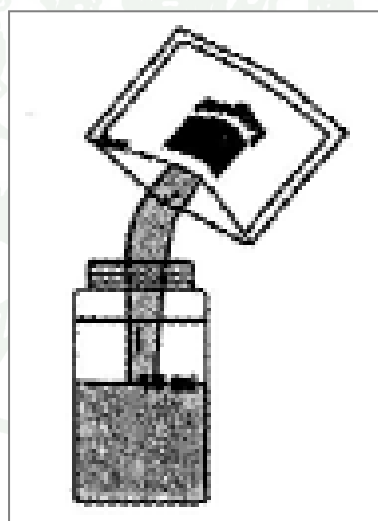


ภาพผนวกที่ ข9 การตั้งค่าศูนย์ (ZERO)

6. นำหลอดตัวอย่างออกจากตัวเครื่อง

7. เติมสารเคมี HI- 93701 จำนวน 1 ชอง ลงในหลอดน้ำตัวอย่าง แสดงดังภาพผนวกที่

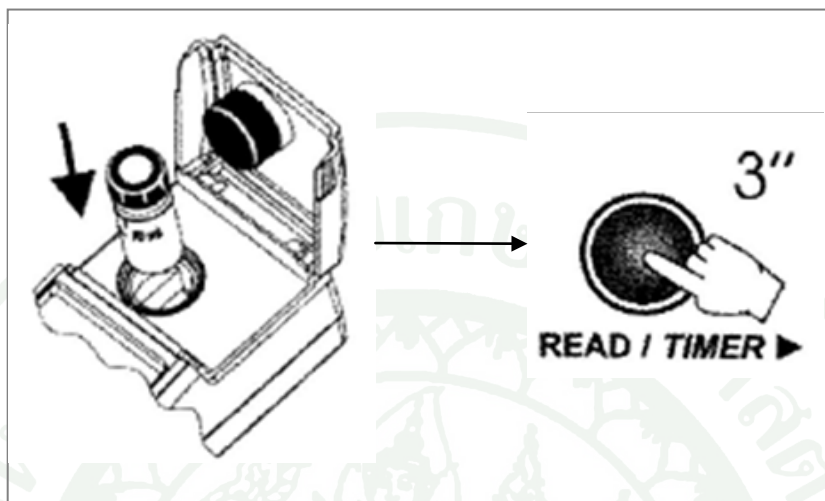
ข10



ภาพผนวกที่ ข10 การเติมสารเคมี HI- 93701 ลงในหลอดน้ำตัวอย่าง

8. เขย่าสารละลายให้เข้ากันประมาณ 30 วินาที แสดงดังภาพผนวกที่ ข4

9. เช็ดหลอดแก้วให้สะอาด จากนั้นนำเข้าสู่ตัวเครื่อง และกดปุ่ม READ/TIMER เพื่อทำการอ่านค่า แสดงดังภาพผนวกที่ ข11



ภาพผนวกที่ ข11 การนำตัวอย่างเข้าสู่ตัวเครื่อง และการอ่านค่า

10. จากนั้นเครื่องจะแสดงค่าปริมาณคลอรีน ในหน่วย มก./ลิตร

หมายเหตุ หากปริมาณคลอรีนที่วัดค่าได้เกิน 5 mg /L เครื่องจะแสดงสัญลักษณ์กระพริบ

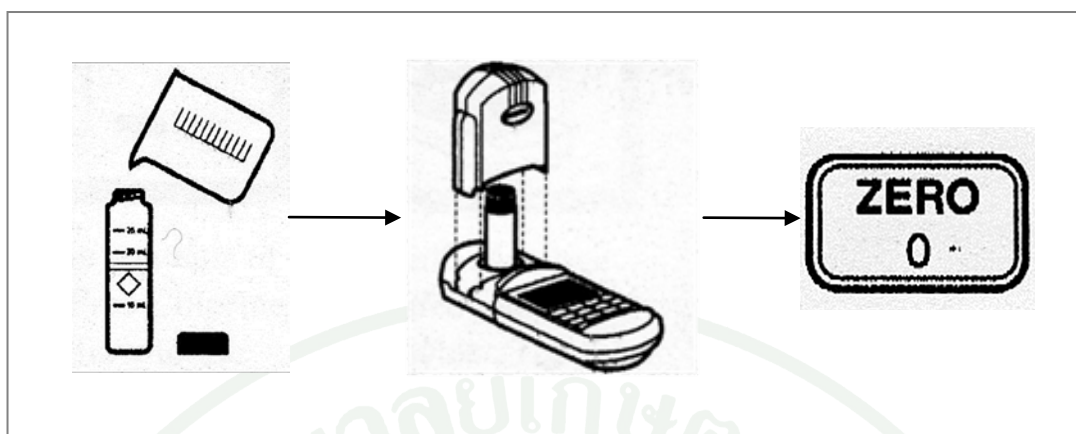
ขั้นตอนการใช้อุปกรณ์ Colorimeter DR/890

1. เปิดเครื่อง แล้วกดปุ่ม PRGM, PRINT และกดปุ่ม ENTER แสดงดังภาพผนวกที่ ข12



ภาพผนวกที่ ข12 ขั้นตอนการตั้งค่าอุปกรณ์ในการวัดคลอรีน

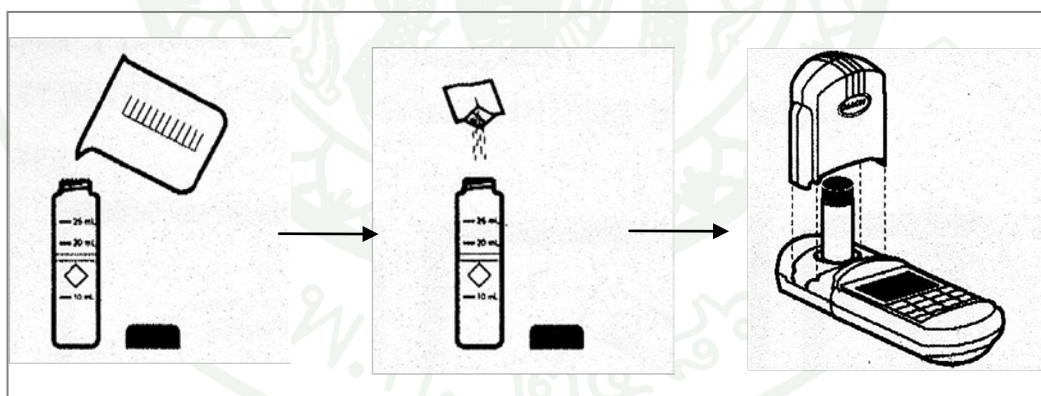
2. นำน้ำ DIONIZED WATER ใส่ในหลอดปริมาณ 10 มิลลิลิตร และเขັดหลอดให้สะอาด นำหลอดใส่ตัวเครื่องและปิดฝาเครื่อง แล้วกดปุ่มศูนย์ (ZERO) เพื่อทำการตั้งค่าศูนย์ แสดงดังภาพผนวกที่ ข13



ภาพผนวกที่ ข13 ขั้นตอนการตั้งค่าศูนย์ (ZERO)

3. นำหลอดน้ำ DIONIZED WATER ออกจากตัวเครื่อง

4. นำหลอดเติมน้ำตัวอย่างและเติมสาร DPD free chlorine reagent จำนวน 1 ชอง เขย่าสารละลายให้เข้ากันประมาณ 30 วินาที เช็ดหลอดตัวอย่างให้สะอาด จากนั้นนำเข้าสู่ตัวเครื่องและกดปุ่ม READ ขั้นตอนแสดงดังภาพผนวกที่ ข4



ภาพผนวกที่ ข14 ขั้นตอนการตรวจวัดน้ำตัวอย่างเพื่อหาปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ

5. จากนั้นเครื่องจะแสดงค่าปริมาณคลอรีนในหน่วย มก./ลิตร

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นายศุภรักษ์ แก้วแสง
 เกิดวันที่ 6 พฤศจิกายน 2532
 สถานที่เกิด อำเภอหันคา จังหวัดชัยนาท
 ประวัติการศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา-ทรัพยากรน้ำ)
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 ตำแหน่งปัจจุบัน -
 สถานที่ทำงานปัจจุบัน -
 ทู่นการศึกษาที่ได้รับ ทู่นผู้ช่วยวิจัยโครงการวิจัยโครงการพัฒนาแบบจำลอง
 คณิตศาสตร์ EPANET เพื่อการบริหารจัดการแรงดันและ
 ความคุ่มน้ำสูญเสียสำหรับระบบโครงข่ายท่อประธานของ
 การประปานครหลวง