



การพัฒนาแบบจำลองเพื่อการบริหารจัดการน้ำสำหรับโครงข่ายการจ่ายน้ำ
โดยใช้โปรแกรม EPANET

โดย

นายรังสรรค์ วรรณภพ

ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมศาสตร์)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อการบริหารจัดการน้ำสำหรับโครงข่ายการจ่ายน้ำ
โดยใช้โปรแกรม EPANET

โดย

นายรังสรรค์ วรรณภาพ



ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมศาสตร์)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

DEVELOPED HYDRAULIC SIMULATION MODEL FOR WATER
DISTRIBUTION NETWORKS USING EPANET

BY

MR. RANGSAN WANNAPOP



A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR
OF PHILOSOPHY (ENGINEERING)
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2018
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คະขุณินพนธ์

ของ

นายรังสรรค์ วรรณภพ

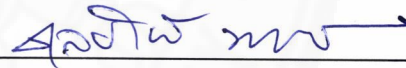
เรื่อง

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อการบริหารจัดการน้ำสำหรับโครงข่ายการจ่ายน้ำโดยใช้โปรแกรม EPANET

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมศาสตร์)

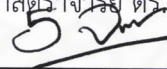
เมื่อ วันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2562

ประธานกรรมการสอบคະขุณินพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร. ดุยโชติ ชลศักดิ์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาคະขุณินพนธ์หลัก



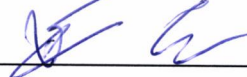
(รองศาสตราจารย์ ดร. อีร์ เจียรศิริพงษ์กุล)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาคະขุณินพนธ์ร่วม



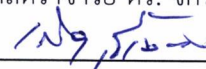
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กริช เจียมจิโรจน์)

กรรมการสอบคະขุณินพนธ์



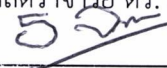
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักรพันธ์ ชวนอาษา)

กรรมการสอบคະขุณินพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เริงวุฒิ ชูเมือง)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ดร. อีร์ เจียรศิริพงษ์กุล)

หัวข้อคุณสมบัติ	การพัฒนาแบบจำลองเพื่อการบริหารจัดการน้ำสำหรับ โครงข่ายการจ่ายน้ำโดยใช้โปรแกรม EPANET
ชื่อผู้เขียน	นายรังสรรค์ วรรณภพ
ชื่อปริญญา	ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาคุณสมบัติ	รองศาสตราจารย์ ดร. ชีร เจียศิริพงษ์กุล
อาจารย์ที่ปรึกษาคุณสมบัติร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กริช เจียมจิโรจน์
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

คุณสมบัตินี้มุ่งหมายในการศึกษาและพัฒนาแบบจำลอง EPANET ของโครงข่ายการจ่ายน้ำในระบบท่อประธานของการประปานครหลวง เพื่อปรับปรุงแบบจำลองให้มีความเที่ยงตรงสูงขึ้นและประยุกต์ใช้เครื่องมือ EPANET Toolkit ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการสูบน้ำสำหรับใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจการวางแผนบริหารจัดการระบบสูบน้ำ การศึกษาในครั้งนี้มีหัวข้อการศึกษา 3 ส่วนคือ 1) การแก้ไขระดับความสูงของแนวท่อประธาน 2) การใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Darcy-Weisbach แทนการใช้สูตรคำนวณของ Hazen-Williams พร้อมทั้งแก้ไขพจน์ในสูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Darcy-Weisbach 3) การหาระดับเฮดที่เหมาะสมที่สุดในการจ่ายน้ำของแต่ละสถานีสูบน้ำในแต่ละชั่วโมง จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า

1) ในส่วนการแก้ไขระดับความสูงของท่อประธานจากเดิมที่ไม่ได้กำหนดระดับความสูงไว้ ทุกตำแหน่งจึงมีระดับความสูงเท่ากับ 0 เมตรเท่ากันหมด เนื่องจากพื้นที่ให้บริการของการประปานครหลวง คือ กรุงเทพมหานคร นนทบุรีและสมุทรปราการนั้นเป็นที่ราบมีความสูงโดยประมาณตั้งแต่ 0 ถึง 2 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง (รทก.) แต่ระดับเฮดน้ำในระบบท่อประธานของการประปานครหลวงอยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำ หลายตำแหน่งมีระดับเฮดน้ำไม่ถึง 10 เมตร ดังนั้นความผิดพลาดของระดับความสูงของท่อเพียง 1 ถึง 2 เมตรจึงส่งผลต่อความเที่ยงตรงของแบบจำลองค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงได้แก้ไขระดับความสูงโดยอ้างอิงข้อมูลจากแผนที่ของสำนักงานการโยธา กรุงเทพมหานครและกรมแผนที่ทหาร โดยผลลัพธ์ของแบบจำลองที่แก้ไขระดับความสูงแล้วมีความเที่ยงตรงสูงขึ้นจาก 83.68% เพิ่มขึ้นเป็น 87.63%

2) การใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Darcy-Weisbach แทนการใช้สูตรคำนวณของ Hazen-Williams ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า แม้ว่าการใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Darcy-Weisbach มีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่าแต่มีความเที่ยงตรงสูงกว่า แต่เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพสูงกว่าในอดีตจึงทำให้การคำนวณไม่ซับซ้อนและใช้เวลาเฉลียวลง โดยการใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Darcy-Weisbach ทำให้แบบจำลองมีความเที่ยงตรงสูงขึ้นเป็น 92.33% เพิ่มขึ้นอีก 4.7% และการแก้ไขพจน์ในสูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Darcy-Weisbach ให้ถูกต้องช่วยให้การคำนวณของซอฟต์แวร์เร็วขึ้น

3) การหาระดับเฮดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจ่ายน้ำของแต่ละสถานีสูบน้ำในแต่ละชั่วโมงได้ประยุกต์ใช้วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ซึ่งเป็นวิธีการที่เลียนแบบการคัดสรรทางธรรมชาติ สำหรับช่วยในการคำนวณหาระดับเฮดที่เหมาะสมที่สุดของสถานีสูบน้ำทั้งสิ้น 20 สถานี เพื่อให้จุดวัดความดันประเมินผลทั้งสิ้น 28 จุดมีระดับความดันใกล้เคียงกับความดันที่ต้องการ โดยผลลัพธ์ที่ได้ค่อนข้างดีแต่ต้องกำหนดจำนวนประชากรของตัวแปรและจำนวนรุ่นของประชากรที่มากพอ อย่างไรก็ตามในบางจุดผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่ดีนักซึ่งควรพัฒนาเพิ่มเติม

การศึกษาในครั้งนี้สามารถปรับปรุงแบบจำลองให้มีความเที่ยงตรงมากขึ้นและสามารถหาระดับเฮดในการจ่ายน้ำที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละสถานีสูบน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลช่วยในการวางแผนการจ่ายน้ำได้ แต่ยังมีข้อควรแก้ไขอยู่หลายจุดซึ่งควรพัฒนาต่อยอดเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น

คำสำคัญ: EPANET, แบบจำลองโครงข่ายการจ่ายน้ำ, เฮดสูญเสีย, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด, วิธีการเชิงพันธุกรรม

Dissertation Title	DEVELOPED HYDRAULIC SIMULATION MODEL FOR WATER DISTRIBUTION NETWORKS USING EPANET
Author	Mr. Rangsan Wannapop
Degree	Doctor of Philosophy (Engineering)
Major Field/Faculty/University	Engineering Faculty of Engineering Thammasat University
Dissertation Advisor	Associate Professor Thira Jearsiripongkul, Ph.D.
Dissertation Co-Advisor	Assistant Professor Krit Jiamjiroch, Ph.D.
Academic Years	2018

ABSTRACT

This dissertation aims to study and develop the EPANET model of the water distribution network in the main pipeline system of the Metropolitan Waterworks Authority (MWA) Thailand. To improve the network model to be more accurate and apply EPANET Toolkit to optimize pumping station head for water supply managing decision tool. There are 3 topics of this study 1) Node elevation correction 2) Using the Darcy-Weisbach head loss formula instead of the Hazen-Williams and correcting the terms of the Darcy-Weisbach in EPANET. 3) Optimize pumping station head in each hour. This study we found that.

1) The current model of the main pipeline does not have the elevation of the node assigned, all node elevation equal to 0. Because MWA service area (Bangkok, Nonthaburi and Samut Prakan) is quite flat, the elevation varies around 0 - 2 meters above mean sea level. But water head in the main pipe of MWA is quite low, the water head at some points is less than 10 meters. Therefore, only 1-2 meters of elevation error gives a high effect on model accuracy. Revision of the elevations of the node

makes the EPANET piping model more accurate. The revised model has increased the accuracy to 87.63% from 83.68% for the existing model; accuracy up 3.95%.

2) Using the Darcy-Weisbach head loss formula instead of the Hazen-Williams formula gives a better result. Although the Darcy-Weisbach formula is more complicated it could provide a better solution. Nowadays, the computer is more efficient, so that using the Darcy-Weisbach formula is easy. Using the Darcy-Weisbach formula has increased the accuracy to 92.33%.

3) Optimize pumping station head was applied Genetic Algorithm for finding the best water head of 20 pumping station in order to 28 pressure evaluation points meet the desired pressure. The result of the Genetic Algorithm quite good with enough population and number of generation. However, the result of some point was not satisfactory.

This study improved the model accuracy up and integrated optimization module for water supply managing decision tool. But there are still many dissatisfied results which should be further developed.

Keywords: EPANET, Water Distribution System, Head loss formula, Optimization, Genetic Algorithm

กิตติกรรมประกาศ

ดุชนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรเจียศิริพงษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กริช เจียมจิโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่คอยให้คำแนะนำและแนวคิดในการศึกษา

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณการประสานครหลวง (กปน.) และสำนักงานโยธา กรุงเทพมหานคร ในการสนับสนุนข้อมูลในการศึกษาวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคุณพ่อถนอม วรรณภพ และคุณแม่ประภัสสร วรรณภพ ที่คอยอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจเสมอมา

นายรังสรรค์ วรรณภพ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญภาพ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 แนวทางการพัฒนาซอฟต์แวร์ EPANET	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 หลักการคำนวณทางชลศาสตร์	5
2.1.1 กฎการอนุรักษ์มวล	5
2.1.2 กฎการอนุรักษ์พลังงาน	6
2.1.3 HEAD สูญเสีย (Head Loss)	8
2.1.3.1 สูตรคำนวณของ Darcy-Weisbach	8
2.1.3.2 สูตรคำนวณของ Hazen-Williams	9
2.1.3.3 สูตรคำนวณของ Manning	10
2.1.3.4 สูตรคำนวณแบบเลขยกกำลัง	12

2.1.4 การสูญเสียรอง (Minor Loss)	13
2.2 พื้นฐานการคำนวณทางชลศาสตร์	15
2.2.1 ระบบจ่ายน้ำแบบไม่ซับซ้อน	15
2.2.2 ระบบท่อจ่ายน้ำแบบโครงข่าย	18
2.3 หลักการของซอฟต์แวร์ EPANET	23
2.4 อัลกอริทึมทางชลศาสตร์ (Hydraulic Algorithm)	34
2.4.1 การใช้ Global Algorithm	37
2.4.2 การใช้ Loop flow	39
2.5 ซอฟต์แวร์ทางด้านชลศาสตร์	40
2.5.1 ฟรีแวร์ (freeware)	40
2.5.1.1 AirInPipes	40
2.5.1.2 EPANET 2.0	40
2.5.1.3 DSS-RWS	41
2.5.1.4 NeatWork	41
2.5.1.5 NRWS	41
2.5.1.6 Peace-Corps-Design-Template	41
2.5.2 ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์	43
2.5.2.1 InfoWater	43
2.5.2.2 KY Pipe	43
2.5.2.3 H2OMap Water	43
2.5.2.4 HydraulCAD	43
2.5.2.5 AFT Fathom	43
2.5.2.6 InfoWorks	44
2.5.2.7 Synergee	44
2.5.2.8 WaterGEMS	44
2.5.2.9 WaterCAD	44
2.5.2.10 WaterCADE	44
2.5.3 ข้อดีและข้อด้อยของ EPANET	45
2.5.3.1 ข้อดีของ EPANET	45
2.5.3.2 ข้อด้อยของ EPANET	45

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	47
2.6.1 การหาค่าความขรุขระของผิวท่อด้านในของท่อต่างชนิดกัน หลังจากใช้งาน	47
2.6.2 การพัฒนาแบบจำลองทางศาสตร์ของระบบโครงข่ายท่อ จ่ายน้ำ	52
2.6.3 การแก้ไขเมตริกซ์จาโคเบียนในสมการเสดสูญเสีของ Darcy-Weisbach ใน EPANET	60
2.6.4 การประมาณการอัตราการไหลของน้ำแบบ real-time ในพื้นที่เฝ้าระวัง	65
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	72
3.1 การแก้ไขระดับความสูงของแนวเส้นท่อประธาน	72
3.1.1 ผลกระทบของระดับความสูงที่แตกต่างกัน	72
3.1.2 การอ้างอิงระดับความสูง	74
3.1.2.1 ระดับน้ำทะเลปานกลาง ร.ท.ก.	74
3.1.2.2 ระดับ ก.ท.ม. หรือ City Datum	75
3.1.3 แนวทางการแก้ไขระดับความสูงของแนวเส้นท่อประธาน	77
3.2 การแก้ไขสูตรคำนวณเสดสูญเสี	81
3.2.1 Laminar Flow	83
3.2.2 Transitional Flow	84
3.2.3 Turbulent Flow	85
3.2.4 อนุพันธ์ของ Laminar Flow	88
3.2.5 อนุพันธ์ของ Transitional Flow	88
3.2.6 อนุพันธ์ของ Turbulent Flow	89
3.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด	93
3.2.1 ขั้นตอนเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm)	93
3.2.1.1 การผสมพันธุ์ (Crossover)	94
3.2.1.2 การกลายพันธุ์ (Mutation)	95

3.2.2 การกำหนดตัวแปรควบคุมในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด	97
3.2.2.1 ตัวแปรต้น	97
3.2.2.2 ตัวแปรตาม	99
3.2.2.3 ฟังก์ชันเป้าหมาย	101
3.4 หน้าจอซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น	101
 บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	 109
4.1 ผลลัพธ์การแก้ไขระดับความสูงของแนวเส้นท่อประธาน	109
4.2 ผลลัพธ์หลังจากการแก้ไขสูตรคำนวณเฮดสูญเสีย	113
4.3 การหาระดับเฮดที่เหมาะสมที่สุดในการจ่ายน้ำของสถานีสูบน้ำ	118
 บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	 128
5.1 การแก้ไขระดับความสูงของแนวเส้นท่อประธาน	128
5.2 การแก้ไขสูตรคำนวณเฮดสูญเสีย	128
5.3 การหาระดับเฮดที่เหมาะสมที่สุดในการจ่ายน้ำของสถานีสูบน้ำ	128
5.4 ข้อเสนอแนะ	129
 รายการอ้างอิง	 130
 ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน	135
ภาคผนวก ข การใช้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน กับระบบเมตริกซ์ของ Todini และ Pilati	136
ภาคผนวก ค การหาอินเวอร์สของเมตริกซ์โดยวิธี Partitioning	137
ภาคผนวก ง Dunlop's interpolating cubic spline	141
ภาคผนวก จ การหาอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์ความต้านทานเทียบกับ อัตราการไหล	144
ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างการใช้ซอฟต์แวร์ EPANET	148

(10)

ภาคผนวก ข Source Code

165

ประวัติผู้เขียน

198



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แฟกเตอร์ความเสียหายตามช่วงการไหล	9
2.2 แสดงค่า r และ n ในการคำนวณเฮดสูญเสีย	12
2.3 สัมประสิทธิ์ความขรุขระสำหรับท่อใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน	13
2.4 สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองของอุปกรณ์ประกอบท่อต่างๆ	14
2.5 ผลการคำนวณโดยวิธีการสุ่มค่าตัวแปร	21
2.6 ผลการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน	32
2.7 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของอัลกอริทึมแต่ละชนิด	37
2.8 เปรียบเทียบขีดความสามารถของฟรีแวร์ทางด้านชลศาสตร์	42
2.9 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของ EPANET กับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ทางด้านชลศาสตร์	46
2.10 รายละเอียดท่อแบ่งตาม ชนิดวัสดุ ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง และอายุการใช้งาน	48
2.11 รายละเอียดในการหาค่า $\varepsilon_{\max}$ และเลขยกกำลัง b	50
2.12 แสดงการเปรียบเทียบการไหลในท่อระหว่าง EPANET และ ELGTnet	56
2.13 แสดงการเปรียบเทียบความดันของ node ระหว่าง EPANET และ ELGTnet	56
2.14 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของ EPANET และ ELGTnet ในโครงข่ายของฟลอริดา	57
2.15 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของ EPANET และ ELGTnet โครงข่ายที่สมมุติขึ้น	58
2.16 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของ EPANET และ ELGTnet ในโครงข่าย Madenet Nasr	60
2.17 แฟกเตอร์ความเสียหายตามช่วงการไหล	63
2.18 ค่า α_k และ β_k สำหรับสูตรคำนวณของ Dunlop	64
2.19 สูตรของแต่ละอีลิเมนต์ของเมตริกซ์ A11	64
2.20 เปรียบเทียบการลู่เข้าของเมตริกซ์จาโคเบียน	65
3.1 สัมประสิทธิ์ความต้านทานตามช่วงการไหล	81
3.2 แสดงค่า α_k และ β_k	85
3.3 เทอมในเมตริกซ์ F ตามช่วงการไหล	91

3.4	เทอมของแต่ละอีลิเมนต์ของเมตริกซ์ A11	91
3.5	เทอมในเมตริกซ์ F ก่อนและหลังการแก้ไข	92
3.6	ระดับเฮดสูงสุดของแต่ละสถานีสูบน้ำ	97
3.7	จุดวัดความดันประเมินผล	99
4.1	เปรียบเทียบการลู่เข้าของเมตริกซ์จาโคเบียน	114
4.2	เฮดการจ่ายน้ำที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละสถานีในแต่ละชั่วโมง	122
4.3	ความดันน้ำของจุดวัดความดันน้ำประเมินผลในแต่ละชั่วโมง	123



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 โครงข่ายระบบท่อประธานของการประปานครหลวง	2
2.1 กฎการอนุรักษ์มวล	5
2.1 กฎการอนุรักษ์พลังงาน	6
2.3 ระบบจ่ายน้ำแบบไม่ซับซ้อน	15
2.4 โครงสร้างระบบการจ่ายน้ำแบบไม่ซับซ้อน	16
2.5 ผลการคำนวณของระบบจ่ายน้ำในภาพที่ 2.3	17
2.6 ระบบท่อจ่ายน้ำแบบโครงข่าย	18
2.7 แสดงผลการคำนวณของโครงข่ายในภาพที่ 2.6	22
2.8 ระบบท่อจ่ายน้ำแบบโครงข่าย	23
2.9 โครงสร้างระบบการจ่ายน้ำของระบบท่อจ่ายน้ำแบบโครงข่าย	33
2.10 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ	31
2.11 อัลกอริทึมทางด้านชลศาสตร์	34
2.12 แนวทางในการคำนวณปัญหาทางชลศาสตร์	35
2.13 อัตราการลู่เข้าหาคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ	36
2.14 ระบบจ่ายน้ำแบบลูบที่มีแหล่งจ่ายน้ำ 2 แหล่ง	37
2.15 ระบบจ่ายน้ำแบบลูบที่มีแหล่งจ่ายน้ำ 2 แหล่ง โดยใช้วิธี Loop flow	39
2.16 พื้นผิวผลการตอบสนองของฟังก์ชัน	50
2.17 ความขรุขระที่ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของท่อตามเซตของตัวแปรที่ต่างกัน	51
2.18 แสดงอิทธิพลของสมการการไหลที่ถูกถ่วงน้ำหนักด้วยความผิดพลาดสัมพัทธ์ต่อรอบการทำซ้ำ	55
2.19 โครงข่ายการจ่ายน้ำของฟลอริดา	55
2.20 โครงข่ายที่สมมติขึ้นซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบของโครงข่ายที่พิเศษ	57
2.21 ผังโครงข่ายการจ่ายน้ำของ Madenet Nasr	59
2.22 ตำแหน่งการวัดในระบบการจ่ายน้ำ	66
2.23 ความผิดพลาดของแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับค่าการไหลของน้ำของจุดวัด 20 จุด	67

2.24 อัตราการไหลของน้ำที่ถูกบริโภคในส่วนหนึ่งของระบบการจ่ายน้ำที่ได้ จากจุดที่ 14 (ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ step ตามตัวแปร 0.1 ลิตร/วินาที)	68
2.25 อัตราการไหลของน้ำที่ถูกบริโภคในส่วนหนึ่งของระบบการจ่ายน้ำที่ได้ จากจุดที่ 14 (ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ step ตามตัวแปร 0.01 ลิตร/วินาที)	69
2.26 อัตราการไหลของน้ำที่ถูกบริโภค ที่เวลา 8:00 น.	70
2.27 อัตราการไหลของน้ำที่ถูกบริโภค ที่เวลา 14:00 น.	70
2.28 อัตราการไหลของน้ำที่ถูกบริโภค ที่เวลา 16:00 น.	71
3.1 ความดันน้ำในพื้นที่ต่างๆ	73
3.2 ระดับน้ำทะเลปานกลาง	74
3.3 จากระบบ WGS-84 (ellipsoid)	75
3.4 ตัวอย่างหมุดบอกระดับความสูงของกรุงเทพมหานคร	76
3.5 เปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลจากซอฟต์แวร์ของจุดวัดความดัน หมายเลข U014	77
3.6 ระดับความสูงของแต่ละโหนดในโครงข่ายท่อประปาของ กปน. ในปัจจุบัน	78
3.7 แสดงค่าระดับความสูงของโหนดต่างๆ ในโครงข่ายท่อประปาหลังการแก้ไข	80
3.8 ขั้นตอนเชิงพันธุกรรม	94
3.9 การผสมพันธุ์	95
3.10 การกลายพันธุ์	96
3.11 แสดงตำแหน่งสถานีสูบน้ำของการประปานครหลวง	98
3.12 แสดงจุดวัดความดันประเมินผลในโครงข่ายท่อประปาของ กปน.	100
3.13 หน้าจอซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น	101
3.14 หน้าจอส่วนของการเลือก input file (.inp)	102
3.15 หน้าจอส่วนที่ 2 สำหรับกำหนดกำหนดระดับความดันน้ำของจุดวัดความดัน	102
3.16 เลือกไฟล์สำหรับการกำหนดความดันของจุดวัดความดันประเมินผล	103
3.17 รูปแบบไฟล์สำหรับการกำหนดความดันของจุดวัดความดันประเมินผล	103
3.18 ตารางข้อมูลที่อ่านได้จากไฟล์นามสกุล .csv สำหรับกำหนดความดันของจุดวัด ความดันประเมินผล	104
3.19 หน้าจอสำหรับกำหนดตัวแปรสำหรับวิธีการเชิงพันธุกรรม	104
3.20 ข้อความแจ้งผลการคำนวณ	105
3.21 ความดันที่ได้จากระดับเขตของสถานีสูบน้ำที่เหมาะสมที่สุด	105
3.22 รูปแบบการบันทึกผลความดันน้ำในแต่ละจุดในรูปแบบของ .csv ไฟล์	106

3.23 ความดันที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการคำนวณของซอฟต์แวร์	107
3.24 รูปแบบการบันทึกผลระดับเขตของแต่ละสถานีสูบน้ำ ในรูปแบบของ .csv ไฟล์	108
4.1 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U014	109
4.2 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U016	110
4.3 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U022	110
4.4 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U145	111
4.5 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U138	111
4.6 โครงข่ายการจ่ายน้ำอย่างง่าย	113
4.6 ไดอะแกรมของโครงข่ายการจ่ายน้ำอย่างง่าย	113
4.7 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U138	115
4.8 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U141	116
4.9 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U145	116
4.10 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U219	117
4.11 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U220	117
4.12 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายและจำนวนรุ่นในช่วงเวลา 0:00-3:00 น.	118
4.13 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายและจำนวนรุ่นในช่วงเวลา 4:00-7:00 น.	119
4.14 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายและจำนวนรุ่นในช่วงเวลา 8:00-11:00 น.	119
4.15 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายและจำนวนรุ่นในช่วงเวลา 12:00-15:00 น.	120
4.16 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายและจำนวนรุ่นในช่วงเวลา 16:00-19:00 น.	120
4.17 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายและจำนวนรุ่นในช่วงเวลา 20:00-23:00 น.	121

4.18 ความดันที่จุด P1 P8 P10 และ P19	124
4.19 ความดันที่จุด P21 P27 P28 และ P32	124
4.20 ความดันที่จุด P36 P39 P43 และ P101	125
4.21 ความดันที่จุด P101 P107 P113 และ P122	125
4.22 ความดันที่จุด P123 P125 P134 และ P137	126
4.23 ความดันที่จุด P138 P146 P147 และ P148	126
4.24 ความดันที่จุด P152 P153 P155 และ P164	127



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การพัฒนาสาธารณูปโภคสำหรับเมืองใหญ่อย่างกรุงเทพมหานคร อาทิเช่น ระบบโทรคมนาคมและคมนาคม ระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า ระบบการจ่ายน้ำ เป็นสิ่งที่จำเป็นมากต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ โดยเฉพาะระบบการจ่ายน้ำซึ่งนอกจากเป็นปัจจัย 4 ในการดำรงชีวิตแล้ว น้ำยังจำเป็นต่อกิจกรรมหลายอย่างของมนุษย์ด้วย ดังนั้นระบบการจ่ายน้ำต้องสามารถจ่ายน้ำให้ถึงมือผู้บริโภคได้อย่างทั่วถึง โดยต้องมั่นใจว่าผู้บริโภคได้รับการจ่ายน้ำในปริมาณที่ต้องการด้วยความดันน้ำที่เหมาะสมในพื้นที่กรุงเทพมหานครหน่วยงานที่รับผิดชอบในการจ่ายน้ำดื่ม คือ การประปานครหลวงหรือ กปน. ซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจมีพื้นที่ให้บริการครอบคลุมพื้นที่ 3 จังหวัด คือ กรุงเทพมหานคร นนทบุรีและสมุทรปราการ 3 จังหวัดนี้เป็นจังหวัดที่มีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น กรุงเทพมหานครเป็นเมืองหลวงและศูนย์กลางเศรษฐกิจของประเทศ สมุทรปราการเป็นเมืองอุตสาหกรรมและนนทบุรีเป็นเมืองที่กำลังขยายตัว ในพื้นที่ให้บริการของ กปน. มีทั้งบ้านเดี่ยว คอนโดมิเนียม อาคารสำนักงาน สถานที่ราชการ ฯลฯ โดยเฉพาะในพื้นที่เศรษฐกิจจะมีความต้องการน้ำจำนวนมาก ดังนั้นจึงมีความต้องการน้ำประปาสำหรับอุปโภคและบริโภคในปริมาณมาก กปน. ผลิตและจ่ายน้ำ เฉลี่ยวันละ 5.47 ล้าน ลบ.ม. เข้าสู่พื้นที่ให้บริการ 2,449.29 ตร.กม. ที่มีผู้ใช้น้ำจำนวนทั้งสิ้น 2.38 ล้านราย ในปี 2018 ผ่านระบบท่อประปาที่เป็นโครงข่ายเชื่อมโยงกันซึ่งมีความยาวท่อรวม 37,700.054 กม. (ไม่รวมท่อบริการ) โครงข่ายท่อประปาของ กปน. มีลักษณะดังภาพที่ 1.1

กปน. มีโรงผลิตน้ำทั้งสิ้น 4 แห่ง มีกำลังการผลิตน้ำรวม 6.72 ล้าน ลบ.ม./วัน น้ำสะอาดที่ผ่านกระบวนการผลิตแล้วจะถูกสูบขึ้นหอสูงแล้วจ่ายผ่านอุโมงค์ส่งน้ำขนาดใหญ่ที่ฝังลึกลงใต้ดินไปยังสถานีสูบน้ำ 18 แห่ง ที่กระจายอยู่ในพื้นที่ให้บริการ จากนั้นน้ำจะถูกสูบเข้าสู่ระบบท่อประปาโดยระบบเครื่องสูบน้ำในสถานีสูบน้ำ หลังจากน้ำจะไหลจากระบบท่อประปาเข้าสู่ระบบท่อจ่ายน้ำแล้วเข้าสู่ผู้ใช้น้ำ พื้นที่ให้บริการของ กปน. ณ ปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 18 สาขา และแบ่งย่อยเป็น 669 พื้นที่เฝ้าระวัง (DMAs) ดังนั้นการจ่ายน้ำให้ถึงมือผู้บริโภคได้อย่างทั่วถึง ในปริมาณที่ต้องการด้วยความดันน้ำที่เหมาะสม นั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบบริหารจัดการที่ดี ตามแผนยุทธศาสตร์การบริหาร กปน. ฉบับที่ 3 (2555 – 2559) มีเป้าหมายในการลดน้ำสูญเสียให้เหลือร้อยละ 20 และเพิ่มความดันในระบบจ่ายน้ำให้ได้ไม่น้อยกว่า 10 เมตร ภายในปี 2560 ด้วยเหตุนี้ กปน. จึงได้นำซอฟต์แวร์ EPANET 2.0 เข้ามาช่วยในการบริหารจัดการระบบจ่ายน้ำในเส้นท่อประปา เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยประกอบการตัดสินใจในการบริหารการสูบน้ำให้สามารถจ่ายน้ำให้แก่ผู้บริโภคได้ใน

ระดับที่พึงพอใจ โดยที่มีค่าใช้จ่ายในการสูบน้ำและมีปริมาณการสูญเสียที่น้อยที่สุด ซอฟต์แวร์ EPANET 2.0 เป็นซอฟต์แวร์สำหรับจำลองทางด้านชลศาสตร์และพฤติกรรมของคุณภาพน้ำ ที่พัฒนาขึ้นโดย Lewis A. Rossman ทำงานในองค์กรที่ชื่อว่า United States Environmental Protection Agency (EPA) ซึ่งเป็นองค์กรที่เกี่ยวข้องกับทรัพยากรน้ำ EPANET ใช้หลักการคำนวณของ Gradient Method ที่นิยามโดย Todini and Pilati EPANET เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถนำมาใช้งานโดยไม่มีค่าใช้จ่าย (freeware) และเป็น open source code สามารถนำมาพัฒนาต่อยอดได้

ในการใช้งานซอฟต์แวร์ EPANET แบบจำลอง (Model) ของระบบการจ่ายน้ำต้องมีการตรวจสอบความเที่ยงตรงโดยการสอบเทียบ (Calibration) กับข้อมูลการวัดจริง ปัจจุบันแบบจำลองยังมีความผิดพลาดอยู่หลายประการ เช่น ระดับความสูงของระบบท่อ อายุการใช้งานของท่อที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อการไหลของน้ำในท่อ การคิดคำนวณการสูญเสียความดันจากอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ข้อต่อต่างๆ ประตูน้ำ วาล์วลดความดัน (PRV) ดังนั้นการปรับปรุงแบบจำลองให้มีความเที่ยงตรงมากขึ้นจึงเป็นสิ่งสำคัญและรวมไปถึงการพัฒนาขั้นตอนหรือวิธี (Algorithm) ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของระบบการสูบน้ำ เพื่อให้จ่ายน้ำได้ตรงตามวัตถุประสงค์และมีค่าใช้จ่ายในการสูบน้ำที่ต่ำ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ปรับปรุงแบบจำลอง (Model) ระบบการจ่ายน้ำของซอฟต์แวร์ EPANET ให้มีความแม่นยำมากขึ้น

1.2.2 พัฒนาขั้นตอนหรือวิธี (Algorithm) ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของระบบการสูบน้ำ เพื่อให้จ่ายน้ำได้ตรงตามวัตถุประสงค์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาในส่วนระบบโครงข่ายท่อประธานของ กปน. เท่านั้น

1.3.2 ศึกษาเฉพาะปัจจัยที่ส่งผลอัตราการไหลและความดันในเส้นท่อเท่านั้น ไม่ศึกษาในส่วนองปริมาณความเข้มข้นของสารคลอรีนในระบบ

1.4 แนวทางการพัฒนาซอฟต์แวร์ EPANET

ซอฟต์แวร์ EPANET โดยเริ่มแรกถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ภาษา C++ ซึ่งพัฒนาขึ้นมาสำหรับการวิจัย โดยหน่วยงาน Environmental Protection Agency ของสหรัฐอเมริกา ผู้พัฒนาชื่อ Lewis A. Rossman ซึ่งประยุกต์ใช้อัลกอริทึมของ Toddini และ Pilati ซอฟต์แวร์ EPANET ปัจจุบันเป็นเวอร์ชัน 2.0 ซึ่งทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, 7 ซึ่งเราสามารถพัฒนาต่อยอดได้อีกดังนี้

1.4.1. หาข้อผิดพลาดของแบบจำลองและปรับปรุงแบบจำลองให้มีความเที่ยงตรงมากขึ้น โดยในปัจจุบันแบบจำลองโครงข่ายการจ่ายน้ำของ กปน. ยังไม่มีข้อมูลระดับความสูงของแต่ละโหนด รวมไปถึงการคิดเสถียรสูญเสียใช้สูตรคำนวณของ Hazen -William ซึ่งใช้แฟกเตอร์ในการคำนวณแบบตายตัวและไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลทำให้ผลการคำนวณมีความผิดพลาด ดังนั้นจึงควรปรับปรุงแบบจำลองโครงข่ายการจ่ายน้ำให้มีระดับความสูงด้วย พร้อมทั้งปรับปรุงวิธีการคำนวณเสถียรสูญเสียให้แม่นยำใกล้เคียงความจริงมากขึ้น

1.4.2. Optimization Module สำหรับหาระดับเฮดที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละสถานีสูบน้ำ เพื่อให้สามารถจ่ายน้ำได้เพียงพอกับปริมาณความต้องการของผู้ใช้น้ำในระดับความดันน้ำที่เหมาะสม

บทที่ 2

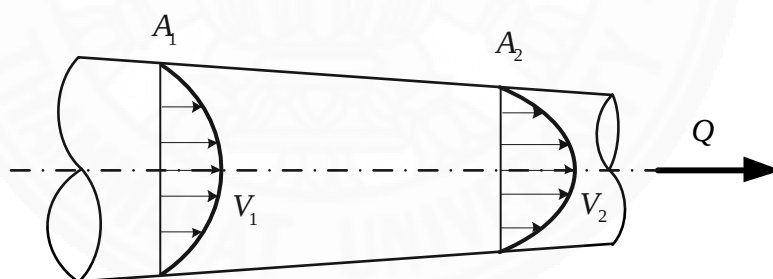
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการคำนวณทางชลศาสตร์

หลักการคำนวณทางชลศาสตร์ในระบบโครงข่ายการจ่ายน้ำนั้นใช้กฎอยู่ 2 ข้อ คือ กฎการอนุรักษ์มวล (Conventional of Mass หรือ Continuity) ในการคำนวณสมมูลน้ำ และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conventional of Energy) ในการคำนวณหาเฮดในแต่ละจุดของระบบ

2.1.1 กฎการอนุรักษ์มวล

น้ำที่ไหลผ่านท่อท่อนหนึ่งที่เป็นท่อปิดและไม่มีการรั่วไหล “มวลของน้ำไหลเข้าจะเท่ากับมวลของน้ำที่ไหลออก” สำหรับการคำนวณการไหลของน้ำในท่อปิดจะถือว่าน้ำเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (incompressible fluid) ดังนั้นความหนาแน่นของน้ำถือว่าเท่ากันทั้งหมดทุกตำแหน่งโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้การคิดสมมูลน้ำโดยคิดจากสมมูลปริมาตรแทนการคิดแบบสมมูลมวล การทำสมมูลปริมาตรน้ำในท่อนั้นใช้สมการความต่อเนื่อง (Continuity)⁽²⁾ ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 สมมูลปริมาตรน้ำในท่อ

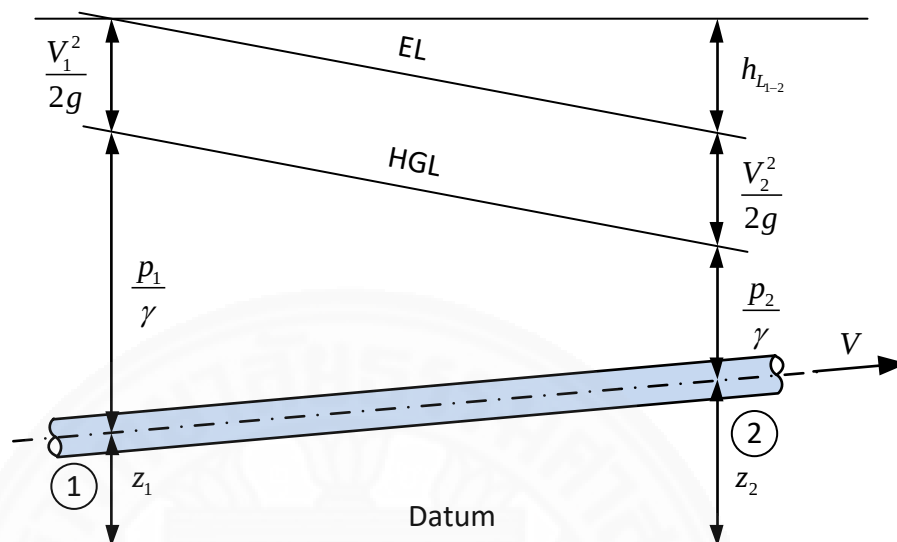
$$Q = \int_A v dA = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (2.1)$$

Q = อัตราการไหล ; ลบ.ม./วินาที

V = ความเร็วการไหลเฉลี่ย ; เมตร/วินาที

A = พื้นที่หน้าตัดท่อ ; ตร.ม.

2.1.2 กฎการอนุรักษ์พลังงาน



ภาพที่ 2.2 การคำนวณหาเฮดในท่อ⁽⁴⁾

สำหรับกฎการอนุรักษ์พลังงานของการไหลของน้ำในท่อดังนั้นใช้สมการของ Bernoulli โดยเพิ่มเติมในส่วนของการคิดการสูญเสียเข้าไป⁽⁴⁾

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \sum h_f - h_m \quad (2.2)$$

เมื่อ $\frac{V^2}{2g}$ = เฮดจากความเร็ว (Velocity head) หรือ พลังงานจลน์ (kinetic energy); เมตร

$\frac{p}{\gamma}$ = เฮดจากความดัน (Pressure head) หรือ พลังงานความดัน (pressure energy); เมตร

γ = ความถ่วงจำเพาะของน้ำ; ไม่มีหน่วย

z = เฮดจากความสูง (Elevation head) หรือ พลังงานศักย์ (potential energy); เมตร

h_f = เฮดสูญเสีย (Head loss); เมตร

h_m = การสูญเสียรอง (Minor Loss); เมตร

Hydraulic Grade Line (HGL) = Pressure energy + Potential energy

$$HGL = \frac{p}{\gamma} + z \quad (2.3)$$

Energy Grade Line (EL) = Kinetic energy + Pressure energy + Potential energy

$$EL = \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z \quad (2.4)$$

หรือ Energy Grade Line = Kinetic energy + Hydraulic Grade Line

$$EL = \frac{V^2}{2g} + HGL \quad (2.5)$$

ในการวางท่อส่งน้ำท่อแต่ละท่อนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัว-ท้ายเท่ากัน ทำให้พื้นที่หน้าตัดของท่อท่อนนั้นเท่ากันตลอดทั้งท่อน ดังนั้นความเร็วน้ำในท่อท่อนนั้นๆ จะมีค่าเท่ากันตลอดทั้งท่อน จากสมการที่ 2.1 $Q = V_1 A_1 = V_2 A_2$ จะได้ $A_1 = A_2$ และ $V_1 = V_2$ แทนค่าในสมการที่ 2.2 จะได้

$$\begin{aligned} \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} + \left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) &= \sum h_f - h_m \\ \left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) &= \sum h_f - h_m \end{aligned}$$

สมการในการคำนวณเฮดสูญเสียในท่อแต่ละท่อนมีรูปสมการดังนี้⁽⁵⁾

$$H_1 - H_2 = \sum h_f - h_m \quad (2.6)$$

เมื่อ $H_1 = \frac{p_1}{\gamma} + z_1$ = Hydraulic Grade Line ณ ตำแหน่งที่ 1

$H_2 = \frac{p_2}{\gamma} + z_2$ = Hydraulic Grade Line ณ ตำแหน่งที่ 2

2.1.3 เฮดสูญเสีย (Head Loss)

เฮดสูญเสียหรือการสูญเสียหลักเกิดจากการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างน้ำและผิวท่อ สามารถคำนวณได้จากสูตรคำนวณดังต่อไปนี้

2.1.3.1 สูตรคำนวณของ Darcy – Weisbach

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (2.7)$$

เมื่อ h_f = เฮดสูญเสีย ; เมตร

f = แฟกเตอร์ความเสียดทาน ; ไม่มีหน่วย

L = ความยาวท่อ ; เมตร

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ; เมตร

V = ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านท่อ ; เมตร/วินาที

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ; เมตร/วินาที²

จากความสัมพันธ์ของความเร็วและอัตราการไหล $V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2}$ แทนค่าในสมการที่ 2.7 จะได้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Darcy – Weisbach ในเทอมของอัตราการไหล Q ดังนี้

$$h_f = f \frac{8LQ^2}{g\pi^2 D^5} \quad (2.8)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล ; ลบ.ม./วินาที หรือเขียนให้อยู่ในรูปของเลขยกกำลังได้ดังนี้

$$h_f = rQ^n \quad (2.9)$$

เมื่อ r = สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Resistance coefficient) , $r = f \frac{8L}{g\pi^2 D^5}$

n = เลขยกกำลัง (Darcy – Weisbach : $n = 2$)

โดย f เป็นฟังก์ชันของเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re และอัตราส่วนระหว่างความขรุขระของท่อ (Pipe roughness) และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ $\frac{\epsilon}{D}$ ซึ่งดูได้จาก Moody diagram โดย f มีค่าแตกต่างกันไปตามช่วงการไหลแบ่งตามค่า Re ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แฟกเตอร์ความเสียดทานตามช่วงการไหล

ชนิดของการไหล	สมการของ f	ช่วงการไหล
การไหลราบเรียบ (Laminar)	$f = 64/\text{Re}$	$\text{Re} < 2,100$
ท่อเรียบ (Smooth pipe)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10} (\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8$	$\text{Re} > 4,000$ และ $\varepsilon/D \rightarrow 0$
การไหลเปลี่ยนแปลง (Transitional) Colebrook-White equation	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{9.35}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$	$\text{Re} > 4,000$
Wholly Rough	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)$	$\text{Re} > 4,000$

2.1.3.2 สูตรคำนวณของ Hazen-Williams

$$Q = 0.849 C_{HW} A R^{0.63} S^{0.54} \quad (2.10)$$

เมื่อ

 C_{HW} = Hazen-Williams roughness coefficient

$$S = \frac{h_f}{L} \quad (\text{Slope of energy line})$$

$$R = A / P \quad (\text{Hydraulic radius})$$

 A = พื้นที่หน้าตัด P = เส้นรอบวงส่วนที่เปียกน้ำ (Wetted perimeter)เมื่อน้ำไหลแบบเต็มท่อ P เท่ากับ πD ดังนั้น $R = D/4$ แทนค่าในสมการที่ 2.10 จะได้

$$Q = 0.849 C_{HW} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \left(\frac{D}{4} \right)^{0.63} \left(\frac{h_f}{L} \right)^{0.54}$$

$$\begin{aligned}
\left(\frac{h_f}{L}\right)^{0.54} &= \frac{Q}{0.849C_{HW}\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)\left(\frac{D}{4}\right)^{0.63}} = \frac{Q(4)(4^{0.63})}{0.849C_{HW}(\pi D^2)(D^{0.63})} \\
\left(\frac{h_f}{L}\right)^{0.54} &= \frac{4^{1.63}Q}{0.849C_{HW}\pi D^{2.63}} \\
\frac{h_f}{L} &= \left(\frac{4^{1.63}Q}{0.849C_{HW}\pi D^{2.63}}\right)^{1/0.54} = \left(\frac{4^{1.63}Q}{0.849C_{HW}\pi D^{2.63}}\right)^{1.852} \\
\frac{h_f}{L} &= \left(\frac{4^{1.63}}{0.849\pi}\right)^{1.852} \left(\frac{Q}{C_{HW}D^{2.63}}\right)^{1.852} \\
\frac{h_f}{L} &= 10.676 \left(\frac{Q}{C_{HW}D^{2.63}}\right)^{1.852}
\end{aligned}$$

จะได้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Hazen-Williams ในท่อมของอัตราการไหล Q ดังนี้

$$h_f = 10.676 \frac{LQ^{1.852}}{C_{HW}^{1.852} D^{4.871}}$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของเลขยกกำลังได้ดังนี้

$$h_f = rQ^n \quad (2.11)$$

เมื่อ r = สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Resistance coefficient), $r = 10.676 \frac{L}{C_{HW}^{1.852} D^{4.871}}$

n = เลขยกกำลัง (Hazen-Williams : $n = 1.852$)

2.1.3.3 สูตรคำนวณของ Manning

สูตรคำนวณของ Manning ใช้สำหรับการคำนวณเฮดสูญเสียในลักษณะที่เป็นคลองเปิด (Open channel) เช่น คลองชลประทาน แม่น้ำ

$$Q = \frac{1}{n_M} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (2.12)$$

เมื่อ $S = \frac{h_f}{L}$ (Slope of energy line)

$R = A / P$ (Hydraulic radius)

$A =$ พื้นที่หน้าตัด

$P =$ เส้นรอบวงส่วนที่เปียกน้ำ (wetted perimeter)

เมื่อน้ำไหลแบบเต็มท่อ P เท่ากับ πD ดังนั้น $R = D / 4$ แทนค่าในสมการที่ (2.12) จะได้

$$Q = \frac{1}{n_M} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \left(\frac{D}{4} \right)^{2/3} \left(\frac{h_f}{L} \right)^{1/2}$$

$$\left(\frac{h_f}{L} \right)^{1/2} = \frac{n_M Q}{\left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \left(\frac{D}{4} \right)^{2/3}} = \frac{4^{5/3} n_M Q}{\pi D^{8/3}}$$

$$\frac{h_f}{L} = \left(\frac{4^{5/3} n_M Q}{\pi D^{8/3}} \right)^2 = \frac{4^{10/3} n_M^2 Q^2}{\pi^2 D^{16/3}}$$

$$h_f = \frac{4^{10/3} n_M^2 L Q^2}{\pi^2 D^{16/3}} = \frac{4^{10/3} n_M^2 L Q^2}{\pi^2 D^{16/3}}$$

จะได้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Manning ในท่อมของอัตราการไหล Q ดังนี้

$$h_f = 10.294 \frac{n_M^2 L Q^2}{D^{5.333}}$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของเลขยกกำลังได้ดังนี้

$$h_f = r Q^n \quad (2.13)$$

เมื่อ $r =$ สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Resistance coefficient), $r = 10.294 \frac{n_M^2 L}{D^{5.333}}$

$n =$ เลขยกกำลัง (Manning: $n = 2$)

2.1.3.4 สูตรคำนวณแบบเลขยกกำลัง

สูตรการคำนวณเฮดสูญเสียในการคำนวณทางชลศาสตร์นิยมใช้สูตรคำนวณที่เขียนในเทอมของอัตราการไหล Q มากกว่าในเทอมของความเร็ว V และนิยมใช้สูตรคำนวณแบบเลขยกกำลัง (Exponential Formula) โดยการคำนวณกำหนดให้เป็นการไหลแบบเต็มท่อเสมอไม่มีอากาศภายในเส้นท่อ

$$h_f = rQ^n \quad (2.14)$$

เมื่อ r = สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Resistance coefficient); ไม่มีหน่วย

Q = อัตราการไหล; ลบ.ม./วินาที

n = เลขยกกำลัง

h_f = เฮดสูญเสีย; เมตร

C_{HW} = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Hazen-Williams; ไม่มีหน่วย

ε = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Darcy-Weisbach; เมตร

f = แฟกเตอร์ความเสียดทาน (ขึ้นอยู่กับ ε , D และ Q); ไม่มีหน่วย

n_M = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning; ไม่มีหน่วย

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ; เมตร

L = ความยาวท่อ; เมตร

โดยค่า r และ n ที่ใช้ในการคำนวณมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า r และ n ในการคำนวณเฮดสูญเสีย

สูตรคำนวณ	สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (r)	เลขยกกำลัง (n)
Hazen-Williams	$10.676 \frac{L}{C_{HW}^{1.852} D^{4.871}}$	1.852
Darcy-Weisbach	$f \frac{8L}{g\pi^2 D^5}$	2
Chezy-Manning	$10.294 \frac{n_M^2 L}{D^{5.333}}$	2

ในส่วนของการคำนวณสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Hazen-Williams (C_{HW}) สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Darcy-Weisbach (ϵ) และสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning (n_M) ขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาผลิตท่อโดยมีค่าดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สัมประสิทธิ์ความขรุขระสำหรับท่อใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

วัสดุ	Hazen-Williams C_{HW} (ไม่มีหน่วย)	Darcy-Weisbach ϵ (มม.)	Manning's n_M (ไม่มีหน่วย)
เหล็กหล่อ	130 – 140	0.259	0.012 - 0.015
คอนกรีต หรือ เคลือบด้วย Concrete Lined	120 – 140	0.304 – 3.04	0.012 - 0.017
เหล็กเคลือบกัลวาไนซ์	120	0.132	0.015 - 0.017
พลาสติก	140 – 150	1.524×10^{-3}	0.011 - 0.015
เหล็กกล้า	140 – 150	0.046	0.015 - 0.017
Vitrified Clay	110		0.013 - 0.015

2.1.4 การสูญเสียรอง (Minor Loss)

การสูญเสียรองเป็นการสูญเสียความดันน้ำที่เกิดจากการไหลผ่าน ประตุน้ำ ข้องอ และอุปกรณ์ประกอบท่อต่างๆ โดยมีค่าการสูญเสียแตกต่างกันไปตามชนิดของอุปกรณ์ประกอบท่อ

$$h_m = K \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (2.15)$$

จากความสัมพันธ์ของความเร็วและอัตราการไหล $V = \frac{4Q}{\pi D^2}$ แทนค่าในสมการที่ 2.15 จะได้

$$h_m = K \frac{8Q^2}{g\pi^2 D^4}$$

เมื่อ h_m = การสูญเสียรอง ; เมตร

K = สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง ; ไม่มีหน่วย (ดังตารางที่ 2.4)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ; เมตร

V = ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านท่อ ; เมตร/วินาที

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ; เมตร/วินาที²

ตารางที่ 2.4 สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองของอุปกรณ์ประกอบท่อต่างๆ

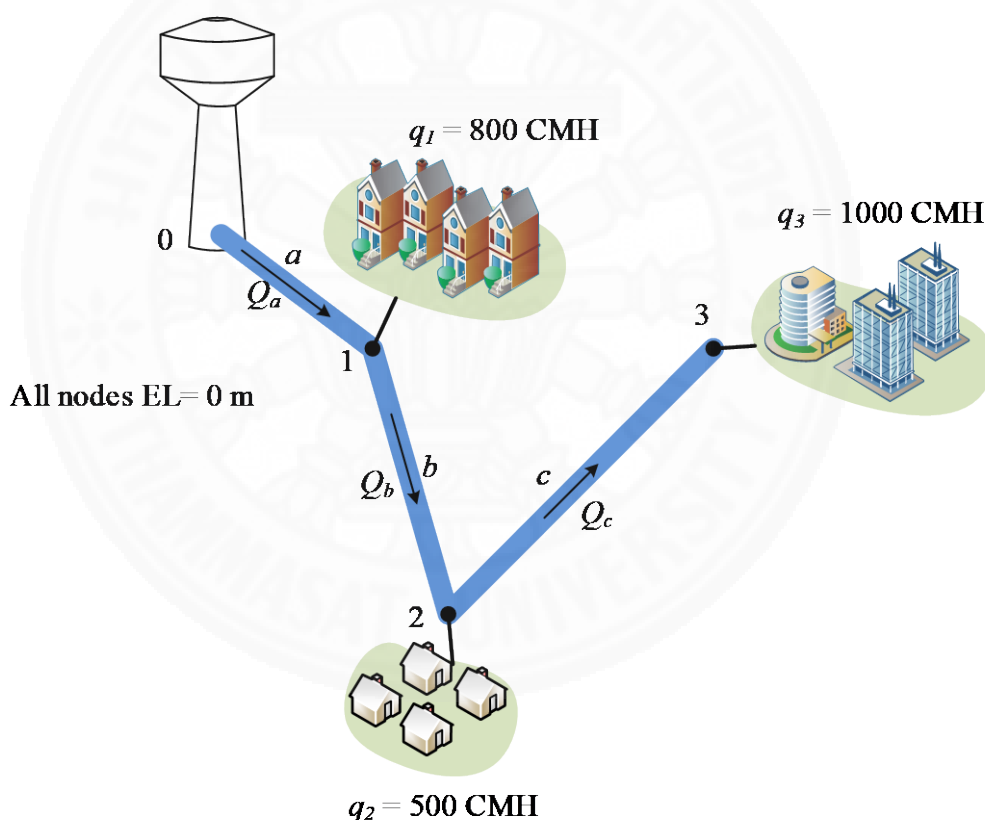
อุปกรณ์ประกอบท่อ	สัมประสิทธิ์การ สูญเสียรอง (K)	อุปกรณ์ประกอบท่อ	สัมประสิทธิ์การ สูญเสียรอง (K)
Globe valve, fully open	10.0	Long-radius elbow	0.6
Angle valve, fully open	5.0	45 degree elbow	0.4
Swing check valve, fully open	2.5	Closed return bend	2.2
Gate valve, fully open	0.2	Standard tee - flow through run	0.6
Short-radius elbow	0.9	Standard tee - flow through branch	1.8
Medium-radius elbow	0.8	Square entrance	0.5
Long-radius elbow	0.6	Exit	1.0

2.2 พื้นฐานการคำนวณทางชลศาสตร์

ก่อนที่จะใช้ซอฟต์แวร์ทางด้านชลศาสตร์จำเป็นต้องมีความรู้ ความเข้าใจพื้นฐานการคำนวณทางชลศาสตร์เสียก่อน เพื่อให้ทราบที่มาของการสร้างซอฟต์แวร์และสามารถวิเคราะห์ผลที่ได้จากซอฟต์แวร์

2.2.1 ระบบจ่ายน้ำแบบไม่ซับซ้อน

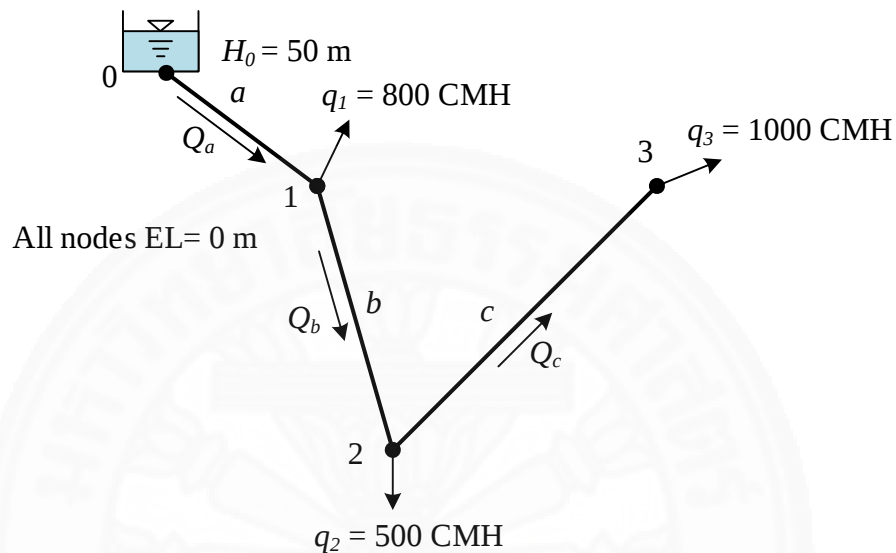
เป็นระบบจ่ายน้ำที่ไม่มีความซับซ้อน ไม่มีการต่อกันแบบลูบ มีทิศทางไหลที่แน่นอนดังนั้นสามารถแก้สมการหาค่าตัวแปรได้ง่ายดังตัวอย่างในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ระบบจ่ายน้ำแบบไม่ซับซ้อน

ระบบประกอบไปด้วยถังจ่ายน้ำที่สามารถจ่ายน้ำได้ที่เฮดน้ำ 50 เมตร จ่ายน้ำผ่านท่อจ่ายน้ำ 3 เส้นท่อไปยังจุดจ่ายน้ำ 3 จุด จุดที่ 1 2 และ 3 โดยแต่ละจุดมีความต้องการการใช้น้ำ (demand) เท่ากับ 800 500 และ 1000 ลบ.ม./ชม. ตามลำดับ สมมติให้ท่อทุกท่อนมีเส้นผ่าน

ศูนย์กลางเท่ากับ 800 มม. โดยเส้นท่อ a b และ c มีความยาว 1000 800 และ 1200 เมตรตามลำดับ ทุกจุดบนเส้นท่อมี่ระดับความสูงเท่ากับ 0 เมตร ใช้การคำนวณเฮดสูญเสียโดยใช้สูตรการคำนวณของ Hazen-Williams โดยกำหนดให้ท่อทุกท่อนมีค่า $C_{HW} = 120$ จากภาพที่ 2.3 สามารถเขียนโครงสร้างระบบการจ่ายน้ำได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างระบบการจ่ายน้ำแบบไม่ซับซ้อน

ที่จุดจ่ายน้ำ (node) ต่างๆ ใช้กฎการอนุรักษ์มวล (continuity) ในการคำนวณหาสมมูลน้ำของโหนด

$$\begin{aligned} \text{โหนด 1 : } Q_a - Q_b - q_1 &= 0 \\ Q_a - Q_b - 800 &= 0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \text{โหนด 2 : } Q_b - Q_c - q_2 &= 0 \\ Q_b - Q_c - 500 &= 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \text{โหนด 3 : } Q_c - q_3 &= 0 \\ Q_c &= 1000 \end{aligned} \quad (2.18)$$

จากนั้นแทนค่าสมการที่ 2.16 2.17 ด้วยสมการที่ 2.18 เราจะได้ $Q_a = 2300$ $Q_b = 1500$ และ $Q_c = 1000$ หน่วยเป็น ลบ.ม./ชม. ที่แต่ละท่อนใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานในการคำนวณหาเฮดสูญเสีย แต่ต้องเปลี่ยนอัตราการไหลให้อยู่ในหน่วย ลบ.ม./วินาที โดยมีค่าดังนี้ $Q_a = 0.639$ $Q_b = 0.222$ และ $Q_c = 0.278$ หน่วยเป็น ลบ.ม./วินาที

จากสูตรคำนวณของ Hazen-Williams

$$h_f = rQ^{1.852}, \quad r = \frac{10.676 \cdot L}{C_{HW}^{1.852} \cdot D^{4.871}}$$

ท่อ a: $H_0 - h_{fa} - H_1 = 0$

$$100 - r_a Q_a^{1.852} - H_1 = 0$$

$$H_1 = 48.029$$

ท่อ b: $H_1 - h_{fb} - H_2 = 0$

$$48.029 - r_b Q_b^{1.852} - H_2 = 0$$

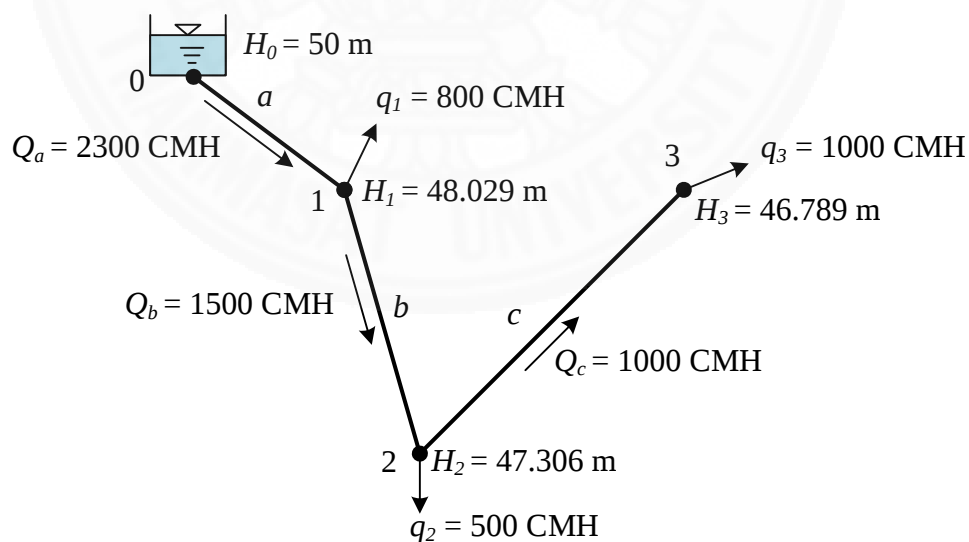
$$H_2 = 47.306$$

ท่อ c: $H_2 - h_{fc} - H_3 = 0$

$$47.306 - r_c Q_c^{1.852} - H_3 = 0$$

$$H_3 = 46.789$$

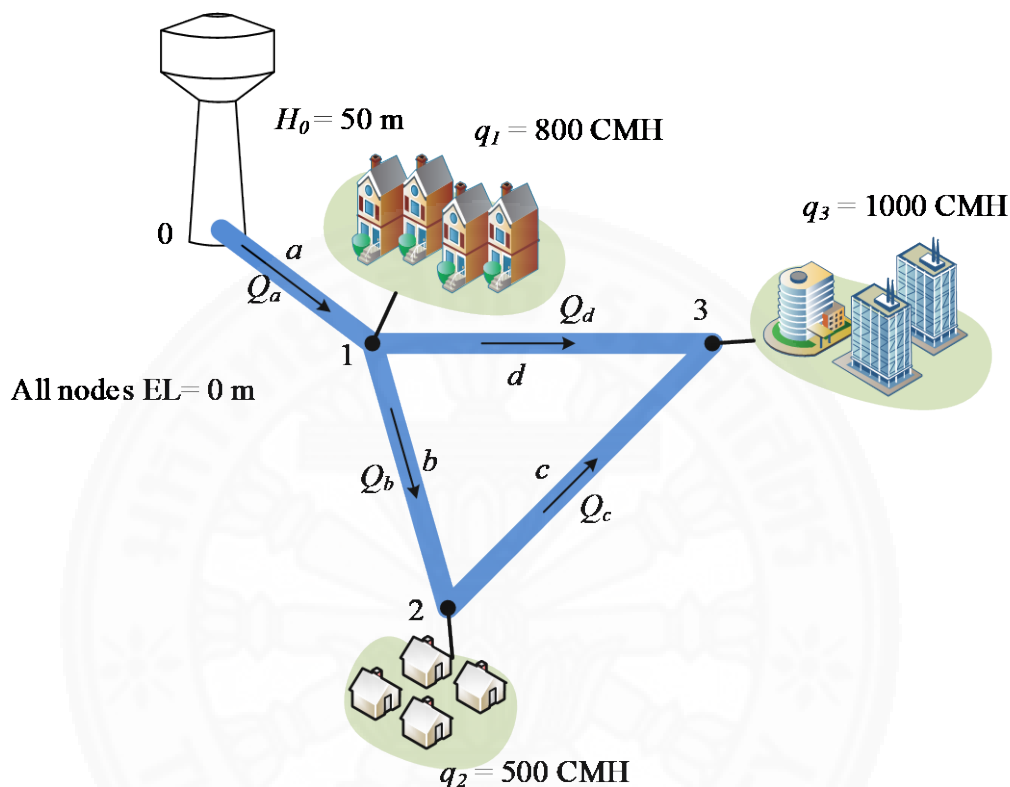
โดยค่าของอัตราการไหลและเฮดที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงได้ดังภาพที่ 2.5 ด้านล่างนี้



ภาพที่ 2.5 ผลการคำนวณของระบบจ่ายน้ำในภาพที่ 2.3

2.2.2 ระบบท่อจ่ายน้ำแบบโครงข่าย

เป็นระบบจ่ายน้ำที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนขึ้น ระบบท่อจ่ายน้ำมีการต่อกันแบบ loop ซึ่งมีทิศทางการไหลของน้ำที่ไม่แน่นอนยากต่อการคำนวณแบบธรรมดา ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ระบบท่อจ่ายน้ำแบบโครงข่าย

ระบบประกอบไปด้วยถังจ่ายน้ำที่สามารถจ่ายน้ำได้ที่เฮดน้ำ 50 เมตร จ่ายน้ำผ่านท่อจ่ายน้ำ 4 เส้นท่อไปยังจุดจ่ายน้ำ 3 จุด โดยแต่ละจุดมีความต้องการการใช้น้ำ (demand) เท่ากับ 800 500 และ 1000 ลบ.ม./ชั่วโมง สมมติให้ท่อทุกท่อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 800 มม. โดยเส้นท่อ a b c และ d มีความยาว 1000 800 1200 และ 1500 เมตรตามลำดับ ทุกจุดบนเส้นท่อนี้มีระดับความสูงเท่ากับ 0 เมตร ใช้การคำนวณเฮดสูญเสียโดยใช้สูตรการคำนวณของ Hazen-Williams โดยกำหนดให้ท่อทุกท่อนมีค่า $C_{HW} = 120$ โดยอัตราการไหลต้องอยู่ในหน่วย ลบ.ม./วินาที สำหรับคำนวณเฮดสูญเสีย ดังนั้น q_1 q_2 และ q_3 มีค่าเท่ากับ 0.222 0.139 และ 0.278 ตามลำดับ ปริมาณความต้องการน้ำทั้งหมดที่ต้องจ่ายสู่ระบบ $Q_a = q_1 + q_2 + q_3 = 0.638$ ลบ.ม./วินาที ที่ท่อแต่ละท่อนเขียนสมการตามกฎการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้

ข้อ a: $H_0 - h_{fa} - H_1 = 0$

$$50 - r_a Q_a^{1.852} - H_1 = 0$$

$$H_1 = 48.053$$

ข้อ b: $H_1 - h_{fb} - H_2 = 0$

$$H_1 - r_b Q_b^{1.852} - H_2 = 0$$

$$H_2 = 48.053 - r_b Q_b^{1.852} \quad (2.19)$$

ข้อ c: $H_2 - h_{fc} - H_3 = 0$

$$H_2 - r_c Q_c^{1.852} - H_3 = 0$$

$$H_3 = H_2 - r_c Q_c^{1.852} \quad (2.20)$$

ข้อ d: $H_1 - h_{fd} - H_3 = 0$

$$H_1 - r_d Q_d^{1.852} - H_3 = 0$$

$$H_3 = 48.053 - r_d Q_d^{1.852} \quad (2.21)$$

ที่โหนดแต่ละโหนดใช้กฎการอนุรักษ์มวล

โหนด 1 : $Q_a - Q_b - Q_d - q_1 = 0$

$$0.639 - Q_b - Q_d - 0.222 = 0$$

$$Q_d = 0.417 - Q_b \quad (2.22)$$

โหนด 2 : $Q_b - Q_c - 0.139 = 0$

$$Q_c = Q_b - 0.139 \quad (2.23)$$

โหนด 3 : $Q_c + Q_d - q_3 = 0$

$$Q_c + Q_d - 0.278 = 0$$

$$Q_d = 0.278 - Q_c \quad (2.24)$$

จากสมการทั้งหมดจะมีตัวแปรไม่ทราบค่าอยู่ 5 ตัวแปร คือ Q_b Q_c Q_d H_2 และ H_3 วิธีการแก้ปัญหาวิธีหนึ่งคือการสุ่มค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งแล้วคำนวณหาค่าของตัวแปรที่เหลือโดยใช้ตัวแปร H_3 ในการเปรียบเทียบผล⁽⁶⁾ โดยมีวิธีการดังนี้

- 1) สุ่มค่าตัวแปร Q_b โดยเริ่มต้นให้ $Q_b = 0.2$
- 2) จากนั้นคำนวณหา Q_c โดยใช้สมการที่ 2.23

$$Q_c = Q_b - 0.139$$

$$Q_c = 0.2 - 0.139$$

$$Q_c = 0.061$$

3) จากนั้นคำนวณหา Q_d โดยใช้สมการที่ 2.24

$$Q_d = 0.278 - Q_c$$

$$Q_d = 0.278 - 0.061$$

$$Q_d = 0.217$$

จากนั้นใช้ค่าอัตราการไหล Q ที่ได้ทั้ง 4 ค่าไปคำนวณหาเฮดสูญเสียที่ท่อต่างๆ จากสูตรคำนวณของ Hazen-Williams

$$h_f = rQ^{1.852}, \quad r = \frac{10.676 \cdot L}{C_{HW}^{1.852} \cdot D^{4.871}}$$

ท่อ b: $H_2 = H_b - r_b Q^{1.852}$

$$H_2 = 48.053 - r_b Q_b^{1.852}$$

$$H_2 = 47.871$$

ท่อ c: $H_3 = H_2 - r_c Q_c^{1.852}$

$$H_3 = 47.871 - r_c Q_c^{1.852}$$

$$H_3 = 47.841$$

ท่อ d: $H_3 = H_1 - r_d Q_d^{1.852}$

$$H_3 = 48.053 - r_d Q_d^{1.852}$$

$$H_3 = 47.685$$

4) เปรียบเทียบผลการคำนวณ

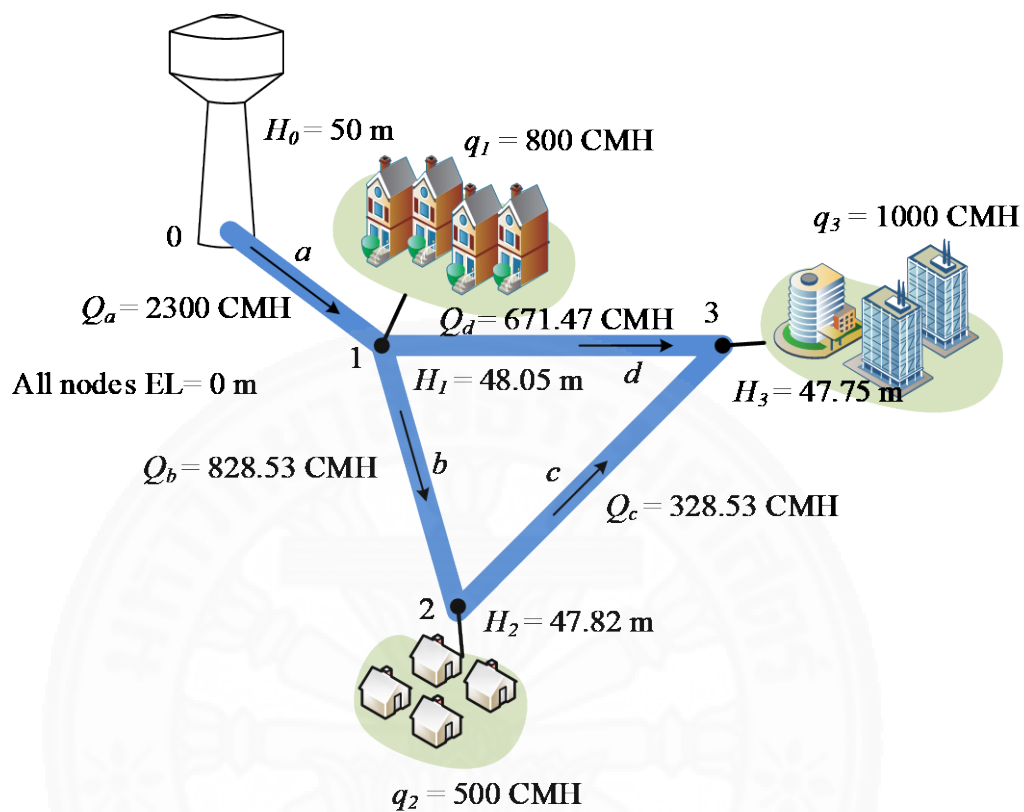
$$\Delta H_3 = 47.871 - 47.658 = 0.183$$

ผลที่ได้ยังมีค่าความผิดพลาดที่สูงอยู่ จากนั้นให้ของสุ่มค่าที่มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าตัวแปรเดิม เพื่อดูทิศทางของความผิดพลาด จากนั้นทำการเพิ่มค่าหรือลดค่าตัวแปรไปเรื่อยๆ จน ความผิดพลาดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังตัวอย่างผลการคำนวณในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ผลการคำนวณโดยวิธีการสุ่มค่าตัวแปร

iteration	Q_b	Q_c	Q_d	H_2	H_3	H_3	ΔH_3
1	0.2	0.06111111	0.21666667	47.87126698	47.84100555	47.65830428	0.182701
2	0.25	0.11111111	0.16666667	47.77848552	47.68691879	47.81004072	-0.123122
3	0.225	0.08611111	0.19166667	47.82707303	47.76996142	47.73839066	0.031571
4	0.2375	0.09861111	0.17916667	47.80332402	47.72991566	47.77528063	-0.045365
5	0.23125	0.09236111	0.18541667	47.81533525	47.75031019	47.75710052	-0.006790
6	0.228125	0.08923611	0.18854167	47.82123839	47.76022908	47.74781164	0.012417
7	0.2296875	0.09079861	0.18697917	47.81829537	47.75529291	47.75247261	0.002820
8	0.23046875	0.09157986	0.18619791	47.81681745	47.75280736	47.7547907	-0.001983
9	0.230078125	0.09118923	0.18658854	47.81755694	47.75405159	47.75363269	0.000419
10	0.230273438	0.09138454	0.18639322	47.81718733	47.75342984	47.75421196	-0.000782
11	0.230175781	0.09128689	0.18649088	47.81737217	47.75374081	47.75392239	-0.000182
12	0.230126953	0.09123806	0.18653971	47.81746456	47.75389622	47.75377756	0.000119
13	0.230151367	0.09126247	0.18651529	47.81741837	47.75381852	47.75384998	-0.000031
14	0.23013916	0.09125027	0.18652750	47.81744147	47.75385737	47.75381377	0.000044
15	0.230145264	0.09125637	0.18652140	47.81742992	47.75383795	47.75383187	0.000006
16	0.230148315	0.09125942	0.18651835	47.81742414	47.75382823	47.75384092	-0.000013
17	0.23014679	0.09125790	0.18651987	47.81742703	47.75383309	47.7538364	-0.000003
18	0.230146027	0.09125713	0.18652064	47.81742847	47.75383552	47.75383414	0.000001

เขตที่โหนดต่างๆ และอัตราการไหลที่เส้นท่อต่างๆ ที่คำนวณได้สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.7

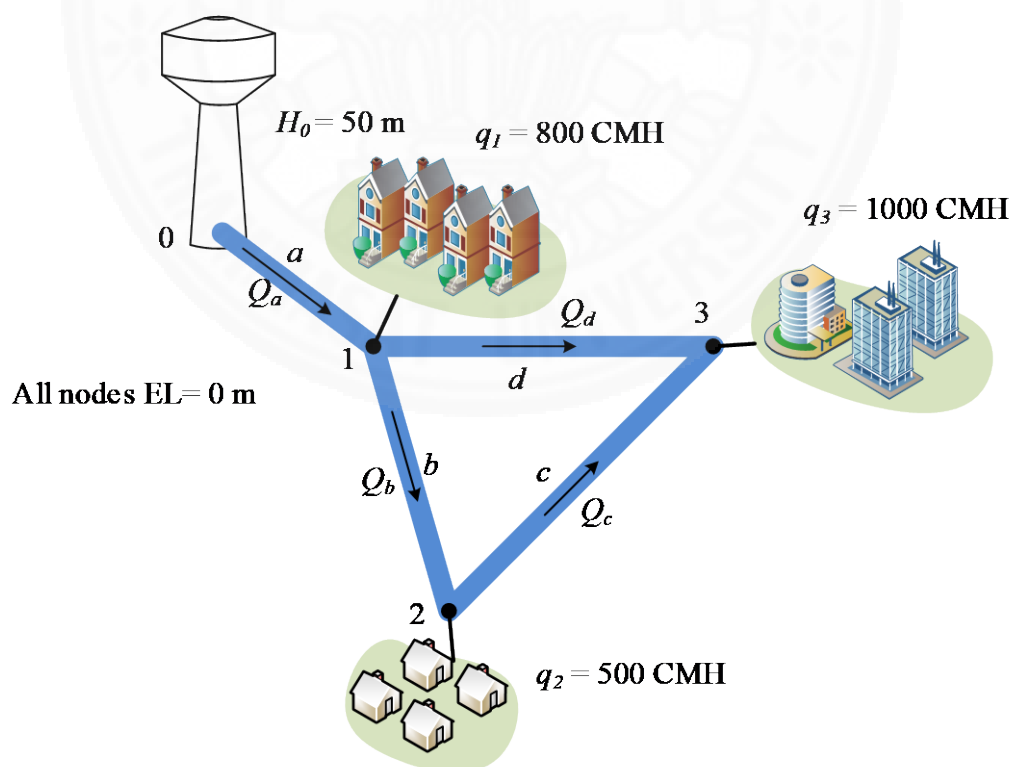


ภาพที่ 2.7 แสดงผลการคำนวณของโครงข่ายจากภาพที่ 2.6

2.3 หลักการของซอฟต์แวร์ EPANET

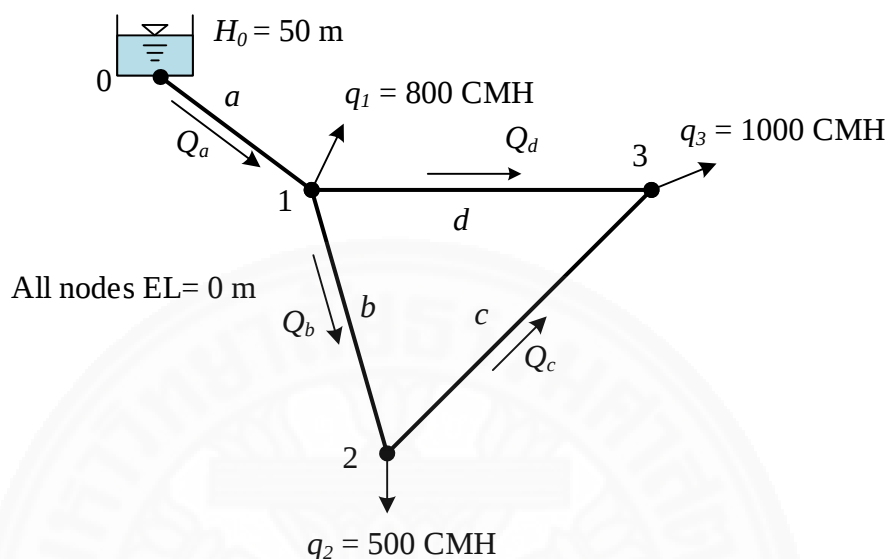
สำหรับโครงข่ายการจ่ายน้ำที่มีความซับซ้อน การสุ่มค่าตัวแปรในการคำนวณเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการนั้นทำได้ยาก เนื่องจากตัวแปรจะมากขึ้นตามจำนวนท่อและจำนวนโหนด ดังนั้นจึงมีการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) เข้ามาใช้สำหรับแก้ปัญหา ซอฟต์แวร์ EPANET คือ ซอฟต์แวร์ทางด้านชลศาสตร์สำหรับจำลองพฤติกรรมไหลของน้ำและความเข้มข้นของสารเคมีในระบบโครงข่ายท่อจ่ายน้ำ เช่น ระบบประปาชุมชน ระบบประปาภายในอาคารสูง ระบบประปาขนาดใหญ่ พัฒนาโดย Lewis A. Rossman United States Environmental Protection Agency's (EPA) Water Supply and Water Resources Division ⁽⁷⁾ โดยพัฒนาต่อยอดมาจากแบบจำลองของ Toddini และ Platini (2003) ⁽⁸⁾ สำหรับลักษณะและตัวอย่างการใช้งานซอฟต์แวร์ EPANET แสดงไว้ในภาคผนวก

โดยแบบจำลองของ Toddini และ Platini ประยุกต์ใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานเข้าไปที่ท่อแต่ละท่อน (link) และใช้กฎการอนุรักษ์มวลเข้าไปที่จุดเชื่อมต่อแต่ละจุด (node หรือ junction) เพื่อให้เข้าใจหลักการสร้างแบบจำลองเราพิจารณาจากโครงข่ายการจ่ายน้ำดังภาพที่ 2.8



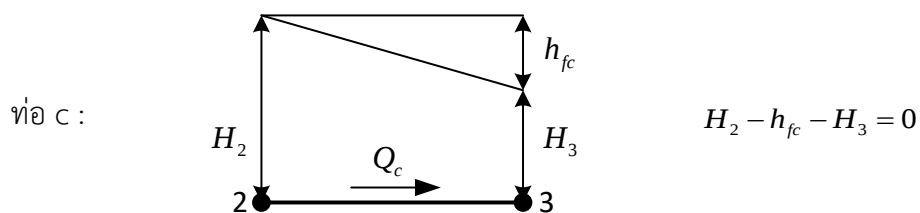
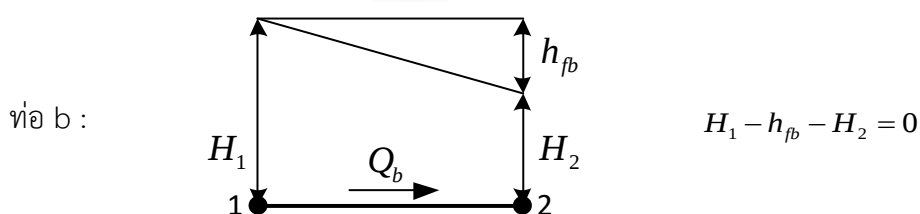
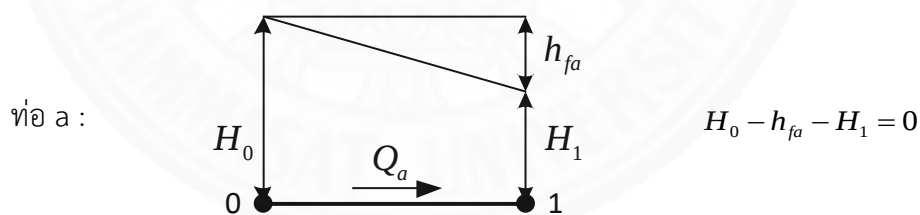
ภาพที่ 2.8 ระบบท่อจ่ายน้ำแบบโครงข่าย

จากภาพที่ 2.8 สามารถเขียนโครงสร้างระบบการจ่ายน้ำได้ดังภาพที่ 2.9

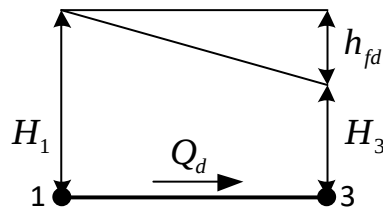


ภาพที่ 2.9 โครงสร้างระบบการจ่ายน้ำของระบบท่อจ่ายน้ำแบบโครงข่าย

ที่เส้นท่อแต่ละเส้นใช้สมการของกฎการอนุรักษ์พลังงานโดยมีสมการของท่อต่างๆ ดังนี้



ท่อน d :



$$H_1 - h_{fd} - H_3 = 0$$

เมื่อ $h_{fk} = r_k Q_k^n$ สมการข้างบนนี้เขียนใหม่ได้เป็น

ท่อน a : $H_0 - r_a Q_a^n - H_1 = 0$

ท่อน b : $H_1 - r_b Q_b^n - H_2 = 0$

ท่อน c : $H_2 - r_c Q_c^n - H_3 = 0$

ท่อน d : $H_1 - r_d Q_d^n - H_3 = 0$

คูณสมการทั้งหมดด้วย -1 จะได้

ท่อน a : $r_a Q_a^n - H_0 + H_1 = 0$

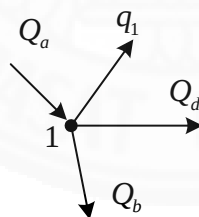
ท่อน b : $r_b Q_b^n - H_1 + H_2 = 0$

ท่อน c : $r_c Q_c^n - H_2 + H_3 = 0$

ท่อน d : $r_d Q_d^n - H_1 + H_3 = 0$

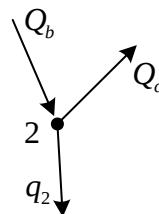
ที่โหนดแต่ละโหนดใช้สมการกฎการอนุรักษ์มวล โดยถือว่าน้ำเป็นของไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้ ดังนั้นความหนาแน่นของน้ำจะไม่เปลี่ยนแปลง จึงใช้การดุลย์ปริมาตรของน้ำแทนมวลโดยสมการที่โหนดต่างๆ ดังนี้

โหนด 1 :



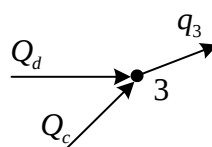
$$Q_a - Q_b - Q_d - q_1 = 0$$

โหนด 2 :



$$Q_b - Q_c - q_2 = 0$$

โหนด 3 :



$$Q_d + Q_c - q_3 = 0$$

โดยระบบนี้มีตัวแปรไม่ทราบค่าทั้งสิ้น 7 ตัวแปร คือ H_1 H_2 H_3 Q_a Q_b Q_c และ Q_d และมีสมการ
ทั้งสิ้น 7 สมการ ดังนี้

$$F_1 = r_a Q_a^n - H_0 + H_1 = 0$$

$$F_2 = r_b Q_b^n - H_1 + H_2 = 0$$

$$F_3 = r_c Q_c^n - H_2 + H_3 = 0$$

$$F_4 = r_d Q_d^n - H_1 + H_3 = 0$$

$$F_5 = Q_a - Q_b - Q_d - q_1 = 0$$

$$F_6 = Q_b - Q_c - q_2 = 0$$

$$F_7 = Q_d + Q_c - q_3 = 0$$

เขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[\mathbf{F}] = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \cdot \\ F_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a Q_a^n - H_0 + H_1 \\ r_b Q_b^n - H_1 + H_2 \\ r_c Q_c^n - H_2 + H_3 \\ r_d Q_d^n - H_1 + H_3 \\ Q_a - Q_b - Q_d - q_1 \\ Q_b - Q_c - q_2 \\ Q_d + Q_c - q_3 \end{bmatrix} = [\mathbf{0}]$$

สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปของการคูณเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[\mathbf{F}] = \begin{bmatrix} r_a |Q_a|^{n-1} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & r_b |Q_b|^{n-1} & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & r_b |Q_b|^{n-1} & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & r_d |Q_d|^{n-1} & -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_b \\ Q_d \\ H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_1 \\ q_1 \\ q_1 \end{bmatrix} = [\mathbf{0}]$$

เขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์เมตริกซ์ตามนิยามของ Toddini และ Platini ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A11} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A10} & \mathbf{H0} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} = [\mathbf{F}] = [\mathbf{0}]$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A11} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A10} & \mathbf{H0} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

เมื่อ $\mathbf{A12} = \mathbf{A21}^T$ (np,nn) เมตริกซ์ของโหนดที่ไม่ทราบค่าเสด

$\mathbf{A10} = \mathbf{A01}^T$ (np,no) เมตริกซ์ของโหนดที่ทราบค่าเสด

$\mathbf{Q}^T = [Q_1, Q_2, \dots, Q_{np}]$ (1,np) อัตราการไหลในท่อแต่ละท่อน

$\mathbf{q}^T = [q_1, q_2, \dots, q_{nn}]$ (1,nn) ความต้องการน้ำของโหนด

$\mathbf{H}^T = [H_1, H_2, \dots, H_{nn}]$ (1,nn) เสดที่ไม่ทราบค่า

$\mathbf{H0}^T = [H0_1, H0_2, \dots, H0_{no}]$ (1,no) เสดที่ทราบค่า

$$\mathbf{A11} = \begin{bmatrix} r_1 |Q_1|^{n_1-1} & & & \\ & r_2 |Q_2|^{n_2-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & r_{np} |Q_{np}|^{n_{np}-1} \end{bmatrix} \quad \text{คือเมตริกซ์แยงมุมขนาด (np,np)}$$

โดยที่

nn = จำนวนโหนดที่ไม่ทราบเสด

no = จำนวนโหนดที่ทราบเสด

np = จำนวนท่อที่ไม่ทราบอัตราการไหล

$$\mathbf{A}_{12}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{ถ้าทิศการไหลในท่อ } i \text{ มีทิศการไหลเข้าสู่โหนด } j \\ 0 & \text{ถ้าท่อ } i \text{ และโหนด } j \text{ ไม่ได้เชื่อมต่อกัน} \\ -1 & \text{ถ้าทิศการไหลในท่อ } i \text{ มีทิศการไหลออกจากโหนด } j \end{cases}$$

จากสมการที่ 2.25 เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A11} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A10} & \mathbf{H0} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{f}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

ใช้การแก้ปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน (แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ก)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A11} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A10} & \mathbf{H0} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{f}_2 \end{bmatrix}$$

เมื่อ $\mathbf{f}_1 = \mathbf{f}_1(\mathbf{Q}, \mathbf{H})$ และ $\mathbf{f}_2 = \mathbf{f}_2(\mathbf{Q})$

จากระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

$$(x - x_0) f'(x_0) = -f(x_0)$$

จะได้

$$\mathbf{f}'(\mathbf{Q}^k)(\mathbf{Q}^k - \mathbf{Q}^{k+1}) = -\mathbf{f}(\mathbf{Q}^k)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{Q}^k) d\mathbf{Q} = \mathbf{f}(\mathbf{Q}^k)$$

(2.27)

เมื่อ $d\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^k - \mathbf{Q}^{k+1}$

$\mathbf{J}(i, j) = \partial f_i / \partial Q_j$ (เมตริกซ์จาโคเบียน)

$$\mathbf{J}(i, j) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial F_1}{\partial Q_2} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial Q_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial Q_1} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_2} & \cdots & \frac{\partial F_2}{\partial Q_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial Q_1} & \frac{\partial F_n}{\partial Q_2} & \cdots & \frac{\partial F_n}{\partial Q_n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}(i, j) = \begin{bmatrix} nr_a |Q_a|^{n-1} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & nr_b |Q_b|^{n-1} & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & nr_b |Q_b|^{n-1} & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & nr_b |Q_b|^{n-1} & -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}(i, j) = \begin{bmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{A11} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

แทนค่าในสมการที่ 2.27 จะได้

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{A11} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{Q} \\ d\mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1^k \\ \mathbf{f}_2^k \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} d\mathbf{Q} \\ d\mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{A11} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1^k \\ \mathbf{f}_2^k \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

เมื่อ

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} n_1 & & & \\ & n_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & n_{np} \end{bmatrix} \text{ เมตริกซ์ไถ่ยมุมขนาด (np,np) }$$

เมื่อ

$$d\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^k - \mathbf{Q}^{k+1}$$

$$d\mathbf{H} = \mathbf{H}^k - \mathbf{H}^{k+1}$$

จะได้

$$\mathbf{Q}^{k+1} = \mathbf{Q}^k - d\mathbf{Q} \quad (2.29)$$

$$\mathbf{H}^{k+1} = \mathbf{H}^k - d\mathbf{H} \quad (2.30)$$

จากนั้นหาค่าของ $d\mathbf{Q}$ และ $d\mathbf{H}$ โดยกำหนดให้ $\mathbf{N} \mathbf{A11} = \mathbf{D}^{-1}$ ดังนั้น $\mathbf{D} \mathbf{A11} = \mathbf{A}^{-1}$, $\mathbf{N}, \mathbf{A11}$ และ $\mathbf{D}$ เป็นเมตริกซ์ไถ่ยมุม หาคอินเวอร์สเมตริกซ์โดยใช้วิธี partitioning⁽⁹⁾ แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ค

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{A11} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}^{-1} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{B11} & \mathbf{B12} \\ \mathbf{B21} & \mathbf{B22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A11} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{A22} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{B11} & \mathbf{B12} \\ \mathbf{B21} & \mathbf{B22} \end{bmatrix}$$

เมื่อ

$$\mathbf{D}^{-1} = \mathbf{A11}, \mathbf{A12} = \mathbf{A12}, \mathbf{A21} = \mathbf{A21}, \mathbf{A22} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{B}_{11} = \mathbf{D} - \mathbf{D} \mathbf{A}_{12} (\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1} (\mathbf{A}_{21} \mathbf{D})$$

$$\mathbf{B}_{12} = -\left((\mathbf{D}^{-1})^{-1} \mathbf{A}_{12}\right) (-\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1}$$

$$\mathbf{B}_{21} = (\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1} (\mathbf{A}_{21} \mathbf{D})$$

$$\mathbf{B}_{22} = -(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1}$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.28 จะได้

$$\begin{bmatrix} d\mathbf{Q} \\ d\mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}^{-1} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1^k \\ \mathbf{f}_2^k \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} d\mathbf{Q} \\ d\mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1^k \\ \mathbf{f}_2^k \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} d\mathbf{Q} \\ d\mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12} \\ \mathbf{B}_{21} & \mathbf{B}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1^k \\ \mathbf{f}_2^k \end{bmatrix}$$

จะได้

$$d\mathbf{Q} = \mathbf{B}_{11} \mathbf{f}_1^k + \mathbf{B}_{12} \mathbf{f}_2^k \quad (2.31)$$

$$d\mathbf{H} = \mathbf{B}_{21} \mathbf{f}_1^k + \mathbf{B}_{22} \mathbf{f}_2^k \quad (2.32)$$

ในรอบการทำซ้ำที่ k $\mathbf{f}_1^k$ และ $\mathbf{f}_2^k$ มีค่าเท่ากับ

$$\mathbf{f}_1^k = \mathbf{A}_{11}^k \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{12} \mathbf{H}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0$$

$$\mathbf{f}_2^k = \mathbf{A}_{12} \mathbf{Q}^k - \mathbf{q}$$

แทนค่าลงในสมการที่ 2.31 และสมการที่ 2.32 จะได้ (แสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาคผนวก ค)

$$\begin{aligned} d\mathbf{Q} &= \mathbf{D} (\mathbf{A}_{11} \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) \\ &\quad - \mathbf{D} \mathbf{A}_{12} (\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1} (\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} (\mathbf{A}_{11} \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) + (\mathbf{q} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{Q}^k)) \end{aligned}$$

(2.33)

$$d\mathbf{H} = \mathbf{H}^k + \left[(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1} (\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} (\mathbf{A}_{11}^k \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) + (\mathbf{q} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{Q}^k)) \right]$$

(2.34)

แทนค่าสมการที่ 2.33 ลงในสมการที่ 2.34 จะได้

$$d\mathbf{Q} = \mathbf{D} (\mathbf{A}_{11} \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) - \mathbf{D} \mathbf{A}_{12} (d\mathbf{H} - \mathbf{H}^k) \quad (2.35)$$

จากนั้นแทนค่าลงในสมการที่ 2.29 และ 2.30 จะได้ (แสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาคผนวก ค)

$$\mathbf{Q}^{k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{N}^{-1}) \mathbf{Q}^k - \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}_{11}^{-1} (\mathbf{A}_{12} \mathbf{H}^{k+1} + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) \quad (2.36)$$

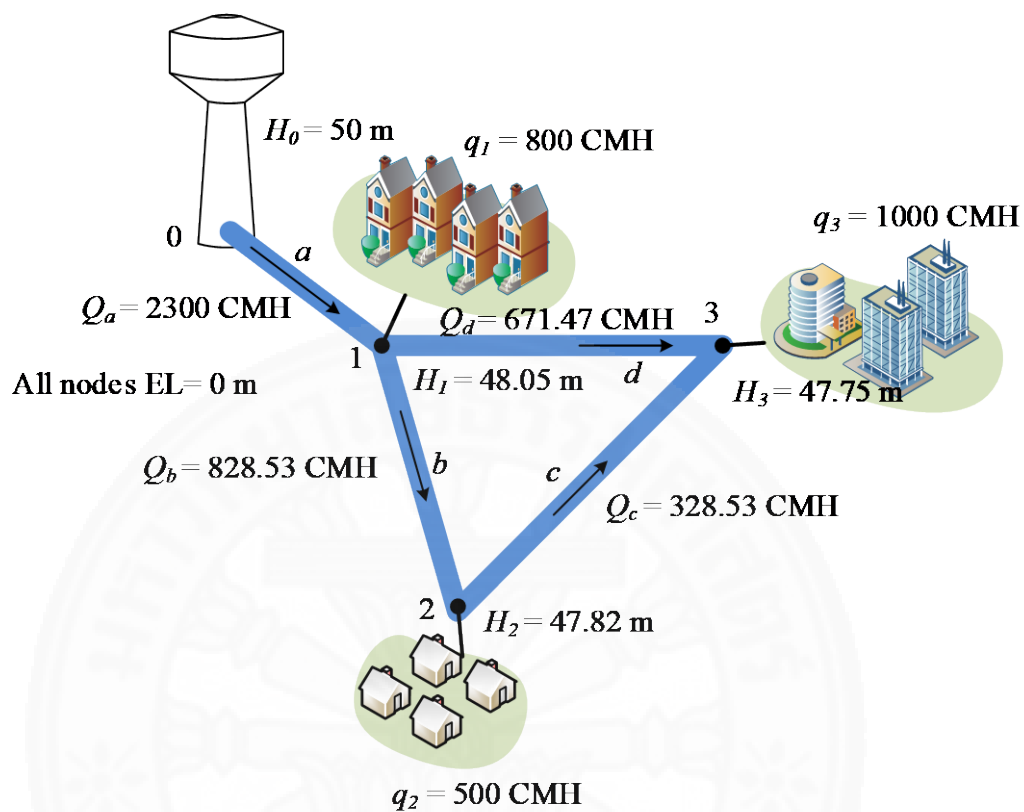
$$\mathbf{H}^{k+1} = -(\mathbf{A}_{21} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}_{11}^{-1} \mathbf{A}_{12})^{-1} (\mathbf{A}_{21} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}_{11}^{-1} (\mathbf{A}_{11}^k \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) + (\mathbf{q} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{Q}^k)) \quad (2.37)$$

จากนั้นทำการวนซ้ำตามระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน^(10,11) โดยผลจากการหาคำตอบโดยระเบียบวิธีของ นิวตัน-ราฟสันสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

Iteration	Q_a	Q_b	Q_c	Q_d	H_1	H_2	H_3	Relative error
1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	1.9042048
2	0.6388889	0.2327625	0.0938736	0.1839041	49.3106739	49.1369642	49.0701770	0.0068206
3	0.6388889	0.2311946	0.0923057	0.1854721	48.5558131	48.3452534	48.2804049	0.0027386
4	0.6388889	0.2305659	0.0916770	0.1861008	48.2538688	48.0285599	47.9644682	0.0010971
5	0.6388889	0.2303141	0.0914253	0.1863525	48.1330910	47.9018811	47.8380890	0.0004391
6	0.6388889	0.2302134	0.0913245	0.1864532	48.0847799	47.8512093	47.7875366	0.0001757
7	0.6388889	0.2301731	0.0912842	0.1864935	48.0654555	47.8309406	47.7673156	0.0000703
8	0.6388889	0.2301570	0.0912681	0.1865097	48.0577257	47.8228331	47.7592271	0.0000281
9	0.6388889	0.2301506	0.0912617	0.1865161	48.0546338	47.8195901	47.7559917	0.0000112
10	0.6388889	0.2301480	0.0912591	0.1865187	48.0533970	47.8182928	47.7546976	0.0000045
11	0.6388889	0.2301469	0.0912581	0.1865197	48.0529023	47.8177740	47.7541799	0.0000018
12	0.6388889	0.2301465	0.0912576	0.1865201	48.0527045	47.8175664	47.7539728	0.0000007

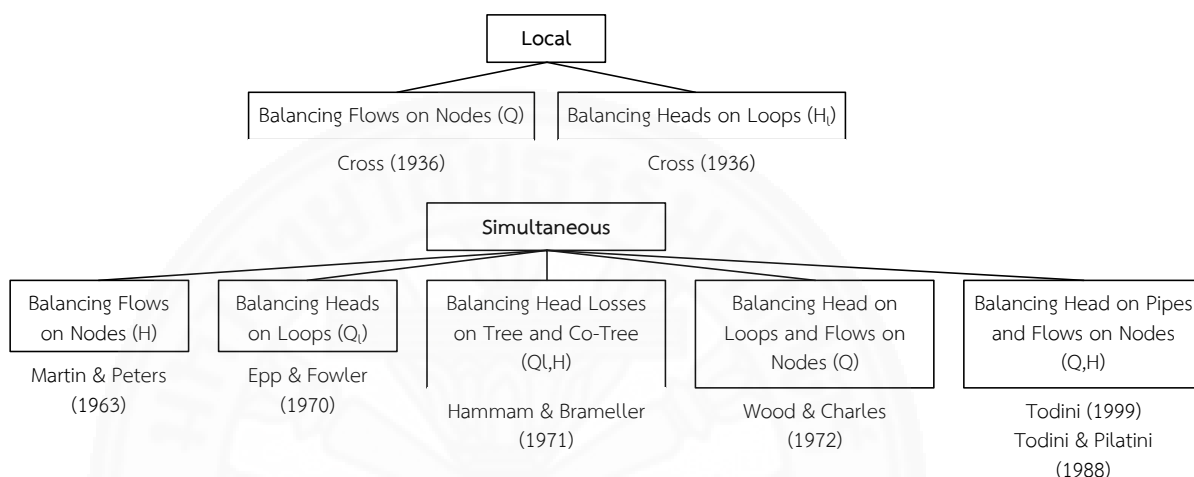
ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

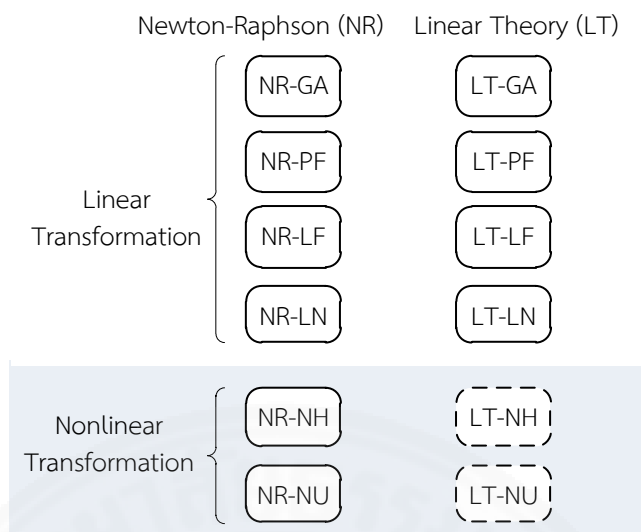
2.4 อัลกอริทึมทางชลศาสตร์ (Hydraulic Algorithm)

มีหลายอัลกอริทึมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาสำหรับคำนวณเซตสมการแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นทางด้านชลศาสตร์ในระบบโครงข่ายการจ่ายน้ำที่เชื่อมต่อกันแบบวงจร (loop)⁽¹²⁾ โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 อัลกอริทึมทางด้านชลศาสตร์

โดยเริ่มแรกใช้การประมาณค่าแบบ local approach ของ Cross⁽¹³⁾ โดยใช้ 1 สมการในเวลานั้นๆ และไม่กี่ปีผ่านมานี้ใช้การประมาณค่าแบบหลายๆ สมการสมการพร้อมกัน โดยใช้การประมาณค่าแบบเชิงเส้นของนิวตัน-ราฟสัน (NR) และทฤษฎีเชิงเส้น (linear theory :LT) ในการแก้สมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับอัลกอริทึมที่ใช้การประมาณค่าของนิวตัน-ราฟสันประกอบไปด้วย วิธีการทางเฮด (head method) ของ Martin และ Peter⁽¹⁴⁾ วิธีการทางอัตราการไหลและวงจร (flow and loop) ของ Wood และ Rayes⁽¹⁵⁾ Epp และ Fowler⁽¹⁶⁾ และ global gradient algorithm ของ Todini และ Pilati⁽⁸⁾ มีเพียง 2 วิธีการที่ใช้การประมาณค่าแบบทฤษฎีเชิงเส้น คือ วิธีการของ Wood และ Charles⁽¹⁷⁾ และ วิธีการของ Isaacs และ Mills⁽¹⁸⁾ ขณะที่วิธีการของ Gupta และ Prasad⁽¹⁹⁾ ใช้การประมาณค่าแบบไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปของ log ที่สามารถใช้การประมาณค่าแบบเชิงเส้นได้



ภาพที่ 2.12 แนวทางในการคำนวณปัญหาทางชลศาสตร์

จากภาพที่ 2.12 แสดงให้เห็นถึงแนวทางในการคำนวณต่างๆ ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับตัวอักษรย่อสองตัวแรก มีความหมายดังนี้

NR คือ การประมาณค่าโดยระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน

LT คือ การประมาณค่าโดยระเบียบวิธีทฤษฎีเชิงเส้น

ส่วนตัวอักษรย่อสองตัวหลังคืออัลกอริทึม มีความหมายดังนี้

GA คือ Global Algorithm

PF คือ Pipe Flow Algorithm

LF คือ Loop Flow Algorithm

LN คือ Loop Node Algorithm ⁽²⁰⁾

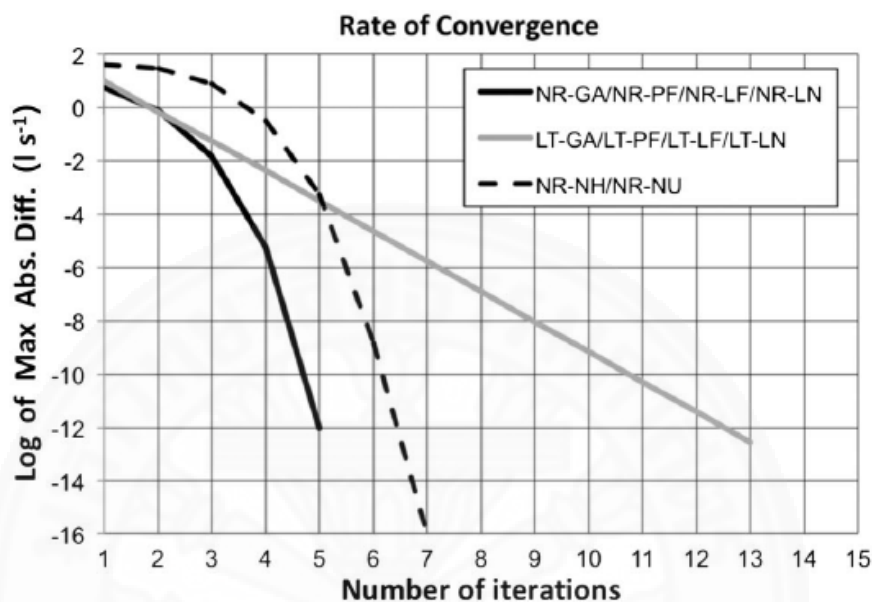
NH คือ Node Head Algorithm

NU คือ Node Head Algorithm ภายใต้การผ่อนปรน (under-relaxation)

ในกลุ่มของ NR อัลกอริทึมทั้ง 4 NR-GA มีความโดดเด่นกว่าแบบอื่น ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

- 1) ไม่ต้องกำหนด loop เมื่อเทียบกับ NR-LN ที่มีขนาดเมตริก $[n;n]$ เท่ากันที่เป็นเมตริกซ์แบบสมมาตรและ มีความหนาแน่นของเมตริกซ์น้อย (sparse metrics)
- 2) NR-GA มี ขนาดเมตริก $[n;n]$ เป็นเมตริกซ์แบบสมมาตรและ มีความหนาแน่นของเมตริกซ์น้อย (sparse metrics) ซึ่งตรงข้ามกับ NR-PF ที่มีขนาดเมตริกซ์ $[p;p]$ และไม่สมมาตรกัน ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า

- 3) แม้ว่า NR-GA จะมีขนาดเมตริกซ์ที่ใหญ่กว่า NR-LF ที่มีขนาด $[L;L]$ เป็นเมตริกซ์แบบสมมาตร ความหนาแน่นน้อย แต่ความหนาแน่นของเมตริกซ์ NR-LF จะขึ้นอยู่กับทางเลือก loop อัลกอริทึมที่กล่าวมานี้สามารถเปรียบเทียบการลู่เข้าหาคำตอบดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 อัตราการลู่เข้าหาคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ

นอกจากจะประเมินจากการลู่เข้าหาคำตอบ (convergence rate) ปัจจัยเพิ่มเติมในการประเมิน คือ ประสิทธิภาพในการคำนวณ โดยมีประเด็นดังต่อไปนี้

- 1) ขนาดของเมตริกซ์ต้องสามารถทำการอินเวอร์ส หรือ factorized ในการคำนวณได้
- 2) เป็นเมตริกซ์สมมาตรหรือไม่
- 3) ความหนาแน่น (จำนวนอีลิเมนต์ที่ไม่เป็น 0) ในเมตริกซ์
- 4) อัตราการลู่เข้าหาคำตอบของอัลกอริทึม (convergent rate)
- 5) ต้องกำหนด loop หรือไม่
- 6) ต้องกำหนดเซตของค่าเริ่มต้นในการทำสมดุลการไหล (flow balancing) ของน้ำหรือไม่
- 7) โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.7

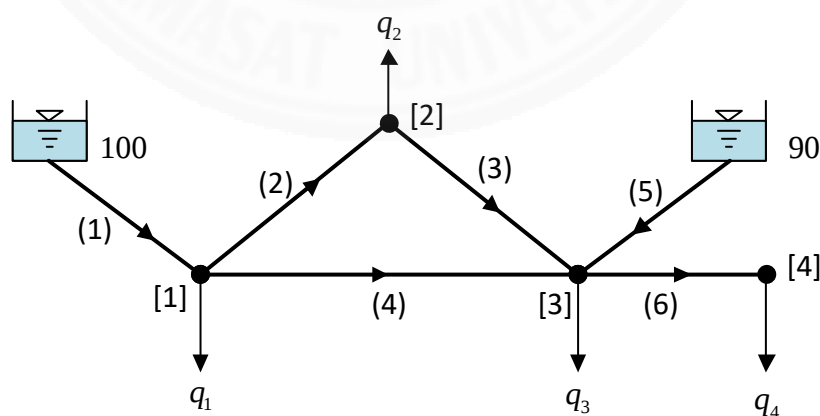
ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของอัลกอริทึมแต่ละชนิด

Algorithm	Unknowns	Matrix size	Matrix symmetric	Matrix density	Solution linear system	Nonlinear convergence rate	Loops required	Initial flows balanced
NR-GA	Q, H	$[n; n]$	Yes	B	A	A	No	No
NR-PF	Q	$[p; p]$	No	A	C	A	Yes	No
NR-LF	Q_l	$[l; l]$	Yes	C	A-B	A	Yes	Yes
NR-LN	Q_l, H	$[n; n]$	Yes	B	A	A	Yes	Yes
LT-GA	Q, H	$[n; n]$	Yes	B	A	B	No	No
LT-PF	Q	$[p; p]$	No	A	C	B	Yes	No
LT-LF	Q_l	$[l; l]$	Yes	C	A-B	B	Yes	Yes
LT-LN	Q_l, H	$[n; n]$	Yes	B	A	B	Yes	Yes
NR-NH	H	$[n; n]$	Yes	B	A	D	No	No
NR-NU	H	$[n; n]$	Yes	B	A	C	No	No

หมายเหตุ: A คือ ดีที่สุด D คือ แย่ที่สุด

การคิดแบบลูบลูบจะมีความยุ่งยากกว่าโดยสามารถเปรียบเทียบได้ดังตัวอย่างดังต่อไปนี้

2.4.1 การใช้ Global Algorithm



ภาพที่ 2.14 ระบบจ่ายน้ำแบบลูบลูบที่มีแหล่งจ่ายน้ำ 2 แหล่ง

จากรูปที่ 2.14 สามารถกำหนดสมการเฮดสูญเสียในท่อแต่ละเส้นได้ดังนี้

$$\text{ท่อ (1)} \quad r_1 Q_1^n - 100 + H_1 = 0$$

$$\text{ท่อ (2)} \quad r_2 Q_2^n - H_1 + H_2 = 0$$

$$\text{ท่อ (3)} \quad r_3 Q_3^n - H_2 + H_3 = 0$$

$$\text{ท่อ (4)} \quad r_4 Q_4^n - H_1 + H_3 = 0$$

$$\text{ท่อ (5)} \quad r_5 Q_5^n - 90 + H_3 = 0$$

$$\text{ท่อ (6)} \quad r_6 Q_6^n - H_3 + H_4 = 0$$

และสามารถกำหนดสมการสมดุลน้ำของแต่ละโหนดได้ดังนี้

$$\text{โหนด [1]} \quad Q_1 - Q_2 - Q_4 - q_1 = 0$$

$$\text{โหนด [2]} \quad Q_2 - Q_3 - q_2 = 0$$

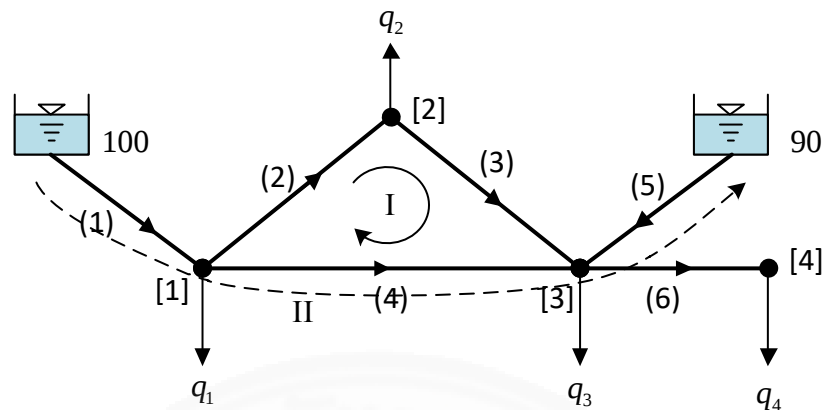
$$\text{โหนด [3]} \quad Q_3 + Q_4 + Q_5 - Q_6 - q_3 = 0$$

$$\text{โหนด [4]} \quad Q_6 - q_4 = 0$$

สมการทั้งหมดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} r_1|Q_1|^{n-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2|Q_2|^{n-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_3|Q_3|^{n-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_4|Q_4|^{n-1} & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_5|Q_5|^{n-1} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_6|Q_6|^{n-1} & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \\ H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 90 \\ 0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = [0]$$

2.4.2 การใช้ Loop flow



ภาพที่ 2.15 ระบบจ่ายน้ำแบบลูปที่มีแหล่งจ่ายน้ำ 2 แหล่ง โดยใช้วิธี Loop flow

สมการสมดุลน้ำที่โหนด

โหนด	[1]	$Q_1 - Q_2 - Q_4 - q_1 = 0$
โหนด	[2]	$Q_2 - Q_3 - q_2 = 0$
โหนด	[3]	$Q_3 + Q_4 + Q_5 - Q_6 - q_3 = 0$
โหนด	[4]	$Q_6 - q_4 = 0$

สมการที่ loop

จำนวน loop ที่ต้องการ $L = P - N = 6 - 4 = 2$

ต้องการ loop ในการคำนวณ 2 loop แต่จากรูปเรามีแค่ 1 loop ดังนั้นต้องสร้าง loop สมมติ (pseudo loop) ขึ้นมาอีก 1 loop

$$\text{Loop I; } r_2 Q_2^n + r_3 Q_3^n - r_4 Q_4^n = 0$$

$$\text{Loop II; } r_1 Q_1^n + r_4 Q_4^n - r_5 Q_5^n - 100 + 90 = 0$$

จากนั้นแก้สมการหาค่าอัตราการไหลในแต่ละท่อ จากนั้นจึงนำอัตราการไหลที่ได้ไปคำนวณหาเฮดในแต่ละ node โดยใช้สมการ

$$H_i - H_j - r_{ij} Q_{ij}^n = 0$$

จากตัวอย่างจะเห็นได้ว่าการคิดแบบ GA ง่ายกว่าการใช้ LF คือไม่ต้องกำหนด loop สมมติขึ้นมาและสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปของการคูณเมตริกซ์ได้ทำให้นำไปเขียนโปรแกรมได้ง่ายกว่า

2.5 ซอฟต์แวร์ทางด้านชลศาสตร์

ระบบการจ่ายน้ำเป็นระบบโครงสร้างทางวิศวกรรมที่ซับซ้อน ซอฟต์แวร์จึงถูกพัฒนาขึ้นมาโดยทั้งจากภาคเอกชน ภาครัฐ และองค์กรไม่แสวงหาผลกำไร สำหรับช่วยในการตัดสินใจในการบริหารจัดการและออกแบบระบบโครงข่ายการจ่ายน้ำ ซอฟต์แวร์เหล่านี้มีความสามารถและจุดประสงค์การใช้งานแตกต่างกันออกไป

2.5.1 ฟรีแวร์ (freeware)

ฟรีแวร์หรือซอฟต์แวร์ที่สามารถดาวน์โหลดได้ฟรีที่ใช้ทางด้านชลศาสตร์มีด้วยกันหลายซอฟต์แวร์ดังนี้

2.5.1.1 AirInPipes

AirInPipes ถูกพัฒนาโดย Agna Para La Vida (APLV) เป็นองค์กรไม่แสวงหาผลกำไรเพื่อช่วยชุมชนในชนบทในการพัฒนาระบบจ่ายน้ำ มีสำนักงานอยู่ในสหรัฐอเมริกาและฝรั่งเศส ปฏิบัติงานอยู่ในอเมริกากลางและโดยเฉพาะในประเทศนิคากัว AirInPipes เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำงานใน Microsoft Excel ขนาด 510 เมกะไบต์ เขียนขึ้นโดยใช้ VBA Macros ซอฟต์แวร์ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยในการออกแบบระบบการจ่ายน้ำแบบจ่ายด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity Flow Water System: GFWS) สำหรับเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและเลือกความยาวท่อระหว่างแหล่งน้ำและถังเก็บน้ำ ซอฟต์แวร์ช่วยในการลดการเกิด air blockage ในแนวเส้นท่อ สามารถดาวน์โหลดฟรีได้จากเว็บไซต์ <http://www.aplv.org/New/en/techresources.shtml>

2.5.1.2 EPANET 2.0

EPANET พัฒนาขึ้นมาโดย Environmental Protection Agencies Water Supply and Water Resources Division ของสหรัฐอเมริกา เป็นซอฟต์แวร์ขนาด 1.34 เมกะไบต์ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows 95/98/NT/XP ซอฟต์แวร์ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อสร้างแบบจำลองทางชลศาสตร์และแบบจำลองทางคุณภาพน้ำในระบบโครงข่ายการจ่ายน้ำที่มีความดัน EPANET 2.0 สามารถใช้ได้กับระบบจ่ายน้ำทุกขนาดและสามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงเวลาได้ สามารถดาวน์โหลดซอฟต์แวร์ได้ฟรีจากเว็บไซต์ <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>

2.5.1.3 DSS-RWS

DSS-RWS (Division Support System – Rural Water Supply) ถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Water Research Commission of South Africa ซอฟต์แวร์เหมาะสำหรับการใช้ในระบบจ่ายน้ำในชุมชนชนบทและการจัดเตรียมงบประมาณและแผนธุรกิจ ซอฟต์แวร์เกิดขึ้นจาก Delphi Shell และยังไม่มี Graphical User Interface (GUI)

2.5.1.4 NeatWork

NeatWork เป็นซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาจาก APLV ด้วยเช่นกัน เป็นโปรแกรมที่พัฒนาจากภาษา JAVA แบบ stand alone โปรแกรม NeatWork ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยออกแบบระบบจ่ายน้ำในชุมชนชนบท โปรแกรมจะช่วยแนะนำขนาดท่อที่เหมาะสมที่มีต้นทุนต่ำสุดตามระดับการจ่ายน้ำที่ต้องการ โปรแกรมยังได้รวบรวมเอาเครื่องมือในการจำลองแบบง่ายในการปรับปรุงการจ่ายน้ำให้ไปถึงผู้ใช้น้ำทุกๆ ราย สามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <http://www.aplv.org/New/en/techresources.shtml>

2.5.1.5 NRWS

NRWS (Nilgiris Rural Water Supply) เป็นซอฟต์แวร์ที่เขียนขึ้นจาก Microsoft Excel ใช้ในการเลือกแหล่งน้ำสำหรับชุมชนในชนบทในเมือง Nilgiris ในประเทศอินเดีย ซอฟต์แวร์ถูกสร้างขึ้นโดย Daniel Olsen แห่ง McMaster University ในปี ค.ศ. 2005 การใช้งานซอฟต์แวร์จะแจ้งไปที่การตกตะกอนและข้อมูลเกี่ยวกับดินในพื้นที่เมือง Nilgiris และไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานโดยทั่วไป สามารถดาวน์โหลดซอฟต์แวร์ได้ฟรีจากเว็บไซต์ <http://www.eng.mcmaster.ca/civil/sustain/downloads.html>

2.5.1.6 Peace-Corps-Design-Template

Peace-Corps-Design-Template เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำงานใน Microsoft Excel ออกแบบโดย Nathan Reents ซึ่งเป็นคนที่เคยทำงานในระบบการจ่ายน้ำใน Peace Corps Volunteer ในประเทศฮอนดูรัส เขาได้ออกแบบโปรแกรมนี้ไว้เพื่อช่วยในการทำงานของเขา โปรแกรมสามารถดาวน์โหลดได้ฟรีทางเว็บไซต์ของ Michigan Technology University <http://www.d80.mtu.edu/Resources.html> โปรแกรมได้เตรียมเครื่องมือในการช่วยเลือกขนาดท่อ อัตราการไหล ปริมาตรถังเก็บน้ำและเครื่องมือพื้นฐานในการทำงานงบประมาณ

ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบขีดความสามารถของฟรีแวร์ทางด้านชลศาสตร์

	Air In Pipes	NeatWork	EPANET	Reet's	GOODwater
คุณสมบัติทั่วไป		*	*		
Stand Alone Program		*	*		
Useful Resources Available			*		
Add-Ons Available					
ความสามารถในการช่วยการออกแบบ					
รายการวัสดุ (Material List)				*	*
Project Scheduling					*
Site Assessment					*
Valve Placement	*		With add-ons		
Pump Modeling			*		
Water Quality Modeling			*		
Conduction Line Design	*		*	*	*
Distribution Network Design		*	*	*	*
Capital Costs Optimizer	*	*			*
Tank Size Calculator				*	*
Airblock Diagnosis	*				*
Pipe Diameter Optimization		*	With add-ons	*	*
Grid System Ability			*		
Post Processing Functionality					
Simulation Capabilities	*	*	*		*
Plan-View Visual Representation			*	*	
Budgeting Tools	*	*		*	*
Report Generator		*	*	*	*
Sustainability Assessment					*

2.5.2 ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์

ซอฟต์แวร์ดังรายการด้านล่างนี้เป็นซอฟต์แวร์ที่มีลิขสิทธิ์ต้องซื้อ ไม่สามารถดาวน์โหลดได้ฟรี ซอฟต์แวร์เหล่านี้มีความซับซ้อนมากกว่าซอฟต์แวร์ที่ได้อธิบายมาในก่อนหน้านี้ โดยมีรายละเอียดของแต่ละซอฟต์แวร์ดังนี้

2.5.2.1 InfoWater

InfoWater มีจุดมุ่งหมายไปที่การออกแบบและการจำลองระบบการจ่ายน้ำในเมืองใหญ่ มีความสามารถในการออกแบบ สอบเทียบ การจำลองคุณภาพน้ำ ตารางการทำงานของโครงข่าย และเครื่องมือเกี่ยวกับการซ่อมบำรุง ซอฟต์แวร์สามารถทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ ArcGIS ได้ ซอฟต์แวร์สามารถจำลองการปนเปื้อนของสารเคมีและเชื้อโรคต่างๆ การเคลื่อนที่ของอนุภาคและการพัดพาของตะกอนต่างๆ ในน้ำ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ราคาของซอฟต์แวร์ขึ้นอยู่กับขนาดของโครงข่าย ถ้าไม่เกิน 100 link ราคา 1,000 เหรียญสหรัฐ ถ้าไม่จำกัดจำนวน Link ราคา 14,000 เหรียญสหรัฐ

2.5.2.2 KY Pipe

KY Pipe เป็นซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางชลศาสตร์โดยสามารถออกแบบจ่ายน้ำในชนบทและในเมืองได้ ซอฟต์แวร์มีความสามารถในการออกแบบขนาดท่อ ความต้องการน้ำ การไหลของน้ำในการดับเพลิง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และหาความเหมาะสมในการทำงานของปั๊ม ซอฟต์แวร์สามารถทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ AutoCAD และ GIS ได้ ซอฟต์แวร์ใช้การวิเคราะห์คุณภาพน้ำของ EPANET

2.5.2.3 H2OMap Water

H2OMap Water เป็นโปรแกรมทางด้านชลศาสตร์และคุณภาพน้ำ พลังงาน และการบริหารจัดการสาธารณูปโภค และการวางแผนทางธุรกิจ เป็นโปรแกรมที่ใช้ระบบ GIS แบบ standalone

2.5.2.4 HydraulCAD

HydraulCAD โปรแกรมมุ่งเน้นไปที่การจำลองทางชลศาสตร์ รวมไปถึงการออกแบบ การวิเคราะห์ และการจำลองระบบโครงข่ายการจ่ายน้ำ โปรแกรมทำงานร่วมกับ AutoCAD ได้ ราคาเริ่มต้นที่ 1,800 เหรียญสหรัฐ จนถึง 6,600 เหรียญสหรัฐ (ไม่จำกัดจำนวนท่อ)

2.5.2.5 AFT Fathom

AFT Fathom มีจุดมุ่งหมายในการจำลองพลศาสตร์ของไหล ช่วยในการคำนวณหาความดันสูญเสีย (pressure drop) และการไหลในระบบท่อจ่ายน้ำ การเลือกขนาดท่อและเครื่องสูบน้ำ และการถ่ายเทความร้อน ซอฟต์แวร์มีโมดูลเพิ่มเติมสามารถจำลองพฤติกรรมของระบบที่เป็นพลศาสตร์ (dynamic) ได้ สามารถหาตัวแปรที่เป็น input ที่ไม่ทราบค่าได้

2.5.2.6 InfoWorks

InfoWorks ช่วยในการวิเคราะห์ทางชลศาสตร์และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ (spatial analysis) และการบริหารจัดการแบบจำลองโครงข่ายการจ่ายน้ำ

2.5.2.7 Synergee

Synergee เป็นซอฟต์แวร์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ระบบท่อแบบปิด ตัวคุมค่าความดัน ประตุน้ำ เครื่องสูบน้ำ อ่างเก็บน้ำ ถังเก็บน้ำ บ่อน้ำ และหลุมเจาะ (borehole) ซอฟต์แวร์มีมอดูลเพิ่มเติมสามารถแยกแยะพื้นที่ วิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ การบริหารจัดการระบบเป็นส่วนๆ และการสอบเทียบแบบจำลองได้

2.5.2.8 WaterGEMS

WaterGEMS เป็นโปรแกรมสำหรับสร้างแบบจำลองระบบจ่ายน้ำที่สามารถทำงานในซอฟต์แวร์ ArcGIS AutoCAD หรือ MicroStation หรือทำงานด้วยตัวซอฟต์แวร์เองได้ โดยรวมเอาการวิเคราะห์การจำลองการไหลในกรณีที่มีเหตุเพลิงไหม้ (fire flow) การจำลองคุณภาพน้ำ การวิเคราะห์วิกฤตการณ์และต้นทุนด้านพลังงานและการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธี genetic algorithm WaterGEMS เป็นซอฟต์แวร์ที่มีขีดความสามารถมากกว่า WaterCAD

2.5.2.9 WaterCAD

WaterCAD เป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์มี feature ทางด้านชลศาสตร์และคุณภาพน้ำครบถ้วน พัฒนาขึ้นมาโดย Bentley System Incorporated ราคาขายขึ้นอยู่กับจำนวนท่อที่ใช้งาน ถ้าจำนวนท่อไม่เกิน 10 ท่อน ราคา 176 เหรียญสหรัฐ ถ้าท่อไม่เกิน 1,000 ท่อน ราคา 4,496 เหรียญสหรัฐ ในส่วนตัวเลือกเพิ่มเติมอื่นๆ เครื่องมือในการออกแบบ สอบเทียบ การตรวจหารอยรั่ว การหาค่าที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่องสูบน้ำ การออกแบบโดยอัตโนมัติ การทำงานร่วมกับระบบ SCADA และ skeletonization modules ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มอีก 4,000 – 20,000 เหรียญสหรัฐ WaterCAD ได้รับการออกแบบมาเพื่อเชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD

2.5.2.10 WaterCADE

WaterCADE (Water Computer Aided Design and Estimation) เป็นเครื่องมือในการปรับปรุงแผนการทำงานของเครื่องสูบน้ำและระบบจ่ายน้ำ เป็นซอฟต์แวร์ขนาด 64 เมกะไบต์ ใช้ VBA interface เชื่อมต่อเข้ากับ Microsoft Access database ข้อมูลของซอฟต์แวร์สามารถดูได้จากเว็บไซต์ <http://www.seuf.org/html/watercade.html> แต่ไม่มีข้อมูลว่าจะสามารถหาโปรแกรมได้จากไหน ซอฟต์แวร์ถูกออกแบบมาเพื่อรัฐ Kerala ในประเทศอินเดีย

2.5.3 ข้อดีและข้อด้อยของ EPANET

ข้อดีของ EPANET นี้เมื่อเทียบกับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ คือ การเชื่อมต่อเข้ากับอินเทอร์เน็ต Optimization module และระบบฐานข้อมูล ดังแสดงรายละเอียดการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2.9 แต่ EPANET ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็น open source ซึ่งสามารถดาวน์โหลดฟรีและยังสามารถนำมาพัฒนาต่อยอดได้

2.5.3.1 ข้อดีของ EPANET

- 1) Open source สามารถนำมาพัฒนาต่อได้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย เหมือนกับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์
- 2) เหมาะสำหรับใช้ในงานวิจัยซึ่งสามารถนำมาแก้ไขหรือดัดแปลงเองได้ เพื่อให้เหมาะสมกับโครงข่ายการจ่ายน้ำของแต่ละแห่ง

2.5.3.2 ข้อด้อยของ EPANET

- 1) ไม่สามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันในระบบได้ เช่น Water Hammer Pipe bursting
- 2) ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมจริงของวาล์วกักเก็บได้
- 3) ไม่สามารถจำลองผลลัพธ์ในกรณีที่มีอากาศเข้ามาในระบบท่อได้
- 4) ไม่สามารถวิเคราะห์ต้นทุนได้
- 5) ไม่มีความสามารถเลือกวัสดุท่อได้ จำเป็นต้องใส่คุณสมบัติต่างๆ ของท่อเอง เช่น ความขรุขระของท่อ

ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของ EPANET กับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ทางด้านชลศาสตร์

Criterion	EPANET	Aquis	SynerGee	InfoWater	WaterCAD
Simulation Modeling	*	*	*	*	*
GIS Interface (DST Part)		*	*	*	*
Incorporate Real-Time Field Data		*	*		*
Accessible to Field Engineers	*	*	*	*	*
Lightweight Access					
Collaborative Decision Making					
Real-time Model Availability in the Field					
On-Demand Resource Access					
Open Source	*				
Desktop App	*	*	*	*	*
Database Access		*	*	*	*
Optimization Module		*	*		*

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซอฟต์แวร์ EPANET เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถดาวน์โหลดมาใช้งานได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย และยังเป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ซ(Open source software) สามารถนำมาพัฒนาต่อยอดได้ ด้วยเหตุนี้ซอฟต์แวร์ EPANET จึงถูกนำมาใช้ในงานวิจัยกันอย่างกว้างขวางดังนี้

2.6.1 การหาค่าความขรุขระของผิวท่อด้านในของท่อต่างชนิดกันหลังจากใช้งาน

เมื่อท่อผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลานานแล้วผิวท่อด้านในย่อมมีความขรุขระเปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงความขรุขระของผิวท่อด้านในขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของวัสดุที่นำมาผลิตท่อ อายุการใช้งาน อัตราการไหลของน้ำ คุณภาพน้ำ เป็นต้น⁽²¹⁾ โดยงานวิจัยของ Echávez⁽²²⁾ ได้ทำการหาค่าความขรุขระของผิวท่อด้านในโดยแยกตามชนิดท่อและอายุการใช้งานที่แตกต่างกันที่มีความสัมพันธ์ทั้งแบบเชิงเส้น (linear) และไม่เชิงเส้น (nonlinear) โดยใช้อัลกอริทึมของ Levenberg–Marquardt (Levenberg–Marquardt Algorithm; LMA) ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยเทียบผลจากความต่างระหว่างค่าเฮดน้ำที่ได้จากการวัดจริงและค่าเฮดน้ำที่ได้จากผลคำนวณของแบบจำลอง โดยฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function; OF) คือ ผลต่างระหว่างค่าเฮดน้ำที่ได้จากการวัดจริงและค่าเฮดน้ำที่ได้จากแบบจำลอง

$$OF = \sum_{i=1}^n (H_i^0 - H_i^P)^2 \quad (2.38)$$

เมื่อ OF คือ OF ที่จะทำการหาค่าที่น้อยที่สุด

H_i^0 คือ H_i^P ความดันที่เก็บค่ามาและความดันที่ทำนายใน node i

n คือ จำนวนจุดวัดความดันที่เก็บข้อมูลมา (ในกรณีนี้เท่ากับ 25 จุด)

เมื่อท่อผ่านการใช้งานไปแล้วก็ย่อมมีความขรุขระของผิวท่อที่เปลี่ยนแปลงไป จึงต้องทำการปรับค่าความขรุขระของท่อใหม่โดยการสอบเทียบ ในงานวิจัย Echávez นี้ระบบการจ่ายน้ำมีท่อกว่าพันท่อน มีอายุการใช้งานตั้งแต่ 0-41 ปี ส่วนใหญ่เป็นท่อเหล็กหล่อ (81% ของความยาวท่อทั้งหมด) ส่วนที่เหลือเป็น ท่อพลาสติกและเหล็กกล้า อย่างละ 11% และ 8% ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 รายละเอียดท่อแบ่งตาม ชนิดวัสดุ ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง และอายุการใช้งาน

อายุการใช้ งาน (ปี)	วัสดุท่อ					
	เหล็กหล่อ		พลาสติก		เหล็กกล้า	
	ความยาว ทั้งหมด (ม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง เฉลี่ย (มม.)	ความยาว ทั้งหมด (ม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง เฉลี่ย (มม.)	ความยาว ทั้งหมด (ม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง เฉลี่ย (มม.)
0-1	10	150	2,043	160		
2-3	490	230	3,000	155		
4-6	2,048	166	4,245	109		
19-21	470	150				
24-25	13,556	170			2,832	458
26-27	6,740	200			375	360
28-30	1,783	335			1,150	330
31-32	35,223	206			2,350	500
33-37	4,370	185				
38-41	5,580	140				
รวม	70,270		9,287		7,314	

ในการประมาณค่าความขรุขระของท่อใช้ฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของท่อ Echávez ได้เสนอไว้ว่าความขรุขระที่ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของท่อ ปกติประมาณโดยใช้การเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามเวลา

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + at \quad (2.39)$$

เมื่อ ε_0 = ความขรุขระของท่อใหม่ (มม.)

a = สัมประสิทธิ์ (มม. /ปี)

t = เวลา (ปี)

ค่าสัมประสิทธิ์ a อยู่ในช่วง 0.061-2.13 มม./ปี ขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำ วัสดุของท่อ และปัจจัยอื่นๆ จากการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าความขรุขระที่ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของท่อน่าจะมีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) ด้วย โดยเราสามารถหาฟังก์ชันเชิงเส้นและฟังก์ชันไม่เชิงเส้นได้ด้วยระดับที่แตกต่างกันของการไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับความขรุขระของท่อ ε นำมาใช้ในการหาแฟกเตอร์ความเสียดทาน (friction factor) ในสูตรคำนวณของ Darcy-Weisbach ดังต่อไปนี้

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\max} - (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}) \left[(t_{\max} - t_i) / (t_{\max} - t_{\min}) \right]^b \quad (2.40)$$

เมื่อ

ε_i = ความขรุขระของท่อ i (มม.)

$\varepsilon_{\min}$ และ $\varepsilon_{\max}$ = คือค่าความขรุขระต่ำสุด และ สูงสุด ที่สอดคล้องกันกับอายุการใช้งานท่อน้อยสุด และมากที่สุด (มม.)

$t_{\min}$ และ $t_{\max}$ อายุการใช้งานน้อยสุด และมากที่สุดของท่อในระบบการจ่ายน้ำ (ปี)

ใช้การประมาณค่าแบบเดียวกันกับ Hazen-Williams C-factor

$$C_i = C_{\max} - (C_{\max} - C_{\min}) \left[(t_{\max} - t_i) / (t_{\max} - t_{\min}) \right]^b \quad (2.41)$$

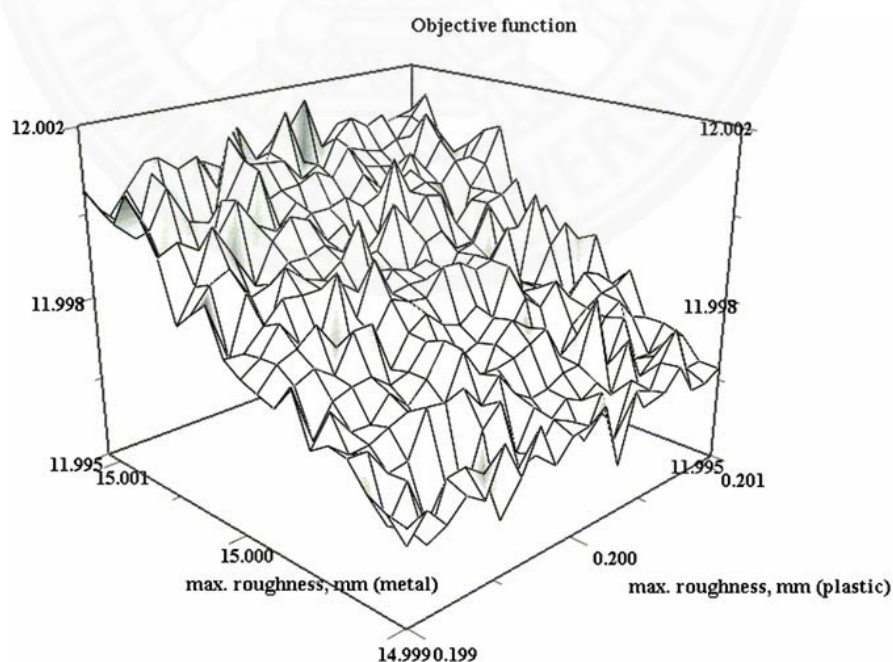
เมื่อ C_i คือ Hazen-Williams C-factor ของท่อ i

ดังนั้น เราจะมีตัวแปร 3 ตัวคือ $\varepsilon_{\min}$, $\varepsilon_{\max}$ (หรือ $C_{\min}$, $C_{\max}$) และเลขยกกำลัง b โดยแบ่งท่อออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ท่อโลหะและท่อพลาสติก โดยกำหนด $\varepsilon_{\min}$ ของท่อโลหะและท่อพลาสติกเท่ากับ 0.26 มม. และ 0.002 มม. ตามลำดับ แล้วหาค่าที่เหลือ คือ $\varepsilon_{\max}$ และเลขยกกำลัง b โดยใช้อัลกอริทึมของ Levenberg-Marquardt โดยในการหาค่า $\varepsilon_{\max}$ และเลขยกกำลัง b ใช้ความพยายามถึง 4 ครั้ง โดยมีรายละเอียดดังตารางด้านล่างนี้

ตารางที่ 2.11 รายละเอียดในการหาค่า $\varepsilon_{\max}$ และเลขยกกำลัง b

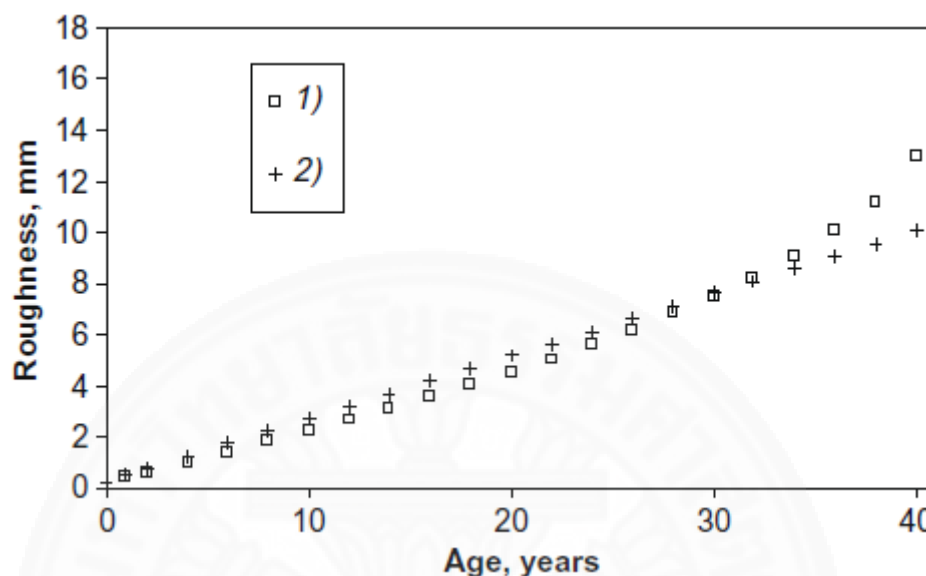
ครั้งที่	1	2	3	4
แบ่งกลุ่มท่อ	2	2	3	2
แบ่งกลุ่มท่อ	โลหะ, พลาสติก	โลหะ, พลาสติก	เหล็กหล่อ, เหล็กกล้า, พลาสติก	โลหะ, พลาสติก
$\varepsilon_{\min}$	0.26, 0.002	0.26, 0.002	0.26, 0.26, 0.002	0.26, 0.002
b	ไม่กำหนดค่า	1, 1	1, 1	ไม่กำหนดค่า
อัลกอริทึมที่ใช้	LMA	LMA+Trial&Error	LMA	LMA+Trial&Error
ผลลัพธ์	ล้มเหลว	ล้มเหลว	ล้มเหลว	สำเร็จ

จากตารางจะเห็นว่าความพยายามสามครั้งแรกไม่ประสบผลสำเร็จเนื่องจากการใช้ step size ที่เล็กเกินไป ทำให้ไม่สามารถหลุดจากช่วงที่เป็นค่าต่ำสุดเฉพาะจุด(local minimum) ได้ เนื่องจากค่าฟังก์ชันมีการแกว่งดังจะเห็นได้จากพื้นผิวของผลการตอบสนอง(response surface)ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.16 พื้นผิวของผลการตอบสนองของฟังก์ชัน

ผลลัพธ์ที่ได้มี 2 เซ็ต คือ เซ็ตที่ 1 $OF = 6.80$, $\varepsilon_{\max} = 15.317$ มิลลิเมตร, $b = 0.499$ เซ็ตที่ 2 $OF = 0.681$, $\varepsilon_{\max} = 10.3$ มิลลิเมตร, $b = 1.0$



ภาพที่ 2.17 ความขรุขระที่ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของท่อตามเซตของตัวแปรที่ต่างกัน

(1) $\varepsilon_{\max} = 15.3$, $b = 0.55$, $OF = 6.80$ และ (2) $\varepsilon_{\max} = 10.3$, $b = 1.0$, $OF = 6.81$

ความแปรปรวนแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นแตกต่างกันไม่มากนัก สำหรับท่อที่มีอายุการใช้งานอยู่ในช่วง 0-30 ปี และยังสามารถใช้กับอายุการใช้งาน 30-32 ปี เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากท่อส่วนใหญ่ที่มีอายุการใช้งาน 31-32 ปี (ดังข้อมูลในตารางที่ 2.10) อย่างไรก็ตามความแตกต่างจะสูงที่อายุการใช้งาน 38-41 ปี เนื่องจากความยาวท่อทั้งหมดที่มีอายุการใช้งานในช่วงนี้มีค่อนข้างมาก (ดังข้อมูลในตารางที่ 2.10)

ในการใช้งานอัลกอริทึมของ Levenberg–Marquardt ควรใช้ Step size ที่ไม่เล็กเกินไป ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวแปร ในกรณีนี้แนะนำให้ใช้ step size ที่มากกว่า 0.01% จากขนาดของตัวแปร การประมาณค่าความขรุขระที่ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งาน โดยฟังก์ชันที่มีจำนวนของตัวแปรน้อยๆ จะง่ายกว่าการจัดกลุ่มตามอายุการใช้งาน การใช้งานอัลกอริทึมของ Levenberg–Marquardt ร่วมกับอัลกอริทึมแบบลองผิดลองถูกและพื้นผิวผลการตอบสนองทำให้เห็นภาพได้ชัดเจนขึ้นและทำงานง่ายขึ้น

2.6.2 การพัฒนาแบบจำลองทางศาสตร์ของระบบโครงข่ายท่อจ่ายน้ำ

ในการแก้ปัญหาทางศาสตร์นอกเหนือจากวิธีของ Todini และ Pilati แล้วยังมีวิธีการอื่นอีกหลายวิธีดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4 นอกจากนี้ยังมีศึกษาการใช้ทฤษฎี Extended Linear Graph Theory (ELGT) ⁽²³⁾ เทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากซอฟต์แวร์ EPANET และเทคนิคการประมาณค่าอื่นๆ ในการจำลองการไหลในระบบจ่ายน้ำช่วงเวลากว้างๆ (extended period simulation : EPS) โดเมนหลักของการ ELGT คือ ท่อแต่ละท่อนในโครงข่ายคือส่วนหนึ่งของกราฟเส้น โดยเฮดลออสที่ผ่านท่อ i คือ

$$h_i = r_i q_i^\alpha \quad (2.42)$$

เมื่อ r_i คือ ค่าคงที่ความขรุขระของท่อ i

q_i คือ อัตราการไหลที่ไหลผ่านท่อ i

และ α คือ เลขยกกำลัง

สมการที่ 2.42 ทำให้อยู่ในรูปเชิงเส้นสำหรับท่อ i ได้ดังนี้

$$h_i = (r \times q_i^{\alpha-1}) q_i \quad (2.43)$$

หรือ จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$q_i = k_i \times h_i \quad (2.44)$$

เมื่อ $k_i = 1/(r_i \times q_i^{\alpha-1})$ คือ stiffness factor (อินเวอร์สของความต้านการไหล inverse of flow resistance) Component matrix คือ

$$[q_c] = [k] \times [h_c] \quad (2.45)$$

เมื่อ $[q_c]_{\{p|1\}}$ คือ เวกเตอร์ของการไหลผ่านโหนด $[k]_{\{p|p\}}$ เมตริกซ์ทแยงมุมของ stiffness factor ของท่อ และ $[h_c]_{\{p|1\}}$ คือ เวกเตอร์ของเฮดลออสที่ผ่านท่อ

ใช้การจัดรูปแบบกราฟเส้น และกฎของ Kirchhoff (Kirchhoff's law) ผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้ารอบวงจรปิดมีค่าเท่ากับ 0 สมการวงจรเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[S]_{\{no\ of\ pipes \times no\ of\ nodes\}}$$

ค่าในแถวของเมตริกซ์ S (pipe) ยึดตามหลักดังต่อไปนี้

- 1) ป้อนค่า 1 มีทิศทางไหลเข้า
- 2) ป้อนค่า -1 มีทิศทางไหลออก
- 3) ป้อนค่า 0 ไม่เกี่ยวข้อง

จัดรูปสมการที่ผ่านมา พบว่า

$$[h_c] = [-S] \times [h_t] \quad (2.46)$$

เมื่อ h_t คือ เสดที่โหนด และ/หรือ การไหลที่โหนด

จาก fundamental cut set equations และ orthogonality of cut set and circuit matrices จะได้

$$[I][q_t] + [S]^T [k][S][h_t] = 0 \quad (2.47)$$

หรือจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$[K]_{n \times n} [h_t] = -[I][q_t] \quad (2.48)$$

$$[K]_{n \times n} = [S]^T [k][S] \quad (2.49)$$

เมื่อ $[h_t]$ คือ เวกเตอร์เฮดของโหนด และ $[q_t]$ คือ เวกเตอร์การไหลของโหนด (demand หรือ supply) ของโครงข่ายท่อ

อย่างไรก็ตาม สำหรับการรวมกันใดๆ ของโหนดที่รู้การไหลและเฮด สมการเช่นเดียวกันนี้สามารถนำมาใช้ได้ ถ้าจับย้ายได้เล็กน้อย ตัวแปรที่ทราบค่าทั้งหมด คือ nodal heads (fixed grade nodes) and/or nodal flows ถูกย้ายไปด้านขวามือของสมการที่ 2.48

การหาคำตอบที่ถูกต้อง สมการที่ 2.48 จะต้องถูกแก้โดยวิธีการวนซ้ำ ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน (NR) เป็นระเบียบวิธีที่ทราบกันดีว่าลู่เข้าหาคำตอบได้เร็ว ถ้าหากกำหนดเวกเตอร์เริ่มต้นที่ดี

ด้วยเหตุนี้วิธีการหาคำตอบจึงไม่ขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้น ฟังก์ชันในการปรับค่า (update) การไหลผ่านท่อ สำหรับการวนซ้ำในรอบต่อไป ที่แนะนำคือ

$$q_{wij} = q_{wij-1}^{\beta} \times q_{cij}^{1-\beta} \quad (2.50)$$

เมื่อ q_{wij} คือ อัตราการไหลผ่านท่อ i ที่ถูกถ่วงน้ำหนัก ในรอบการทำซ้ำ j
 q_{wij-1} คือ อัตราการไหลผ่านท่อ i ที่ถูกถ่วงน้ำหนัก ในรอบการทำซ้ำ $j-1$
 q_{cij} คือ อัตราการไหลผ่านท่อ i ที่ได้จากสมการ (7) ในรอบการทำซ้ำที่ j
 และ β คือ เลขยกกำลัง (เท่ากับ 0.45)

ในบทความอื่นๆ มีเทคนิคการถ่วงน้ำหนักอัตราการไหล (q_w) หลายวิธี ดังนี้

Muir ⁽²⁴⁾ แนะนำว่าจากการทำซ้ำตั้งแต่รอบที่ 2 ขึ้นไป ค่า q_w ควรจะใช้รากที่สองของผลคูณ (product) ของค่าที่สมมติไว้และค่าที่ได้จาก Q

$$q_{wij} = q_{wij-1}^{0.5} \times q_{cij}^{0.5} \quad (2.51)$$

Wood and Charles ⁽¹⁷⁾ แนะนำว่าจากการทำซ้ำตั้งแต่รอบที่ 2 ขึ้นไป ค่า q_w ควรใช้ค่าเฉลี่ยจากค่า Q ที่ได้ในรอบการทำซ้ำก่อนหน้านี้ 2 รอบ

$$q_{wij} = (q_{cij-2} + q_{wij-1})/2 \quad (2.52)$$

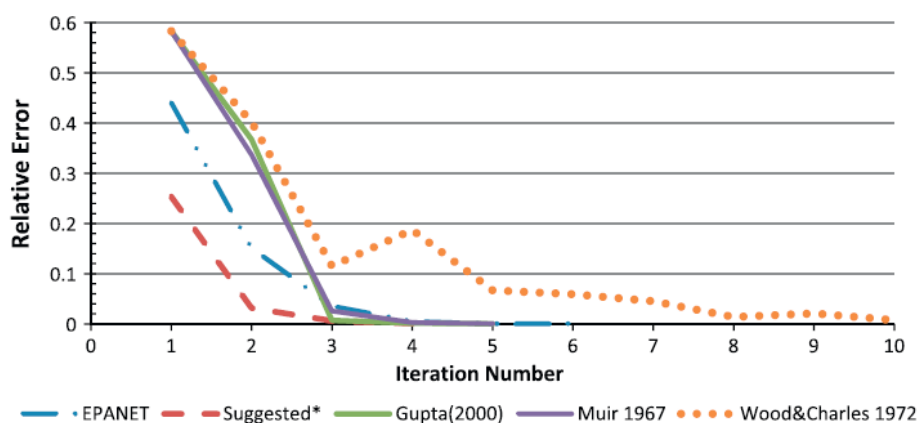
เมื่อ q_{cij-2} คือ อัตราการไหลที่คำนวณจาก ท่อ i ในรอบการทำซ้ำที่ $(j-2)$

Gupta and Prasad ⁽¹⁹⁾ แนะนำให้แทนค่าสมการ $q_{wij} = q_{wij-1}^{\beta} \times q_{cij}^{1-\beta}$ ในการทำซ้ำรอบแรกโดยใช้

$$q_{wij} = q_{cij} \quad (2.53)$$

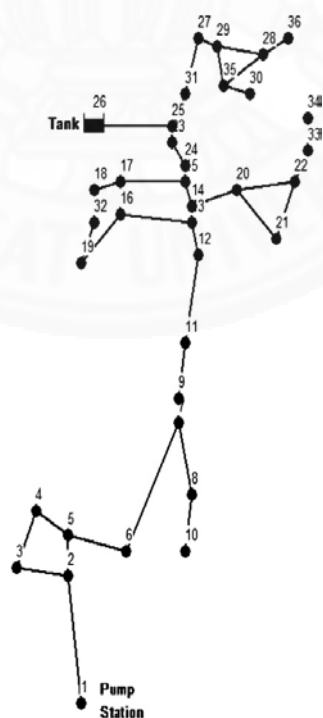
โดยในรอบการทำซ้ำครั้งที่ 2 ขึ้นไปให้ใช้สมการ $q_{wij} = q_{wij-1}^{\beta} \times q_{cij}^{1-\beta}$

ซึ่งผลลัพธ์ของเทคนิคการถ่วงน้ำหนักแต่ละวิธีแสดงได้ดังภาพที่ 2.18 วิธีการที่ได้แนะนำไปมีความผิดพลาดที่น้อยที่สุดในการทำซ้ำครั้งแรก และยังทำให้มีจำนวนรอบการทำซ้ำน้อยที่สุด



ภาพที่ 2.18 แสดงอิทธิพลของสมการการไหลที่ถูกถ่วงน้ำหนักด้วยความผิดพลาดสัมพัทธ์ต่อรอบการทำงานซ้ำ

เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่าง ELGT และ EPANET โดยใช้การจำลองบนโครงข่ายการจ่ายน้ำของฟลอริดา ดังภาพที่ 2.18 พบว่าได้ผลใกล้เคียงกัน (ดังข้อมูลในตารางที่ 2.12 และ 2.13) แม้ว่า ELGT จะมีความผิดพลาดสัมพัทธ์มากกว่า EPANET ในการวนซ้ำรอบแรกๆ แต่ ELGT จะลู่เข้าหาคำตอบอย่างรวดเร็ว ทำให้มีรอบการทำงานซ้ำที่น้อยกว่า EPANET (ดังข้อมูลในตารางที่ 2.14)



ภาพที่ 2.19 โครงข่ายการจ่ายน้ำของฟลอริดา

ตารางที่ 2.12 แสดงการเปรียบเทียบการไหลในท่อระหว่าง EPANET และ ELGTnet

Pipe	ELGTnet flow	EPANET flow	Pipe	ELGTnet flow	EPANET flow	Pipe	ELGTnet flow	EPANET flow
ID	(L/s)	(L/s)	ID	(L/s)	(L/s)	ID	(L/s)	(L/s)
1	42.05	42.05	15	22.41	22.41	29	2.86	2.86
2	34.59	34.59	16	5.511	5.51	30	1.51	1.51
3	6.82	6.82	17	1.01	1.01	31	0.87	0.87
4	5.71	5.71	18	2.44	2.44	32	0.14	0.14
5	5.07	5.07	19	1.86	1.86	33	0.23	0.23
6	39.03	39.03	20	0.27	0.27	34	0.12	0.12
7	38.63	38.63	21	1.47	1.47	35	-1.08	-1.08
8	1.11	1.11	22	3.81	3.81	36	0.18	0.18
9	37.20	37.20	23	1.16	1.16	37	0.23	0.23
10	0.39	0.39	24	-0.11	-0.11	38	0.05	0.05
11	36.09	36.09	25	1.14	1.14	39	0.079	0.079
12	33.33	33.33	26	20.37	20.37	40	-16.39	-16.39
13	32.06	32.06	27	21.24	21.24	Max diff (L/s)		0.0009
14	26.38	26.39	28	19.74	19.74	Relative diff%		0.0023

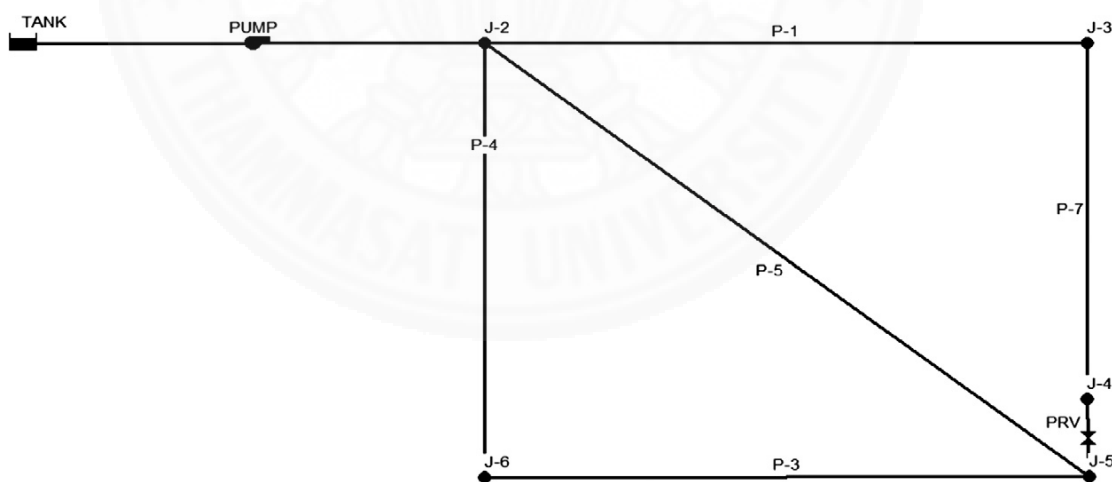
ตารางที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบความดันของ node ระหว่าง EPANET และ ELGTnet

Node	ELGTnet pressure	EPANET pressure	Node	ELGTnet pressure	EPANET pressure	Node	ELGTnet pressure	EPANET pressure
ID	(m)	(m)	ID	(m)	(m)	ID	(m)	(m)
1	96.09	96.09	14	90.81	90.81	27	90.57	90.57
2	94.67	94.67	15	90.75	90.75	28	90.56	90.56
3	94.48	94.48	16	90.76	90.76	29	90.56	90.56
4	94.35	94.35	17	90.74	90.74	30	90.56	90.56
5	94.34	94.34	18	90.74	90.74	31	90.57	90.57
6	93.72	93.72	19	90.75	90.75	32	90.74	90.74
7	92.35	92.35	20	90.80	90.80	33	90.79	90.79
8	92.35	92.35	21	90.79	90.79	34	90.79	90.79
9	92.17	92.17	22	90.79	90.79	35	90.56	90.56
10	92.35	92.35	23	90.62	90.62	36	90.56	90.56
11	91.85	91.85	24	90.71	90.71			
12	91.12	91.12	25	90.57	90.57	Max diff (m)		0.0060
13	90.91	90.90	26	90.55	90.55	Relative diff%		0.0013

ตารางที่ 2.14 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของ EPANET และ ELGTnet ในโครงข่ายของฟลอริดา

Florida network		
	EPANET	ELGTnet
Time (s)	0.796	0.18
No of iterations	7	4
$T1$	0.9319	86.388
$T2$	0.042347	0.0564
$T3$	0.010643	0.0073
$T4$	0.00213	1×10^{-4}
$T5$	0.0009	
$T6$	1.6×10^{-3}	
$T7$	7×10^{-4}	
Max H diff (m)	0.00597	
Max Q diff (L/s)	9×10^{-4}	

เมื่อลองเปรียบเทียบผลจากการจำลองของ ELGT และ EPANET ในโครงข่ายที่สมมุติขึ้นที่มีอุปกรณ์ที่พิเศษต่างๆ เพิ่มเติมเข้ามา เช่น pump PRV ดังภาพที่ 2.20 พบว่าผลลัพธ์ยังคงเป็นไปตามทิศทางเดิม



ภาพที่ 2.20 โครงข่ายที่สมมุติขึ้นซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบของโครงข่ายที่พิเศษ

ตารางที่ 2.15 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของ EPANET และ ELGTnet โครงข่ายที่สมมุติขึ้น

Hypothetical special network		
	EPANET	ELGTnet
Time (s)	0.906	0.51
No of iterations	6	5
T1	0.692	6.995
T2	0.414	0.309
T3	0.0174	0.3233
T4	0.004	0.00155
T5	0.0026	9.22×10^{-5}
T6	1×10^{-6}	
Max H diff (m)	0.04	
Max Q diff (L/s)	0.1	

ในขั้นตอนสุดท้ายได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองอีกครั้งบนระบบจ่ายน้ำขนาดใหญ่ที่เป็นโครงข่ายการจ่ายน้ำจริงของ Madenet Nasr ดังแสดงในภาพที่ 2.21 ผลลัพธ์ที่ได้ก็ยังคงเป็นไปในทิศทางเดิม คือ แม้ว่า ELGT จะมีความผิดพลาดสัมพัทธ์มากกว่า EPANET ในการวนซ้ำรอบแรกๆ แต่ ELGT จะลู่เข้าหาคำตอบอย่างรวดเร็ว ทำให้มีรอบการทำซ้ำที่น้อยกว่า EPANET



ภาพที่ 2.21 แผนผังข่ายการจ่ายน้ำของ Madenet Nasr

ตารางที่ 2.16 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของ EPANET และ ELGTnet ในโครงข่าย Madenet Nasr

Madenet Nasr network		
	EPANET	ELGTnet
Time (s)	0.897	0.59
No of iterations	7	5
$T1$	1.762	342.74
$T2$	0.4406	0.253
$T3$	0.1509	0.0316
$T4$	0.035487	0.00634
$T5$	0.005022	9.8×10^{-5}
$T6$	3.5×10^{-4}	
$T7$	7×10^{-5}	
Max H diff (m)	0.12	
Relative H diff%	0.103	
Max Q diff (L/s)	0.095	
Relative Q diff%	1.4	

สามารถนำเทคนิคการถ่วงน้ำหนักอัตราการไหล (q_w) ทั้ง 4 เทคนิคมาปรับใช้กับการหาคำตอบในการคำนวณของ EPANET เพื่อให้มีการลู่เข้าหาคำตอบได้รวดเร็วขึ้น

2.6.3 การแก้ไขจาโคเบียนเมตริกซ์ในสมการเฮดสูญเสียของ Darcy-Weisbach ใน EPANET

วิธีการของ Todini และ Pilati โดยเริ่มแรกนั้นคำนวณเฮดสูญเสียโดยใช้สมการของ Hazen-Williams สำหรับซอฟต์แวร์ EPANET ที่พัฒนาโดย Rossman ที่นำเอาอัลกอริทึมของ Todini และ Pilati มาใช้นั้นได้เพิ่มเติมตัวเลือกในการคำนวณเฮดสูญเสีย โดยสามารถเลือกการคำนวณเฮดสูญเสียจากสูตรของ Hazen-Williams และ Darcy-Weisbach สำหรับสูตรคำนวณของ Darcy-Weisbach แพกเตอร์ความเสียดทานขึ้นอยู่กับเรย์โนลด์นัมเบอร์และความขรุขระของท่อ แต่ในซอฟต์แวร์ EPANET ของ Rossman นั้นแพกเตอร์ความเสียดทานในเมตริกซ์จาโคเบียนนั้นไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล⁽²⁵⁾

$$H_i - H_j = \begin{cases} r_j Q_j & \text{laminar flow} \\ r_j Q_j |r_j Q_j|^{n-1} & \text{turbulent flow} \end{cases} \quad (2.54)$$

เมื่อ Q_j คือ อัตราการไหลในท่อ j
 H_j คือ ไฮดรอลิกเกรดไลน์ หรือ เหนือที่โหนด i
 n คือ เลขยกกำลัง ($n = 2$)

แฟกเตอร์ความเสียดทานของท่อคือ

$$r_j = \begin{cases} \frac{128\nu L_j}{\pi g D_j^4} & \text{laminar flow} \\ \frac{8 L_j f_j}{\pi^2 g D_j^5} & \text{turbulent flow} \end{cases}$$

ν คือ ความหนืดจลน์ของน้ำตามอุณหภูมิ

g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง

L_j คือ ความยาวท่อ

D_j คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

f_j คือ แฟกเตอร์ความเสียดทานของ Darcy-Weisbach

การไหลแบบ turbulent แฟกเตอร์ความเสียดทานของท่อแต่ละท่อนจะขึ้นอยู่กับทั้งความสัมพันธ์ของความขรุขระในท่อ ε_j/D_j อัตราส่วนของความขรุขระต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง และ Reynolds number $Re = VD/\nu$ เมื่อ V คือ ความเร็วเฉลี่ย เรานิยามให้เมตริกซ์แพนงมุม $[A11] = A11(\mathbf{Q}, \mathbf{r}) \in \mathbb{R}^{n_p \times n_p}$ โดย

$$[A11] = \begin{cases} r_j & \text{laminar} \\ r_j |Q_j|^{n-1} & \text{turbulent} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, np$$

นิยามให้เวกเตอร์ $\mathbf{Q} = (Q_1, Q_2, \dots, Q_{np})^T$ อัตราการไหลที่ไม่ทราบค่า และ $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_{np})^T$ แฟกเตอร์ความเสียดทาน

จากเมตริกซ์ความสัมพันธ์ของ Todini และ Pilati

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A11} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A10} & \mathbf{H0} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix}$$

และเมื่อใช้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสันจะหาความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{A11} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A10} & \mathbf{H0} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2.55)$$

เวกเตอร์เมตริกซ์ $\mathbf{x}$ ขนาด $n_p + n_j$ ของอัตราการไหล และเฮดที่ไม่ทราบค่าในระบบ โดย $\mathbf{x} = (\mathbf{q}^T, \mathbf{h}^T)^T$ โดยเมตริกซ์ในสมการที่ 2.56 เป็นเมตริกซ์สมมาตรเสมอ $\mathbf{A11}$ เป็นเมตริกซ์แท่งมุม เมตริกซ์ $\mathbf{0}$ เป็น 0 ทั้งหมด

เมตริกซ์ $\mathbf{A12}$ และ $\mathbf{A21}$ เป็นเมตริกซ์ค่าคงที่ แต่เมตริกซ์ $\mathbf{A11}$ จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลที่ไม่ทราบค่า (ยกเว้นในกรณีที่เป็น laminar flow) และทำให้สมการที่ 2.56 เป็นสมการไม่เชิงเส้น ระบบสมการไม่เชิงเส้น $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ ในสมการที่ 4 สามารถหาคำตอบได้โดยระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(m)}) (\mathbf{x}^{(m+1)} - \mathbf{x}^{(m)}) = -\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(m)}) \quad \mathbf{x}^{(0)} \text{ Prescribed}$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

เมื่อ $\mathbf{J}$ คือจาโคเบียนเมตริกซ์ของ $\mathbf{f}$ และ m คือรอบการทำซ้ำ สำหรับ $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ คือ เวกเตอร์ฟังก์ชันของ เวกเตอร์ตัวแปร $\mathbf{x}$ ในสมการที่ (3.18) เรากำหนดให้ $\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{f}$ คือเกรเดียนของ $\mathbf{f}$ เทียบกับ $\mathbf{x}$ ความจริงแล้ว $\mathbf{A12}$, $\mathbf{A10}$, $\mathbf{H0}$ และ $\mathbf{q}$ คือค่าคงที่เมื่อเทียบกับ $\mathbf{Q}$ และ $\mathbf{H}$ จาโคเบียนของสมการที่ 2.56 คือ

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \nabla_g(\mathbf{A11q}) & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

สำหรับสูตรคำนวณของ Darcy-Weisbach เราพิจารณาแฟกเตอร์ความเสียดทานตาม Reynolds number โดยการพิจารณาแบ่งออก 3 ช่วงดังตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.17 แฟกเตอร์ความเสียดทานตามช่วงการไหล

กรณี	ช่วงของ Re	แฟกเตอร์ความเสียดทาน r	สูตรที่ใช้
1	$\text{Re} \leq 2,000$ laminar flow	$(128\nu/\pi g)(L/D^4)$	Hagen-Poiseuille
2	$2,000 < \text{Re} < 4,000$ transitional flow	$(8/\pi^2 g)(L/D^5) \sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta$	Dunlop α_k และ β_k ดูค่าในตารางที่ 2.18
3	$\text{Re} \geq 4,000$ turbulent flow	$(2\ln^2 10/\pi^2 g)(L/D)(1/\ln^2 \theta)$	Swamee-Jain ดูค่าจากสมการที่ (2.57)

กรณีที่ 1 Laminar flow ($\text{Re} \leq 2,000$) ช่วงอัตราการไหลช่วงนี้ใช้สูตรคำนวณของ Hagen-Poiseuille

$$f = 16\pi\nu D/|Q| \quad (2.56)$$

เทอมของเมตริกซ์แท่งมุม **A11** ในสมการที่ 2.55 จะเป็น $[\mathbf{A11}]_{jj} = r_j$ เทอมนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล

กรณีที่ 2 transitional flow ($2,000 < \text{Re} < 4,000$) เราใช้การประมาณค่าในช่วงของ Dunlop (Dunlop's interpolating cubic spline) แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ง

$$f = \sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) n^k \quad (2.57)$$

เมื่อ α_k และ β_k นิยามไว้ในตารางที่ 2.18 และเราได้ $n = \text{Re}/2,000$

$$\theta = \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{\text{Re}^{9/10}} = \frac{b\varepsilon}{D} + c \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \quad (2.58)$$

$$\hat{\theta} = \frac{b\varepsilon}{D} + \frac{5.74}{4,000^{9/10}} \quad (2.59)$$

เมื่อ $b = 1/3.7$ และ $c = 5.74(\pi\nu/4)^{9/10}$ หมายถึง η, θ, α_k และ β_k ทั้งหมดขึ้นอยู่กับ ε และ D ซึ่งแตกต่างกันไปตามท่อแต่ละท่อนที่แสดงไว้ในเทอมของเมตริกซ์แท่งมุม **A11** ในสมการที่ 2.55

ตารางที่ 2.18 ค่า α_k และ β_k สำหรับสูตรคำนวณของ Dunlop

k	α_k	β_k
0	$5/(\xi^2 \ln^2 \hat{\theta})$	$\tau/(\xi^3 \ln^3 \hat{\theta})$
1	$0.128 - 12/(\xi^2 \ln^2 \hat{\theta})$	$-5\tau/(2\xi^3 \ln^3 \hat{\theta})$
2	$-0.128 + 9/(\xi^2 \ln^2 \hat{\theta})$	$-2\tau/(\xi^3 \ln^3 \hat{\theta})$
3	$0.032 - 2/(\xi^2 \ln^2 \hat{\theta})$	$-\tau/(2\xi^3 \ln^3 \hat{\theta})$

กรณีที่ 3 turbulent flow ($Re \geq 4,000$) แฟกเตอร์ความเสียดทานของ Darcy-Weisbach สามารถใช้วิธีการของ Swamee และ Jain ⁽²⁶⁾ ในการประมาณค่าสูตรคำนวณของ Colebrook-White

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\varepsilon / 3.7D + 5.74 / Re^{0.9} \right) \right]^2} = \frac{\ln^2 10}{4 \ln^2 \theta} \quad (2.60)$$

โดย θ นิยามไว้ในสมการที่ 2.58 เทอมในเมตริกซ์แท่งมุม **A11** ในสมการที่ 2.55 ใช้ค่าคอลัมน์ที่ 3 ในตารางที่ 2.17 สำหรับกรณีนี้ r_j ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล ตารางที่ 2.19 แสดงสูตรของแต่ละอีลิเมนต์ของเมตริกซ์ **A11** สำหรับกรณีที่ 1 2 และ 3

ตารางที่ 2.19 สูตรของแต่ละอีลิเมนต์ของเมตริกซ์ **A11**

กรณีที่	ช่วงของ Re	เทอมในเมตริกซ์ A11
1	$Re \leq 2,000$	$(128\nu/\pi g)(L/D^4)$
2	$2,000 < Re < 4,000$	$ Q (8/\pi^2 g)(L/D^5) \sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta^k$
3	$Re \geq 4,000$	$ Q (2 \ln^2 10 / \pi^2 g)(L/D)(1/\ln^2 \theta)$

โดยผลการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังแก้ไขเมตริกซ์จาโคเบียนแสดงได้ดังตารางที่ 2.20 $\theta_u(q^{(i)})$ คือค่าที่ได้เมตริกซ์จาโคเบียนเดิมของ EPANET ส่วน $\theta_c(q^{(i)})$ คือค่าที่ได้จากเมตริกซ์จาโคเบียนที่ได้รับการแก้ไข

ตารางที่ 2.20 เปรียบเทียบการลู่เข้าของเมตริกซ์จาโคเบียน

i	$\theta_u(q^{(i)})$	$\theta_c(q^{(i)})$
1	9.0e-001	9.0e-001
2	1.8e-002	8.2e-002
3	4.6e-003	5.5e-003
4	7.9e-005	2.3e-005
5	1.5e-006	1.0e-009
6	3.6e-008	1.3e-014

จากตารางจะเห็นได้ว่าในรอบการทำซ้ำรอบเดียวกันจาโคเบียนเมตริกซ์ที่ได้รับการแก้ไขมีค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่า โดย $\theta_u(q^{(i)})$ ที่มีแฟกเตอร์ความเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลนั้นมีการลู่เข้าแบบเส้นตรง ส่วน $\theta_c(q^{(i)})$ ที่มีแฟกเตอร์ความเสียดทานที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลนั้นมีการลู่เข้าแบบกำลังสอง (quadratic)

2.6.4 การประมาณการอัตราการไหลของน้ำแบบ real-time ในพื้นที่เฝ้าระวัง

T. Koppel, A. Vassiljev⁽²⁷⁾ ได้การทดสอบความเป็นไปได้ในการประมาณการอัตราการไหลของน้ำแบบ real-time ในพื้นที่เฝ้าระวัง (District Metering Areas; DMAs) โดยใช้ซอฟต์แวร์ EPANET-RTX โดยปกติความต้องการน้ำในแต่ละช่วงเวลาใน 1 วัน จะไม่คงที่มากนัก แตกต่างกันไปตาม ช่วงเวลา ฤดูกาล ประเภทของผู้ใช้น้ำ รูปแบบของท่อจ่ายน้ำ รูปแบบการจัดเคหะสถาน และสภาพอากาศ โดยเป้าหมายคือต้องการหาไหลของน้ำที่ถูกต้องในพื้นที่เฝ้าระวังโดยใช้พื้นฐานจากการวัดความดัน วิธีที่ง่ายที่สุดคือ การใส่ความต้องการน้ำ (demand) เพิ่มขึ้น (ใส่เป็นค่า + หรือ -) ใน จุดเชื่อมต่อท่อที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน ในการลดค่าความแตกต่างระหว่างค่าความดันที่ได้จากการวัดและแบบจำลองให้มีค่าน้อยที่สุด เราไม่สามารถเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ของรูปแบบการใช้น้ำ (demand pattern) โดยไม่มีกฎเกณฑ์ได้เนื่องจากสมดุลของน้ำ (water balance) ต้องไม่เปลี่ยนแปลง หมายความว่าถ้าความต้องการน้ำของแต่ละจุดถูกทำให้เพิ่มขึ้นจากค่าบางค่า ต้องแน่ใจว่าการทำ water balance นั้นได้ลดค่าความต้องการน้ำของจุดอื่นลง วิธีการที่ง่ายที่สุด คือ ใช้ จุดใดจุดหนึ่ง ในการชดเชยการเปลี่ยนแปลงค่าในทุกๆ จุด ในกรณีนี้จำนวนของพารามิเตอร์จะถูกลดลง 1 ตัว ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function: OF) คือ

$$OF = \min \sum_{i=1}^n error_i^2 \quad (2.61)$$

$$error_{i,t} = press_{s,t} - press_{e,t} \quad (2.62)$$

$$press_{e,t} = press_{m,t} + const_i \quad (2.63)$$

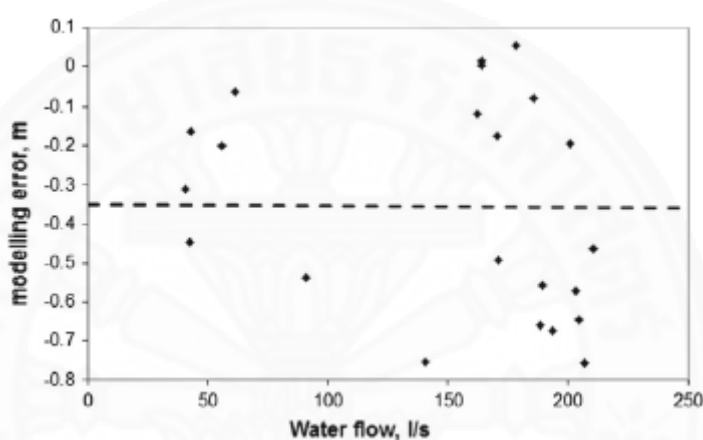
เมื่อ $error_i$ คือ ความแตกต่างระหว่างค่าที่คาดการณ์และค่าจากการจำลองใน junction i
 n คือ จำนวน junction ที่มีการวัดความดัน
 $error_{i,t}$ คือ ค่าผิดพลาดจากการจำลองความดันใน junction i ณ เวลา t
 $press_{s,t}$ คือ ความดันจากการจำลอง
 $press_{e,t}$ คือ ความดันคาดการณ์ใน junction i ณ เวลา t
 $press_{m,t}$ คือ ความดันที่ได้จากการวัดใน junction i
 $const_i$ คือ ค่าผิดพลาดคงที่ใน junction i

สาเหตุที่ใช้ความดันคาดการณ์ (expected pressure) เนื่องจากในระบบยังมีค่าความผิดพลาดคงที่เนื่องจากระดับความสูงที่ผิด (elevation) ของแต่ละโหนด T. Koppel และ A. Vassiljev⁽²⁷⁾ ได้ประยุกต์ใช้กับระบบการจ่ายน้ำของ city of Tallinn ที่ประกอบไปด้วยท่อมากกว่า 2,000 ท่อน และผู้ใช้น้ำมากกว่า 1,000 ราย มีจุดวัดความดันน้ำ 20 จุด ดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 ตำแหน่งการวัดในระบบการจ่ายน้ำ (สีเหลี่ยมสีดำหมายถึงแหล่งจ่ายน้ำ)

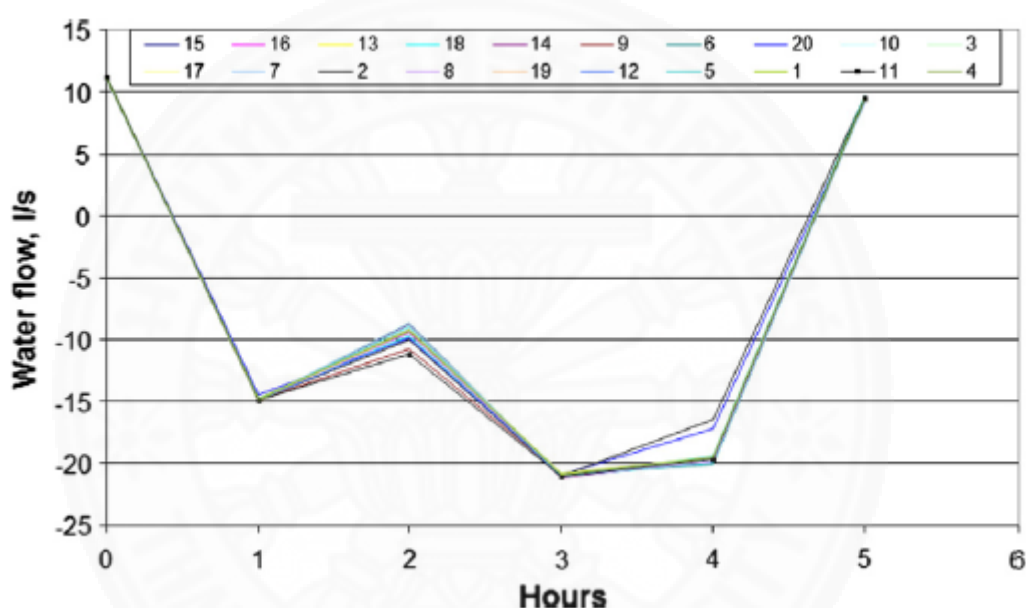
การสอบเทียบแบบจำลองของ EPANET ของระบบการจ่ายน้ำ แสดงให้เห็นว่าการวัดความดันยังคงมีความผิดพลาดคงที่ในบางจุด ยกตัวอย่างเช่น ในภาพที่ 2.23 อธิบายถึงผลที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองของจุดวัดความดัน 20 จุด อย่างแรกที่เราเห็นความแตกต่างระหว่างความดันจากการวัดและความดันจากแบบจำลอง คือ ค่ามีการแกว่งเฉลี่ยแล้วอยู่ที่ประมาณ -0.35 ลิตร/วินาที โดยคาดว่ามีความผิดพลาดเนื่องจากระดับความสูงที่ผิดพลาดของจุดเชื่อมต่อท่อ ค่านี้คือค่าผิดพลาดคงที่ในเทอมของสมการที่ (2.62) ดังนั้นต้องการการไหลของน้ำในการจำลองของแต่ละช่วงเวลา ที่จะทำให้ค่าความผิดพลาดในการจำลองมีความเบี่ยงเบนน้อยที่สุดจากค่าความผิดพลาดคงที่



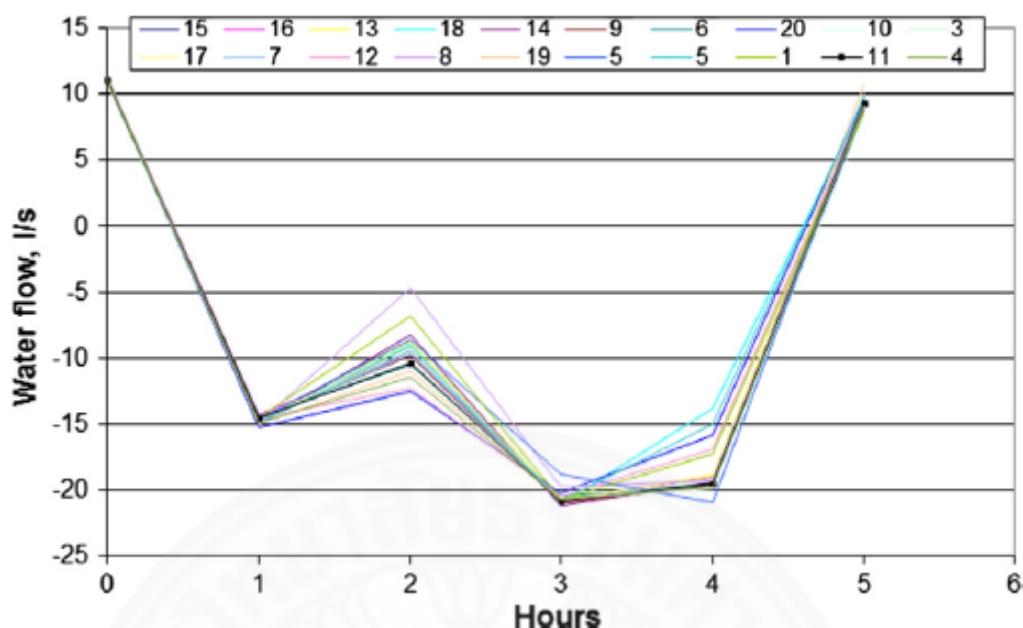
ภาพที่ 2.23 ความผิดพลาดของแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำของจุดวัด 20 จุด

การคำนวณเสร็จสมบูรณ์โดยใช้ step ต่างๆ ที่แตกต่างกันตามตัวแปร (0.01, 0.1 และ 0.5 ลิตร/วินาที) สำหรับการคำนวณอนุพันธ์ย่อยของ LMA ผลลัพธ์ที่ได้มีความเสถียรมาก และไม่ขึ้นอยู่กับ junction ที่ใช้เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงใน junction อื่นๆ ในช่วงกลางวัน แม้ว่าจะมีความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ในบางกรณีในเวลากลางคืน ยกตัวอย่างเช่น ผลลัพธ์ที่ได้จาก 14 จุดในเวลากลางคืน โดยใช้ junction ที่ต่างกันสำหรับการชดเชยการเปลี่ยนแปลงใน water balance ที่แสดงในภาพที่ 2.24 สิ่งหนึ่งที่เราเห็น คือ กราฟทุกเส้นมาบรรจบกันในเวลา 0:00 น. 3:00 น. และ 5:00 น. ที่ 2:00 น. ค่าบนกราฟทุกเส้นเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $\pm 12\%$ ประมาณ 10 ลิตร/วินาที (ค่า OF ต่ำสุด ค่านี้) การคำนวณในส่วนที่เพิ่มเข้ามาประสบผลสำเร็จทุกตัวแปรโดยใช้อัตราการไหลที่ได้มาจากกรณีที่ OF น้อยสุดมาใช้เป็นค่าเริ่มต้น (โดยทั่วไปแล้ว ค่าเริ่มต้นทุกค่าเท่ากับ 0) แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลนี้สามารถยอมรับได้สำหรับทุกตัว ด้วยเหตุนี้ยังคงจำเป็นในการทำให้การคำนวณประสมผลสำเร็จโดยใช้จุดที่แตกต่างกันสำหรับชดเชยการเปลี่ยนแปลงในการทำ water balance และเลือกตัวแปรที่มีค่า OF น้อยที่สุด

ผลลัพธ์ที่ได้จาก 17 junction จากทั้งหมด 20 junction ค่อนข้างเสถียร แม้ว่าจะเป็นช่วงกลางคืน และไม่ได้ขึ้นอยู่กับการเลือก junction ในการหาค่าการเปลี่ยนแปลง water balance ความมีเสถียรภาพของการคำนวณยังขึ้นอยู่กับ step ตามตัวแปรในการคำนวณอนุพันธ์ย่อยของ LMA ภาพที่ 2.24 แสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้จาก step ที่เท่ากับ 0.1 ลิตร/วินาที และภาพที่ 2.25 แสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้จาก step ที่เท่ากับ 0.01 ลิตร/วินาที อย่างแรกที่เราเห็นจากการเปรียบเทียบภาพที่ 2.24 และ 2.25 คือ ผลลัพธ์ของ step ที่เท่ากับ 0.1 ลิตร/วินาที มีความเสถียรมาก หมายความว่า step ที่เท่ากับ 0.01 ลิตร/วินาที นั้นมีขนาด step ที่เล็กเกินไปในการคำนวณ



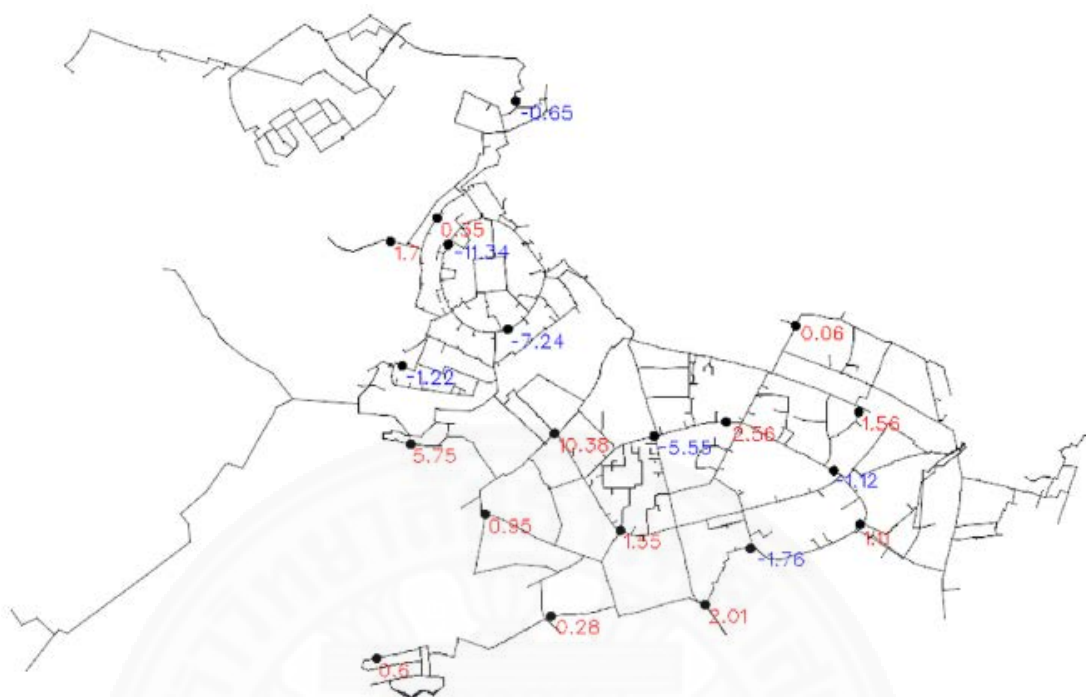
ภาพที่ 2.24 อัตราการไหลของน้ำที่ถูกบริโภคในส่วนของระบบการจ่ายน้ำที่ได้จากจุดที่ 14 (ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ step ตามตัวแปร 0.1 ลิตร/วินาที)



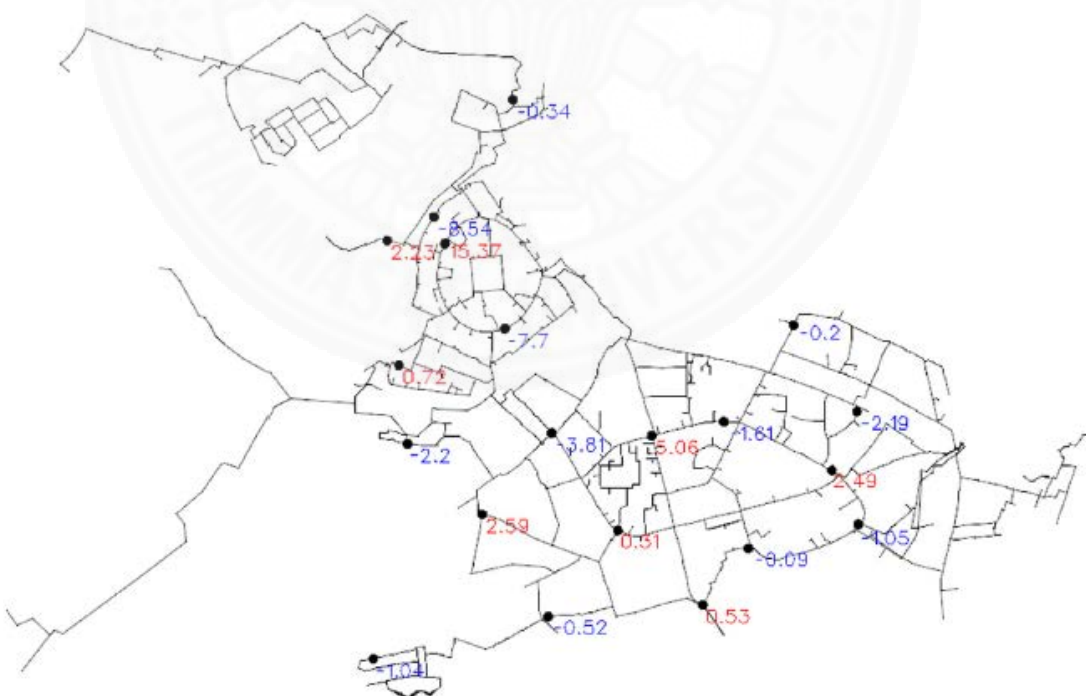
ภาพที่ 2.25 อัตราการไหลของน้ำที่ถูกบริโภคในส่วหนึ่งของระบบการจ่ายน้ำที่ได้จากจุดที่ 14 (ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ step ตามตัวแปร 0.01 ลิตร/วินาที)

การบริโภคน้ำในระบบการจ่ายน้ำสูงสุดในตอนเช้า (8:00 น.) น้อยสุดในช่วงกลางวัน (14:00 น.) และสูงสุดอีกทีในช่วงเย็น (16:00 น.) ตามลำดับ ตัวเลขที่ติดค่า + แสดงถึงว่าจะเพิ่มน้ำเข้าไปใน junction อีกเท่าไรจึงจะเพียงพอต่อการบริโภคในบริเวณดังกล่าวนี้ ตัวเลขที่ติดค่า - แสดงถึงบริเวณนั้นมีการบริโภคน้ำน้อยกว่าการจำลองตามรูปแบบ (pattern) ปรกติ ภาพที่ 2.26-2.28 ประกอบด้วยเนื้อที่ (spatial) ในการจ่ายน้ำของอัตราการไหลเหล่านี้ ความต้องการในบริเวณนี้เปลี่ยนแปลงอย่างน่าสังเกตตลอดทั้งวัน ส่วนหนึ่งของ DMA อธิบายได้โดยจุดที่ 10 และ 3 การบริโภคน้ำมากในตอนเช้า (ภาพที่ 2.26) และกลางวัน (ภาพที่ 2.27) แต่น้อยในตอนเย็น (ภาพที่ 2.28)

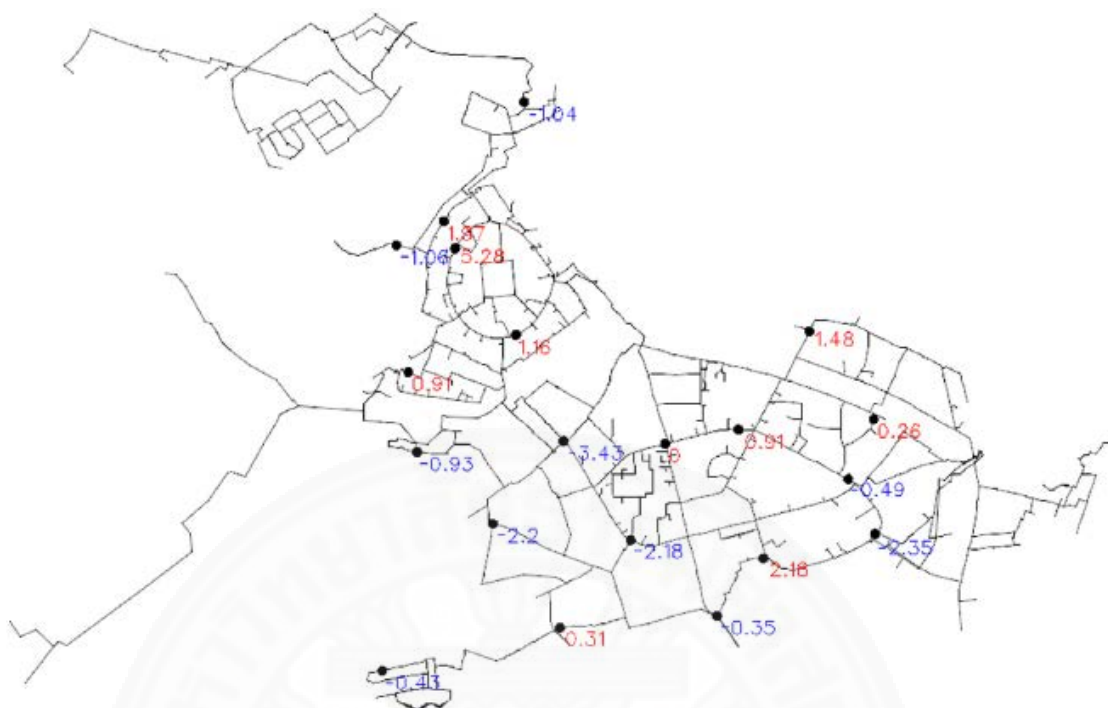
การทำให้อัตราการไหลถูกต้องตามความต้องการน้ำเป็นเรื่องที่ค่อนข้างใหญ่ คำถาม คืออะไรคือขอบเขตที่เป็นไปได้ในการทำให้การไหลของน้ำถูกต้องโดยใช้การวัดความดัน การตรวจแก้ไขความต้องการน้ำมีค่อนข้างมากทีเดียว ความจริงถูกหยิบยกมาตั้งคำถามว่าอะไรคือขอบเขตที่เป็นไปได้ในการแก้ไขการไหลของน้ำโดยใช้การวัดความดัน อะไรคือขอบเขตของ junction 1 junction (แม้ว่าจะตั้งอยู่บนท่อขนาดใหญ่) ที่สามารถอธิบายอาณาเขตได้ และอะไรคือขอบเขตของ random error ในการวัดความดันที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ อย่างไรก็ตาม ทั้งๆ ที่มีคำถามนี้การคำนวณแสดงว่ามีความเป็นไปได้ที่จะได้จำนวนของรูปจำลองของพื้นที่การจ่ายน้ำโดยพื้นฐานของการวัดความดัน



ภาพที่ 2.26 อัตราการไหลของน้ำที่ถูกบริโภค ที่เวลา 8:00 น.



ภาพที่ 2.27 อัตราการไหลของน้ำที่ถูกบริโภค ที่เวลา 14:00 น.



ภาพที่ 2.28 อัตราการไหลของน้ำที่ถูกบริโภค ที่เวลา 16:00 น.

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถใช้หาการไหลของน้ำแบบ real-time ในระบบการจ่ายน้ำบนพื้นฐานของการวิเคราะห์ความดัน การคำนวณแสดงให้เห็นว่าความมีเสถียรภาพของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับ step ตามตัวแปรเมื่อใช้การคำนวณแบบจาโคเบียน (Jacobeian) step ที่มากพอตามตัวขนาดของแปรช่วยป้องกันปัญหาการแกว่งของฟังก์ชันเป้าหมาย OF ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องทำการคำนวณซ้ำ 3-4 รอบ ด้วย step ที่แตกต่างกันอย่างไ้ก็ตามการสอบสวนเพิ่มเติมจำเป็นเพื่อประเมินอิทธิพลของ random error ในการวัดความดันบนผลลัพธ์และอะไรคือ การแผ่ขยายของ junction 1 junction (แม้ว่าจะกำหนดตำแหน่งในบริเวณที่มีท่อขนาดใหญ่) ที่สามารถแทนขอบเขตของพื้นที่ได้

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

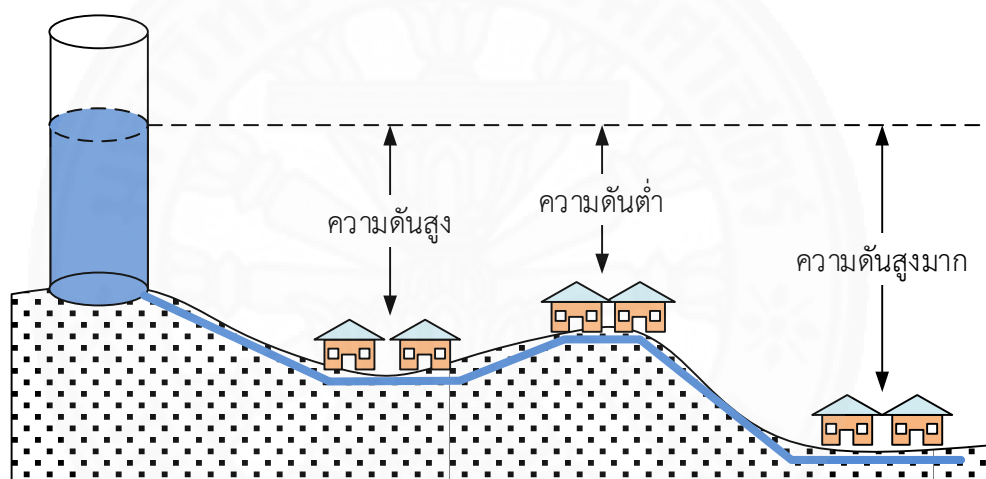
งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงแบบจำลองโครงข่ายการจ่ายน้ำในส่วนของท่านประธานของการประปานครหลวง (กปน.) ให้มีความเที่ยงตรงมากขึ้นและพัฒนาซอฟต์แวร์ EPANET ให้มีความสามารถทางการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization module) ปัจจุบันโครงข่ายการจ่ายน้ำในส่วนของท่านประธานของ กปน. มีความเที่ยงตรง 83.68 % เมื่อเทียบกับข้อมูลการวัดจริง โดยการใช้การเปรียบเทียบระหว่างความดันตามจุดต่างๆ บนเส้นท่อที่ได้จากการวัดจริงและความดันที่ได้จากการคำนวณของซอฟต์แวร์ EPANET จากคู่มือการปฏิบัติงานของ AWWA manual M32⁽²⁹⁾ ระบุไว้ว่าแบบจำลองโครงข่ายการจ่ายน้ำต้องมีความเที่ยงตรง 80% ขึ้นไปถึงจะสามารถนำไปใช้ทำนายหรือประมาณการณ์การจ่ายน้ำในสถานะอื่นๆ ได้ แต่ยังคงมีความผิดพลาดในแบบจำลองที่ควรปรับปรุงแก้ไขให้มีความเที่ยงตรงสูงขึ้นโดยเฉพาะระดับความสูงของแนวท่อประธานและการใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสีย โครงข่ายท่อประธานของ กปน. เป็นระบบการจ่ายน้ำที่มีขนาดใหญ่และสลับซับซ้อนเชื่อมต่อกันเหมือนใยแมงมุม น้ำถูกจ่ายเข้าระบบท่อจากสถานีสูบน้ำหลายสถานีซึ่งทำให้พื้นที่แต่ละจุดได้รับอิทธิพลจากสถานีสูบน้ำมากกว่า 1 สถานี ดังนั้นจึงยากต่อการประมาณเฮดที่เหมาะสมในการจ่ายน้ำของแต่ละสถานี ในส่วนนี้ได้มีการศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเฮดในแต่ละสถานีเพื่อใช้เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจการวางแผนการจ่ายน้ำ

3.1 การแก้ไขระดับความสูงของแนวเส้นท่อประธาน

3.1.1 ผลกระทบของระดับความสูงที่แตกต่างกัน

ในการเคลื่อนย้ายวัตถุหรือสสารจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งนั้นจะต้องใช้พลังงาน ในระบบการจ่ายน้ำก็เช่นเดียวกัน การจะส่งจ่ายน้ำจากต้นทางไปยังปลายทางต้องอาศัยพลังงานจากความดันน้ำ สำหรับการจ่ายความดันให้กับระบบจ่ายน้ำปัจจุบันมีอยู่ 2 ชนิด คือ การใช้แรงดึงดูดของโลก(gravity)และการใช้เครื่องสูบน้ำสำหรับการจ่ายน้ำของ กปน. จะเป็นการใช้เครื่องสูบน้ำเพื่อจ่ายความดันน้ำเข้าสู่ระบบ ระบบการจ่ายน้ำที่มีความดันน้ำสูงก็จะสามารถจ่ายน้ำได้ไกลและน้ำมีอัตราการไหลที่สูงกว่าระบบการจ่ายน้ำที่ความดันน้ำต่ำ ส่วนความดันตามแนวเส้นท่อแต่ละแห่งจะมีระดับความดันที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับ ระยะทางจากสถานีสูบน้ำ ขนาดท่อจ่ายน้ำ ความหนาแน่นของประชากรและระดับความสูงของแต่ละพื้นที่

ถ้าหากพื้นที่ในการส่งจ่ายน้ำเป็นพื้นราบที่มีระดับความสูงเดียวกันการคำนวณความดันของน้ำแต่ละจุดจะไม่ซับซ้อน ซึ่งในพื้นที่เล็กๆ เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถวางระบบท่อให้มีความสูงระดับเดียวกันทั้งหมดได้ แต่ในความเป็นจริงแล้วพื้นที่ให้บริการของ กปน. นั้นมีขนาดใหญ่ครอบคลุม 3 จังหวัด คือ กรุงเทพมหานคร นนทบุรีและสมุทรปราการ ซึ่งแต่ละพื้นที่มีระดับความสูงของพื้นดินแตกต่างกัน การวางท่อสำหรับส่งน้ำให้มีความสูงระดับเดียวกันทั้งหมดนั้นไม่สามารถกระทำได้ ดังนั้นระดับความสูงของท่อประธานจึงขึ้นอยู่กับระดับความสูงของแต่ละพื้นที่ ถึงแม้ว่าสถานีสูบน้ำจ่ายน้ำของ กปน. จะมีระดับความสูงทุกสถานีอยู่แล้ว แต่ในแบบจำลองระบบท่อประธานไม่มีข้อมูลระดับความสูงของท่อ ซึ่งระดับความสูงนี้เองเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ความดันน้ำในแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ความดันน้ำในพื้นที่ต่างๆ

เนื่องจากความดันน้ำแสดงถึงความสามารถในการจ่ายน้ำ ซึ่งแต่ละพื้นที่มีความต้องการความสามารถในการจ่ายน้ำไม่เท่าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยสามารถสรุปได้เป็น 4 ปัจจัยหลักดังนี้

- 1) ความแตกต่างกันของพื้นที่ เนื่องจากระบบการจ่ายน้ำส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกในการจ่ายน้ำและแต่ละพื้นที่ให้บริการมีความสูงต่ำไม่เท่ากัน ดังนั้นแต่ละพื้นที่จึงได้รับความดันน้ำไม่เท่ากันดังภาพที่ 3.1 ด้วยเหตุนี้เองที่จำเป็นต้องมีระบบการบริหารจัดการความดันน้ำเพื่อให้พื้นที่สูงมีความดันน้ำที่เพียงพอและพื้นที่ต่ำมีความดันน้ำไม่สูงจนเกินไปที่จะทำให้ระบบท่อจ่ายน้ำรั่วไหลหรือแตกเสียหาย
- 2) ความหนาแน่นของประชากร บริเวณที่มีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่นย่อมมีความต้องการน้ำสูงดังนั้นจึงต้องจัดสรรความดันน้ำให้สัมพันธ์กับความหนาแน่นของประชากรด้วย
- 3) ประเภทของผู้ใช้น้ำ ประเภทของผู้ใช้น้ำก็มีความสำคัญเนื่องจากผู้ใช้น้ำบางกลุ่ม

เช่นโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความต้องการน้ำสูงต้องการความดันน้ำที่สูงเพื่อหล่อเลี้ยงสายการผลิต

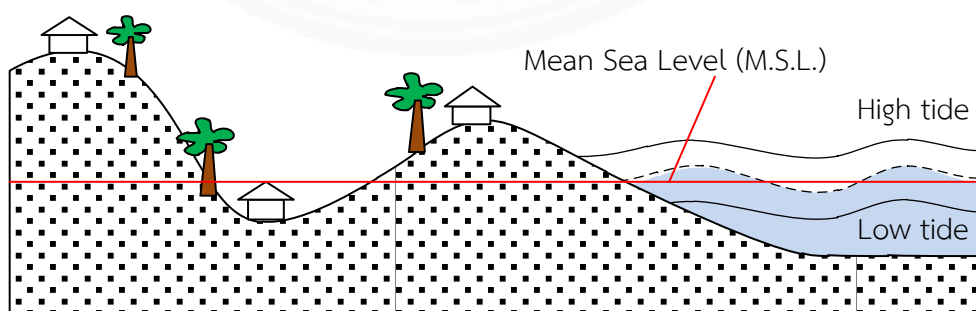
4) ช่วงเวลาในการใช้น้ำ นอกจากเหตุผลทั้งสามข้อดังกล่าวแล้ว เรื่องของช่วงเวลาก็มีความสำคัญเป็นอย่างมากเพราะเนื่องจากพฤติกรรมการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำเช่น ที่พักอาศัย สถานที่ราชการ บริษัทเอกชน โรงงานอุตสาหกรรม มีช่วงเวลาการใช้น้ำที่แตกต่างกันดังนั้นจึงต้องมีการจัดสรรความดันน้ำให้สัมพันธ์กับช่วงเวลาด้วย

3.1.2 การอ้างอิงระดับความสูง

เนื่องจากระดับความสูงของพื้นผิวโลกนั้นมีระดับความสูงแตกต่างกัน การเปรียบเทียบระดับความสูงจึงต้องอ้างอิงจากจุดอ้างอิงเดียวกัน ในปัจจุบันการบอกระดับทางดิ่งของกรุงเทพมหานครมีอยู่ 2 ระดับ คือ ระดับน้ำทะเลปานกลาง (ร.ท.ก.) และระดับ ก.ท.ม. ซึ่งระดับความสูง 2 ระดับนี้มีความแตกต่างกัน

3.1.2.1 ระดับน้ำทะเลปานกลาง ร.ท.ก.

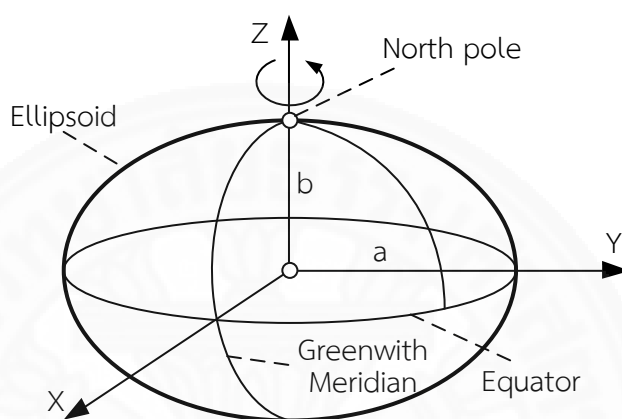
ระดับน้ำทะเลปานกลาง ร.ท.ก. (Mean Sea Level: M.S.L.)ได้มาจากการเก็บสถิติระดับความสูงของน้ำขึ้น(High tide)-น้ำลง(Low tide) ดังภาพที่ 3.2 แล้วนำค่ามาเฉลี่ย โดยเก็บค่าเป็นรายชั่วโมง และบันทึกผลไว้ตลอดเวลา สำหรับประเทศไทยอ้างอิงจากสถานีวัดระดับน้ำซึ่งสร้างขึ้นในสมัยรัชการที่ 6 เมื่อเดือนกันยายน พ.ศ. 2453 ที่บริเวณเกาะหลัก อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เริ่มเปิดให้เครื่องทำงานเมื่อ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2453 โดยทำการเก็บข้อมูลน้ำขึ้น-น้ำลงตั้งแต่นั้นมาจนถึงปัจจุบัน ระดับน้ำทะเลนี้ใช้ประโยชน์ในการเดินเรือ การสำรวจแผนที่ และด้านการก่อสร้าง



ภาพที่ 3.2 ระดับน้ำทะเลปานกลาง

3.1.2.2 ระดับ ก.ท.ม. หรือ City Datum

โดยอ้างอิงจากระบบ WGS-84 (World Geodetic System of 1984) ใช้ในการอ้างอิงเพื่อระบุตำแหน่งในพิกัดของลองจิจูด ละติจูดและความสูง WGS-84 เป็นแบบจำลองโลกรูปทรงรี (ellipsoid) ที่กำหนดให้รัศมีในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางโลก (a) มีค่า 6,378.137 กม. และรัศมีในแนวขั้วโลก (b) มีค่า 6,356.7523142 กม. ดังแสดงในภาพที่ 3.3

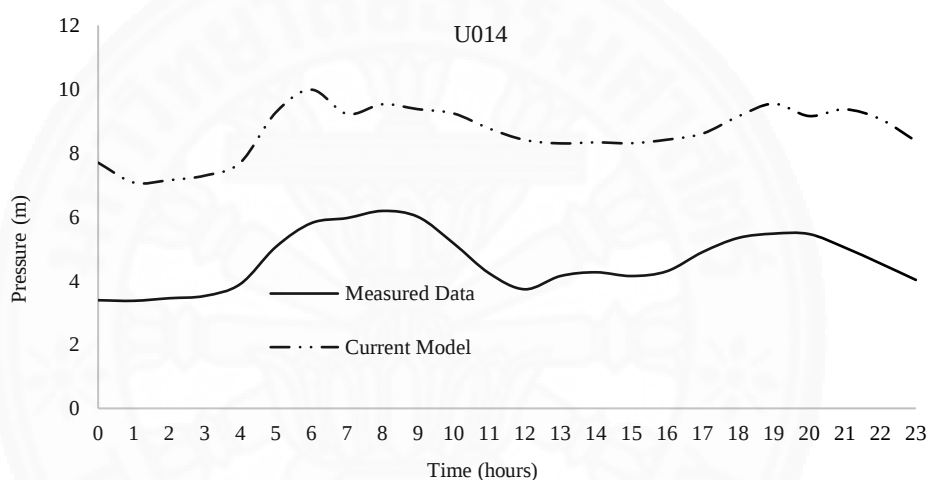


ภาพที่ 3.3 ระบบ WGS-84 (ellipsoid)

ระบบ WGS-84 ใช้สำหรับระบบนำร่องจีพีเอส (GPS) การสำรวจแผนที่ ซึ่งต่างจากระดับน้ำทะเลปานกลาง คือ สามารถระบุพิกัดทางราบได้ด้วย โดยที่ระดับความสูง 0 ร.ท.ก. จะเท่ากับระดับความ 35.03 เมตร ก.ท.ม. โดยหมุดบอกระดับของกรุงเทพมหานครจะระบุตัวเลขไว้ทั้งสองค่าทั้ง ร.ท.ก. และ ก.ท.ม. ดังตัวอย่างในภาพที่ 3.4

3.1.3 แนวทางการแก้ไขระดับความสูงของแนวเส้นท่อประธาน

แบบจำลองโครงข่ายการจ่ายน้ำของ กปน. มีการปรับปรุงอยู่เรื่อยๆ เพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดให้น้อยลงและได้ทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับความดันน้ำที่ได้จากเครื่องมือวัดตามจุดต่างๆ ที่กระจายอยู่ตามโครงข่ายท่อประธาน มีจุดวัดความดันที่สามารถนำมาใช้งานได้รวมกันทั้งสิ้น 134 จุด ผลการคำนวณจากซอฟต์แวร์ยังมีความผิดพลาดอยู่ ซึ่งมาจากหลายสาเหตุ เช่น การกำหนดค่าความเสียดทานของท่อ การกำหนดเปอร์เซ็นต์การเปิดของวาล์ว การกำหนดค่าความสูงของโหนดต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ภาพที่ 3.5 แสดงผลที่ได้จากการสอบเทียบระหว่างแบบจำลองและผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U014



ภาพที่ 3.5 เปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลจากซอฟต์แวร์ของจุดวัดความดันหมายเลข U014

จะเห็นว่าผลการคำนวณจากซอฟต์แวร์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลจากการวัดจริง แต่มีความแตกต่างกันอยู่ โดยความดันที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์จะมีค่าสูงกว่าความดันที่วัดได้จริงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3.892 เมตร ความผิดพลาดนี้เกิดจากระดับความสูงของโหนด แบบจำลองโครงข่ายท่อประธานของ กปน. ในปัจจุบัน ไม่ได้กำหนดความสูงของโหนดต่างๆ โดยระดับความสูงของแต่ละโหนดเท่ากับ 0 เมตรทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 3.6 จากรูปจะเห็นว่าโหนดสีน้ำเงินทุกโหนดมีระดับความสูงเท่ากับ 0 เมตรทั้งหมด



ภาพที่ 3.6 ระดับความสูงของแต่ละโหนดในโครงข่ายท่อประปาของ กปน. ในปัจจุบัน

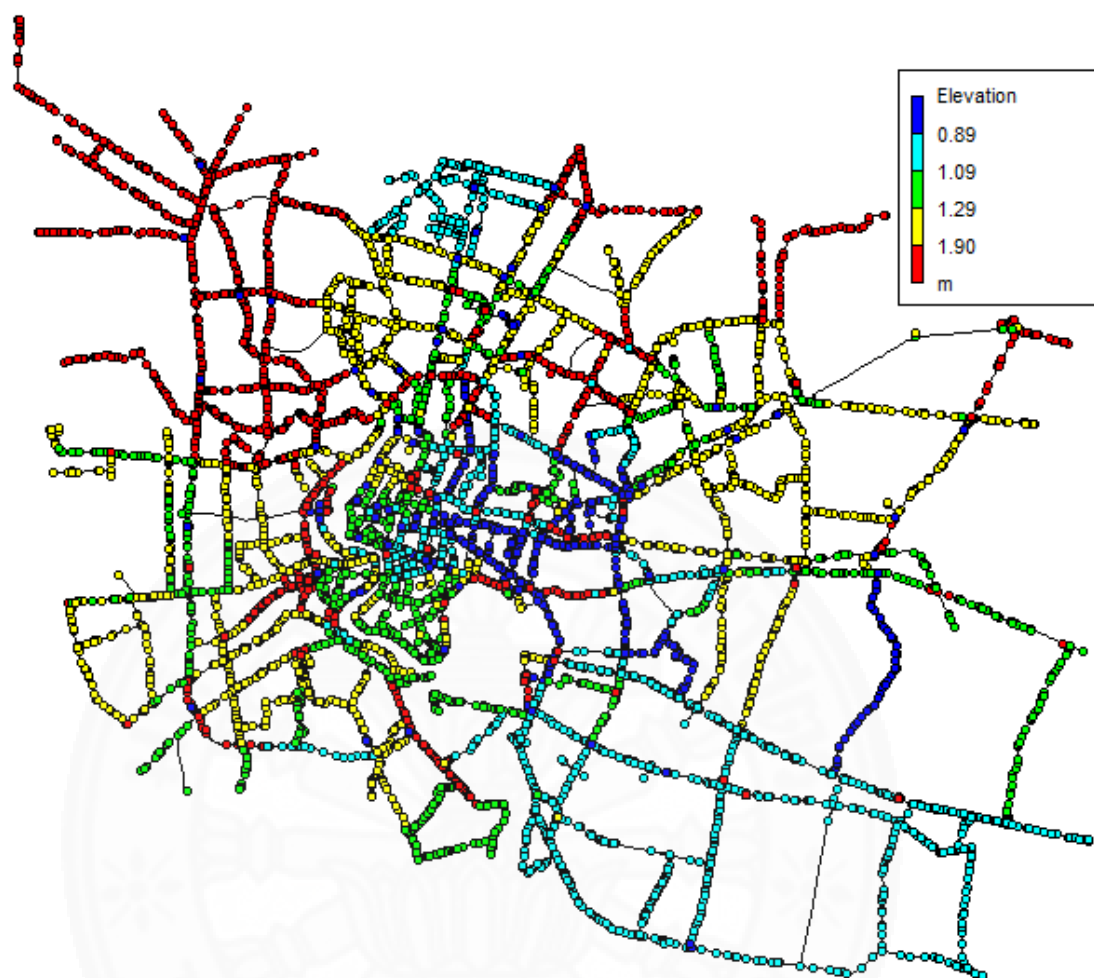
ถึงแม้ว่าพื้นที่ให้บริการของ กปน. ทั้ง 3 จังหวัดค่อนข้างจะเป็นพื้นราบมีความแตกต่างของความสูงไม่เกิน 2 เมตร แต่ระดับความดันน้ำของ กปน. นั้นค่อนข้างต่ำโดยบางตำแหน่งมีความดันน้ำไม่ถึง 10 เมตร ความผิดพลาดของระดับความสูงเพียง 1 หรือ 2 เมตรสามารถทำให้เกิดความผิดพลาดได้สูงถึง 20% ความผิดพลาดจากระดับความสูงนี้คือความผิดพลาดคงที่ในเทอมของความสูง z ในสมการของ Bernoulli

$$\left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) = H_1 - H_2 = \sum h_f - h_m$$

ค่าที่ใช้ในการคำนวณและค่าที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์คือเฮดเกรดไลน์ H ดังนั้น ค่า H ต้นทางที่ใส่เข้าไปให้ซอฟต์แวร์คำนวณโดยเฉพาะจุดจ่ายน้ำ (reservoir) ซึ่งเฮดของ

แหล่งจ่ายเหล่านี้เป็น Fixed grade head ต้องเป็นเฮดที่รวมพจน์ของความดันน้ำและความสูง ($H = (p/\gamma) + z$) ถ้าใช้เฮดจากความดันน้ำเพียงพจน์เดียวเฮดที่คำนวณได้ตามโนหนดต่างๆ บนโครงข่ายท่อจ่ายน้ำจะผิดพลาดทั้งหมดและเหตุผลเดียวกันนี้ ความดันตามโนหนดต่างๆ จะต้องนำค่า H ที่คำนวณได้ลบด้วย z ($(p/\gamma) = H - z$) จึงจะได้ความดันที่ถูกต้อง เมื่อแบบจำลองโครงข่ายปัจจุบันของ กปน. ไม่ได้กำหนดระดับความสูงจึงเป็นสาเหตุให้เกิดข้อผิดพลาดในการคำนวณของซอฟต์แวร์และการเปรียบเทียบผลกับข้อมูลที่วัดจริงจากภาคสนาม ดังนั้นควรมีการปรับแก้ระดับความสูงของแต่ละโนหนดในแบบจำลองโครงข่ายท่อประธาน

ในส่วนการแก้ไขระดับความสูงของระบบท่อประธานใช้การอ้างอิงจากระดับความสูงของถนน ซึ่งโดยปกติแล้วการวางท่อประธานจะวางตามแนวนอนดังนั้นจึงสามารถประเมินระดับความสูงของแนวท่อประธานได้จากระดับความสูงของถนน โดยใช้ข้อมูลจากแผนที่แสดงค่าระดับเฉลี่ยตามแนวนอนในบริเวณกรุงเทพมหานคร ปี 2549 -2550 ของกองสำรวจและแผนที่ที่ดิน สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นแผนที่ที่แสดงค่าระดับความสูงโดยอ้างอิงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง (ร.ท.ก.) ตามเอกสารแนบในภาคผนวก ระดับความสูงของถนนอยู่ในช่วง 0 ถึง 2 เมตรเหนือระดับ ร.ท.ก. จากนั้นทำการแก้ไขระดับความสูงของแต่ละโนหนดตามระดับความสูงของถนน ส่วนในพื้นที่จังหวัดนนทบุรีและสมุทรปราการประมาณความสูงจากแผนที่แสดงแนวคันกั้นน้ำและระดับพื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ของกรมแผนที่ทหาร เมื่อทำการแก้ไขระดับความสูงของโนหนดต่างๆ ในโครงข่ายท่อประธานเสร็จแล้วสามารถแสดงค่าระดับความสูงของโนหนดต่างๆ ในระบบเส้นท่อได้ดังภาพที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าความจริงแล้วความสูงของแต่ละโนหนดในระบบเส้นท่อมีความสูงที่แตกต่างกันและไม่ได้มีค่าเท่ากับ 0 ทั้งหมด



ภาพที่ 3.7 แสดงค่าระดับความสูงของโหนดต่างๆ ในโครงข่ายท่อประปาหลังการแก้ไข

3.2 การแก้ไขสูตรคำนวณเฮดสูญเสีย

วิธีการของ Todini และ Pilati โดยเริ่มแรกนั้นคำนวณเฮดสูญเสียโดยใช้สูตรคำนวณของ Hazen-Williams และการคำนวณเฮดสูญเสียที่ใช้กับแบบจำลองปัจจุบันของ กปน. ใช้สูตรคำนวณของ Hazen-Williams ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันเนื่องจากมีวิธีการคำนวณไม่ยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งสัมประสิทธิ์ความต้านทาน (r) จะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล $r = 4.727 (L/C_{HW}^{1.852} D^{4.871})$ ดังนั้นที่อัตราการไหลใดๆ ค่า r ก็จะเป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหล แต่สูตรคำนวณที่แม่นยำกว่าคือสูตรคำนวณของ Darcy-Weisbach แต่การคำนวณค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน สัมประสิทธิ์ความต้านทาน $r = f(8L/g\pi^2 D^5)$ ซึ่ง f เป็นฟังก์ชันของอัตราการไหล (Q) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (D) และความขรุขระของผิวภายในท่อ (ε) ซึ่งต้องเปิดอ่านค่าจาก Moody diagram⁽³⁰⁾ สำหรับการเขียนโปรแกรมนิยมใช้การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานตามช่วงการไหล⁽³¹⁻³⁹⁾ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานตามช่วงการไหล

กรณีที่	ช่วงการไหล	สัมประสิทธิ์ความต้านทาน r	สูตรที่ใช้
1	$Re \leq 2,000$ laminar flow	$\frac{128\nu L}{g\pi Q D^4}$	Hagen-Poiseuille
2	$2,000 < Re < 4,000$ transitional flow	$\left(\sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta)\eta^k\right) \frac{8L}{g\pi^2 D^5}$	Donlop
3	$Re \geq 4,000$ turbulent flow	$\frac{\ln^2 10}{4\ln^2 \theta} \frac{8L}{g\pi^2 D^5}$	Swamee และ Jain

วิธีการของ Todini และ Pilati โดยเริ่มแรกนั้นคำนวณเฮดสูญเสียโดยใช้สมการของ Hazen-Williams แต่ในส่วนของการซอฟต์แวร์ EPANET ที่พัฒนาโดย Rossman ที่นำเอาอัลกอริทึมของ Todini และ Pilati มาใช้นั้นได้เพิ่มเติมตัวเลือกในการคำนวณเฮดสูญเสีย โดยสามารถเลือกการคำนวณเฮดสูญเสียจากสูตรของ Hazen-Williams และ Darcy-Weisbach สำหรับสูตรคำนวณของ Darcy-Weisbach แพกเตอร์ความเสียดทานขึ้นอยู่กับ Reynolds number และความขรุขระของท่อ แต่ในซอฟต์แวร์ EPANET ของ Rossman นั้นแพกเตอร์ความเสียดทานในเมตริกซ์จาโคเบียนนั้นไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล โดยไม่คิดอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์ความต้านทานเทียบกับอัตรา

การไหล $\partial r/\partial Q$ การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการนำส่วนดังกล่าวนี้มาคิดคำนวณด้วย ตามงานวิจัยของ Simpson ⁽²⁵⁾ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าในรอบการทำซ้ำรอบเดียวกัน จากสูตรคำนวณเฮดสูญเสียในท่อ

$$h_f = rQ^n \quad (3.1)$$

เมื่อ h_f คือ เฮดสูญเสียในท่อ
 Q คือ อัตราการไหลในท่อ
 n คือ เลขยกกำลัง (Darcy-Weisbach; $n = 2$)
 r คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทาน

สัมประสิทธิ์ความต้านทาน r มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = f \frac{8L}{g\pi^2 D^5} \quad (3.2)$$

เมื่อ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
 L คือ ความยาวท่อ
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
 f คือ แฟกเตอร์ความเสียดทานของ Darcy-Weisbach

แทนค่าสมการที่ 3.2 ในสมการที่ 3.1 จะได้

$$h_f = f \frac{8L}{g\pi^2 D^5} Q^2 \quad (3.3)$$

ดังนั้นเฮดสูญเสีย h_f จะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ความเสียดทานของ Darcy-Weisbach ซึ่งแปรผันตามช่วงการไหล โดยแบ่งตาม Reynolds number (Re) ได้ 3 ช่วงดังนี้

3.2.1 Laminar Flow ($Re < 2,000$)

ในช่วงการไหลนี้ใช้การประมาณค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน f จากสูตร
คำนวณของ Hagen–Poiseuille

$$f = \frac{64}{Re}$$

แทนค่า $Re = \frac{VD}{\nu}$ จะได้

$$f = \frac{64\nu}{VD}$$

เมื่อ V คือ ความเร็วเฉลี่ย

ν คือ ความหนืดจลน์ของน้ำตามอุณหภูมิ

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำตามอุณหภูมิ

เราสามารถเขียนสมการในเทอมของอัตราการไหลโดยแทนค่า $V = Q/A$ ในสมการจะได้

$$f = \frac{64\nu A}{QD}$$

แทนค่า $A = \frac{\pi D^2}{4}$ จะได้

$$f = \frac{64\nu \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)}{QD}$$

$$f = \frac{16\nu\pi D}{Q}$$

(3.4)

แทนค่าสมการที่ 3.4 ในสมการที่ 3.3 จะได้

$$h_f = \left(\frac{16\nu\pi D}{Q} \frac{8L}{g\pi^2 D^5} \right) Q^2$$

$$h_f = \left(\frac{128\nu L}{g\pi Q D^4} \right) Q^2 \quad (3.5)$$

จะได้สมการเฮดสูญเสียในช่วง Laminar Flow ดังนี้

$$h_f = rQ^n \quad ; \quad r = \frac{128\nu L}{g\pi Q D^4} \quad (3.6)$$

3.2.2 Transitional Flow ($2,000 < Re < 4,000$)

ใช้การประมาณค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน f จากสูตรคำนวณของ Dunlop (Donlop's interpolating cubic spline) แสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก ง

$$f = \sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta^k$$

แทนค่า f ในสมการที่ 3.3 จะได้

$$\begin{aligned} h_f &= \left(\sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta^k \right) \frac{8L}{g\pi^2 D^5} Q^2 \\ h_f &= rQ^2 \quad ; \quad r = \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta^k \end{aligned} \quad (3.7)$$

เมื่อ $\eta = Re/2000$

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{9/10}} \\ \hat{\theta} &= \frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{4000^{9/10}} \end{aligned}$$

โดยค่า α_k และ β_k ดังตารางที่ 3.2 และภาคผนวก ง

ตารางที่ 3.2 แสดงค่า α_k และ β_k

k	α_k	β_k
0	$5/(\xi^2 \ln^2 \hat{\theta})$	$\tau/(\xi^3 \ln^3 \hat{\theta})$
1	$0.128 - 12/(\xi^2 \ln^2 \hat{\theta})$	$-5\tau/(2\xi^3 \ln^3 \hat{\theta})$
2	$-0.128 + 9/(\xi^2 \ln^2 \hat{\theta})$	$2\tau/(\xi^3 \ln^3 \hat{\theta})$
3	$0.032 - 2/(\xi^2 \ln^2 \hat{\theta})$	$-\tau/(2\xi^3 \ln^3 \hat{\theta})$

3.2.3 Turbulent Flow (Re ≥ 4000)

ใช้การประมาณค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน f จากสูตรคำนวณของ Swamee และ Jain ในการประมาณค่าสูตรคำนวณของ Colebrook-White

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\varepsilon / 3.7D + 5.74 / \text{Re}^{0.9} \right) \right]^2} = \frac{\ln^2 10}{4 \ln^2 \theta} \quad (3.8)$$

เมื่อ $\theta = \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{\text{Re}^{9/10}}$
แทนค่า f ในสมการที่ 3.3 จะได้

$$h_f = \frac{\ln^2 10}{4 \ln^2 \theta} \frac{8L}{g\pi^2 D^5} Q^2$$

$$h_f = rQ^2 \quad ; \quad r = \frac{\ln^2 10}{4 \ln^2 \theta} \frac{8L}{g\pi^2 D^5} \quad (3.9)$$

โดยสมการเฮดสูญเสียของ Darcy-Weisbach ในแต่ละช่วงการไหลสรุปได้ดังนี้

$$h_f = \begin{cases} \frac{128\nu L}{g\pi Q D^4} Q^2 & ; \text{laminar} \\ \left(\sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k / \theta) \eta^k \right) \frac{8L}{g\pi^2 D^5} Q^2 & ; \text{transitional} \\ \frac{\ln^2 10}{4 \ln^2 \theta} \frac{8L}{g\pi^2 D^5} Q^2 & ; \text{turbulent} \end{cases}$$

สัมประสิทธิ์ความต้านทาน r มีค่าดังนี้

$$r = \begin{cases} \frac{128\nu L}{g\pi Q D^4} & ;\text{laminar} \\ \left(\sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta)\eta^k\right) \frac{8L}{g\pi^2 D^5} & ;\text{transitional} \\ \frac{\ln^2 10}{4\ln^2 \theta} \frac{8L}{g\pi^2 D^5} & ;\text{turbulent} \end{cases} \quad (3.10)$$

จากเมตริกซ์ความสัมพันธ์ของ Todini และ Pilati

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{10} & \mathbf{H}_0 \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

และเมื่อใช้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสันจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{10} & \mathbf{H}_0 \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (3.12)$$

เวกเตอร์เมตริกซ์ $\mathbf{x}$ ขนาด $n_p + n_j$ ของอัตราการไหล และเฮดที่ไม่ทราบค่าในระบบ โดย $\mathbf{x} = (\mathbf{q}^T, \mathbf{h}^T)^T$ โดยเมตริกซ์ในสมการที่ 3.12 เป็นเมตริกซ์สมมาตรเสมอ $\mathbf{A}_{11}$ เป็นเมตริกซ์แยงมุม เมตริกซ์ $\mathbf{0}$ เป็น 0 ทั้งหมด เมตริกซ์ $\mathbf{A}_{12}$ และ $\mathbf{A}_{21}$ เป็นเมตริกซ์ค่าคงที่ แต่เมตริกซ์ $\mathbf{A}_{11}$ จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลที่ไม่ทราบค่า และทำให้สมการที่ 3.12 เป็นสมการไม่เชิงเส้น ระบบสมการไม่เชิงเส้น $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ ในสมการที่ 3.12 สามารถหาคำตอบได้โดยระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(m)}) (\mathbf{x}^{(m+1)} - \mathbf{x}^{(m)}) = -\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(m)}) \quad \text{กำหนดให้เริ่มต้นที่ } \mathbf{x}^{(0)}$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

เมื่อ $\mathbf{J}$ คือเมตริกซ์จาโคเบียนของ $\mathbf{f}$ ส่วน m คือรอบการทำซ้ำ สำหรับ $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ คือ เวกเตอร์ฟังก์ชันของเวกเตอร์ตัวแปร $\mathbf{x}$ ในสมการที่ 3.12 เรากำหนดให้ $\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{f}$ คือเกรเดียนของ $\mathbf{f}$ เทียบกับ $\mathbf{x}$

ความจริงแล้ว **A12** **A10** **H0** และ **q** คือค่าคงที่เมื่อเทียบกับ **Q** และ **H** จาโคเบียนของสมการที่ 3.12 คือ

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \nabla_q (\mathbf{A11Q}) & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

เรานิยามให้เมตริกซ์แท่งมุม $[\mathbf{A11}] = \mathbf{A}(\mathbf{Q}, \mathbf{r}) \in \mathbb{R}^{n_p \times n_p}$ โดย

$$[\mathbf{A11}] = r_j |Q_j|^{n-1}$$

สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Darcy-Weisbach เลขยกกำลัง $n = 2$ ดังนั้นเมตริกซ์ $[\mathbf{A11}]$ มีค่าเท่ากับ

$$[\mathbf{A11}] = r_j |Q_j| \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, np$$

นิยามให้เวกเตอร์อัตราการไหลที่ไม่ทราบค่า $\mathbf{Q} = (Q_1, Q_2, \dots, Q_{np})^T$ และเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ความต้านทาน $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_{np})^T$

$$[\mathbf{A11Q}] = r_j Q_j |Q_j|$$

นิยามให้ $\mathbf{F} = \nabla_q (\mathbf{A11Q})$

$$\begin{aligned} \mathbf{F} = \nabla_q (\mathbf{A11Q}) &= \frac{\partial [\mathbf{A11Q}]_j}{\partial Q} = \frac{\partial}{\partial Q} r Q |Q| = 2r |Q| + Q |Q| \frac{\partial r}{\partial Q} \\ \mathbf{F} &= 2r |Q| + Q |Q| \frac{\partial r}{\partial Q} \end{aligned} \quad (3.13)$$

จากนั้นหาค่า $\frac{\partial r}{\partial Q}$ โดยพิจารณาสัมประสิทธิ์ความต้านทาน r เป็น 3 กรณีตามช่วงการไหล โดยอนุพันธ์ของ r เทียบกับ Q ของแต่ละช่วงการไหลมีค่าดังนี้ (รายละเอียดการหาอนุพันธ์แสดงไว้ในภาคผนวก จ)

$$\frac{\partial r}{\partial Q} = \begin{cases} -\frac{128\nu L}{g\pi Q^2 D^4} & \text{;laminar} \\ \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{1}{Q} \sum_{k=0}^3 \left[k(\alpha_k + \beta_k/\theta) + \frac{9}{10} c\beta_k \frac{1}{\theta^2} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right] \eta^k & \text{;transitional} \\ \frac{18c \ln^2 10}{5g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{1}{Q} \frac{1}{\theta \ln^3 \theta} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} & \text{;turbulent} \end{cases} \quad (3.14)$$

จากนั้นแทนค่า $\frac{\partial r}{\partial Q}$ ในสมการที่ 3.13 โดยแบ่งตามช่วงการไหล 3 ช่วงดังต่อไปนี้

3.2.4 อนุพันธ์ในช่วง Laminar Flow

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= 2r|Q| + Q|Q| \frac{\partial r}{\partial Q} \\ \mathbf{F} &= 2r|Q| + Q|Q| \left(-\frac{r}{Q} \right) \\ \mathbf{F} &= 2r|Q| - r|Q| \\ \mathbf{F} &= r|Q| ; r = \frac{128\nu L}{g\pi Q D^4} \end{aligned} \quad (3.15)$$

3.2.5 อนุพันธ์ในช่วง Transitional Flow

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= 2r|Q| + Q|Q| \frac{\partial r}{\partial Q} \\ \mathbf{F} &= 2r|Q| + Q|Q| \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{1}{Q} \sum_{k=0}^3 \left[k(\alpha_k + \beta_k/\theta) + \frac{9}{10} c\beta_k \frac{1}{\theta^2} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right] \eta^k \\ \mathbf{F} &= 2r|Q| + |Q| \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \sum_{k=0}^3 \left[k(\alpha_k + \beta_k/\theta) + \frac{9}{10} c\beta_k \frac{1}{\theta^2} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right] \eta^k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{F} &= 2 \left(\frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta^k \right) |Q| \\
&\quad + |Q| \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \sum_{k=0}^3 \left[k(\alpha_k + \beta_k/\theta) + \frac{9}{10} c \beta_k \frac{1}{\theta^2} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right] \eta^k \\
\mathbf{F} &= \left(\sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta^k \right) \frac{16}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} |Q| \\
&\quad + \left(\sum_{k=0}^3 \left[k(\alpha_k + \beta_k/\theta) + \frac{9}{10} c \beta_k \frac{1}{\theta^2} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right] \eta^k \right) \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} |Q|
\end{aligned}$$

แทนค่า $c = 5.74(\pi\nu/4)^{0.9}$

$$\begin{aligned}
\mathbf{F} &= \left(\sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta^k \right) \frac{16}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} |Q| \\
&\quad + \left(\sum_{k=0}^3 \left[k(\alpha_k + \beta_k/\theta) + \frac{9}{10} (5.74(\pi\nu/4)^{0.9}) \beta_k \frac{1}{\theta^2} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right] \eta^k \right) \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} |Q| \\
\mathbf{F} &= \left(\sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta^k \right) \frac{16}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} |Q| \\
&\quad + \left(\sum_{k=0}^3 \left[k(\alpha_k + \beta_k/\theta) + \frac{9}{10} \beta_k \frac{1}{\theta^2} 5.74 \left| \frac{\pi\nu D}{4Q} \right|^{9/10} \right] \eta^k \right) \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} |Q|
\end{aligned}$$

3.2.6 อนุพันธ์ในช่วง Turbulent Flow

$$\begin{aligned}
\mathbf{F} &= 2r|Q| + Q|Q| \frac{\partial r}{\partial Q} \\
\mathbf{F} &= 2r|Q| + Q|Q| \frac{18c \ln^2 10}{5g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{1}{Q} \frac{1}{\theta \ln^3 \theta} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \\
\mathbf{F} &= 2 \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{4 \ln^2 \theta} |Q| + |Q| \frac{18c \ln^2 10}{5g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{1}{\theta \ln^3 \theta} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \\
\mathbf{F} &= 2 \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{4 \ln^2 \theta} |Q| + |Q| \frac{18c \ln^2 10}{5g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{1}{\theta \ln^3 \theta} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10}
\end{aligned}$$

แทนค่า $c = 5.74(\pi\nu/4)^{0.9}$

$$\mathbf{F} = 2 \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{4 \ln^2 \theta} |Q| + |Q| \frac{18 \ln^2 10}{5g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{1}{\theta \ln^3 \theta} (5.74(\pi\nu/4)^{0.9}) \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10}$$

$$\mathbf{F} = 2 \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{4\ln^2 \theta} |Q| + |Q| \frac{18\ln^2 10}{5g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{1}{\theta \ln^3 \theta} (5.74) \left| \frac{\pi v D}{4Q} \right|^{9/10}$$

$$\mathbf{F} = \frac{\ln^2 10}{4\ln^2 \theta} \frac{16}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} |Q| + \frac{18}{5g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{\theta \ln^3 \theta} \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} |Q|$$

ดังนั้นเราจะได้เทอมของ $\mathbf{F}$ และ $\mathbf{A11}$ ดังตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 ตามลำดับ เทอมของเมตริกซ์ $\mathbf{F}$ ก่อนการแก้ไขมีแค่พจน์ $2r|Q|$ เพียงพจน์เดียว แต่เมตริกซ์ $\mathbf{F}$ หลังการแก้ไขมีพจน์ทั้งหมด คือ $2r|Q| + Q|Q| \frac{\partial r}{\partial Q}$ โดยเมตริกซ์ $\mathbf{F}$ หลังการแก้ไขจะมีพจน์ $Q|Q| \frac{\partial r}{\partial Q}$ เพิ่มเติมเข้ามา โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.5 โดยสูตรคำนวณเดิมในซอฟต์แวร์ EPANET2.0 ได้กำหนดให้เทอม $\partial r / \partial Q = 0$ ซึ่งหมายความว่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน r ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล Q แต่ความจริงแล้วสัมประสิทธิ์ความต้านทาน r เป็นฟังก์ชันของ Q ดังแสดงในสมการ 3.10

ตารางที่ 3.3 เทอมในเมตริกซ์ **F** ตามช่วงการไหล

ช่วงการไหล	ช่วงของ Re	เทอมในเมตริกซ์ F
Laminar	$Re \leq 2,000$	$\frac{128\nu}{g\pi} \frac{L}{D^4}$
Transitional	$2,000 < Re < 4,000$	$\left(\sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta^k \right) \frac{16}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} Q + \left(\sum_{k=0}^3 \left[k(\alpha_k + \beta_k/\theta) + \frac{9}{10} \beta_k \frac{1}{\theta^2} 5.74 \left \frac{\pi\nu D}{4Q} \right ^{9/10} \right] \eta^k \right) \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} Q $
Turbulent	$Re \geq 4,000$	$\frac{\ln^2 10}{4 \ln^2 \theta} \frac{16}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} Q + \frac{18}{5g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{\theta \ln^3 \theta} \frac{5.74}{Re^{0.9}} Q $

ตารางที่ 3.4 เทอมของแต่ละอีลิเมนต์ของเมตริกซ์ **A11**

ช่วงการไหล	ช่วงของ Re	เทอมในเมตริกซ์ A11
Laminar	$R \leq 2,000$	$(128\nu/\pi g)(L/D^4)$
Transitional	$2,000 < R < 4,000$	$ Q (8/\pi^2 g)(L/D^5) \sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta^k$
Turbulent	$R \geq 4,000$	$ Q (2 \ln^2 10 / \pi^2 g)(L/D)(1/\ln^2 \theta)$

ตารางที่ 3.5 เทอมในเมตริกซ์ **F** ก่อนและหลังการแก้ไข

ช่วงการไหล	ช่วงของ Re	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
Laminar	$R \leq 2,000$	$256 \frac{\nu}{g\pi} \frac{L}{D^4}$	$128 \frac{\nu}{g\pi} \frac{L}{D^4}$
Transitional	$2,000 < R < 4,000$	$\left(\sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k / \theta) \eta^k \right) \frac{16}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} Q $	$\left(\sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k / \theta) \eta^k \right) \frac{16}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} Q $ $+ \left(\sum_{k=0}^3 \left[k(\alpha_k + \beta_k / \theta) + \frac{9}{10} \beta_k \frac{1}{\theta^2} 5.74 \left \frac{\pi \nu D}{4Q} \right ^{9/10} \right] \eta^k \right) \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} Q $
Turbulent	$R \geq 4,000$	$\frac{\ln^2 10}{4 \ln^2 \theta} \frac{16}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} Q $	$\frac{\ln^2 10}{4 \ln^2 \theta} \frac{16}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} Q + \frac{18}{5g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{\theta \ln^3 \theta} \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} Q $

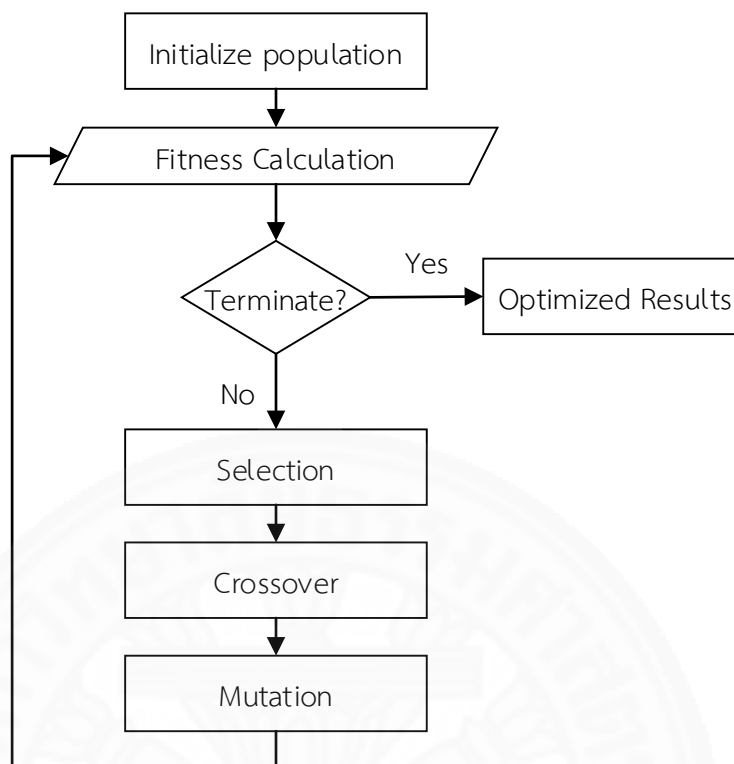
3.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดหรือการออปติไมเซชัน (Optimization) เป็นการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาหรือโจทย์ ซึ่งการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมีวิธีการหรืออัลกอริทึม (Algorithm) หลายวิธีซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมว่าแต่ละวิธีจะสามารถแก้ไขปัญหที่กำลังศึกษาอยู่ได้หรือไม่ สำหรับปัญหาทางด้านแบบจำลองโครงข่ายการจ่ายน้ำขนาดใหญ่อย่างโครงข่ายการจ่ายน้ำของ กปน. นั้นเป็นปัญหาที่ซับซ้อน เนื่องจากโครงข่ายการจ่ายน้ำของ กปน. มีลักษณะสลับซับซ้อนพื้นที่ให้บริการพื้นที่หนึ่งได้รับอิทธิพลจากการจ่ายน้ำจากสถานีสูบน้ำหลายสถานี และสถานีสูบน้ำหนึ่งสถานีสูบน้ำให้พื้นที่บริการมากกว่าหนึ่งพื้นที่ ดังนั้นปัญหาระบบการจ่ายน้ำของ กปน. จึงไม่สามารถหาฟังก์ชันที่ใช้อธิบายปัญหาได้ ดังนั้นปัญหาระบบโครงข่ายการจ่ายน้ำของ กปน. จึงเป็นปัญหาแบบกล่องดำ(Black box) สำหรับวิธีการที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาด้านโครงข่ายการจ่ายน้ำมีหลายอัลกอริทึม เช่น วิธีลำดับขั้นตอนเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) วิธีลองผิดลองถูก (Trial & Error) วิธีการของ Levenberg–Marquardt วิธีการของ meme (Memetic Algorithms) การสืบค้นด้วยตนเอง (heuristic-based) (Simulated Annealing (SA) Tabu Search Scatter Search Binary Linear Programming วิธี meta-heuristic Heuristic Approaches (HA)

3.2.1 ขั้นตอนเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm)

เป็นวิธีการที่เลียนแบบวิวัฒนาการทางธรรมชาติไม่ได้มีพื้นฐานจากวิธีการทางคณิตศาสตร์⁽⁴⁰⁾ โดยใช้แนวคิดจากทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติของดาร์วิน (Darwin's theory of evolution)

- 1) สร้างประชากรรุ่นแรกเพื่อใช้เป็นประชากรรุ่นพ่อแม่โดยการสุ่มตัวเลข
- 2) การคัดเลือกประชากรที่มีความฟิต(มีค่าฟังก์ชันเป้าหมายต่ำ) จำนวน A%
- 3) สร้างประชากรชุดใหม่จากประชากรที่ถูกคัดเลือกไว้ในขั้นตอนที่ 2 โดยการผสมในสัดส่วน B% จากนั้นสร้างประชากรชุดใหม่อีกหนึ่งชุดโดยทำให้เกิดการกลายพันธุ์ในสัดส่วน C% โดยสัดส่วน $A+B+C=100\%$ และสัดส่วน $B > C$
- 4) ประชากรในขั้นตอนที่ 3 ที่ผ่านการผสมพันธุ์และกลายพันธุ์คือประชากรรุ่นถัดไป จากนั้นทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง 3 ไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าฟังก์ชันเป้าหมายต่ำสุดจากรุ่นหนึ่งไปยังรุ่นถัดไปไม่ลดลงถือว่าได้คำตอบ

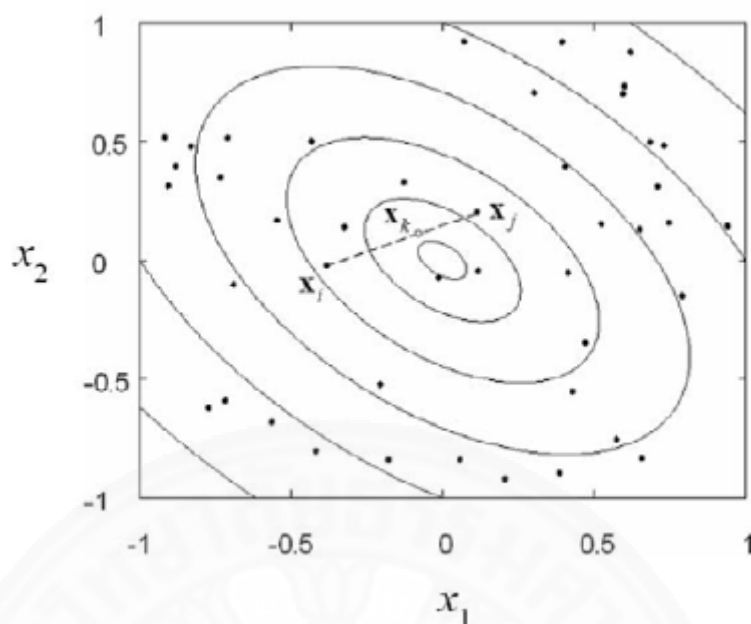


ภาพที่ 3.8 ขั้นตอนเชิงพันธุกรรม

การคัดเลือกประชากรที่มีความฟิต(Selection) เป็นการคัดเลือกชุดประชากรที่มีค่าฟังก์ชันเป้าหมายต่ำไว้จำนวนหนึ่งเพื่อเป็นประชากรชุดพ่อแม่ที่ดีเพื่อใช้ต่อไปในขั้นตอนการผสมพันธุ์ และการกลายพันธุ์ เหมือนกับการคัดพันธุ์พืชหรือพันธุ์สัตว์ที่คัดเลือกพ่อแม่พันธุ์ดีไว้เพื่อให้ได้รุ่นลูกที่ดี

3.2.1.1 การผสมพันธุ์ (crossover)

เป็นการสร้างประชากรชุดใหม่หรือรุ่นลูก จากประชากรรุ่นพ่อแม่ที่ถูกคัดเลือกไว้โดยสุ่มประชากรรุ่นพ่อแม่มา 2 ชุดที่แตกต่างกัน นั่นคือจุดที่ x_i และ x_j ดังภาพที่ 3.9 มาถ่วงน้ำหนักกันดังสมการที่ 3.16



ภาพที่ 3.9 การผสม⁽⁴⁰⁾

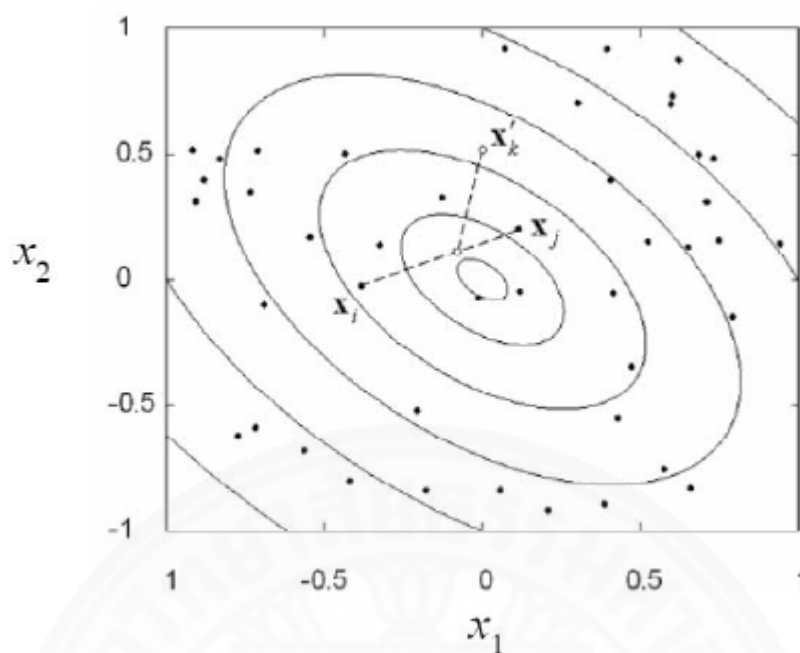
$$x = rx_i + (1-r)x_j \quad (3.16)$$

โดย r เป็นตัวเลขจากการสุ่มมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ($0 < r < 1$) หรือสามารถกำหนดขึ้นเองได้เพื่อให้การลู่เข้าหาคำตอบรวดเร็วขึ้น กำหนดให้ $r > 0.5$ เมื่อ $f(x_i) < f(x_j)$ และ กำหนดให้ $r < 0.5$ เมื่อ $f(x_i) > f(x_j)$

3.2.1.2 การกลายพันธุ์(Mutation)

เป็นวิธีการทำให้เกิดความหลากหลายของประชากร เหมือนกับการกลายพันธุ์ทางธรรมชาติ เพื่อให้คำตอบของปัญหาไม่ติดอยู่บริเวณที่เป็นค่าต่ำสุดเฉพาะถิ่น (local minimum) การกลายพันธุ์ทำได้โดยสุ่มตัวเลขเข้าไปเพื่อเบี่ยงเบนผลบวกที่เกิดจากการผสมพันธุ์ในสมการที่ 3.16

$$x'_k = x_k + d \cdot \hat{e} \quad (3.17)$$



ภาพที่ 3.10 การกลายพันธุ์⁽⁴⁰⁾

เมื่อ d คือระยะทางสุ่มในขอบเขตจำกัด โดยขึ้นอยู่กับความราบเรียบของฟังก์ชัน ควรใช้ค่า d น้อยกว่าระยะห่างระหว่าง x_i ถึง x_j ถ้าฟังก์ชันมีความราบเรียบสูง $\hat{c}$ คือเวกเตอร์ขนาดหนึ่งหน่วยที่ได้จากการสุ่ม การทำให้เกิดการกลายพันธุ์มีโอกาที่ประชากรที่สร้างขึ้นมานั้นจะดีกว่าเดิม (มีค่าฟังก์ชันเป้าหมายต่ำกว่าเดิม) หรือแย่กว่าเดิม (มีค่าฟังก์ชันเป้าหมายสูงกว่าเดิม) ซึ่งประชากรที่แย่กว่าเดิมนี้จะถูกคัดออกในขั้นตอนการคัดเลือก

3.2.2 การกำหนดตัวแปรควบคุมในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

3.2.2.1 ตัวแปรต้น

ตัวแปรต้นที่ศึกษาคือ ระดับเขตของสถานีสูบน้ำแต่ละแห่งของ กปน. มีจำนวนทั้งสิ้น 20 สถานี โดยระดับเขตสูงสุดในการสูบน้ำของแต่ละสถานีไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องสูบน้ำที่ติดตั้งในแต่ละสถานี โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.6 และภาพที่ 3.11

ตารางที่ 3.6 ระดับเขตสูงสุดของแต่ละสถานีสูบน้ำ

ลำดับที่	ชื่อสถานีสูบน้ำในแบบจำลอง	เขตน้ำสูงสุด	ตำแหน่งที่ตั้ง
1	BANGKHEN03	36	โรงผลิตน้ำบางเขน
2	BANGKHEN04	35	โรงผลิตน้ำบางเขน
3	BANGPLEE	35	สถานีสูบน้ำบางพลี
4	DU1	35	โรงผลิตน้ำบางสามเสน
5	K	35	โรงผลิตน้ำบางสามเสน
6	KLONGTAEY	36	สถานีสูบน้ำคลองเตย
7	LADKRABUNG	35	สถานีสูบน้ำลาดกระบัง
8	LADPRAW	50	สถานีสูบน้ำลาดพร้าว
9	LUMPINEE	44	สถานีสูบน้ำลุมพินี
10	MAHASAWAT	50	โรงผลิตน้ำมหาสวัสดิ์
11	MINBURI	35	สถานีสูบน้ำมีนบุรี
12	O1	35	โรงผลิตน้ำบางสามเสน
13	PETKASEM	50	สถานีสูบน้ำเพชรเกษม
14	RATBURANA	36	สถานีสูบน้ำราษฎร์บูรณะ
15	S	35	โรงผลิตน้ำบางสามเสน
16	SUMRONG	50	สถานีสูบน้ำสำโรง
17	THAPRA	36	สถานีสูบน้ำท่าพระ
18	TONBURI	35	โรงผลิตน้ำธนบุรี
19	U	35	โรงผลิตน้ำบางสามเสน
20	X	35	โรงผลิตน้ำบางสามเสน



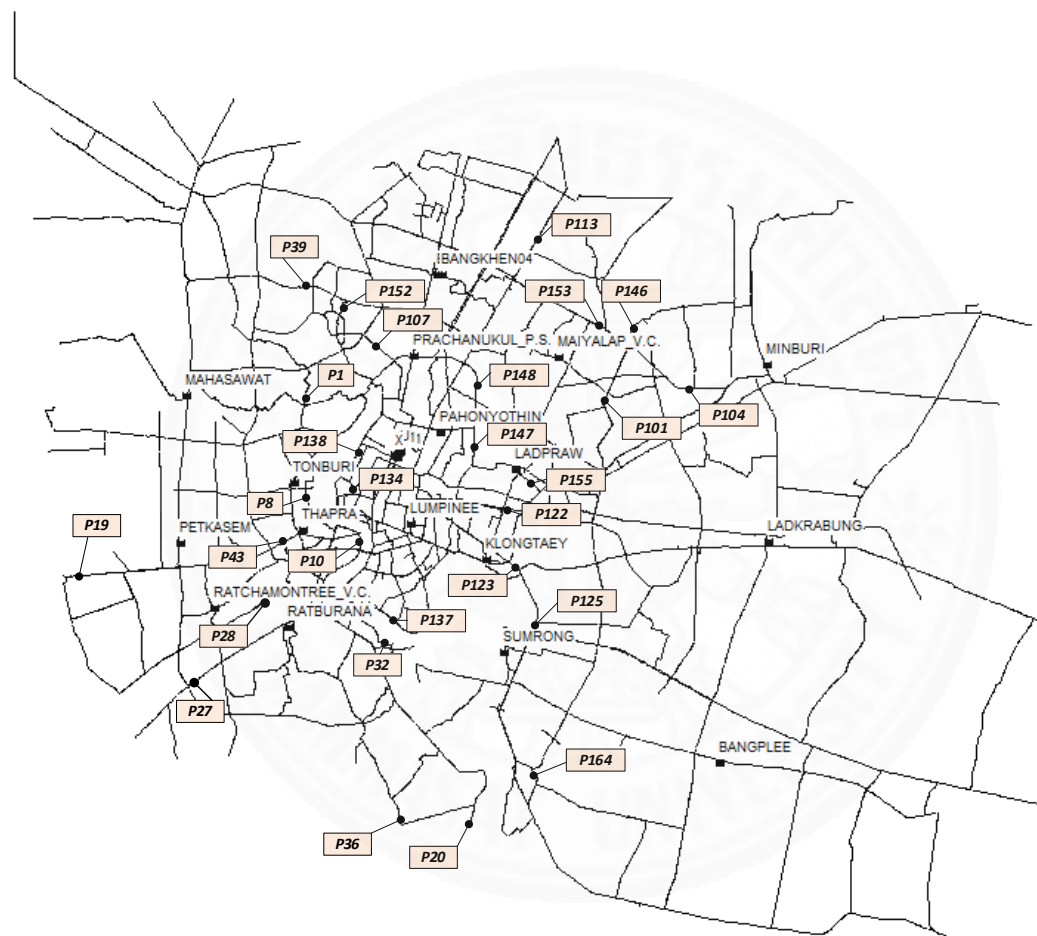
ภาพที่ 3.11 แสดงตำแหน่งสถานีสูบน้ำของ กปน.

3.2.2.2 ตัวแปรตาม

ตัวแปรตามในการการศึกษาคือระดับเอดของตำแหน่งที่สนใจบนแนวท่อประธาน โดยตำแหน่งที่สนใจที่นำมาศึกษาคือจุดวัดความดันประเณมผลที่ใช้ในการประเณมการจ่ายน้ำของ กปน. มีทั้งสิ้น 28 ตำแหน่งกระจายอยู่ทั่วทั้งโครงข่ายท่อประธาน ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.7 และภาพที่ 3.12

ตารางที่ 3.7 จุดวัดความดันประเณมผล

ลำดับที่	ตำแหน่งที่สนใจ	ลำดับที่	ตำแหน่งที่สนใจ
1	P1	15	P113
2	P8	16	P122
3	P10	17	P123
4	P19	18	P125
5	P21	19	P134
6	P27	20	P137
7	P28	21	P138
8	P32	22	P146
9	P36	23	P147
10	P39	24	P148
11	P43	25	P152
12	P101	26	P153
13	P104	27	P155
14	P107	28	P164



ภาพที่ 3.12 แสดงจุดวัดความดันประเมินผลในโครงข่ายท่อประธานของ กปน.

3.2.2.3 ฟังก์ชันเป้าหมาย

ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ความแตกต่างระหว่างระดับความดันที่ต้องการและความดันที่ซอฟต์แวร์คำนวณได้ ณ ตำแหน่งที่สนใจทั้ง 28 ตำแหน่ง

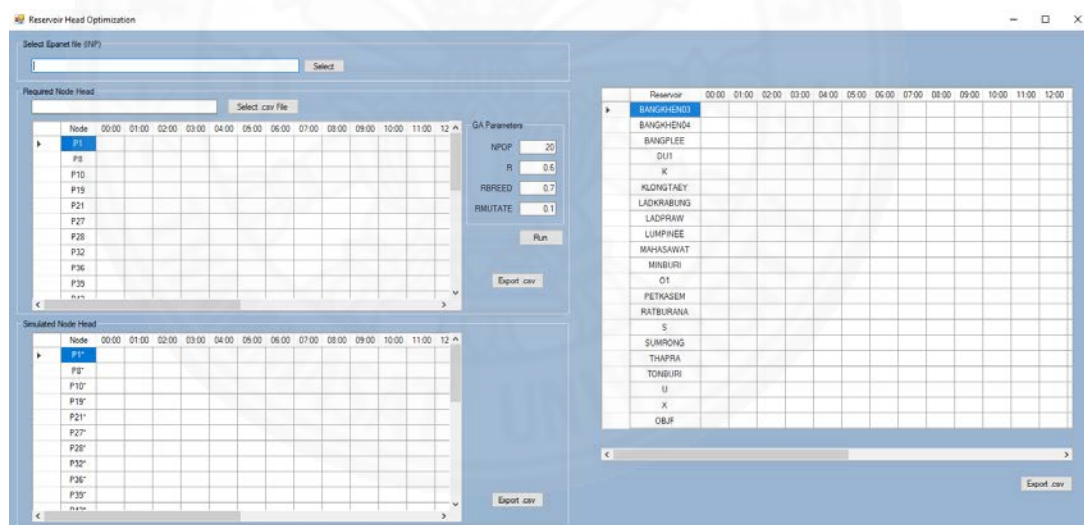
$$\min(OBJF) = \min\left(\sum_{i=1}^{28} |PG_i - P_i|\right)$$

PG_i คือ ระดับความดันที่ต้องการหรือระดับความดันคาดการณ์ในแต่ละชั่วโมง

P_i คือ ระดับความดันที่ซอฟต์แวร์คำนวณได้ในแต่ละชั่วโมง

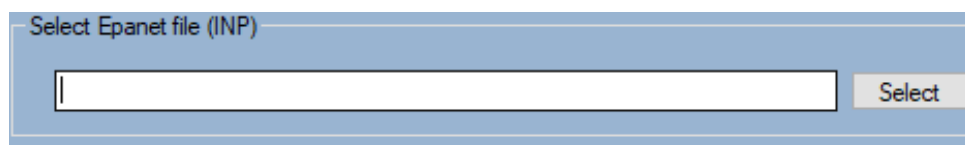
3.4 หน้าจอซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น

ซอฟต์แวร์เขียนขึ้นโดยใช้ Microsoft Visual Studio 2019 (Visual Basic.net) สามารถศึกษาได้จาก Source Code ในภาคผนวก ข โดยซอฟต์แวร์แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 3.13



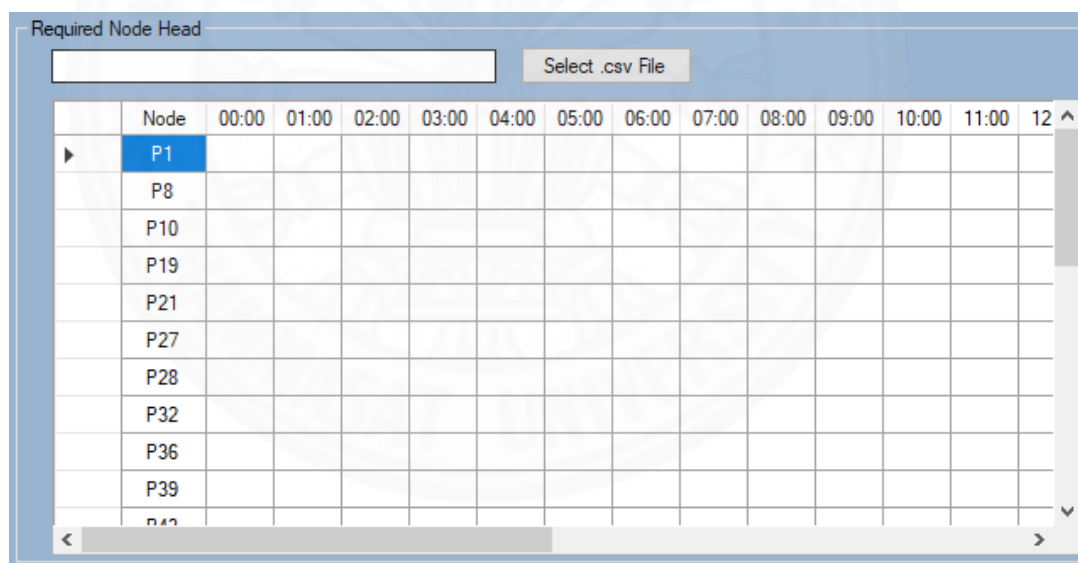
ภาพที่ 3.13 หน้าจอซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น

1) ส่วนแรกคือการเลือกไฟล์ input file (.inp) เป็นไฟล์แบบจำลองโครงข่ายที่ในซอฟต์แวร์ EPANET



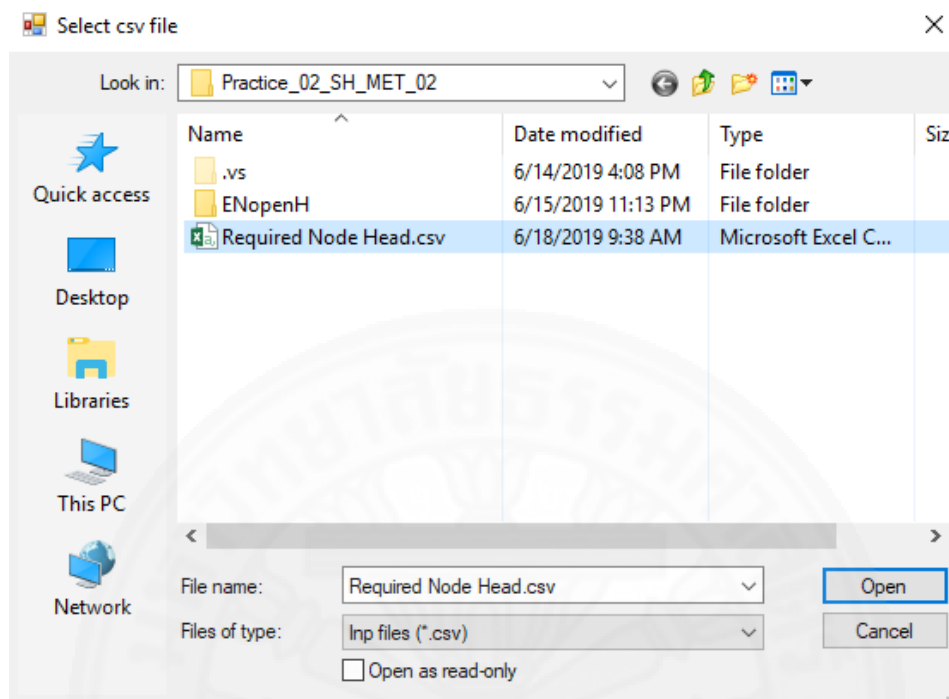
ภาพที่ 3.14 หน้าจอส่วนของการเลือก input file (.inp)

2) ส่วนที่ 2 คือส่วนของการกำหนดระดับความดันน้ำที่ต้องการของจุดวัดความดันประเมินผลทั้ง 28 จุดในแต่ละชั่วโมง โดยสามารถกำหนดค่าได้ 2 วิธี คือ (1) อ่านค่าจากไฟล์นามสกุล .csv หรือ (2) ป้อนค่าเองในตาราง การอ่านค่าจากไฟล์นามสกุล .csv กดปุ่ม Select .csv File จากนั้นไปเลือกไฟล์นามสกุล .csv ที่เราเก็บไว้



ภาพที่ 3.15 หน้าจอส่วนที่ 2 สำหรับกำหนดกำหนดระดับความดันน้ำของจุดวัดความดันประเมินผล

จากนั้นไปเลือกไฟล์นามสกุล .csv ที่เราเก็บไว้



ภาพที่ 3.16 เลือกไฟล์สำหรับการกำหนดความดันของจุดวัดความดันประเมินผล

โดยไฟล์นามสกุล .csv ต้องมีรูปแบบดังภาพที่ 3.17 โดยบันทึกเป็นชื่ออะไรก็ได้

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
1	Tris	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	
2	P1	17	18	15	10	15	19	19	10	18	14	16	15	13	20	18	11	18	10	18	14	13	20	11	17	12	
3	P8	11	16	20	17	13	11	20	12	12	17	17	11	14	19	15	19	10	13	12	12	19	11	17	13	11	
4	P10	12	15	17	10	14	12	14	16	20	17	19	17	20	20	10	12	20	18	19	20	18	15	19	20	20	
5	P19	18	11	13	19	10	12	19	11	13	19	15	10	15	10	13	17	12	19	18	11	17	11	15	10	16	
6	P21	18	14	18	18	10	12	11	10	19	19	12	18	17	19	11	19	13	14	13	10	14	18	10	16	20	
7	P27	14	15	18	18	14	16	16	18	18	15	20	10	20	14	17	11	20	11	13	11	12	13	11	20	16	
8	P28	20	18	13	13	18	19	12	15	10	19	19	20	14	15	14	12	13	12	12	19	19	19	17	19	20	
9	P32	10	13	17	20	19	13	20	12	16	18	17	12	13	12	15	15	15	14	18	10	10	10	18	10	19	
10	P36	14	16	19	18	17	17	20	17	12	10	12	19	13	11	13	19	11	12	12	11	19	18	20	14	10	
11	P39	14	16	18	17	10	16	10	13	14	18	14	19	20	20	14	11	13	20	20	12	19	16	19	19	19	
12	P43	13	18	20	14	16	19	11	14	16	15	14	12	20	12	14	20	20	20	18	14	14	16	16	19	13	
13	P101	13	19	10	12	12	18	14	10	15	11	19	18	12	13	20	16	19	16	16	11	14	11	19	20	17	
14	P104	10	15	14	18	19	16	14	16	19	10	15	17	15	13	20	15	11	16	18	10	17	12	13	20	13	
15	P107	10	11	12	14	20	11	18	18	12	12	10	14	15	12	14	17	15	20	17	11	14	13	16	15	15	
16	P113	20	11	14	11	16	11	17	15	16	10	10	16	10	14	19	11	16	11	12	20	10	18	18	20	11	
17	P122	19	15	13	16	20	17	18	19	20	16	11	16	14	14	16	16	16	15	12	11	12	14	16	11	18	
18	P123	11	16	18	20	18	12	13	14	14	17	13	17	20	16	12	14	16	10	12	13	18	13	20	11	11	
19	P125	11	11	19	14	15	10	13	10	10	17	19	15	20	16	15	18	11	13	15	16	16	20	11	17	19	
20	P134	20	20	16	13	18	19	17	20	16	17	20	14	15	14	19	14	13	19	10	14	19	10	14	15	12	
21	P137	12	17	15	18	14	15	10	16	16	13	16	17	11	13	17	19	17	12	10	14	17	13	14	17	20	
22	P138	10	16	17	12	14	17	18	19	14	11	17	18	14	20	11	12	11	13	15	19	12	10	13	19	11	
23	P146	11	17	16	16	18	12	10	15	11	19	12	20	20	12	12	16	13	16	19	14	13	12	13	19	13	
24	P147	14	18	14	13	19	17	10	11	13	11	18	17	16	18	19	10	15	14	14	10	18	13	10	16	19	
25	P148	19	14	15	15	20	20	10	10	15	13	19	13	12	12	12	19	15	10	17	13	20	14	14	18	10	
26	P152	20	11	18	14	17	15	17	17	15	18	19	17	17	10	12	19	16	15	15	14	15	13	18	13	12	
27	P153	12	15	16	18	17	12	11	19	17	20	17	15	20	13	13	12	10	13	10	14	12	17	11	17	10	
28	P155	14	15	14	20	13	15	16	12	19	12	20	13	16	16	20	17	10	16	11	12	11	10	16	13	18	
29	P164	18	19	15	18	10	15	12	12	11	16	16	11	10	20	13	18	14	11	17	14	14	15	17	12	20	
30																											

ภาพ 3.17 รูปแบบไฟล์สำหรับการกำหนดความดันของจุดวัดความดันประเมินผล

จากนั้นซอฟต์แวร์จะอ่านค่าจากไฟล์นามสกุล .csv ที่เราเลือกเข้ามาไว้ในตารางดังภาพที่ 3.18

Required Node Head

Reservoir Head Optimization\Required Node Head.csv

	Node	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
▶	P1	3.28	2.98	3.06	3.09	3.61	5.2	7.94	9.36	9.66	9.09	8.46	7.97	7.4
	P8	2.85	2.82	2.97	3.03	3.09	4.53	6.55	7.1	7.15	7.15	7.24	7.25	7.1
	P10	5.44	4.7	4.73	4.77	4.79	6.65	9	9.63	9.77	9.69	9.44	8.96	8.4
	P19	2.7	2.26	2.45	2.49	2.55	4	4.67	3.52	3.94	3.77	3.76	3.86	3.7
	P21	5	4.57	4.71	7.87	5.12	5.73	4.23	1.81	2.29	2.58	3.36	3.7	3.8
	P27	3.71	6.52	6.6	6.8	7.75	9.87	10.23	9.21	9.66	9.64	9.33	9.03	8.9
	P28	4.84	4.22	4.27	4.31	4.39	6.07	7.76	7.85	8.04	8.03	7.91	7.67	7.2
	P32	4.85	4.28	4.39	4.56	4.99	6.01	5.55	3.77	4.21	4.33	4.71	4.77	4.8
	P36	5.06	4.62	4.76	4.91	5.18	5.82	4.44	2.03	2.5	2.78	3.53	3.85	3.9
	P39	5.05	4.73	4.75	4.63	5.16	5.88	6.67	5.84	6.32	6.23	6.37	6.62	6.4
	P42	5.08	4.28	4.2	4.31	4.36	6.56	10	11.4	11.53	11.2	10.63	9.83	9.6

ภาพที่ 3.18 ตารางข้อมูลที่อ่านได้จากไฟล์นามสกุล .csv สำหรับกำหนดความดันของจุดวัดความดันประเมินผล

โดยตารางในภาพที่ 3.18 สามารถทำการแก้ไขข้อมูลได้และสามารถบันทึกข้อมูลที่แก้ไขแล้วจากตารางในรูปแบบของไฟล์นามสกุล .csv ได้ โดยกดที่ปุ่ม “Export .csv” ไฟล์จะถูกบันทึกในชื่อ “Goal.csv” โดยมีรูปแบบเช่นเดียวกันกับไฟล์ในภาพที่ 3.17 และสามารถใช้เป็นไฟล์ในการอ่านค่าเข้ามาในตารางได้

3) ส่วนที่ 3 คือส่วนการกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในวิธีการเชิงพันธุกรรม ในสมการที่ 3.16

GA Parameters

NPOP

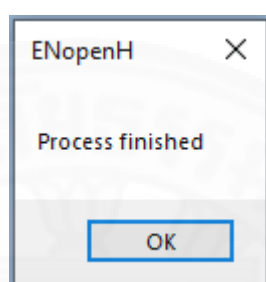
RCROSS

RMUTATE

NGEN

รูปที่ 3.19 หน้าจอสำหรับกำหนดตัวแปรสำหรับวิธีการเชิงพันธุกรรม

โดย NPOP คือจำนวนประชากรที่ต้องการสร้างขึ้น RCROSS คือสัดส่วนในการผสม RMUTATE คือสัดส่วนในการกลายพันธุ์ NGEN คือจำนวนรุ่นของประชากรที่ต้องการสร้าง หลังจากที่กำหนดตัวแปรต่างๆ เสร็จเรียบร้อยแล้วกดปุ่ม “Run” ซอฟต์แวร์จะคำนวณระดับเฮตของสถานีสุบจ่ายน้ำที่เหมาะสมที่สุดให้ ระยะเวลาในการคำนวณจะแปรผันตรงตามกับจำนวนประชากร สัดส่วนในการผสม สัดส่วนในการกลายพันธุ์และจำนวนรุ่นของประชากร เมื่อซอฟต์แวร์คำนวณเสร็จจะปรากฏหน้าจอแสดงข้อมูลดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 ข้อความแจ้งผลการคำนวณ

4) ส่วนที่ 4 ตารางแสดงผลความดันที่ได้จากเฮตที่เหมาะสมที่สุดเป็นรายชั่วโมง

Simulated Node Head

	Node	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12	^
	P134*	17.7	16.8	17.1	14.6	16.1	17.3	16.8	18.4	14.9	15.2	16.8	15.3	14	
	P137*	17	16.2	16.3	18	15.6	15.1	11.8	14	12.2	12	14.4	13	13	
	P138*	14.6	17.3	15.4	13.9	16.4	17.2	16	16.1	13.7	14.4	16.1	14.4	12	
	P146*	11.4	13.9	15.1	15.2	14.7	12.4	11.3	11	9.9	9.4	12.7	13.8	1	
	P147*	10.2	9.9	9.2	10	11.4	11.1	13.3	14.8	15	14.7	15.3	13.2	11	
	P148*	10.7	10.1	9.7	10.2	11.9	11.1	13.1	14.3	14.6	13.7	15	13.1	11	
	P152*	15.2	11.3	16.3	13.4	15.9	15.7	13	7.4	7.8	7.9	12.1	12.2	13	
	P153*	14.9	13.5	15.6	15.4	16.6	13.3	12.3	10.3	10.2	9.1	12.8	14.1	12	
	P155*	18.1	16.7	14.4	16.7	18.3	14	17.4	19.9	20.5	17	20.9	20.9	15	
	P164*	13.8	18.1	13.1	18.7	10.6	13.6	11.3	10.7	13	15	14.5	15.4	9	

Export .csv

รูปที่ 3.21 ความดันที่ได้จากระดับเฮตของสถานีสุบจ่ายที่เหมาะสมที่สุด

โดยสามารถบันทึกข้อมูลจากตารางในแบบของไฟล์นามสกุล .csv ได้ โดยกดที่ปุ่ม “Export .csv” ไฟล์จะถูกบันทึกในชื่อ “Simulate.csv” โดยมีรูปแบบดังภาพที่ 3.22

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	Node	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	1
2	P1*	16.8	16.1	18.3	15.1	15	13.4	16.2	13.1	12.3	15.4	17.4	
3	P8*	19.4	16.9	19.3	12.1	21.9	13.1	12.8	14.4	13.1	18.1	19.8	
4	P10*	20.3	12.4	20.1	15.5	14.4	17.9	14.8	13.8	15.5	15.1	19.4	
5	P19*	19.9	15	13.6	13.5	11.1	11.1	18.1	2.2	6.5	8.2	12.1	
6	P21*	19.1	13.5	15.8	18.2	11.7	12.5	10.6	9.3	4.5	11.7	15.9	
7	P27*	19.7	15.1	20	22.6	14.8	16.4	14.5	18.5	13.1	18.9	22.2	
8	P28*	17.9	11	17.7	14.1	12.6	15.4	12.5	11.3	12.6	12.8	16.6	
9	P32*	18.4	13	16.6	18.5	11.9	13	11.1	11.5	7.1	13.1	17	
10	P36*	19.1	13.5	15.9	18.3	11.8	12.6	10.7	9.6	4.7	11.9	16	
11	P39*	14.7	14.8	17	13.6	12.6	9.8	11.9	4.6	4.7	4.8	8.9	
12	P43*	20.8	11.9	19.7	15.2	13.8	18.2	15.9	14	17	16.4	20.6	
13	P101*	14.4	15.2	15.4	14.5	15.5	13.4	14.2	12.1	11.1	9.2	12.2	
14	P104*	17.9	16.9	19.6	15.9	19.9	14.6	16.9	15.8	15.8	12.7	14.6	
15	P107*	16.5	16.1	15.2	15.2	13.3	11.5	13.2	9.4	10.8	10.3	13.1	
16	P113*	15.1	15.3	17.4	12.7	15	11.8	11.8	7.1	6.6	5	10.1	
17	P122*	13.2	17.2	14	19.3	15.5	17.9	14.6	16.9	15	13.9	17.6	
18	P123*	13.2	17.2	13.9	18.8	15.4	16.6	12.7	16	13.1	12.5	17.8	
19	P125*	22.8	18.9	15.6	19.6	16.1	18.2	19.1	18.2	14.1	17.2	21.8	
20	P134*	15.8	21	21	17.4	19.8	17.2	18.4	14.3	15.5	13.5	18.7	
21	P137*	13.8	17.7	17.2	18.4	16.9	16.3	12.3	11.4	11.4	8.5	13.3	
22	P138*	13.8	16.6	17	15.5	18.4	17	18.2	13.9	15.5	13.3	17.9	
23	P146*	14.5	14.4	16	13.4	15.8	12	13.3	11.1	10.6	8.3	11.3	
24	P147*	9	10.5	8.4	11.7	9.8	12.7	13.8	14.8	14.6	13.5	15	
25	P148*	9.8	10.8	8.8	11.7	9.8	12.2	13.7	14.4	14.2	13.3	14.6	
26	P152*	15.2	15	17.1	13.6	12.8	9.8	12.1	6.3	6.7	6.2	10.1	
27	P153*	15.1	15.5	16.4	14.1	15.7	13	13.8	10.6	9.9	8.2	12.1	
28	P155*	13.7	19.2	14.9	22.9	16	25.8	23.8	24.7	19.3	18.5	21.4	
29	P164*	19.6	16.4	15.5	18	15.1	13	12.9	10.3	8.4	11.6	13.9	
30													

ภาพที่ 3.22 รูปแบบการบันทึกผลความดันน้ำในแต่ละจุดในรูปแบบของ .csv ไฟล์

5) ส่วนที่ 5 ตารางแสดงระดับความดันที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละสถานีเป็นรายชั่วโมง

	Reservoir	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
▶	BANGKHEN03	28.8	24	28.3	22.1	21.5	14.3	31.4	27.2	26.2	22.8	26.2	25.5	26.2
	BANGKHEN04	24	23.1	29.5	14.7	22.8	27.9	28.4	27.6	28.3	23.9	33.1	30.5	18.9
	BANGPLEE	20.1	19.9	22.8	24.1	24.3	16.3	17.5	21	26.5	21.5	19.7	17.9	17.9
	DU1	14.3	14.4	15.5	15.9	19.6	20.5	26.1	23.1	30	24.5	22.7	27	16.3
	K	20.6	22.1	23.4	22.8	17.2	31.3	24.7	17.8	19.3	18.5	26.3	20.4	22.1
	KLONGTAEY	14.5	24.1	16.8	29.3	23.9	20.5	14.4	27.3	23.4	18.8	29.1	26.8	28.9
	LADKRABUNG	31	13.8	13.6	11.3	19.3	21.8	22.6	27.8	18.4	15.7	27.6	17.4	20.2
	LADPRAW	15.8	25.8	18.3	32.2	19	39.3	37.9	39.5	30.6	30.3	31.1	41.4	39.1
	LUMPINEE	22.7	22.1	25.1	25.2	26.1	23.2	23.1	27.1	27.5	17	19.9	23.5	18
	MAHASAWAT	20	22.3	24.8	30.6	18.4	26.3	44.8	36.2	34	33.1	32.2	30.9	33.2
	MINBURI	22.7	17.8	25.9	16.4	27.3	14.7	24.3	28.3	32.1	24.5	21.6	23.9	24.1
	O1	26.8	28.4	29.9	26.2	19.4	31.1	20.5	18.4	16.4	32.3	24.9	17.4	24.8
	PETKASEM	36.7	28.1	21.6	23.2	20.2	22.8	46.5	24.9	32.2	32.3	34.8	24.3	35.5
	RATBURANA	24	19	23.9	26.6	18.8	22.1	24.7	33.3	27.1	31.8	33.3	22	26.8
	S	25.7	20.1	29.1	30.8	14.6	17.2	32.8	27.1	20.9	26.3	15.4	27.6	16.8
	SUMRONG	40.7	25.9	20.4	23.4	17.5	24.7	41.6	33.1	24	40.9	41.7	37.8	20.6
	THAPRA	23.3	13.3	22.2	16.7	15.5	21.3	17.7	17.1	20.6	19	23.8	18.7	23.5
	TONBURI	22	21.8	21.3	13.1	30.6	14.3	14.8	21.6	17.2	28.4	26	21.3	16.1
	U	25.6	21.9	13.3	30.2	15.2	23.3	19.2	17.9	30.7	31.4	21.1	24.1	23.4
	X	18.3	30	26.7	18.9	30.4	18.3	27.1	18.6	23	18.2	28	17.1	20.9
	OBJF	127.3	79.9	68.8	73.6	100.1	85.6	92.9	130	121.4	130.1	86.5	105.8	79.5

<
>

Export .csv

ภาพที่ 3.23 ความดันที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการคำนวณของซอฟต์แวร์

สามารถบันทึกข้อมูลจากตารางในแบบของไฟล์นามสกุล .csv ได้ โดยกดที่ปุ่ม “Export .csv” ไฟล์จะถูกบันทึกในชื่อ “ReservoirHead.csv” โดยมีรูปแบบดังภาพที่ 3.23

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	Reservoir	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	1
2	BANGKHEN03	28.8	24	28.3	22.1	21.5	14.3	31.4	27.2	26.2	22.8	
3	BANGKHEN04	24	23.1	29.5	14.7	22.8	27.9	28.4	27.6	28.3	23.9	
4	BANGPLEE	20.1	19.9	22.8	24.1	24.3	16.3	17.5	21	26.5	21.5	
5	DU1	14.3	14.4	15.5	15.9	19.6	20.5	26.1	23.1	30	24.5	
6	K	20.6	22.1	23.4	22.8	17.2	31.3	24.7	17.8	19.3	18.5	
7	KLONGTAEY	14.5	24.1	16.8	29.3	23.9	20.5	14.4	27.3	23.4	18.8	
8	LADKRABUNG	31	13.8	13.6	11.3	19.3	21.8	22.6	27.8	18.4	15.7	
9	LADPRAW	15.8	25.8	18.3	32.2	19	39.3	37.9	39.5	30.6	30.3	
10	LUMPINEE	22.7	22.1	25.1	25.2	26.1	23.2	23.1	27.1	27.5	17	
11	MAHASAWAT	20	22.3	24.8	30.6	18.4	26.3	44.8	36.2	34	33.1	
12	MINBURI	22.7	17.8	25.9	16.4	27.3	14.7	24.3	28.3	32.1	24.5	
13	O1	26.8	28.4	29.9	26.2	19.4	31.1	20.5	18.4	16.4	32.3	
14	PETKASEM	36.7	28.1	21.6	23.2	20.2	22.8	46.5	24.9	32.2	32.3	
15	RATBURANA	24	19	23.9	26.6	18.8	22.1	24.7	33.3	27.1	31.8	
16	S	25.7	20.1	29.1	30.8	14.6	17.2	32.8	27.1	20.9	26.3	
17	SUMRONG	40.7	25.9	20.4	23.4	17.5	24.7	41.6	33.1	24	40.9	
18	THAPRA	23.3	13.3	22.2	16.7	15.5	21.3	17.7	17.1	20.6	19	
19	TONBURI	22	21.8	21.3	13.1	30.6	14.3	14.8	21.6	17.2	28.4	
20	U	25.6	21.9	13.3	30.2	15.2	23.3	19.2	17.9	30.7	31.4	
21	X	18.3	30	26.7	18.9	30.4	18.3	27.1	18.6	23	18.2	
22	OBJF	127.3	79.9	68.8	73.6	100.1	85.6	92.9	130	121.4	130.1	
23												

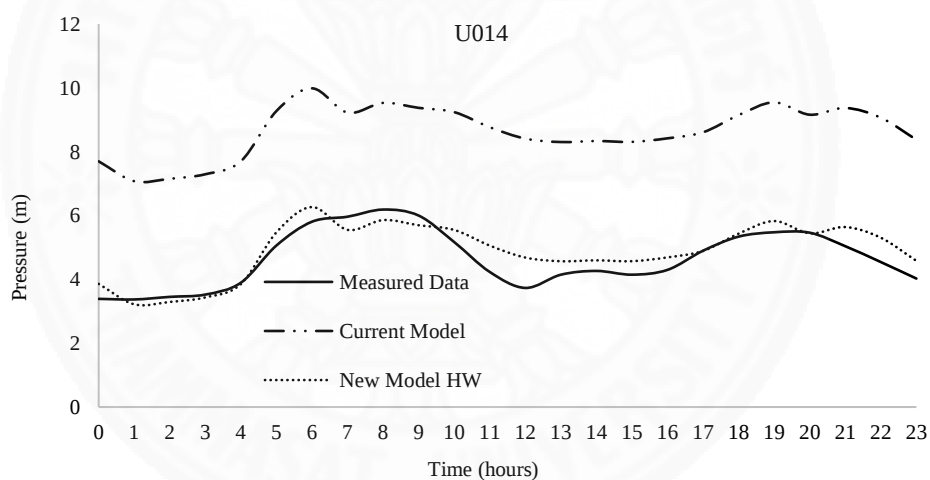
ภาพที่ 3.24 รูปแบบการบันทึกผลระดับเขตของแต่ละสถานีสูบน้ำจ่ายในรูปแบบของ .csv ไฟล์

บทที่ 4

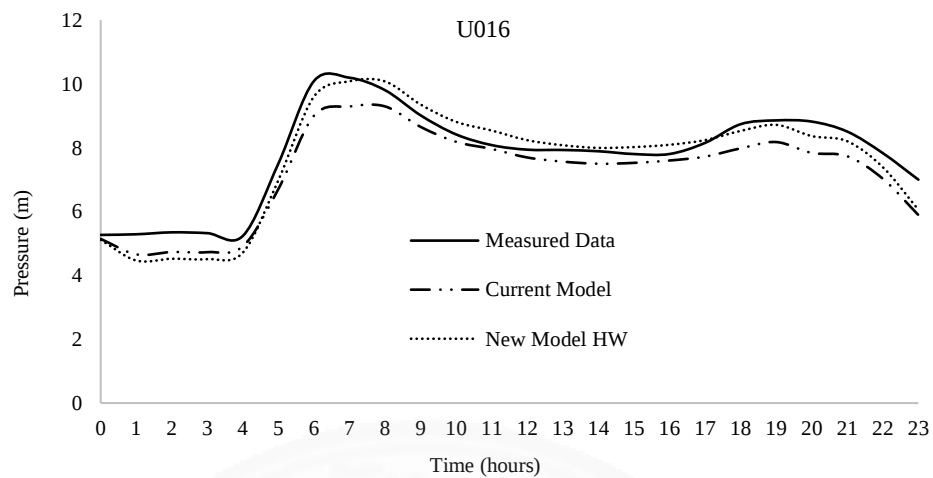
ผลการวิจัย

4.1 ผลลัพธ์การแก้ไขระดับความสูงของแนวเส้นท่อประธาน

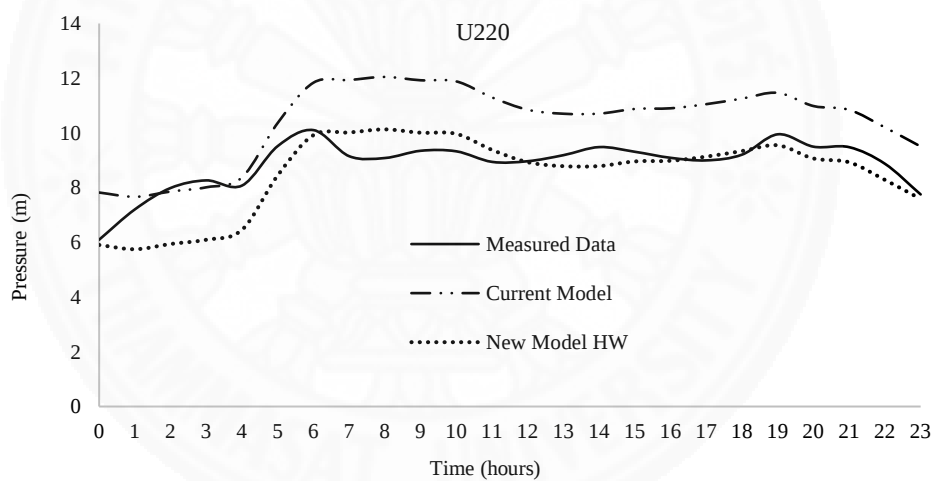
หลังจากที่ได้แก้ไขค่าระดับความสูงของโหนดต่างๆ ในระบบเส้นท่อประธานแล้ว ได้ทำการสอบเทียบแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับความดันที่วัดได้จริงจากเครื่องมือวัดตามจุดต่างๆ จำนวน 134 จุด พบว่าแบบจำลองโครงข่ายท่อประธานที่ได้ทำการปรับแก้ไขแล้วมีความเที่ยงตรงโดยเฉลี่ยมากกว่าแบบจำลองเดิม โดยเปรียบเทียบค่าจากจุดวัดความดันเป็นรายชั่วโมง จากเดิมมีค่าความเที่ยงตรง 83.68% เพิ่มขึ้นเป็น 87.63% ดังตัวอย่างในภาพที่ 4.1 ถึงภาพที่ 4.2 ของจุดวัดความดันหมายเลข U014 U016 U022 U145 ตามลำดับ



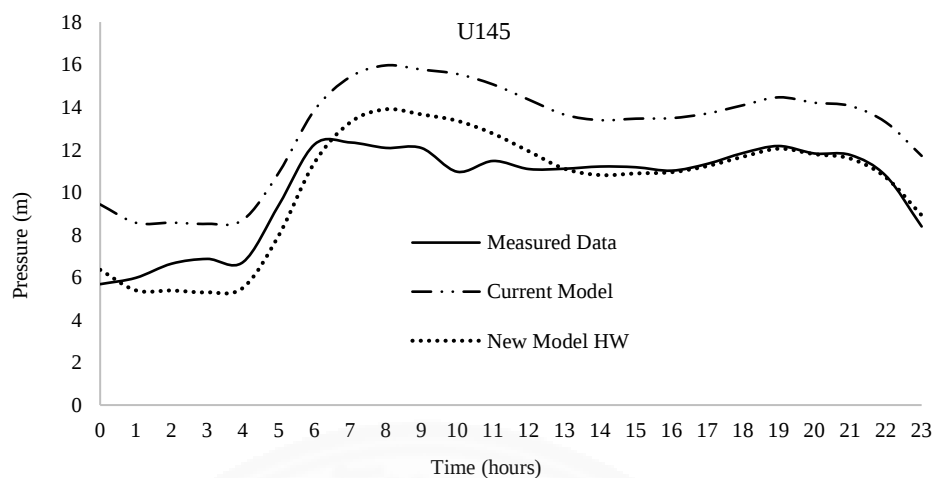
ภาพที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่
และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U014



ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่
และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U016

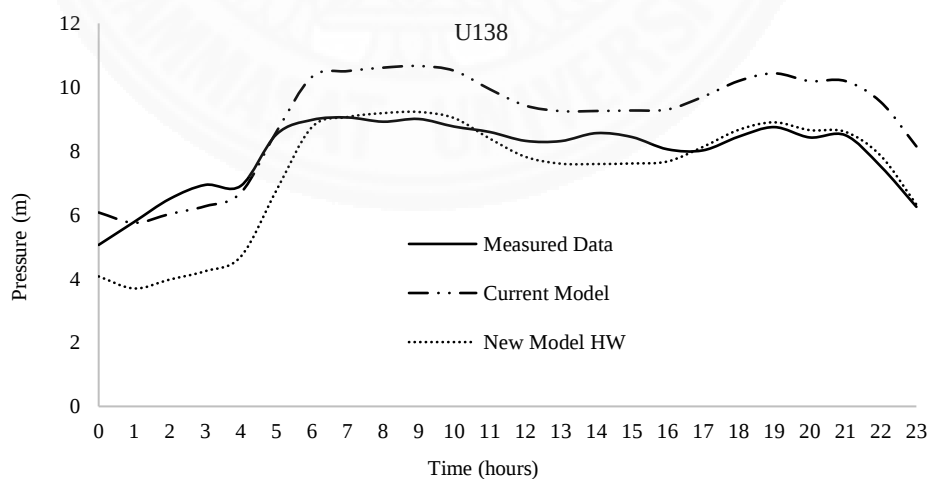


ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่
และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U022



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่
และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U145

เมื่อแก้ไขระดับความสูงแล้วจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของแบบจำลองที่แก้ไขแล้วมีค่าใกล้เคียงผลการวัดจริงมากขึ้น ถึงแม้ภาพรวมของแบบจำลองที่แก้ไขแล้วจะดีขึ้น แต่มีบางจุดที่หลังจากแก้ไขระดับความสูงแล้วมีความผิดพลาดลดลงก็จริงแต่เส้นกราฟจะแนบเข้าหากันในบางช่วงเวลาเท่านั้น บางช่วงเวลายังมีความแตกต่างกันอยู่มากอยู่พอสมควร ยกตัวอย่างเช่นจุดวัดความดันหมายเลข U138 ในช่วงเวลา 0:00 - 5:00 น. ดังภาพที่ 4.5

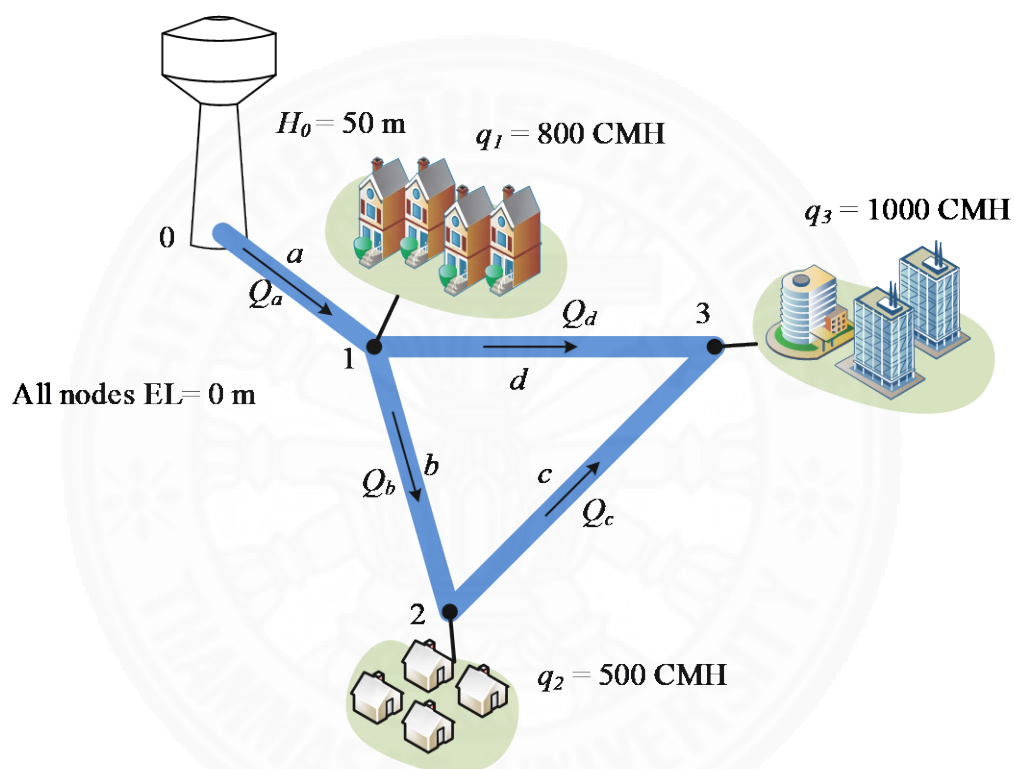


ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่
และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U138

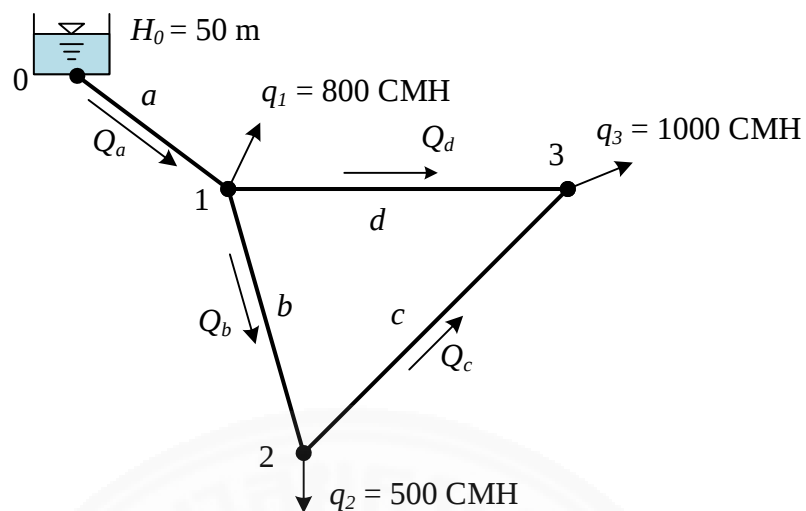
ซึ่งคาดว่าความผิดพลาดนี้อาจเกิดจากการเลือกใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสีย โดยปัจจุบัน กปน. ใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Hazen-Williams โดยกำหนดค่า C_{HW} เท่ากับ 120 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้สำหรับท่อเหล็กเหนียว(ST)ที่เป็นท่อใหม่เท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วท่อของ กปน. นั้นได้ใช้งานมานานแล้ว ผิวท่อด้านในจะมีความขรุขระสูงขึ้น ดังนั้นค่า C_{HW} จะไม่เป็นไปตามที่ระบุไว้เบื้องต้น และการใช้สูตรคำนวณของ Hazen-Williams มีความแม่นยำน้อยกว่า Darcy-Weisbach เนื่องจากไม่แปรผันตามอัตราการไหล จากงานวิจัยของ Chyr Pyng Liou⁽⁵⁰⁾ เกี่ยวกับผลกระทบของการเลือกใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียได้กล่าวไว้ว่าการใช้สูตรคำนวณของ Hazen-Williams ที่ใช้เพียงค่า resistance coefficient C_{HW} เพียงค่าเดียว หากนำไปใช้นอกขอบเขตอาจทำให้เกิดความผิดพลาดสูงถึง 40% และงานวิจัยของ Fabian⁽²⁵⁾ ก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ สูตรคำนวณของ Hazen-Williams มักจะถูกใช้ในการออกแบบท่อส่งน้ำขนาดใหญ่โดยไม่ได้นำถึงข้อจำกัดในการใช้งาน การใช้งานสูตรคำนวณของ Hazen-Williams มีความเที่ยงตรงแค่ในช่วงการไหลแบบเปลี่ยนแปลง (transition) หรือแบบราบรื่น (smooth) การไหลเชี่ยว (turbulent) ควรใช้สูตรคำนวณของ Hazen-Williams ใช้ในช่วงอัตราการไหล $10^5 < Re < 10^8$ ในการใช้งานจริงช่วงการไหลในการจ่ายน้ำนั้นมักจะอยู่นอกเหนือเงื่อนไขดังกล่าวมานี้ ถ้ามีการไหลนอกเหนือจากช่วงอัตราการไหลดังกล่าวนี้ควรใช้สูตรคำนวณของ Darcy-Weisbach ซึ่งครอบคลุมทุกช่วงการไหลและตัวแปรต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามกายภาพของน้ำและท่อ นอกจากนี้การใช้สูตรคำนวณของ Hazen-Williams ยังมีปัญหาในการคำนวณของคอมพิวเตอร์เมื่อเกิด zero flow^(51,52) ในท่อ ซึ่งพบว่างานวิจัยดังกล่าวนี้สอดคล้องกับข้อมูลของ กปน. ดังตัวอย่างในภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาที่มีการใช้น้ำสูง (6:00 – 23:00 น.) ผลการจำลองความดันจากซอฟต์แวร์ EPANET จะใกล้เคียงกับผลการวัดจริง แต่ช่วงที่มีการใช้น้ำต่ำ (0:00 – 5:00 น.) ผลการจำลองจากซอฟต์แวร์ EPANET จะมีค่าแตกต่างจากผลการวัดจริง ดังนั้นควรมีการปรับเปลี่ยนสูตรการคำนวณเฮดสูญเสียโดยใช้สูตรคำนวณของ Darcy-Weisbach แทนการใช้สูตรคำนวณของ Hazen-Williams โดยกำหนดค่าตัวแปรสำหรับสูตรคำนวณของ Darcy-Weisbach ดังนี้ $\varepsilon = 4$ มม. $\nu = 0.802 \times 10^{-6}$ เมตร²/วินาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเงื่อนไขการหยุด $< 10^{-6}$.

4.2 ผลลัพธ์หลังจากการแก้ไขสูตรคำนวณเฮดสูญเสีย

หลังจากทำการแก้ไขสูตรคำนวณเฮดสูญเสียแล้วได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของซอฟต์แวร์โดยใช้โครงข่ายการจ่ายน้ำอย่างง่าย ดังภาพที่ 4.6 แล้วทำการเปรียบเทียบความผิดพลาดสัมพัทธ์ (relative error) ที่ได้จากการคำนวณแต่ละรอบโดยได้ผลดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.6 โครงข่ายการจ่ายน้ำอย่างง่าย



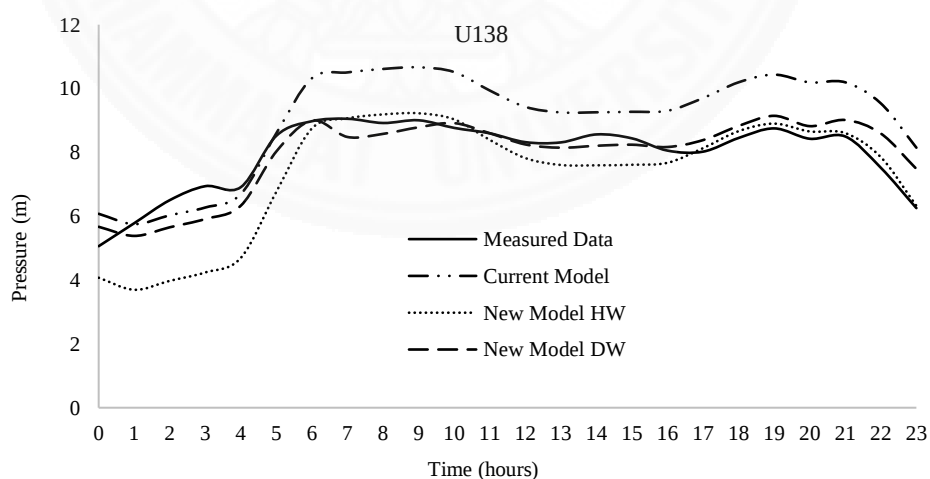
ภาพที่ 4.6 ไดอะแกรมของโครงข่ายการจ่ายน้ำอย่างง่าย

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบการลู่เข้าของเมตริกซ์จาโคเบียน

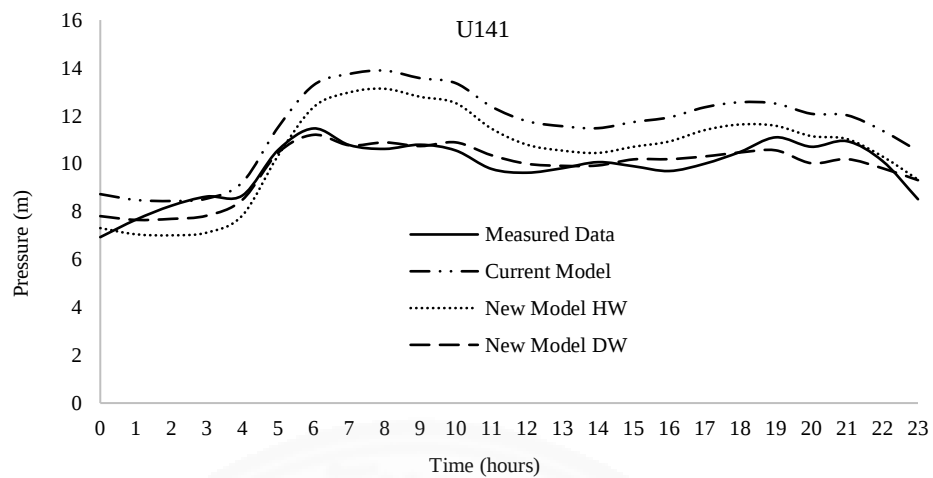
รอบการคำนวณ	ความผิดพลาดสัมพัทธ์	
	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
0	1.903E+00	1.903E+00
1	8.710E-03	8.589E-03
2	3.532E-03	3.452E-03
3	1.429E-03	1.383E-03
4	5.770E-04	5.538E-04
5	2.330E-04	2.216E-04
6	9.405E-05	8.864E-05
7	3.796E-05	3.546E-05
8	1.532E-05	1.418E-05
9	6.185E-06	5.674E-06
10	2.496E-06	2.269E-06
11	1.008E-06	9.078E-07
12	4.067E-07	3.631E-07
13	1.641E-07	1.452E-07

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าในรอบการทำซ้ำรอบเดียวกันเมตริกซ์จาโคเบียนที่ได้รับการแก้ไขมีค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่า โดยจาโคเบียนเมตริกซ์ที่ได้รับการแก้ไขมีการลู่เข้าสู่คำตอบเร็วกว่าเมตริกซ์เดิม โดยรอบการคำนวณแรกๆ อาจจะไม่เห็นความแตกต่าง แต่รอบการคำนวณหลายๆ จะเห็นผลชัดเจนขึ้น

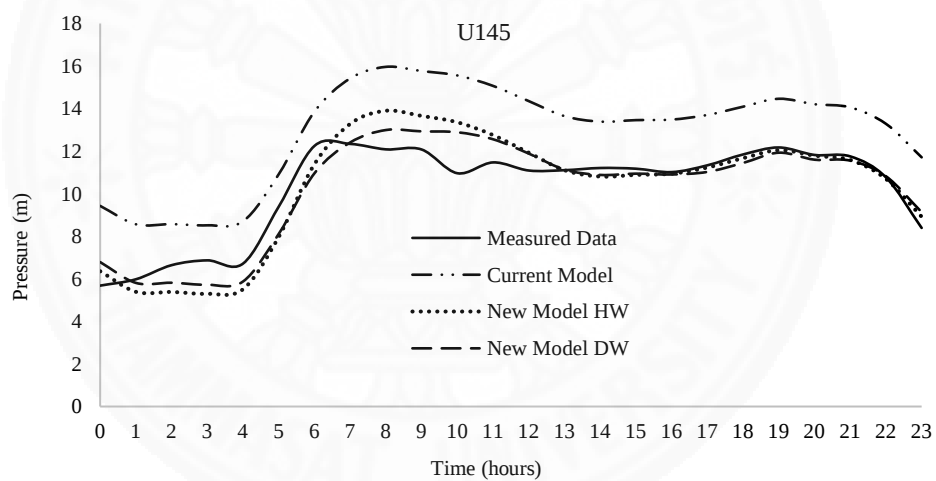
หลังจากที่ได้แก้ไขเมตริกซ์จาโคเบียนแล้วได้ทำการเปรียบเทียบผลอีกครั้งบนโครงข่ายการจ่ายน้ำของการประปานครหลวงและเปรียบเทียบกับผลการวัดจริง โดยมีข้อมูลในการเปรียบเทียบดังนี้ 1) Measured Data คือ ความดันน้ำที่วัดจริงจากภาคสนาม 2) Current Model คือ ความดันน้ำจากการคำนวณโดยโครงข่ายเดิมที่ไม่ได้แก้ไขระดับความสูงและใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Hazen-Williams 3) New Model HW คือ ความดันน้ำจากการคำนวณโดยโครงข่ายที่แก้ไขระดับความสูงแล้วและใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Hazen-Williams และ 4) New Model DW คือ ความดันน้ำจากการคำนวณโดยโครงข่ายที่แก้ไขระดับความสูงแล้วและใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Darcy-Weisbach เมื่อทำการเปรียบเทียบผลอีกครั้งพบว่า การกำหนดความสูงของแต่ละโหนดให้กับโครงข่ายการจ่ายน้ำของ กปน. ร่วมกับการใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Darcy-Weisbach ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับผลการวัดจริงมากที่สุดในทุกช่วงเวลา โดยมีความเที่ยงตรงเพิ่มขึ้นเป็น 92.32% ดีกว่าแบบจำลองเดิมที่ไม่ได้แก้ไขระดับความสูงและใช้สูตรคำนวณของ Hazen-Williams 8.65% และดีกว่าแบบจำลองที่แก้ไขระดับความสูงแล้วแต่ยังใช้สูตรคำนวณของ Hazen-Williams 4.70% โดยแสดงได้ดังภาพที่ 4.7 ถึง ภาพที่ 4.11



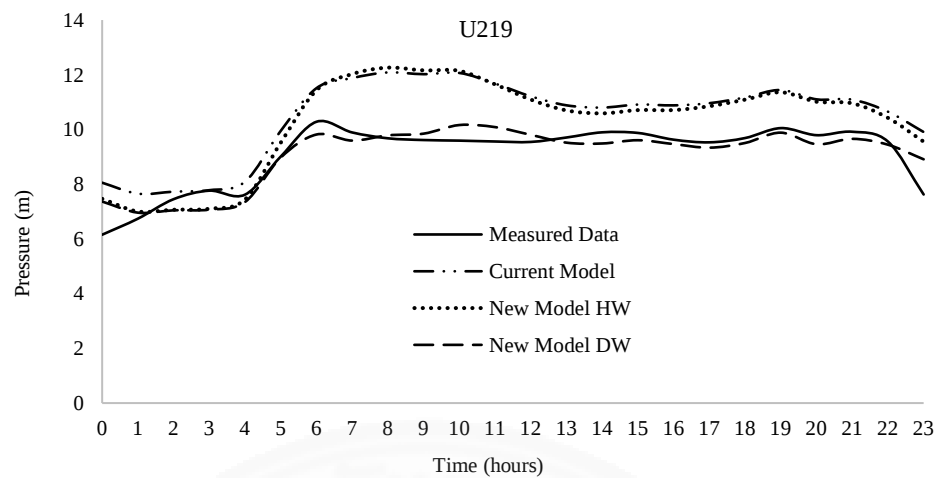
ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U138



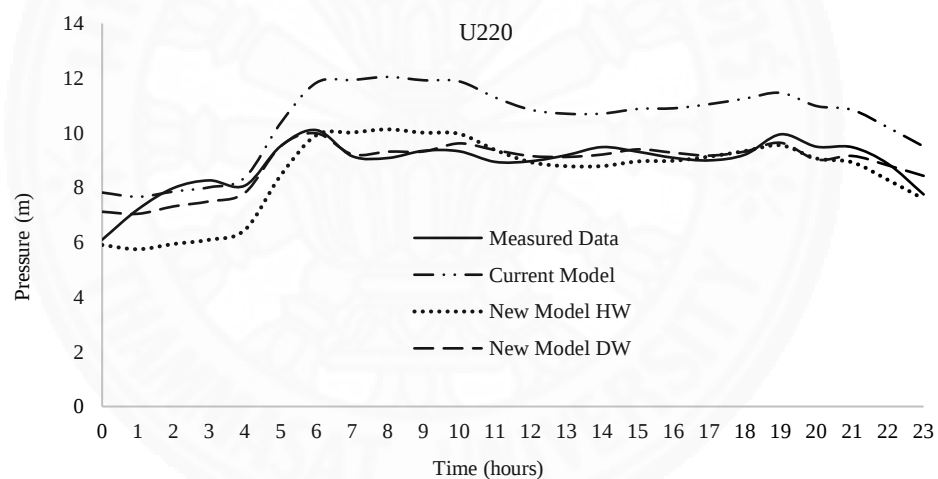
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่
และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U141



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่
และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U145



ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U219



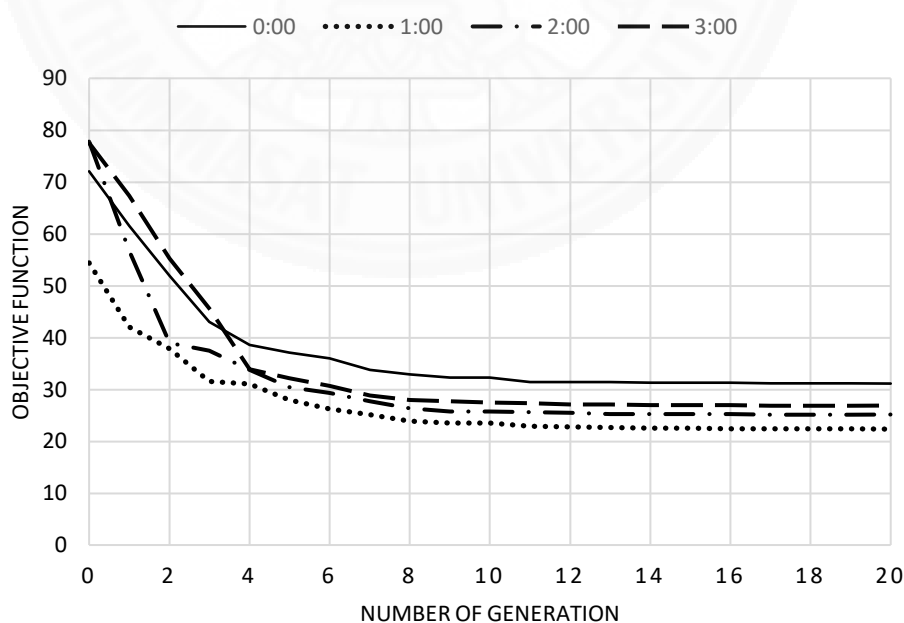
ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าการคำนวณของแบบจำลองเดิม แบบจำลองใหม่ และผลการวัดจริงของจุดวัดความดันหมายเลข U220

จากภาพจะเห็นได้ว่าหลังจากที่กำหนดความสูงและแก้ไขสูตรคำนวณเฮดสูญเสียแล้วผลการคำนวณจากซอฟต์แวร์มีค่าใกล้เคียงผลการวัดจริงมากกว่า เนื่องจากได้กำจัดข้อผิดพลาดที่เกิดจากระดับความสูงผนวกกับการกำจัดข้อผิดพลาดเนื่องจากการใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียที่ไม่ตรงตามช่วงอัตราการไหล

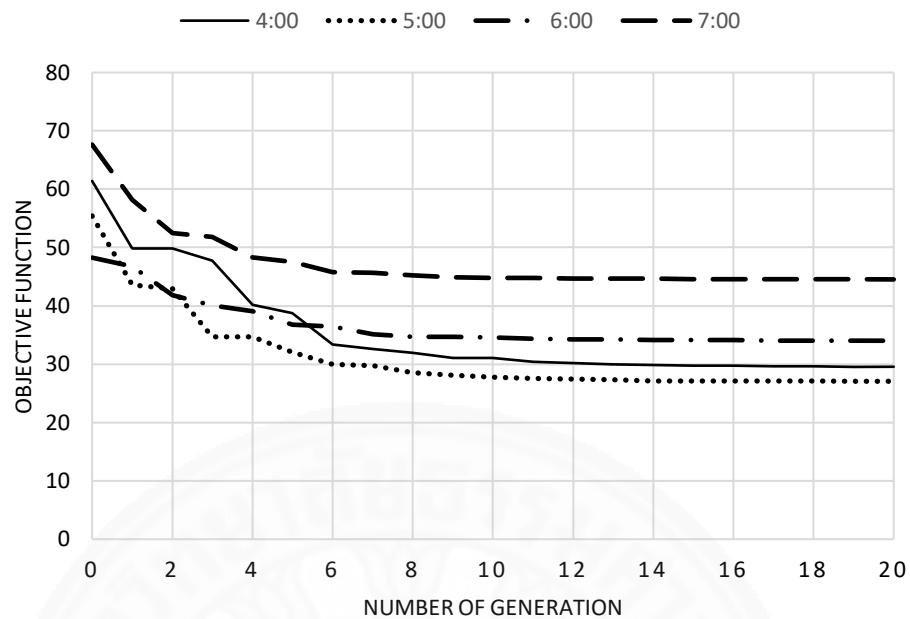
4.3 การหาระดับเฮดที่เหมาะสมที่สุดในการจ่ายน้ำของสถานีสูบน้ำ

ในการหาระดับเฮดที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละสถานีในแต่ละช่วงเวลาเพื่อให้จุดวัดความดันประเมินผลทั้ง 28 จุดมีความดันน้ำใกล้เคียงกับระดับความดันที่ต้องการ การประปานครหลวงตั้งเป้าหมายในการจ่ายน้ำให้ทุกจุดบนท่อประธานมีระดับความดันน้ำอย่างน้อย 10 เมตรน้ำ และจุดวัดความดันประเมินผลที่ทางการประปานครหลวงได้กำหนดไว้เป็นตำแหน่งปลายเส้นท่อ ดังนั้นในเบื้องต้นจึงกำหนดความดันของจุดวัดความดันประเมินผลทั้ง 28 จุดไว้ที่ 10 เมตรน้ำ เพื่อให้แน่ใจได้ว่าทุกจุดบนท่อประธานจะมีระดับความดันอย่างน้อย 10 เมตรน้ำ ตลอด 24 ชั่วโมง

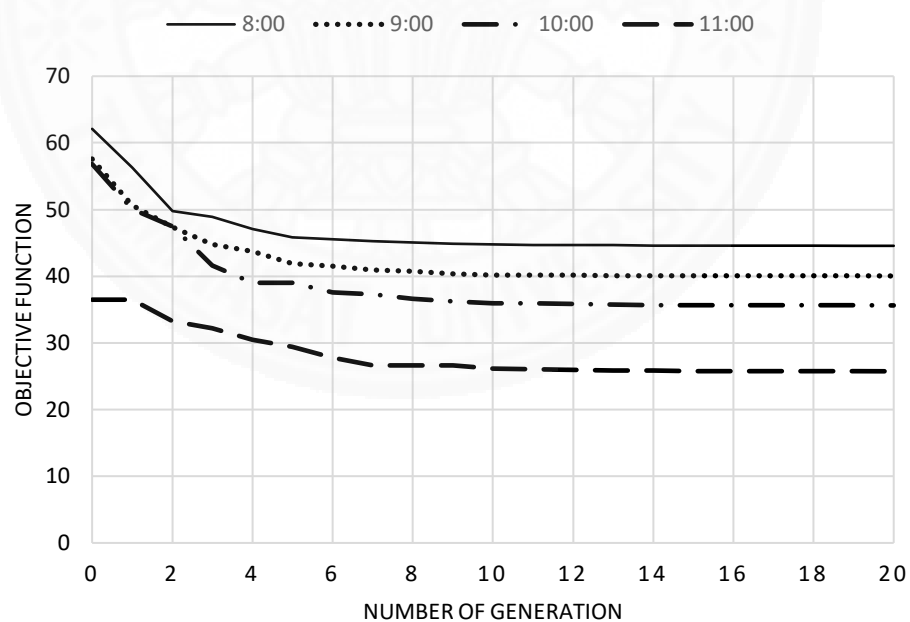
โดยกำหนดตัวแปรสำหรับวิธีการทางพันธุกรรมไว้ดังนี้ NPOP=200 R=0.6 RCROSS=0.6 RMUTATE=0.2 NGEN=20 โดยซอฟต์แวร์ได้คำนวณหาเฮดที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละสถานีสูบน้ำ ในแต่ละชั่วโมงดังตารางที่ 4.2 และความดันที่เกิดจากเฮดในการจ่ายน้ำที่เหมาะสมที่สุดแสดงได้ในตารางที่ 4.3 สำหรับวิธีการเชิงพันธุกรรมในช่วงประชากรรุ่นแรกๆ จะมีอัตราการลดลงของฟังก์ชันเป้าหมายระหว่างรุ่นสูง ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4.12 – 4.17 ในช่วงประชากรรุ่นแรกไปจนถึงรุ่นที่ 8 มีอัตราการลดลงของฟังก์ชันเป้าหมายสูง หลังจากนั้นจะมีอัตราการลดลงของฟังก์ชันเป้าหมายน้อย ซึ่งแสดงว่าใช้วิธีการเชิงพันธุกรรมมีความเป็นไปได้ในการหาระดับเฮดที่เหมาะสมที่สุดในการสูบน้ำของแต่ละสถานีสูบน้ำได้



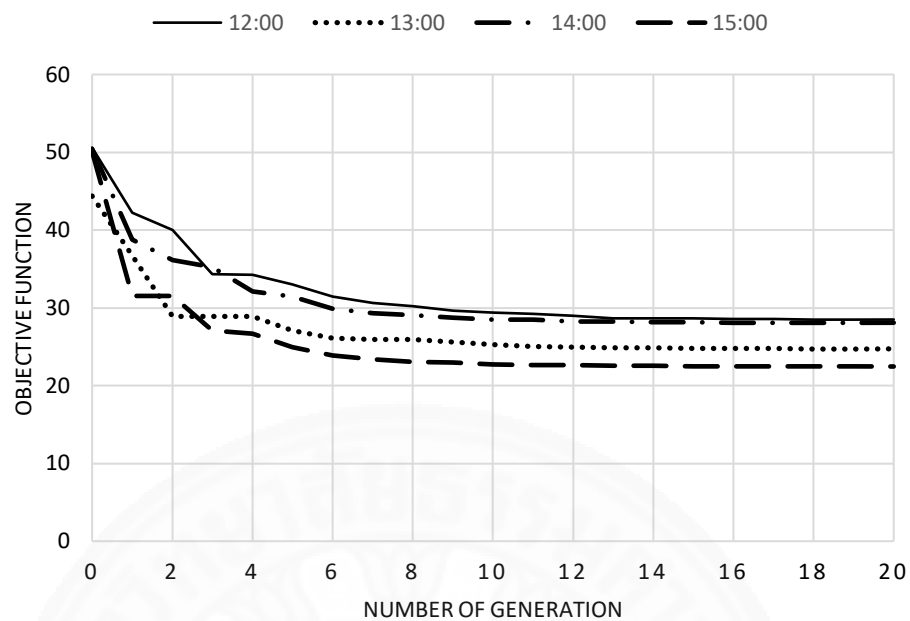
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายและจำนวนรุ่นในช่วงเวลา 0:00-3:00 น.



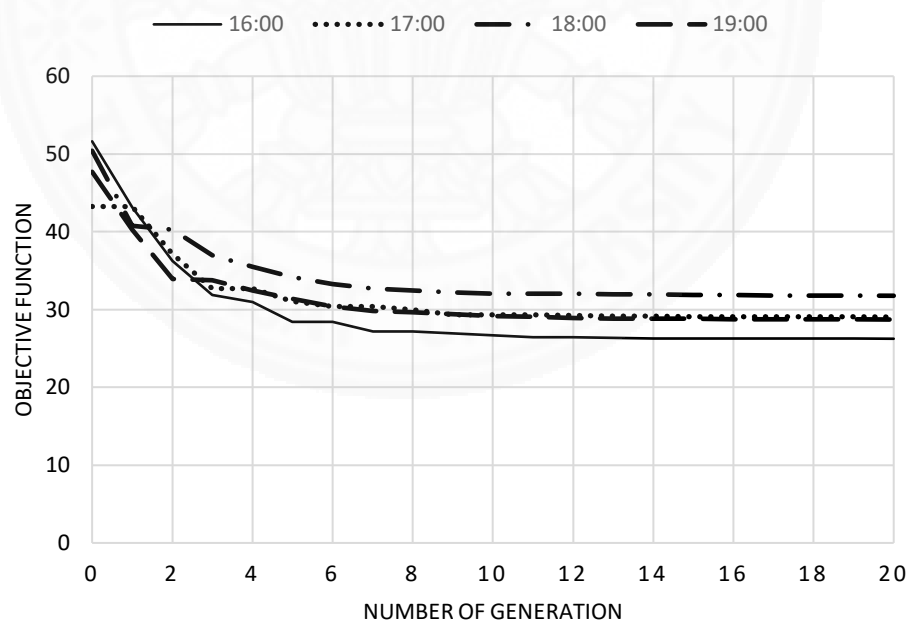
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายและจำนวนรุ่นในช่วงเวลา 4:00-7:00 น.



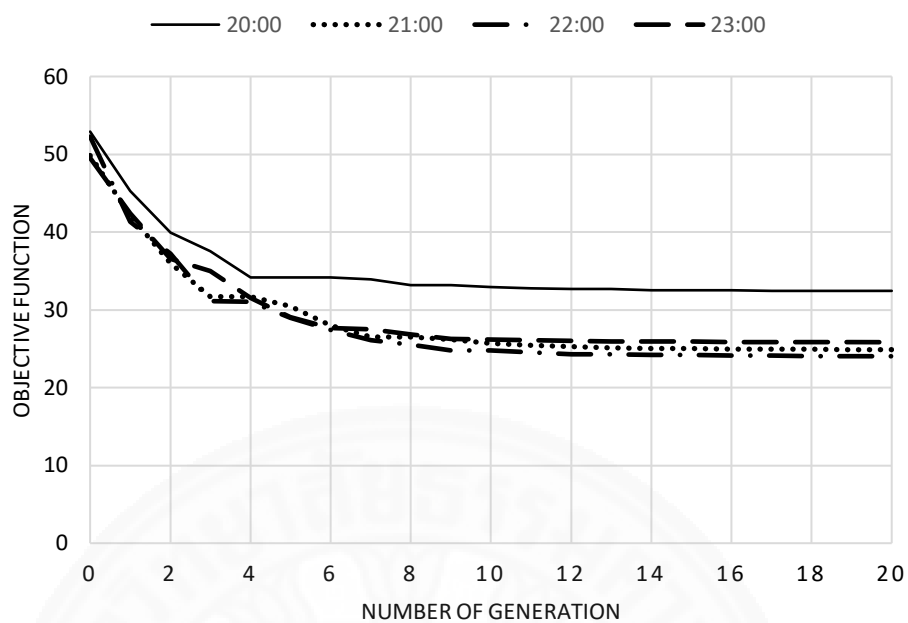
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายและจำนวนรุ่นในช่วงเวลา 8:00-11:00 น.



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายและจำนวนรุ่นในช่วงเวลา 12:00-15:00 น.



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายและจำนวนรุ่นในช่วงเวลา 16:00-19:00 น.



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป้าหมายและจำนวนรุ่นในช่วงเวลา 20:00-23:00 น.

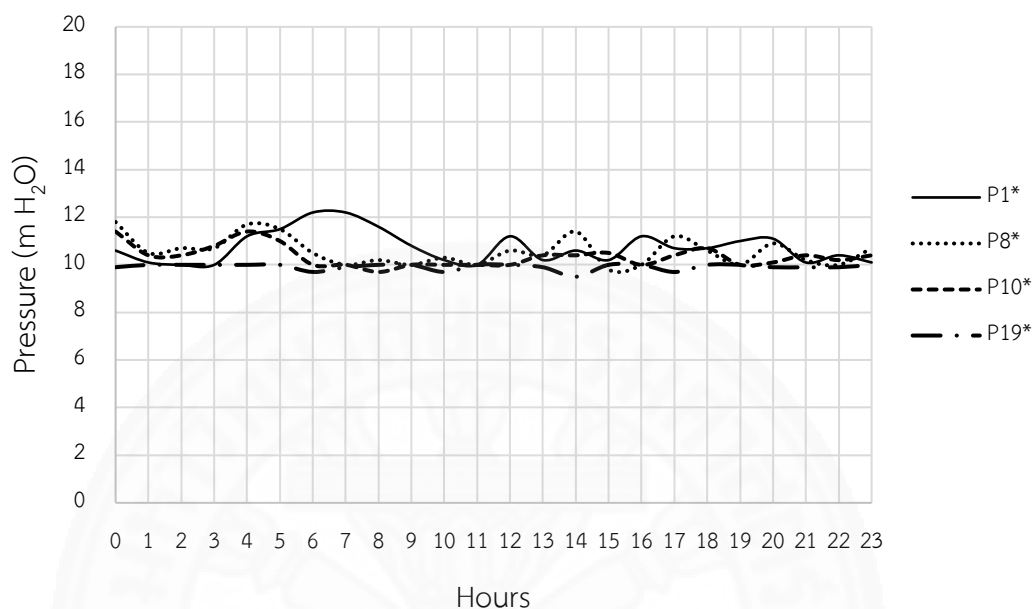
ตารางที่ 4.2 เขตการจ่ายน้ำที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละสถานี ในแต่ละชั่วโมง

Reservoir	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
BANGKHEN03	16.3	14.4	14.8	16.4	15.4	16.9	27.8	31.8	32.4	32.1	31.1	31.7	26.6	24.7	24.7	25	27.7	32.2	31.6	30.1	30.2	27	21.8	20.6
BANGKHEN04	19.3	17.1	17.1	14.9	15.9	22.7	28.6	32.3	33.2	32.3	30.2	31.7	27.8	29.4	24.7	28.5	24.4	30.3	29	28.9	27.3	31.4	27	21.6
BANGPLEE	15.6	16.7	18.6	19.1	19.4	16.2	20.3	25.9	26.3	24.8	22.1	23.5	18.7	20.9	18.3	17.8	18.7	19.2	20.8	21.2	22.3	16.7	21.4	17
DU1	16.1	18.3	14	16.4	18.1	15.2	18	22.5	18.9	18.5	18.2	16.8	15.1	14	17.8	19.5	19.1	20	20.3	16.9	15.1	14.8	18.7	19.7
K	19.3	16.3	20.2	15.3	21.2	23.8	15.3	17.7	18.9	16.5	18.5	13.1	18	18.2	17.2	19.2	20.6	20.8	18.7	17.4	17.7	20.1	25.6	20.7
KLONGTAEY	16.7	14.6	14.4	14.1	13.1	12.8	15	13.4	15.4	13.6	15.4	14.4	16.7	16.5	16.9	16.9	16.1	14.7	17.6	14.6	16.1	16.2	17	14.9
LADKRABUNG	16.8	16.1	16.4	21.1	17.5	15.5	21.7	23.2	18.6	19.5	18.7	19.6	20.4	19.1	20.3	16.1	20.1	19.5	19.6	19.7	22.4	17.3	14.7	15.3
LADPRAW	12.3	12.5	12.3	13.6	14.9	16	14.2	16.7	15.2	15.4	15.4	14.1	14.6	15.8	14.9	14.1	14.9	14.3	14.4	14.6	15.1	14.6	15.5	14.6
LUMPINEE	15.1	16.6	12.9	13.2	13.9	19	18.2	24	24	27.3	24.5	26.3	18.6	19.6	16.1	21.3	19.4	22.2	17.6	23.7	19.9	20.6	19.9	18.6
MAHASAWAT	15.4	15.8	15.1	15.4	18	21.8	34.1	42.9	37.9	34.1	27.7	24.8	26.3	22.1	20.2	23.6	28.9	24.2	27.9	30.5	28	23.9	23.8	18.1
MINBURI	14.4	14.8	14.2	13.2	13.4	15	22.7	28.6	26.4	29.3	21.9	22.4	20.1	19.4	19.5	19.1	21.2	23.1	24.2	23.6	23.9	20.5	18.2	16.5
O1	21.6	15.7	25.3	18	22.1	17.1	18	19	20	18.5	22.7	20.3	15.1	17.4	20	18.5	16.8	17.8	17.5	17.8	19.6	19.9	19.1	21.9
PETKASEM	22.9	21.2	20.6	20.2	20	24.3	33.8	43.2	42.1	38.7	35.3	33.3	31.5	30.2	28.6	29.1	30.2	32.2	34.1	34.5	35.7	33.9	31.4	28.9
RATBURANA	16	16.2	17.4	15.8	16	18.8	26.4	32.2	31.6	29.9	27	25.5	22.5	23.5	22.6	22.2	23.7	25.4	26.1	26.2	26.7	23.6	22.8	19.3
S	25.1	21.5	22.9	27.3	22.1	20.2	20.9	20.9	24.3	21.6	20.4	26.3	23	22.5	17.1	18	21.5	23.6	22.5	22.1	23.5	23.6	22.7	24.3
SUMRONG	16.8	14.1	12.4	13.3	14.6	19.2	26.9	31.3	31.9	31.2	29.4	23.6	25.1	21.2	22.7	24.9	24.3	27.8	27.1	25.6	24.5	29.2	19.7	19.7
THAPRA	12.8	11.8	11.6	12.2	13	12.6	12.2	13	12.3	12.5	12.3	12.1	11.8	12.4	12.6	12.7	11.9	12.7	13.5	12	12.3	12.8	12.1	12
TONBURI	15	12.8	13.3	12.6	14	14.8	14.4	14	15.6	14.6	15.3	14	15.1	14.2	16.9	12.6	13.1	16.7	14.4	13.7	16.3	13.7	12.6	14
U	18.2	21.9	23.5	21.2	20.6	18.9	22.8	23.5	24.9	19.3	23.9	16.8	16.6	23.2	26.1	22.4	21	24.6	22.6	22.1	22.8	24.3	24.3	22.9
X	15.3	11	14.3	13.2	12	12.9	14	12.6	13.6	13.7	12.9	13.3	17.6	13.5	13.2	11.9	13.6	12.1	12.5	13.4	13.4	12.5	11.3	12.8
OBJF	31.1	22.3	25.2	26.9	29.6	27.1	34	44.5	44.6	40	35.6	25.7	28.5	24.7	28.1	22.5	26.2	29	31.8	28.7	32.4	24.9	24	25.8

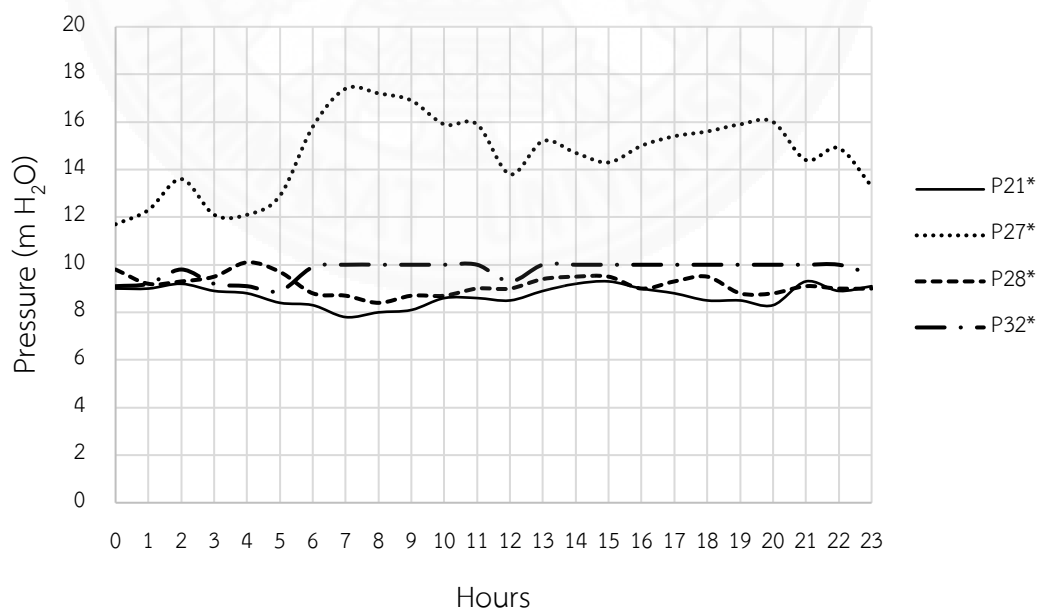
ตารางที่ 4.3 ความดันน้ำของจุดวัดความดันน้ำประเมนผลในแต่ละชั่วโมง

Node	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
P1*	10.6	10.1	10	10	11.2	11.5	12.2	12.2	11.6	10.8	10.2	10	11.2	10.2	10.6	10.2	11.2	10.7	10.7	11	11.1	10.1	10.4	10.1
P8*	11.8	10.5	10.7	10.7	11.7	11.5	10.5	10	10.2	10	10.3	10	10.6	10.4	11.4	9.8	10	11.2	10.6	10	10.9	10.2	10	10.7
P10*	11.4	10.4	10.4	10.8	11.4	11	10	10	9.7	10	10	10	10	10.4	10.4	10.5	10	10.4	10.7	10	10.1	10.4	10.2	10.4
P19*	9.9	10	10	10	10	10	9.7	9.9	10	10	9.7	10	10	9.9	9.5	10	10	9.7	10	10	9.9	9.9	9.9	10
P21*	9	9	9.2	8.9	8.8	8.4	8.3	7.8	8	8.1	8.6	8.6	8.5	8.9	9.2	9.3	9	8.8	8.5	8.5	8.3	9.3	8.9	9.1
P27*	11.7	12.3	13.6	12.1	12.1	12.9	15.8	17.4	17.2	16.9	15.9	15.9	13.8	15.2	14.7	14.3	15	15.4	15.6	15.9	16	14.4	14.9	13.3
P28*	9.8	9.2	9.3	9.5	10.1	9.7	8.8	8.7	8.4	8.7	8.7	9	9	9.4	9.5	9.5	9	9.3	9.5	8.8	8.8	9.1	9	9
P32*	9.1	9.2	9.8	9.2	9.1	8.9	9.9	10	10	10	10	10	9.3	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9.6
P36*	9	9	9.3	9	8.9	8.5	8.5	8	8.2	8.3	8.8	8.8	8.7	9.1	9.3	9.4	9.2	9	8.7	8.7	8.5	9.4	9	9.2
P39*	9.4	9.6	9.2	9.1	9.3	8.5	8.6	6.7	6.1	5.9	6.7	8.2	8.6	8.4	7.9	8.8	9	7.9	7.4	8.4	7.5	8.3	8.9	8.9
P43*	11.1	10.2	10	10.5	11.4	10.9	10.5	11.2	10.5	10.7	10.5	10.3	10.2	10.6	10.8	10.9	10.2	10.9	11.6	10.3	10.5	11	10.4	10.3
P101*	9.8	10	10	10.4	10.5	10	9.1	8.4	7.6	8.3	8.5	9.3	9.4	9.9	9.6	9.4	9.5	9.4	9.3	9.5	9.4	9.5	9.5	9.7
P104*	12	12.3	12.3	12.3	12.3	12.1	12.8	13.2	12	13.4	11.9	13	12.5	12.8	12.7	12.5	12.9	13.1	13.2	13.4	13.3	12.7	12.3	12.3
P107*	12.6	12.7	12.1	11.6	11.5	10.6	11.7	11	11.3	11	12.2	13.1	12.6	12.6	12.1	12.6	12.5	12.6	12	12.5	11.9	12.8	13	12.9
P113*	10	9.9	10	10	10	9.8	8.5	6.5	6.1	6.9	7.8	9.7	9.2	9.9	9.2	9.8	9	9.4	8.7	9.2	8.6	9.9	9.8	9.8
P122*	10.5	10.1	10.1	10.6	10.9	11	10.9	10.5	10.4	10.1	10.9	10.3	10.8	10.8	10.6	10.5	10.8	10.6	10.7	10.7	10.7	10.7	10.6	10.4
P123*	10.3	9.5	9.4	9.9	9.9	9.8	9.6	9	9.2	8.9	9.7	9.1	10	9.9	9.8	9.9	10	9.5	9.9	9.6	9.7	10	9.8	9.7
P125*	12.1	11.1	10.7	11.4	11.7	12	13.2	13.3	13.2	13.2	13.4	12.1	13.1	12.3	12.7	13	13	13.3	13.3	12.8	12.7	13.8	11.8	12
P134*	12.8	10.2	12	11.4	11.1	11.3	10.7	10.1	10.3	10.4	10.3	10.4	11.6	10.5	10.5	10.1	10.9	10.1	10.1	10.8	10.3	10.3	10	11.2
P137*	10.5	9.8	10	10	10.2	10.2	7.9	6.9	6.9	7.4	8	8.2	8.5	8.7	8.1	8.8	8.6	8.2	7.6	8.6	7.8	8.4	8.8	9.5
P138*	12.7	10.6	11.9	11.5	11.4	11.2	10.6	10	10	10	10	10	11	10	10.2	10	10.7	10	10	10.5	10	10	10	11.3
P146*	9.3	9.5	9.5	9.7	9.7	9.3	8.8	8.2	7.3	8.3	8	9.1	9	9.4	9.2	9	9.2	9.2	9.1	9.3	9.2	9.1	9	9.2
P147*	7.3	7	6.8	7	7.9	9.9	10.7	10.6	10.5	10.3	10.8	10	10	9.8	9.5	9.6	10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	9.9	9.1	8.1
P148*	7.7	7.5	7.3	7.4	8.2	9.8	10.4	10.5	10.4	10.2	10.7	10	9.9	9.8	9.5	9.5	9.9	10	10	10.1	10	9.8	9.2	8.4
P152*	10	10	9.6	9.4	9.5	8.8	9.4	8.1	8	7.9	8.9	10.3	9.9	9.9	9.3	10	10	9.8	9.2	9.8	9.1	10	10.1	10
P153*	10.4	10.4	10.5	10.7	10.7	10.3	9.5	8.6	7.9	8.6	8.9	10	9.8	10.3	10	10	9.9	9.9	9.7	10	9.8	10.1	10.1	10.3
P155*	10	10	10	11	11.6	11.8	10.6	11.3	10.3	10.5	10.9	10.4	10.9	11.5	11.1	10.6	11.1	10.6	10.7	10.8	11.1	10.8	11.1	10.8
P164*	10.6	10.3	10.2	11	11.3	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.1	10	10	10	10	10	10	10	10.1

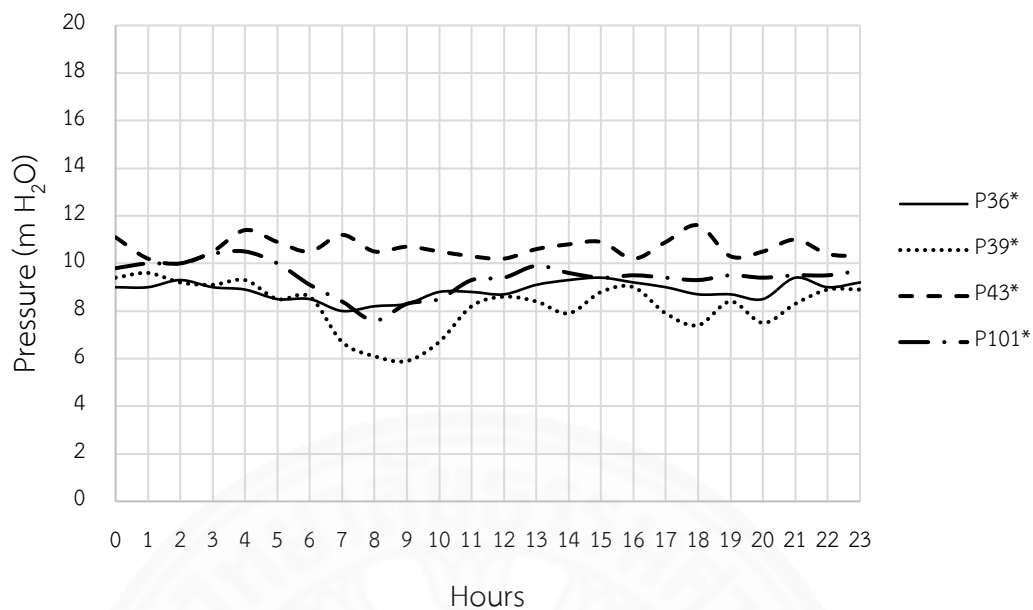
จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 เมื่อนำข้อมูลมาแสดงในรูปของกราฟเส้นเพื่อดูแนวโน้มของค่าที่ได้ สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังภาพที่ 4.18 ถึง ภาพที่ 4.24



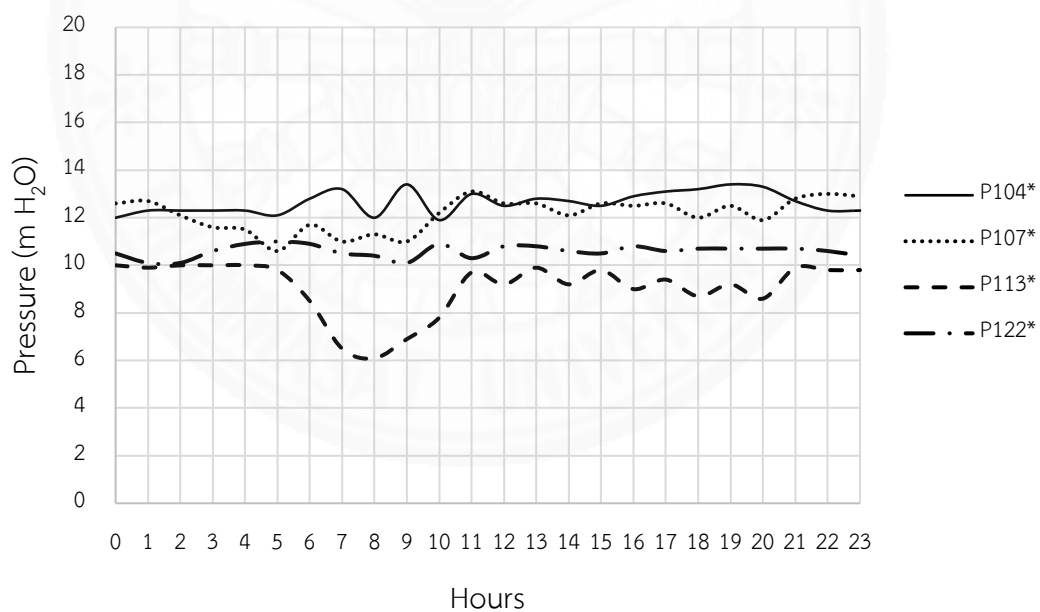
ภาพที่ 4.18 ความดันที่จุด P1 P8 P10 และ P19



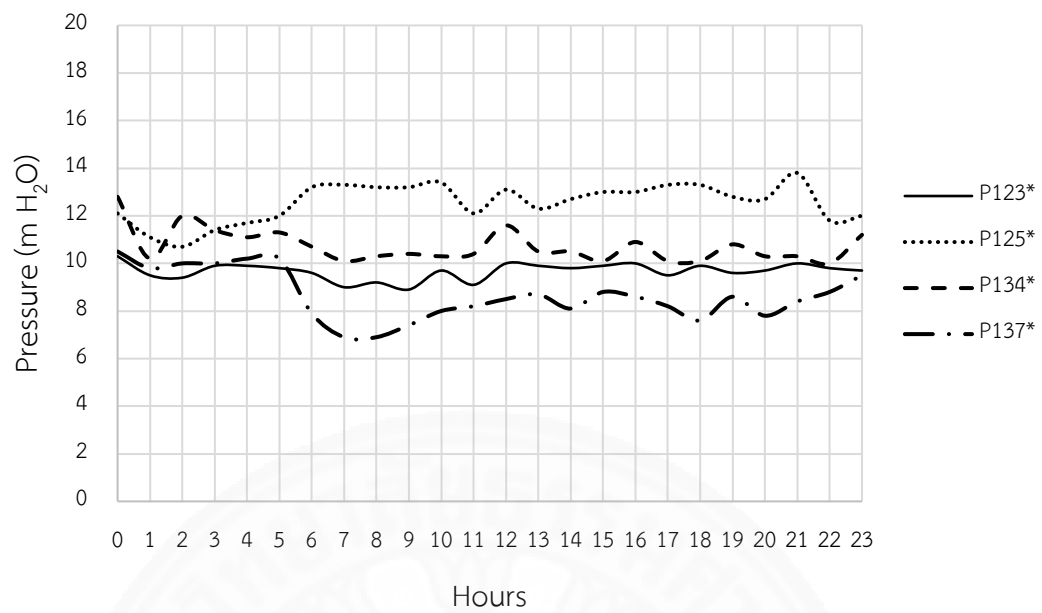
ภาพที่ 4.19 ความดันที่จุด P21 P27 P28 และ P32



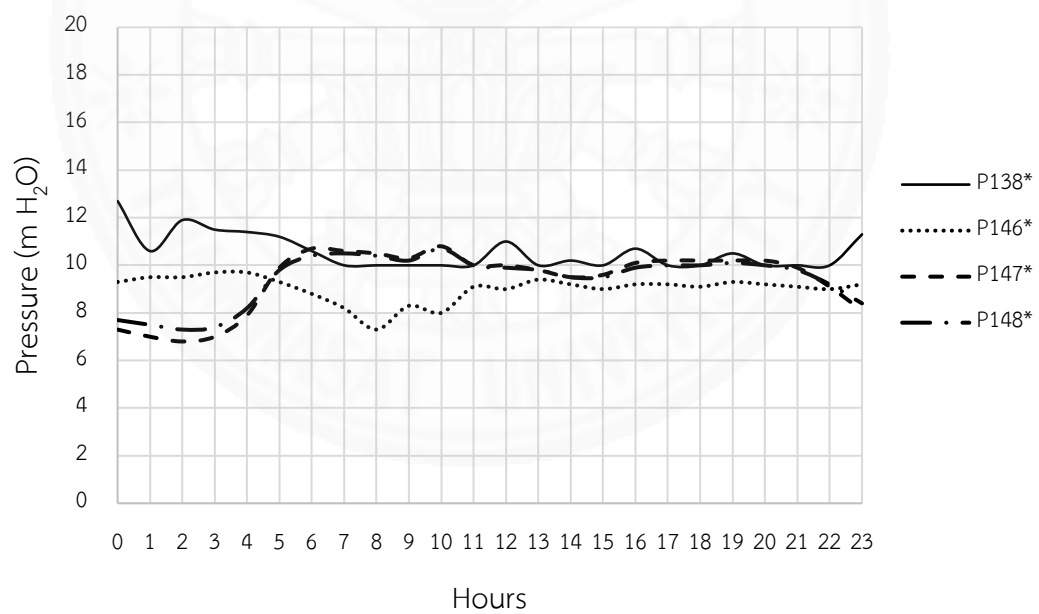
ภาพที่ 4.20 ความดันที่จุด P36 P39 P43 และ P101



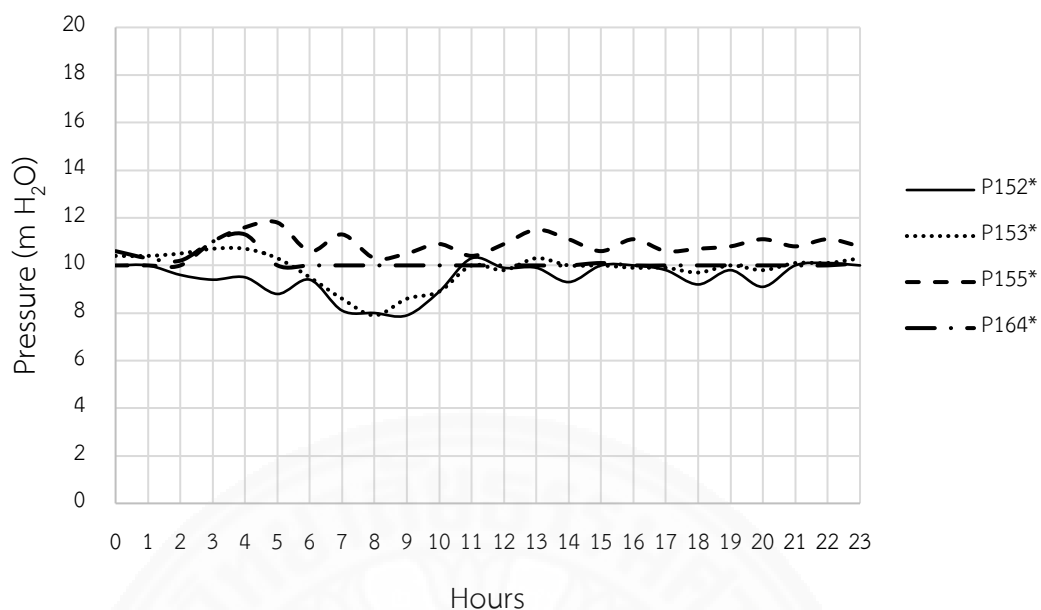
ภาพที่ 4.21 ความดันที่จุด P101 P107 P113 และ P122



ภาพที่ 4.22 ความดันที่จุด P123 P125 P134 และ P137



ภาพที่ 4.23 ความดันที่จุด P138 P146 P147 และ P148



ภาพที่ 4.24 ความดันที่จุด P152 P153 P155 และ P164

จากภาพที่ 4.18 ถึง ภาพที่ 4.24 จะสังเกตเห็นว่าระดับความดันของแต่ละจุดมีแนวโน้มที่ดี โดยมีค่าเข้าใกล้ความดันที่ต้องการคือ 10 เมตรน้ำ แต่ยังคงมีการแกว่งของข้อมูลอยู่บางช่วงเวลาซึ่งจะเห็นได้ชัดที่จุดวัดความดันหมายเลข P27 P39 P122 และ P137

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 การแก้ไขระดับความสูงของแนวเส้นท่อประธาน

การแก้ไขระดับความสูงของแนวเส้นท่อประธานโดยอ้างอิงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง โดยใช้ข้อมูลจากแผนที่แสดงค่าระดับเฉลี่ยตามแนวถนน ของสำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร และแผนที่แสดงแนวกั้นกันน้ำและระดับพื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ของกรมแผนที่ทหาร ทำให้แบบจำลองโครงข่ายการจ่ายน้ำมีความเที่ยงตรงสูงขึ้นเป็น 87.63% เพิ่มขึ้นจากแบบจำลองเดิม 3.95% ดังนั้นในการใช้แบบจำลองโครงข่ายการจ่ายน้ำในซอฟต์แวร์ EPANET สำหรับทำนายการจ่ายน้ำในสถานะอื่นมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในแบบจำลองยังมีความผิดพลาดเนื่องจากสาเหตุอื่นอยู่ อีกหนึ่งสาเหตุที่สามารถแก้ไขได้ไม่ยากคือการใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสีย

5.2 การแก้ไขสูตรคำนวณเฮดสูญเสีย

การใช้สูตรคำนวณเฮดสูญเสียของ Hazen-Williams เป็นที่นิยมเนื่องจากสูตรคำนวณใช้ง่ายไม่ซับซ้อน สูตรคำนวณของ Darcy-Weisbach ถึงแม้ว่ามีความเที่ยงตรงสูงกว่าแต่การคำนวณยุ่งยากซับซ้อนกว่าเนื่องจากต้องใช้สูตรคำนวณให้ตรงช่วงการไหลทั้ง 3 ช่วง คือ การไหลราบเรียบ การไหลเปลี่ยนแปลงและการไหลปั่นป่วน ในระบบโครงข่ายท่อจ่ายน้ำในชีวิตจริงมีช่วงการไหลทั้ง 3 ช่วงขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้น้ำในแต่ละเวลา ซึ่งแต่ละจุดบนแนวท่อจะมีช่วงอัตราการไหลที่แตกต่างกันทำให้เกิดความยุ่งยากในการคำนวณ แต่ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์มีความก้าวหน้าไกลกว่าในอดีตมากดังนั้นการใช้สูตรคำนวณของ Darcy-Weisbach จึงไม่ใช่เรื่องยาก ซึ่งจากการที่ได้ปรับเปลี่ยนการใช้สูตรคำนวณของ Darcy-Weisbach แทนการใช้สูตรคำนวณของ Hazen-Williams ประกอบกับการแก้ไขระดับความสูงของแนวท่อประธานแล้วพบว่าความเที่ยงตรงของแบบจำลองเพิ่มขึ้นเป็น 92.32% ซึ่งทำให้การนำไปใช้ทำนายการจ่ายน้ำในสถานะอื่นมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

5.3 การหาระดับเฮดที่เหมาะสมที่สุดในการจ่ายน้ำของสถานีสูบน้ำ

สำหรับการหาระดับเฮดที่เหมาะสมที่สุดในการจ่ายน้ำของแต่ละสถานีสูบน้ำทั้งหมด 20 สถานี เพื่อให้ได้ระดับความดันที่สอดคล้องกับระดับความดันที่ต้องการของจุดวัดความดัน ประเมินผลทั้ง 28 จุด โดยใช้วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับ

เป้าหมายที่วางไว้ โดยค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ต้องการ 89.40 % โดยเฉลี่ย สามารถใช้เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจการบริหารจัดการจูงน้ำได้ แต่ยังคงมีความแตกต่างอยู่พอสมควรและในบางจุดยังได้ผลไม่ค่อยดีนัก ซึ่งต้องพัฒนาซอฟต์แวร์ต่อยอด

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 แนวท่อหลายตำแหน่งไม่อยู่ในระดับเดียวกับพื้นถนนหรือพื้นดิน โดยเฉพาะวางท่อข้ามคลองหรือตามสะพานบางตำแหน่งสูงกว่าระดับพื้นดิน 4-5 เมตร ซึ่งควรได้รับการแก้ไขระดับเพิ่มเติม จะช่วยให้แบบจำลองมีความเที่ยงตรงมากขึ้น

5.4.2 ในการใช้วิธีการเชิงพันธุกรรมควรกำหนดเงื่อนไข (Constrain) เพิ่มเติม เพื่อให้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเข้าใกล้เป้าหมายมากขึ้น

5.4.3 ควรหาวิธีการอื่นในการหาค่าที่เหมาะสมเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชิงพันธุกรรม ซึ่งอาจให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า

รายการอ้างอิง

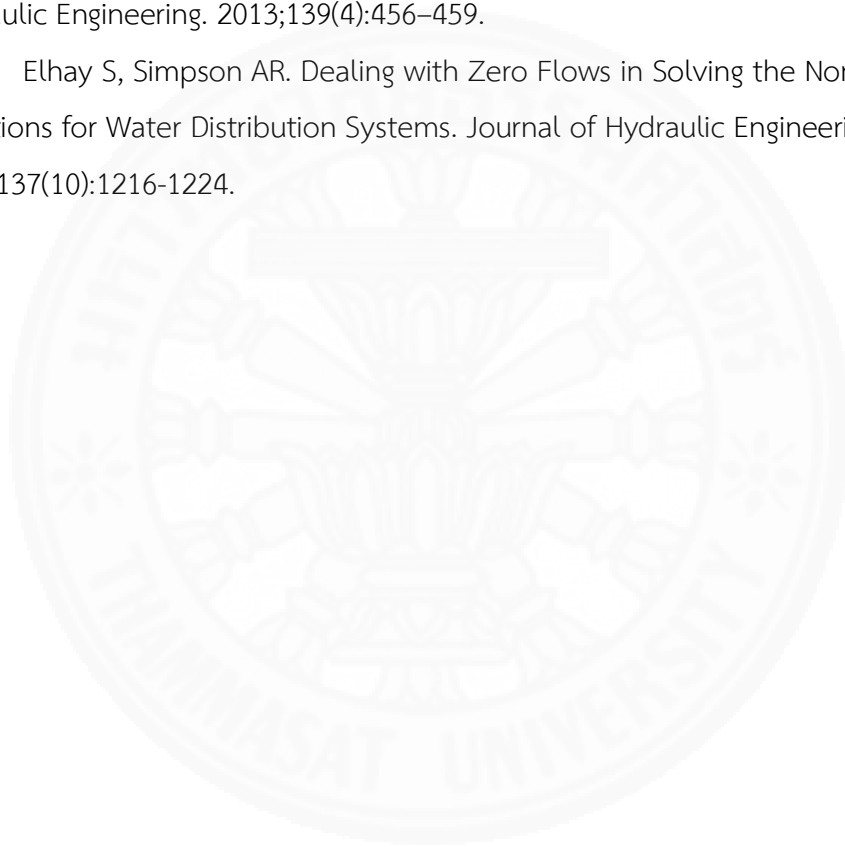
1. Babel MS, Aldrin AA, Kallidaikurichi S. Municipal Water Supply Management in Bangkok: Achievements and Lessons. *Water Resources Development*. 2010;26(2):193–217
2. Munson BR, Okiishi TH, Huebsch WW, Rothmayer AP. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 7th ed: New York: Wiley; 2013.
3. Larock BE, Jeppson RW, Watters GZ. *Hydraulics of Pipeline Systems*. 1st ed. New York: CRC Press LLC; 2000.
4. White FM. *Fluid Mechanics*. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 2011.
5. Shammass NK, and Wang LK. *Water Engineering Hydraulics: Distribution and Treatment*. 1st ed. New Jersey: Wiley; 2016.
6. Farina G, Creaco E, Franchini M. Using EPANET for modelling water distribution systems with users along the pipes. *Civil Engineering and Environmental Systems*. 2014;31(1):36–50.
7. Rossman, LA (2000). “EPANET2.” EPA/600/R- 00/057, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. EPA, Cincinnati.
8. Todini E, Pilati S. A gradient method for the solution of looped pipe networks. *Computer applications in water supply*, B. Coulbeck and C. H. Orr, eds., Vol. 1 (System analysis and simulation), Wiley, London, 1–20.1988.
9. Ayres FJR. *Theory and Problems of Matrices*. New York: McGraw-Hill; 1962
10. Kreyszig E. *Advanced Engineering Mathematics*. 10th ed. Asia: Wiley (Asia); 2011
11. Chapra ST, Canale RP. *Numerical Methods for Engineers*. 6th Ed. Singapore: McGraw-Hill; 2010.
12. Todini E, Rossman LA. Unified Framework for Deriving Simultaneous Equation Algorithms for Water Distribution Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2013;139: 511-526.
13. Cross H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors. Bulletin No. 286, Engineering Experiment Station, Univ. of Illinois, Urbana, IL. 1936.

14. Martin DW, Peters G. The application of Newton's method to network analysis by digital computer. *J. Inst. Water Eng.* 1963; 17:115–129.
15. Wood D J, Rayes AG. Reliability algorithms for pipe network analysis. *J. Hydraul. Div.* 1981; 107(HY10): 1145–1161.
16. Epp R, Fowler AG (1970). Efficient code for steady-state flows in networks. *J. Hydraul. Div.* 1970;96(HY1):43–56.
17. Wood DJ, Charles, COA. Hydraulic network analysis using linear theory. *J. Hydraul. Div.* 1972;98(HY7):1157–1170.
18. Isaacs LT, Mills KG. (1980). Linear theory for pipe network analysis. *J. Hydraul. Div.* 1980;106(HY7):1191–1201.
19. Gupta R, Prasad TD. Extended use of linear graph theory for analysis of pipe networks. *J. Hydraul. Eng.* 2000;126(1):56–62.
20. Hamam Y, Brameller A. Hybrid method for the solution of piping network. *Proc., IEE.* 1971;118(11), 1607–1612.
21. Koppel T, Vassiljev A. Calibration of a Model of an Operational Water Distribution System Containing Pipes of Different Age. *Advances in Engineering Software.* 2009;40:659–664.
22. Echávez G. Increase in losses coefficient with age for small diameter pipes. *J Hydraul Eng.* 1997;2:157–9.
23. Ayad A, Awad H, Yassin A. Developed hydraulic simulation model for water Pipeline networks. *Alexandria Engineering Journal.* 2012;52:43-49.
24. Muir JF. Discussion of “Improved design of fluid networks with computers” by T.A. Marlow et al. *Journal of Hydraulic Division.* 1967;93 (HY2):88–90.
25. Simpson AR, Elhay S. The Jacobian for solving water distribution system equations with the Darcy-Weisbach head loss model, *Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers.* 2011;137(6):696-700.
26. Swamee PK. Exact equation for pipe-flow problems. *Journal of Hydraulic Research.* 2007;45(1):131-134

27. Koppel T, Vassiljev A. Estimation of real-time water fluxes in water distribution system on the basis of pressure measurements. *Advances in Engineering Software*. 2013;66:19–23.
28. Burger G, Sitzenfrie R, Kleidorfer M, Rauch W. Quest for a New Solver for EPANET 2. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2016;142(3): 04015065
29. American Water Works Association, AWWA manual M32, Distribution Net Work Analysis for Water Utilities.
30. Bombardelli FA, Garcí'a MH. Hydraulic Design of Large-Diameter Pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2003;129(11):839-846
31. Swamee PK, Rathie PN, Aggarwal N. Exact solution of friction factor and diameter problems involving laminar flow of Bingham plastic fluids. *Journal of Petroleum and Gas Exploration Research*. 2012;2(2):027-032.
32. Keady G. (1998). Colebrook-White Formula for Pipe Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1998;124(1):96-97.
33. Genić S, Arandjelović I, Kolendić P, Jarić M, Budimir N, Genić V. A Review of Explicit Approximations of Colebrook's Equation. *FME Transactions*. 2011;39:67-71.
34. Travis QB, Mays LW. Relationship between Hazen–William and Colebrook–White Roughness Values. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007;133(11):1270-1273.
35. Babajimopoulos C, Terzidis G. Accurate Explicit Equations for the Determination of Pipe Diameters. *International Journal of Hydraulic Engineering*. 2013; 2(5):115-120.
36. Cheng NS. (2008). Formulas for friction factor in transitional regions. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2008;134(9):1357-1362.
37. Dobrnjac M. (2012). Determination of Friction Coefficient in Transition Flow Region for Waterworks and Pipelines Calculation. *International Journal of Engineering*. 2012;3.
38. Lipovka AY, Lipovka YL. (2014). Determining Hydraulic Friction Factor for Pipeline Systems. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies* 1. 2014;7:62-82.

39. Pomeroy RD. (1983). Flow Velocities in Pipelines .Journal of Hydraulic Engineering. 1983;109(8):1108-1117.
40. ดุลย์โชติ ชลศึกษ์. การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นส่วนทางกล. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2552
41. Chandramouli S. Reliability based optimal design of a municipal water supply pipe network. Urban Water Journal. 2015;V12(5):353–361.
42. Kurek W, Ostfeld A. Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems. Journal of Environmental Management. 2013;115:189-197.
43. Bieupoude P, Azoumah Y, Neveu P. (2012). Optimization of drinking water distribution networks: Computer-based methods and constructal design. Computers, Environment and Urban Systems. 2012;36:434–444.
44. Saminu A, Abubakar I, Rabia L, Tsoho U, Haruna G. Modifications of Optinet work Software for the Implementation of Advance Genetic Algorithm on Existing Water Distribution Network. International Journal of Engineering Sciences & Research Technology. 2013;2(12):3599-3606.
45. Avila-Melgar EY, Cruz-Chávez MA and Martinez-Bahena B. General methodology for using Epanet as an optimization element in evolutionary algorithms in a grid computing environment for water distribution network design. Water Science & Technology: Water Supply. 2017;17.1 39-51.
46. Quiniou ML, Mandel P, Monier L. Optimization of Drinking Water and Sewer Hydraulic Management: Coupling of a Genetic Algorithm and Two Network Hydraulic Tools. 16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2014. Procedia Engineering. 2014;89:710 – 718.
47. Marchi A, Simpson AR, Lambert MF. Pump operation optimization using rule-based controls. XVIII International Conference on Water Distribution Systems Analysis, WDSA2016. Procedia Engineering. 2017;186:210 – 217.
48. Chang Y, Choi G, Kim J and Byeon S. (2017). Energy Cost Optimization for Water Distribution Networks Using Demand Pattern and Storage Facilities. Sustainability. 2018, 10, 1118; doi:10.3390/su10041118.

49. Letting LK, Hamam Y, Abu-Mahfouz AM. Estimation of Water Demand in Water Distribution Systems Using Particle Swarm Optimization. *Water*. 2017, 8, 593; doi:10.3390/w9080593.
50. Pyng Liou CP. Limitations and Proper Use of the Hazen-Williams Equation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1998;124(9):951-954.
51. Gorev NB, Kodzhespirov IF, Kovalenko Y, Prokhorov E, Trapaga G. Method to Cope with Zero Flows in Newton Solvers for Water Distribution Systems. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2013;139(4):456–459.
52. Elhay S, Simpson AR. Dealing with Zero Flows in Solving the Nonlinear Equations for Water Distribution Systems. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2011;137(10):1216-1224.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) เป็นการประยุกต์ใช้อนุกรมของเทย์เลอร์ (Taylor Series Expansion)

อนุกรมของเทย์เลอร์

$$f(x) \cong f(x_0)$$

$$f(x) \cong f(x_0) + (x - x_0) f'(x_0) + \frac{(x - x_0)^2}{2!} f''(x_0) + \dots + \frac{(x - x_0)^n}{n!} f^{(n)}(x_0)$$

โดยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสันใช้อนุกรมของเทย์เลอร์เพียง 2 พจน์ในการประมาณค่า

$$f(x) \cong f(x_0) + (x - x_0) f'(x_0) = 0$$

$$f(x_0) + (x - x_0) f'(x_0) = 0$$

$$(x - x_0) f'(x_0) = -f(x_0); \quad f'(x_0) = \text{ค่าความชัน}$$

$$f'(x_0) \Delta x = -f(x_0); \quad (x - x_0) = \Delta x$$

$$\Delta x = \frac{-f(x_0)}{f'(x_0)}$$

$$\Delta x = -f'(x_0)^{-1} f(x_0)$$

จากนั้นทำการปรับค่าจากสมการ

$$x = x_0 + \alpha(\Delta x); \quad \alpha \text{ คือ Relaxation Factor}$$

จากนั้นทำการคำนวณซ้ำไปเรื่อยๆ จนค่า $x - x_0$ เข้าใกล้ศูนย์

ภาคผนวก ข

การใช้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสันกับระบบเมตริกซ์ของ Todini และ Pilati

จากระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

$$\mathbf{J}(\mathbf{Q}^k)(\mathbf{Q}^{k+1} - \mathbf{Q}^k) = -\mathbf{f}(\mathbf{Q}^k)$$

จากระบบเมตริกซ์ของ Todini และ Pilati

$$\mathbf{f}(\mathbf{Q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

จะได้

$$\mathbf{f}(\mathbf{Q}^k) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^k \\ \mathbf{H}^k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 \\ \mathbf{q}_k \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \nabla_q(\mathbf{A}_{11}\mathbf{Q}) & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

กำหนดให้ $\mathbf{F} = \nabla_q(\mathbf{A}_{11}\mathbf{Q})$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^{k+1} \\ \mathbf{H}^{k+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^k \\ \mathbf{H}^k \end{bmatrix} \right\} = - \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^k \\ \mathbf{H}^k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 \\ \mathbf{q}_k \end{bmatrix} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^{k+1} \\ \mathbf{H}^{k+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^k \\ \mathbf{H}^k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^k \\ \mathbf{H}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 \\ \mathbf{q}_k \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^{k+1} \\ \mathbf{H}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^k \\ \mathbf{H}^k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^k \\ \mathbf{H}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 \\ \mathbf{q}_k \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^{k+1} \\ \mathbf{H}^{k+1} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^k \\ \mathbf{H}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 \\ \mathbf{q}_k \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^{k+1} \\ \mathbf{H}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} - \mathbf{A}_{11} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^k \\ \mathbf{H}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0 \\ \mathbf{q}_k \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}\mathbf{Q}^{k+1} + \mathbf{A}_{12}\mathbf{H}^{k+1} = (\mathbf{F} - \mathbf{A}_{11})\mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{10}\mathbf{H}_0$$

$$\mathbf{A}_{21}\mathbf{Q}^{k+1} = \mathbf{q}_m$$

ภาคผนวก ค

การหาอินเวอร์สของเมทริกซ์โดยวิธี Partitioning

กำหนดให้ $A = [a_{i,j}]$ ขนาด $n \times n$ และอินเวอร์สเมทริกซ์ $B = [b_{i,j}]$ ที่ถูกแบ่งออกเป็นเมทริกซ์ย่อยดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}$$

$p \times p$ $p \times q$ $n \times n$ $p \times p$ $p \times q$ $q \times p$ $q \times q$

เมื่อ $p + q = n$

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}^{-1} = B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}$$

$$B_{11} = A_{11}^{-1} + (A_{11}^{-1} A_{12}) \xi^{-1} (A_{21} A_{11}^{-1})$$

$$B_{12} = -(A_{11}^{-1} A_{12}) \xi^{-1}$$

$$B_{21} = -\xi^{-1} (A_{21} A_{11}^{-1})$$

$$B_{22} = \xi^{-1}$$

เมื่อ $\xi = A_{22} - A_{21} (A_{11}^{-1} A_{12})$

เนื่องจาก $AB = BA = I_n$ โดยมีผลคูณของเมทริกซ์เป็นดังนี้

$$AB = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}$$

$$AB = \begin{bmatrix} A_{11}B_{11} + A_{12}B_{21} & A_{11}B_{12} + A_{12}B_{22} \\ A_{21}B_{11} + A_{22}B_{21} & A_{21}B_{12} + A_{22}B_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_p & 0 \\ 0 & I_q \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของ AB ดังนี้

$$A_{11}B_{11} + A_{12}B_{21} = I_p \quad (1)$$

$$A_{11}B_{12} + A_{12}B_{22} = 0 \quad (2)$$

$$A_{21}B_{11} + A_{22}B_{21} = 0 \quad (3)$$

$$A_{21}B_{12} + A_{22}B_{22} = I_q \quad (4)$$

$$BA = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

$$BA = \begin{bmatrix} B_{11}A_{11} + B_{12}A_{21} & B_{11}A_{12} + B_{12}A_{22} \\ B_{21}A_{11} + B_{22}A_{21} & B_{21}A_{12} + B_{22}A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_p & 0 \\ 0 & I_q \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของ BA ดังนี้

$$B_{11}A_{11} + B_{12}A_{21} = I_p \quad (5)$$

$$B_{11}A_{12} + B_{12}A_{22} = 0 \quad (6)$$

$$B_{21}A_{11} + B_{22}A_{21} = 0 \quad (7)$$

$$B_{21}A_{12} + B_{22}A_{22} = I_q \quad (8)$$

เพื่อให้เหลือพจน์ในการคำนวณให้น้อยที่สุด จำเป็นต้องจัดเซตความสัมพันธ์ใหม่ ดังนี้
ใช้สมการ (1) (2) (7) และ (8) โดยมีเงื่อนไขคือ A_{11} ต้องเป็น non-singular matrix

$$\text{จากสมการที่ (2) } A_{11}B_{12} + A_{12}B_{22} = 0$$

$$B_{12} = -A_{11}^{-1}A_{12}B_{22}$$

$$\text{จากสมการที่ (7) } B_{21}A_{11} + B_{22}A_{21} = 0$$

$$B_{21} = -B_{22}A_{21}A_{11}^{-1}$$

$$\text{จากสมการที่ (1) } A_{11}B_{11} + A_{12}B_{21} = I_p$$

$$B_{11} = A_{11}^{-1}(I_p - A_{12}B_{21})$$

$$B_{11} = A_{11}^{-1} - A_{11}^{-1}A_{12}B_{21}$$

$$B_{11} = A_{11}^{-1} + A_{11}^{-1}A_{12}B_{22}A_{21}A_{11}^{-1}$$

$$\text{แทนค่าในสมการที่ (8) } B_{21}A_{12} + B_{22}A_{22} = I_q$$

$$(-B_{22}A_{21}A_{11}^{-1})A_{12} + B_{22}A_{22} = I_q$$

$$B_{22}(A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12}) = I_q$$

$$B_{22}^{-1} = A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12}$$

$$\text{กำหนดให้ } \xi = A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12} \text{ ดังนั้น}$$

$$B_{22} = \xi^{-1}$$

ดังนั้นเมตริกซ์ย่อยของ B คือ

$$B_{11} = A_{11}^{-1} + (A_{11}^{-1}A_{12})\xi^{-1}(A_{21}A_{11}^{-1}) \quad (9)$$

$$B_{12} = -(A_{11}^{-1}A_{12})\xi^{-1} \quad (10)$$

$$B_{21} = -\xi^{-1}(A_{21}A_{11}^{-1}) \quad (11)$$

$$B_{22} = \xi^{-1} \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} A_{11}^{-1} + (A_{11}^{-1}A_{12})\xi^{-1}(A_{21}A_{11}^{-1}) & -(A_{11}^{-1}A_{12})\xi^{-1} \\ -\xi^{-1}(A_{21}A_{11}^{-1}) & \xi^{-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{เมื่อ } \xi = A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12}$$

การหาอินเวอร์สของเมตริกซ์โดยวิธี Partitioning

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A11} & \mathbf{A12} \\ \mathbf{A21} & \mathbf{A22} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{B11} & \mathbf{B12} \\ \mathbf{B21} & \mathbf{B22} \end{bmatrix}$$

$$\text{เมื่อ } \mathbf{D}^{-1} = \mathbf{A11}, \mathbf{A12} = \mathbf{A12}, \mathbf{A21} = \mathbf{A21}, \mathbf{A22} = 0$$

$$\mathbf{B11} = \mathbf{A11}^{-1} + (\mathbf{A11}^{-1} \mathbf{A12})\xi^{-1}(\mathbf{A21} \mathbf{A11}^{-1})$$

$$\mathbf{B21} = -\xi^{-1}(\mathbf{A21} \mathbf{A11}^{-1})$$

$$\mathbf{B}_{12} = -(\mathbf{A}_{11}^{-1} \mathbf{A}_{12}) \xi^{-1}$$

$$\mathbf{B}_{22} = \xi^{-1}$$

$$\xi = \mathbf{A}_{22} - \mathbf{A}_{21}(\mathbf{A}_{11}^{-1} \mathbf{A}_{12})$$

เมื่อแทนค่า $\mathbf{D}^{-1} = \mathbf{A}_{11}$, $\mathbf{A}_{12} = \mathbf{A}_{12}$, $\mathbf{A}_{21} = \mathbf{A}_{21}$, $\mathbf{A}_{22} = 0$ จะได้

$$\xi = 0 - \mathbf{A}_{21}((\mathbf{D}^{-1})^{-1} \mathbf{A}_{12})$$

$$\xi = -\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12}$$

$$\mathbf{B}_{11} = \mathbf{D} + (\mathbf{D} \mathbf{A}_{12})(-\mathbf{A}_{21}(\mathbf{D} \mathbf{A}_{12}))(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D})$$

$$\mathbf{B}_{11} = \mathbf{D} - \mathbf{D} \mathbf{A}_{12}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D})$$

$$\mathbf{B}_{21} = (\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D})$$

$$\mathbf{B}_{12} = -((\mathbf{D}^{-1})^{-1} \mathbf{A}_{12})(-\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1}$$

$$\mathbf{B}_{12} = \mathbf{D} \mathbf{A}_{12}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1}$$

$$\mathbf{B}_{22} = -(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1}$$

แก้สมการ 2.31 และสมการที่ 2.32 ในบทที่ 2

$$d\mathbf{Q} = \mathbf{B}_{11} \mathbf{f}_1^k + \mathbf{B}_{12} \mathbf{f}_2^k$$

$$d\mathbf{H} = \mathbf{B}_{21} \mathbf{f}_1^k + \mathbf{B}_{22} \mathbf{f}_2^k$$

แทนค่าด้วยสมการ

$$\mathbf{f}_1^k = \mathbf{A}_{11}^k \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{12} \mathbf{H}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0$$

$$\mathbf{f}_2^k = \mathbf{A}_{12} \mathbf{Q}^k - \mathbf{q}$$

จะได้

$$d\mathbf{Q} = (\mathbf{D} - \mathbf{D} \mathbf{A}_{12}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D}))(\mathbf{A}_{11} \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{12} \mathbf{H}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) \\ + ((\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D}))(\mathbf{A}_{12} \mathbf{Q}^k - \mathbf{q})$$

$$d\mathbf{Q} = \mathbf{D}(\mathbf{A}_{11} \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{12} \mathbf{H}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) \\ - \left[(\mathbf{D} \mathbf{A}_{12}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1} \mathbf{A}_{21} \mathbf{D})(\mathbf{A}_{11} \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{12} \mathbf{H}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) \right] \\ + \left[\mathbf{D} \mathbf{A}_{12}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1}(\mathbf{A}_{12} \mathbf{Q}^k - \mathbf{q}) \right]$$

$$d\mathbf{Q} = \mathbf{D}(\mathbf{A}_{11} \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{12} \mathbf{H}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) \\ - \mathbf{D} \mathbf{A}_{12}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D}(\mathbf{A}_{11} \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{12} \mathbf{H}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) + (\mathbf{q} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{Q}^k)) \\ d\mathbf{Q} = \mathbf{D} \mathbf{A}_{12} \mathbf{H}^k + (-\mathbf{D} \mathbf{A}_{12}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1} \mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12} \mathbf{H}^k) + \mathbf{D}(\mathbf{A}_{11} \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) \\ - \mathbf{D} \mathbf{A}_{12}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D} \mathbf{A}_{12})^{-1}(\mathbf{A}_{21} \mathbf{D}(\mathbf{A}_{11} \mathbf{Q}^k + \mathbf{A}_{10} \mathbf{H}_0) + (\mathbf{q} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{Q}^k))$$

$$\begin{aligned}
dQ &= D(A_{11} Q^k + A_{10} H_0) \\
&\quad - D A_{12}(A_{21} D A_{12})^{-1} (A_{21} D(A_{11} Q^k + A_{10} H_0) + (q - A_{12} Q^k))
\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
dH &= B_{21} f_1^k + B_{22} f_2^k \\
dH &= (A_{21} D A_{12})^{-1} (A_{21} D) (A_{11}^k Q^k + A_{12} H^k + A_{10} H_0) - (A_{21} D A_{12})^{-1} (A_{12} Q^k - q) \\
&= (A_{21} D A_{12})^{-1} [A_{21} D (A_{11}^k Q^k + A_{12} H^k + A_{10} H_0) - (q - A_{12} Q^k)] \\
&= (A_{21} D A_{12})^{-1} A_{21} D A_{12} H^k \\
&\quad + [(A_{21} D A_{12})^{-1} (A_{21} D (A_{11}^k Q^k + A_{10} H_0) + (q - A_{12} Q^k))] \\
dH &= H^k + [(A_{21} D A_{12})^{-1} (A_{21} D (A_{11}^k Q^k + A_{10} H_0) + (q - A_{12} Q^k))]
\end{aligned} \tag{15}$$

การแทนค่าสมการ 2.36 และ 2.37 สมการในบทที่ 2

$$\begin{aligned}
Q^{k+1} &= Q^k - dQ \\
&= Q^k - D(A_{11} Q^k + A_{10} H_0) + D A_{12}(dH - H^k) ; dH - H^k = -H^{k+1} \\
&= Q^k - D(A_{11} Q^k + A_{10} H_0) + D A_{12}(-H^{k+1}) \\
&= Q^k - D A_{11} Q^k - D A_{10} H_0 - D A_{12} H^{k+1} \\
&= (Q^k - N^{-1} Q^k) - D(A_{10} H_0 + A_{12} H^{k+1}) \\
Q^{k+1} &= (I - N^{-1}) Q^k - N^{-1} A_{11}^{-1} (A_{12} H^{k+1} + A_{10} H_0)
\end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
H^{k+1} &= H^k - dH \\
&= H^k - H^k - [(A_{21} D A_{12})^{-1} (A_{21} D (A_{11}^k Q^k + A_{10} H_0) + (q - A_{12} Q^k))] \\
&= -(A_{21} D A_{12})^{-1} (A_{21} D (A_{11}^k Q^k + A_{10} H_0) + (q - A_{12} Q^k)) \\
H^{k+1} &= -(A_{21} N^{-1} A_{11}^{-1} A_{12})^{-1} (A_{21} N^{-1} A_{11}^{-1} (A_{11}^k Q^k + A_{10} H_0) + (q - A_{12} Q^k))
\end{aligned} \tag{18}$$

ภาคผนวก ง

Dunlop's interpolating cubic spline

$$f = X_1 + \eta(X_2 + \eta(X_3 + X_4)) \quad (19)$$

เมื่อ $Y_2 = \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}}$

$$Y_3 = -0.86859 \ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{4000^{0.9}} \right) \quad (20)$$

$$FA = Y_3^{-2} \quad (21)$$

$$FB = FA \left(2 - \frac{0.00514215}{Y_2 Y_3} \right) \quad (22)$$

$$\eta = \frac{\text{Re}}{2000}$$

$$X_1 = 7FA - FB$$

$$X_2 = 0.128 - 17FA + 2.5FB$$

$$X_3 = -0.128 + 13FA - 2FB$$

$$X_4 = \eta(0.032 - 3FA + 0.5FB)$$

จัดรูปสมการใหม่ในรูปของผลรวมดังนี้

กำหนดให้ $\theta = Y_2 = \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}}$

$$\hat{\theta} = \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{4000^{0.9}}$$

$$\xi = -0.86859$$

$$\tau = 0.00514215$$

$$Y_3 = \xi \ln \hat{\theta}$$

แทนค่าในสมการ (21) และ (22) จะได้

$$FA = \frac{1}{\xi^2 \ln^2 \hat{\theta}}$$

$$FB = 2FA - \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}}$$

แทนค่า FB ใน X_1 X_2 X_3 และ X_4 จะได้

$$X_1 = 7FA - \left(2FA - \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right)$$

$$X_1 = 5FA + \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}}$$

$$X_2 = 0.128 - 17FA + 2.5 \left(2FA - \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right)$$

$$X_2 = 0.128 - 17FA + 5FA - 2.5 \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}}$$

$$X_2 = 0.128 - 12FA - 2.5 \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}}$$

$$X_3 = -0.128 + 13FA - 2 \left(2FA - \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right)$$

$$X_3 = -0.128 + 13FA - 4FA + 2 \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}}$$

$$X_3 = -0.128 + 9FA + 2 \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}}$$

$$X_4 = \eta \left(0.032 - 3FA + 0.5 \left(2FA - \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right) \right)$$

$$X_4 = \eta \left(0.032 - 3FA + FA - 0.5 \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right)$$

$$X_4 = 0.032\eta - 2\eta FA - 0.5 \frac{\tau \eta FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}}$$

แทนค่าในสมการ (19) จะได้

$$f = X_1 + \eta(X_2 + \eta(X_3 + X_4))$$

$$f = X_1 + \eta X_2 + \eta^2 X_3 + \eta^3 X_4$$

$$\begin{aligned} f &= \left(5FA + \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right) + \eta \left(0.128 - 12FA - 2.5 \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right) \\ &\quad + \eta^2 \left(-0.128 + 9FA + 2 \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right) + \eta^3 \left(0.032\eta - 2\eta FA - 0.5 \frac{\tau \eta FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right) \\ f &= \left(5FA + \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right) + \left(0.128 - 12FA - 2.5 \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right) \eta \\ &\quad + \left(-0.128 + 9FA + 2 \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right) \eta^2 + \left(0.032 - 2FA - 0.5 \frac{\tau FA}{\theta \xi \ln \hat{\theta}} \right) \eta^3 \end{aligned}$$

แทนค่า $FA = \frac{1}{\xi^2 \ln^2 \hat{\theta}}$ จะได้

$$f = \left(\frac{5}{\xi^2 \ln^2 \hat{\theta}} + \frac{\tau}{\theta \xi^3 \ln^3 \hat{\theta}} \right) + \left(0.128 - \frac{12}{\xi^2 \ln^2 \hat{\theta}} - \frac{2.5\tau}{\theta \xi^3 \ln^3 \hat{\theta}} \right) \eta$$

$$+ \left(-0.128 + \frac{9}{\xi^2 \ln^2 \hat{\theta}} + \frac{2\tau}{\theta \xi^3 \ln^3 \hat{\theta}} \right) \eta^2 + \left(0.032 - \frac{2}{\xi^2 \ln^2 \hat{\theta}} - \frac{0.5\tau}{\theta \xi^3 \ln^3 \hat{\theta}} \right) \eta^3$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการผลรวมได้ดังนี้

$$f = \sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k / \theta) \eta^k \quad (23)$$

เมื่อ α_k และ β_k มีค่าดังนี้

k	α_k	β_k
0	$5 / (\xi^2 \ln^2 \hat{\theta})$	$\tau / (\xi^3 \ln^3 \hat{\theta})$
1	$0.128 - 12 / (\xi^2 \ln^2 \hat{\theta})$	$-2.5\tau / (\xi^3 \ln^3 \hat{\theta})$
2	$-0.128 + 9 / (\xi^2 \ln^2 \hat{\theta})$	$2\tau / (\xi^3 \ln^3 \hat{\theta})$
3	$0.032 - 2 / (\xi^2 \ln^2 \hat{\theta})$	$-0.5\tau / (\xi^3 \ln^3 \hat{\theta})$

ภาคผนวก จ

การหาอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์ความต้านทานเทียบกับอัตราการไหล

Laminar flow

$$\begin{aligned}\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{\partial}{\partial Q} \frac{128\nu L}{g\pi Q D^4} \\ \frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{128\nu L}{g\pi D^4} \frac{\partial}{\partial Q} \frac{1}{Q} = \frac{128\nu L}{g\pi D^4} \frac{\partial}{\partial Q} Q^{-1} \\ \frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{128\nu L}{g\pi D^4} \frac{-1}{Q^2} \\ \frac{\partial r}{\partial Q} &= -\frac{128\nu L}{g\pi Q^2 D^4} = -\frac{128\nu L}{g\pi Q D^4} \frac{1}{Q}\end{aligned}$$

ดังนั้นอนุพันธ์ของ r เทียบกับ Q เท่ากับ

$$\frac{\partial r}{\partial Q} = \frac{-r}{Q} \quad ; \quad r = \frac{128\nu L}{g\pi Q D^4} \quad (19)$$

Transitional flow

$$\frac{\partial r}{\partial Q} = \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\partial}{\partial Q} \sum_{k=0}^3 (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta^k$$

ให้ $t_k = (\alpha_k + \beta_k) \eta^k$

$$\frac{\partial r}{\partial Q} = \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\partial}{\partial Q} \sum_{k=0}^3 t_k = \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \sum_{k=0}^3 \frac{\partial}{\partial Q} t_k$$

หาค่า $\frac{\partial}{\partial Q} t_k$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = \frac{\partial}{\partial Q} (\alpha_k + \beta_k/\theta) \eta^k$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k/\theta) \frac{\partial}{\partial Q} \eta^k + \eta^k \frac{\partial}{\partial Q} (\alpha_k + \beta_k/\theta)$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k/\theta) \left(\frac{\partial \eta^k}{\partial \eta} \times \frac{\partial \eta}{\partial Q} \right) + \left(\frac{\partial}{\partial Q} \alpha_k + \frac{\partial}{\partial Q} \beta_k/\theta \right) \eta^k$$

เมื่อ $\eta = \text{Re}/2000 = 4Q/2000\nu D\pi$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k/\theta) \left(k\eta^{k-1} \times \frac{\partial}{\partial Q} \frac{4Q}{2000\nu D\pi} \right) + \left(\frac{\partial}{\partial Q} \alpha_k + \frac{\partial}{\partial Q} \beta_k/\theta \right) \eta^k$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(k \eta^{k-1} \times \frac{4}{2000 v D \pi} \right) + \left(\frac{\partial}{\partial Q} \alpha_k + \frac{\partial}{\partial Q} \beta_k / \theta \right) \eta^k$$

α_k และ β_k ไม่ขึ้นอยู่กั Q ดังนั้นจะได้

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(k \eta^{k-1} \times \frac{4}{2000 v D \pi} \right) + \left(0 + \beta_k \frac{\partial}{\partial Q} \frac{1}{\theta} \right) \eta^k$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(k \eta^{k-1} \times \frac{4}{2000 v D \pi} \right) + \left(\beta_k \left(\frac{\partial \theta^{-1}}{\partial \theta} \times \frac{\partial \theta}{\partial Q} \right) \right) \eta^k$$

$$\text{โดย } \theta = \frac{e}{3.7 D} + \frac{5.74}{\text{Re}^{9/10}} = \frac{be}{D} + c \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10}; b = \frac{1}{3.7}, c = 5.74 (\pi v / 4)^{0.9}$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(k \eta^{k-1} \times \frac{4}{2000 v D \pi} \right) + \left(\beta_k \left((-1 \theta^{-2}) \frac{\partial}{\partial Q} \left(\frac{be}{D} + c \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right) \right) \right) \eta^k$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(k \eta^{k-1} \times \frac{4}{2000 v D \pi} \right) + \left(-1 \beta_k \theta^{-2} \left(\frac{\partial}{\partial Q} c \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right) \right) \eta^k$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(k \eta^{k-1} \times \frac{4}{2000 v D \pi} \right) + \left(-1 \beta_k \theta^{-2} \left(\frac{\partial}{\partial Q} c |D|^{9/10} |Q|^{-9/10} \right) \right) \eta^k$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(k \eta^{k-1} \times \frac{4}{2000 v D \pi} \right) + \left(-1 \beta_k \theta^{-2} c |D|^{9/10} \left(\frac{\partial}{\partial Q} |Q|^{-9/10} \right) \right) \eta^k$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(k \eta^{k-1} \times \frac{4}{2000 v D \pi} \right) + \left(-1 \beta_k \theta^{-2} c |D|^{9/10} \left(-\frac{9}{10} |Q|^{-9/10} |Q|^{-1} \right) \right) \eta^k$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(k \eta^{k-1} \times \frac{4}{2000 v D \pi} \right) + \left(\beta_k \theta^{-2} c |D|^{9/10} \frac{9}{10} |Q|^{-9/10} |Q|^{-1} \right) \eta^k$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(\frac{4}{2000 v D \pi} k \eta^{k-1} \right) + \left(\frac{9}{10} \beta_k \theta^{-2} c \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \frac{1}{|Q|} \right) \eta^k$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(\frac{4Q}{2000 v D \pi} \frac{1}{Q} k \eta^{k-1} \right) + \left(\frac{9}{10} \beta_k \theta^{-2} c \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \frac{1}{Q} \right) \eta^k$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(\eta \frac{1}{Q} k \eta^{k-1} \right) + \left(\frac{9}{10} \beta_k \theta^{-2} c \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \frac{1}{Q} \right) \eta^k$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} t_k = (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(\frac{1}{Q} k \eta^k \right) + \left(\frac{9}{10} \beta_k \theta^{-2} c \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \frac{1}{Q} \right) \eta^k$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial Q} t_k &= (\alpha_k + \beta_k / \theta) \left(\frac{1}{Q} k \eta^k \right) + \left(\frac{9}{10} \beta_k \theta^{-2} c \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \frac{1}{Q} \right) \eta^k \\
\frac{\partial}{\partial Q} t_k &= \frac{\eta^k}{Q} \left[k(\alpha_k + \beta_k / \theta) + \frac{9}{10} c \beta_k \frac{1}{\theta^2} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right] \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \sum_{k=0}^3 \frac{\eta^k}{Q} \left[k(\alpha_k + \beta_k / \theta) + \frac{9}{10} c \beta_k \frac{1}{\theta^2} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right] \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{1}{Q} \sum_{k=0}^3 \left[k(\alpha_k + \beta_k / \theta) + \frac{9}{10} c \beta_k \frac{1}{\theta^2} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right] \eta^k
\end{aligned}$$

Turbulent flow

$$\begin{aligned}
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{\partial}{\partial Q} \left(\frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{0.25}{\left[\log(e/3.7D + 5.74/\text{Re}^{0.9}) \right]^2} \right) \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\partial}{\partial Q} \left(\frac{0.25}{\left[\log(e/3.7D + 5.74/\text{Re}^{0.9}) \right]^2} \right) \\
\text{โดย } \theta &= \frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{\text{Re}^{9/10}} = \frac{be}{D} + c \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\partial}{\partial Q} \left(\frac{1}{4[\log \theta]^2} \right)
\end{aligned}$$

ใช้เทคนิคการเปลี่ยนฐาน (Changing the base)

$$\log_b c = \frac{\log_a c}{\log_a b}$$

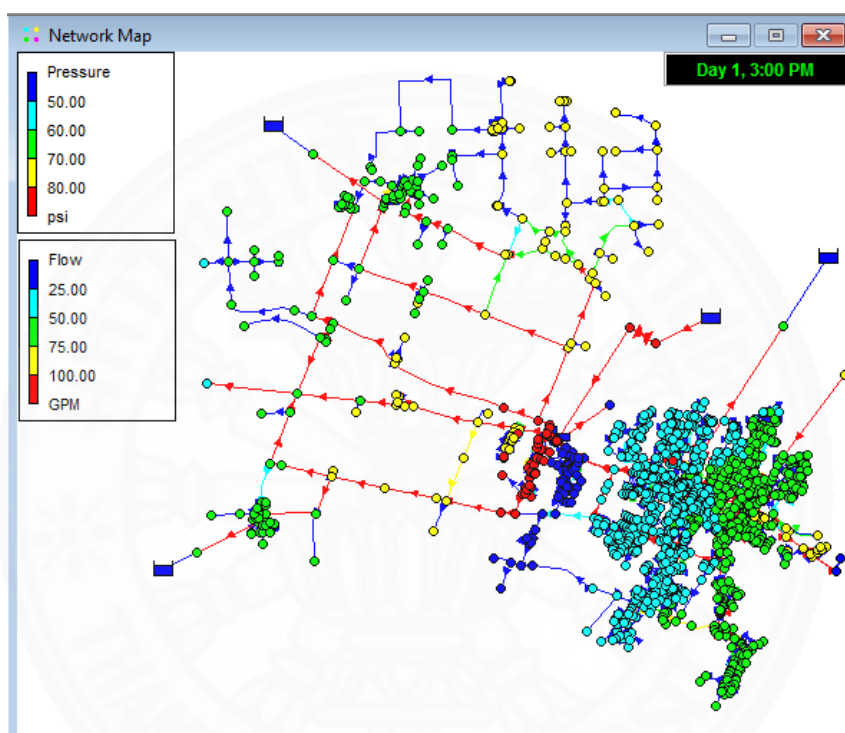
ดังนั้น

$$\begin{aligned}
\log \theta &= \log_{10} \theta = \frac{\log_e \theta}{\log_e 10} = \frac{\ln \theta}{\ln 10} \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\partial}{\partial Q} \left(\frac{1}{4 \left[\frac{\ln \theta}{\ln 10} \right]^2} \right) \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\partial}{\partial Q} \left(\frac{\ln^2 10}{4 \ln^2 \theta} \right) \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{4} \frac{\partial}{\partial Q} \frac{1}{\ln^2 \theta}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{4} \frac{\partial}{\partial Q} \ln^{-2} \theta \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{4} \left(\frac{\partial \ln^{-2} \theta}{\partial \theta} \times \frac{\partial \theta}{\partial Q} \right) \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{4} \left(\left(\frac{\partial \ln^{-2} \theta}{\partial \ln \theta} \times \frac{\partial \ln \theta}{\partial \theta} \right) \times \frac{\partial \theta}{\partial Q} \right) \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{4} \left(\left(\frac{-2}{\ln^3 \theta} \times \frac{1}{\theta} \right) \times \frac{\partial \theta}{\partial Q} \right) \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{4} \frac{1}{\theta} \frac{-2}{\ln^3 \theta} \frac{\partial}{\partial Q} \left(\frac{be}{D} + c \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right) \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{4} \frac{1}{\theta} \frac{-2}{\ln^3 \theta} \left(c \frac{\partial}{\partial Q} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \right) \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{8}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{4} \frac{1}{\theta} \frac{-2}{\ln^3 \theta} \left(\frac{-9c}{10} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \frac{1}{Q} \right) \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{4}{g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{\ln^2 10}{\theta \ln^3 \theta} \frac{1}{Q} \frac{9c}{5} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10} \\
\frac{\partial r}{\partial Q} &= \frac{18c \ln^2 10}{5g\pi^2} \frac{L}{D^5} \frac{1}{Q} \frac{1}{\theta \ln^3 \theta} \left| \frac{D}{Q} \right|^{9/10}
\end{aligned}$$

ภาคผนวก ฉ

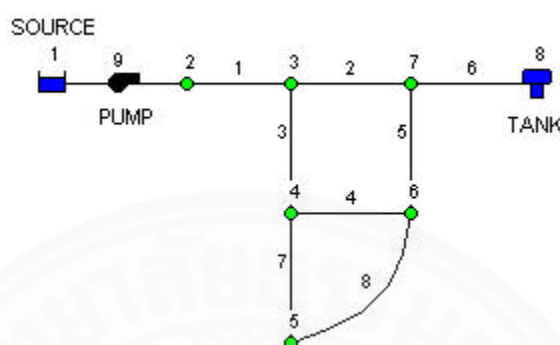
ตัวอย่างการใช้ซอฟต์แวร์ EPANET



ซอฟต์แวร์ EPANET คือ ซอฟต์แวร์ทางชลศาสตร์สำหรับจำลองพฤติกรรมไหลของน้ำและความเข้มข้นของสารเคมีในระบบโครงข่ายท่อจ่ายน้ำ เช่น ระบบประปาชุมชน ระบบประปาภายในอาคารสูง ระบบประปาขนาดใหญ่ พัฒนาโดย Lewis A. Rossman United States Environmental Protection Agency's (EPA) Water Supply and Water Resources Division EPANET แสดงการจำลองช่วงเวลานานๆ ของกำลังการส่งน้ำและพฤติกรรมเกี่ยวกับคุณภาพน้ำในระบบโครงข่ายท่อส่งน้ำที่มีการอัดแรงดัน (ต้องมีน้ำเต็มท่อ) โครงข่ายประกอบไปด้วยท่อ node (จุดบรรจบท่อ) ปิ๊ม วาล์ว และถังเก็บน้ำ หรือบ่อเก็บน้ำ อ่างเก็บน้ำ EPANET จะติดตามอัตราการไหลของน้ำในท่อแต่ละท่อน ความดันในแต่ละ node ระดับความสูงของน้ำในแต่ละถัง และความเข้มข้นของสารเคมีแต่ละชนิดในทุกส่วนของโครงข่ายตลอดช่วงเวลาที่ทำการจำลองที่ประกอบด้วยหลายๆ time step

ตัวอย่างการจำลองทางศาสตร์ของซอฟต์แวร์ EPANET

ระบบส่งน้ำอย่างง่าย โดยที่ปั๊มสูบน้ำด้วยอัตราการไหล 600 แกลลอนต่อนาที ด้วยเฮด 150 ฟุต และมีถังเก็บน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 ฟุต มีระดับน้ำในถัง 3.5 ฟุต และสามารถเก็บน้ำได้สูงสุด 200 ฟุต



โครงข่ายนี้มีทั้งหมด 8 node โดยมีรายละเอียดของแต่ละ node ดังนี้

ตารางที่ 1 รายละเอียดของแต่ละ node

Node	Elevation (ft)	Demand (gpm)
1	700	0
2	700	0
3	710	150
4	700	150
5	650	200
6	700	150
7	700	0
8	830	0

โดยค่าที่จำเป็นต้องกำหนดให้แต่ละ node คือ ระดับความสูง (elevation) และปริมาณการใช้น้ำ (demand)

และมีแนวเส้นท่อทั้งหมด 8 เส้น โดยมีรายละเอียดของท่อต่างๆ ดังนี้
ตารางที่ 2 รายละเอียดของแต่ละเส้นท่อ

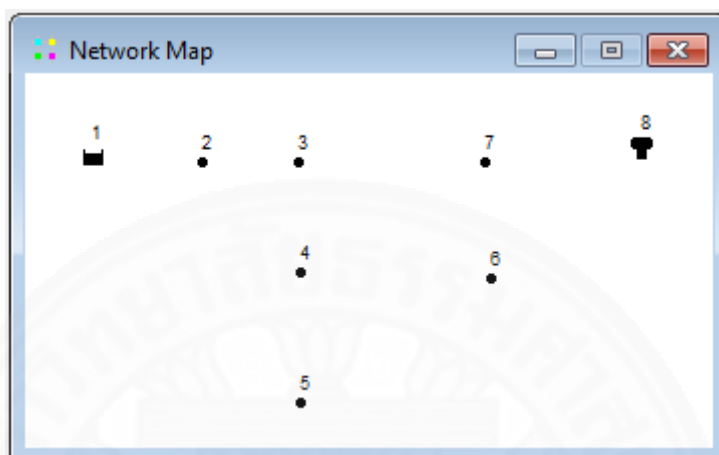
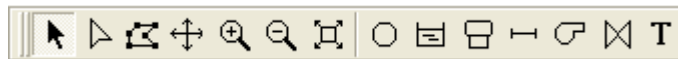
Pipe	Length (ft)	Diameter (inches)	C-Factor
1	3000	14	100
2	5000	12	100
3	5000	8	100
4	5000	8	100
5	5000	8	100
6	7000	10	100
7	5000	6	100
8	7000	6	100

โดยค่าที่จำเป็นต้องกำหนดให้เส้นท่อแต่ละเส้นคือ ความยาวเส้นท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และแฟกเตอร์ความขรุขระของท่อ

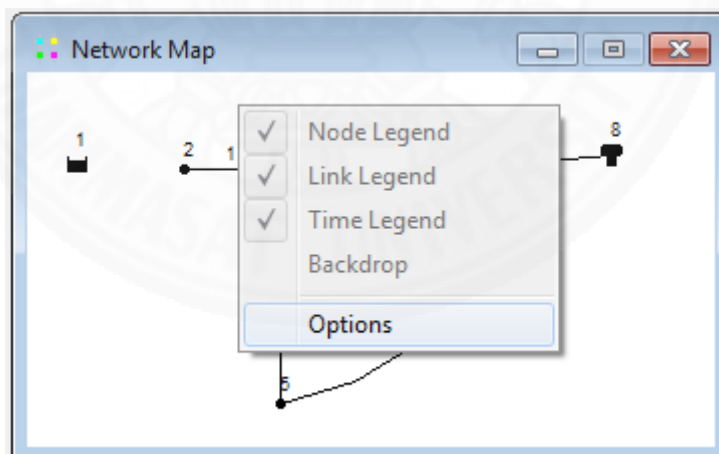
สำหรับการใช้งานซอฟต์แวร์ EPANET สามารถอธิบายคร่าวๆ เป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนด node ต่างๆ Reservoir, Junction และ Tank ดังรูป

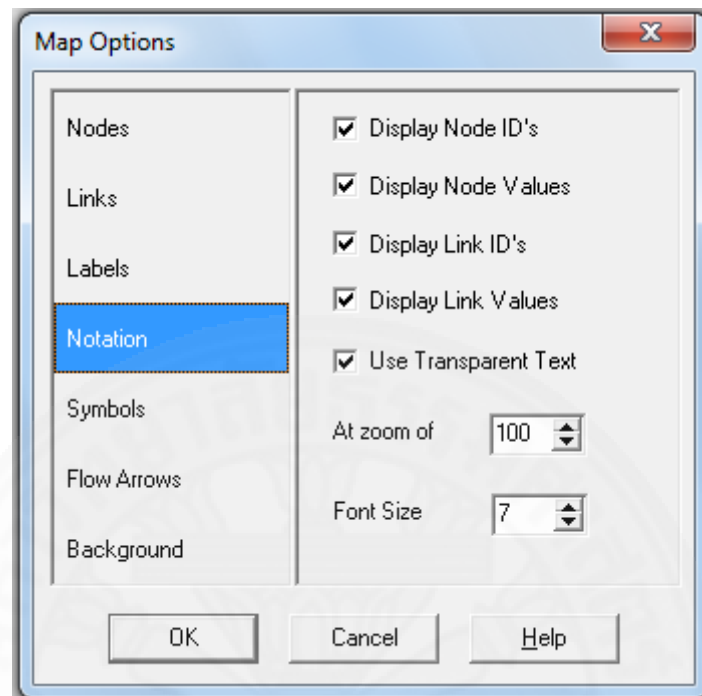
จากตัวเลือกใน Map Toolbar



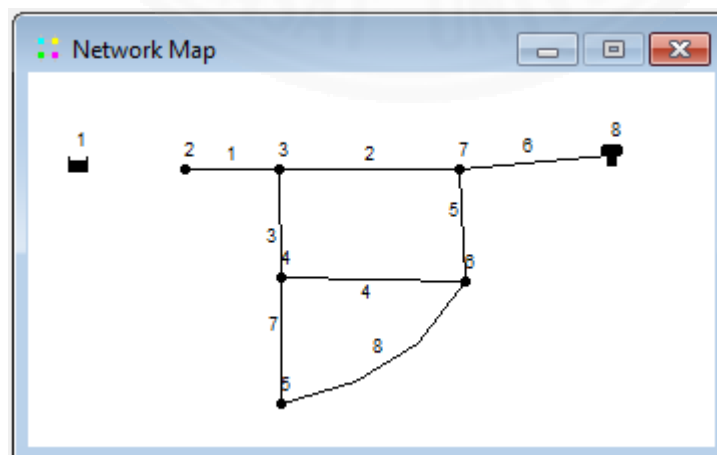
หมายเหตุ ถ้า Network Map ไม่แสดง ID ของแต่ละ node ให้คลิกขวาบริเวณ Network Map แล้วเลือกปุ่ม Options ดังรูป



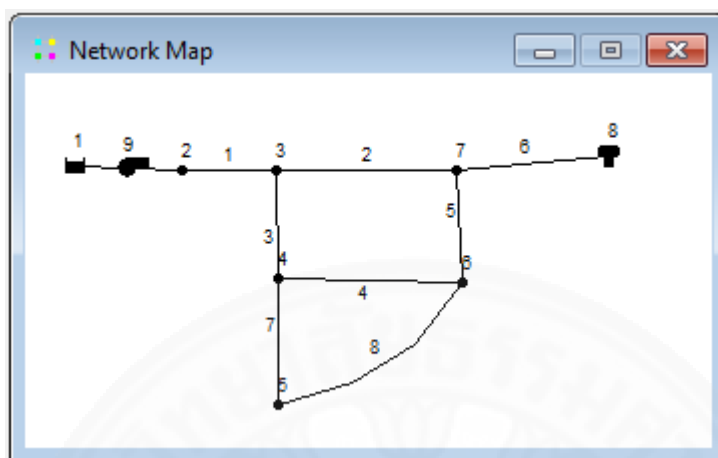
จากนั้นเลือกเมนู Notation แล้ว เลือก Display Node ID's และ Display Link ID's



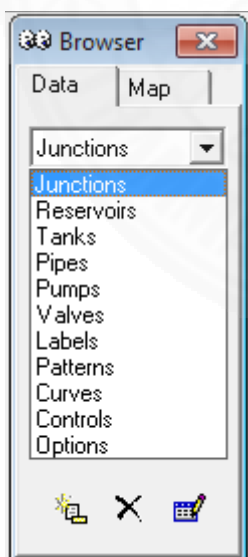
ขั้นตอนที่ 2 สร้างท่อเชื่อมต่อระหว่าง node ต่างๆ โดยใช้ปุ่ม  แล้วคลิกที่ node ต้นทาง จากนั้นคลิกที่ node ปลายทาง



ขั้นตอนที่ 3 ใส่ป๊ิมเข้าไปโดยคลิกที่ node1 (Reservoir) จากนั้นคลิกที่ node2 จะได้ Network ที่มีลักษณะดังรูป



ขั้นตอนที่ 4 กำหนด properties ของแต่ละ node โดยดับเบิลคลิกที่ node หรือไปที่ Browser จากนั้น เลือกแท็บ Data จากนั้นเลือก Reservoirs หรือ Junctions

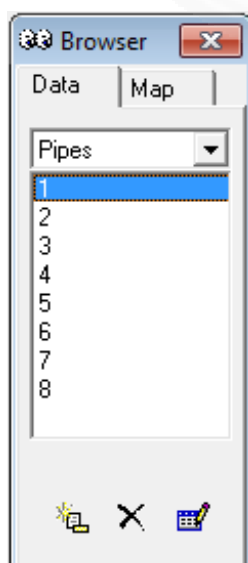


จากนั้นทำการแก้ไข properties ต่างของแต่ละ node ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 1

Junction 2	
Property	Value
*Junction ID	2
X-Coordinate	1298.57
Y-Coordinate	8364.01
Description	
Tag	
*Elevation	0
Base Demand	0
Demand Pattern	
Demand Categories	1
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Actual Demand	#N/A
Total Head	#N/A
Pressure	#N/A
Quality	#N/A

ขั้นตอนที่ 5 กำหนด properties ของแต่ละ pipe โดยดับเบิลคลิกที่ pipe หรือไปที่ Browser

จากนั้น เลือกแท็บ Data จากนั้นเลือก Pipes แล้วคลิกที่ปุ่ม Edit 

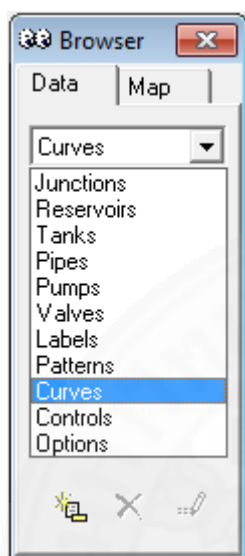


จากนั้นทำการแก้ไข properties ต่างของแต่ละ pipe ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 2

Pipe 1	
Property	Value
*Pipe ID	1
*Start Node	2
*End Node	3
Description	
Tag	
*Length	3000
*Diameter	14
*Roughness	100
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	#N/A
Velocity	#N/A
Unit Headloss	#N/A
Friction Factor	#N/A
Reaction Rate	#N/A
Quality	#N/A
Status	#N/A

ขั้นตอนที่ 6 การกำหนด Properties ของปั๊ม

สร้าง Pump Curve: จาก Browser เลือกแท็บ Data จากนั้นเลือก Curves แล้วคลิกที่ปุ่ม Add



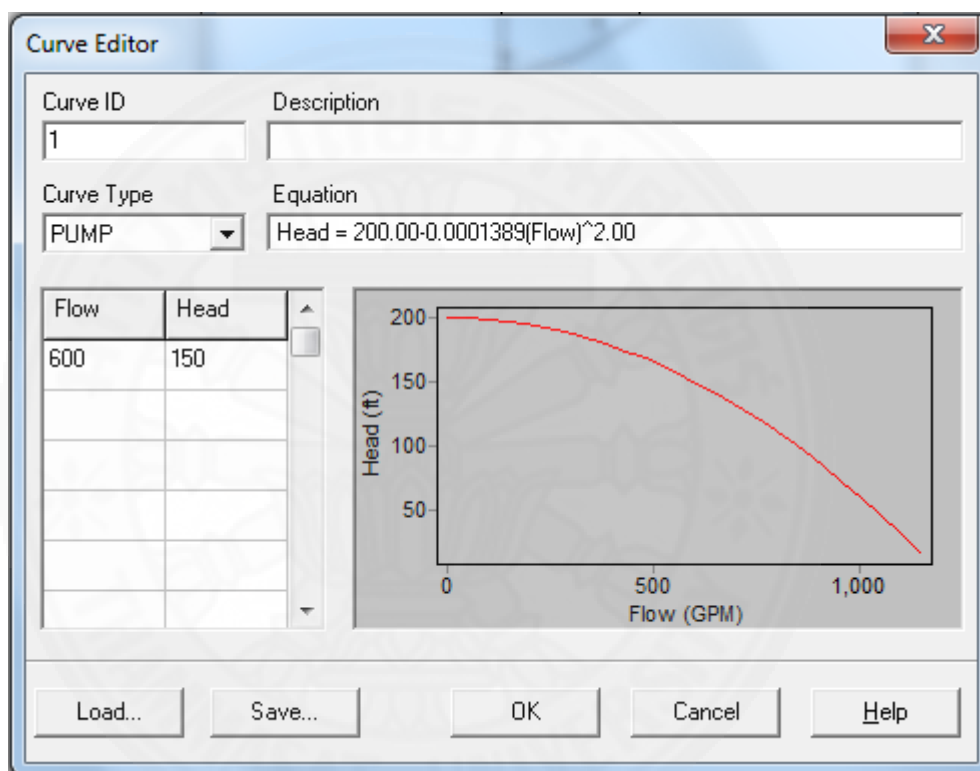
จากนั้นกำหนดค่าดังนี้

Curve ID: 1

Curve Type: PUMP

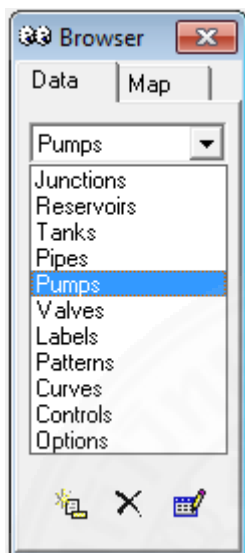
Flow: 600

Head: 150 แล้วกด Enter ซอฟต์แวร์ EPANET จะสร้าง Pump Curves ให้โดยอัตโนมัติ จากนั้นกดปุ่ม OK



กำหนด Curves ให้กับ Pumps: จาก Browser เลือกแท็บ Data แล้วเลือก Pumps แล้วคลิกที่ปั๊ม

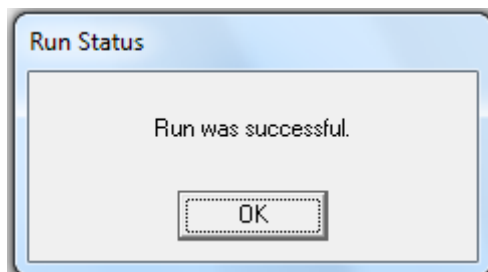
Edit 



จากนั้นที่ Pump Curve ใส่ 1 (Curve1)

Property	Value
*Pump ID	9
*Start Node	1
*End Node	2
Description	
Tag	
Pump Curve	1
Power	
Speed	
Pattern	
Initial Status	Open
Effic. Curve	
Energy Price	
Price Pattern	
Flow	#N/A
Headloss	#N/A
Quality	#N/A
Status	#N/A

กดปุ่ม Run  เพื่อส่งให้ซอฟต์แวร์คำนวณ เมื่อซอฟต์แวร์คำนวณเสร็จแล้ว ให้คลิกปุ่ม OK

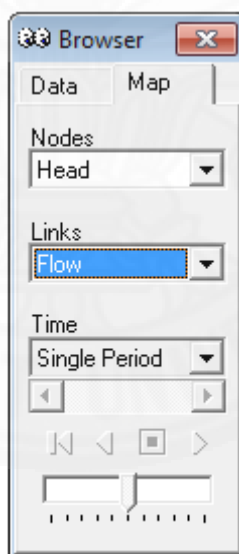


จากนั้นจาก Browser เลือกแท็บ Map จากนั้นเลือกรายละเอียดที่ต้องการแสดงค่าของ Node และ Link

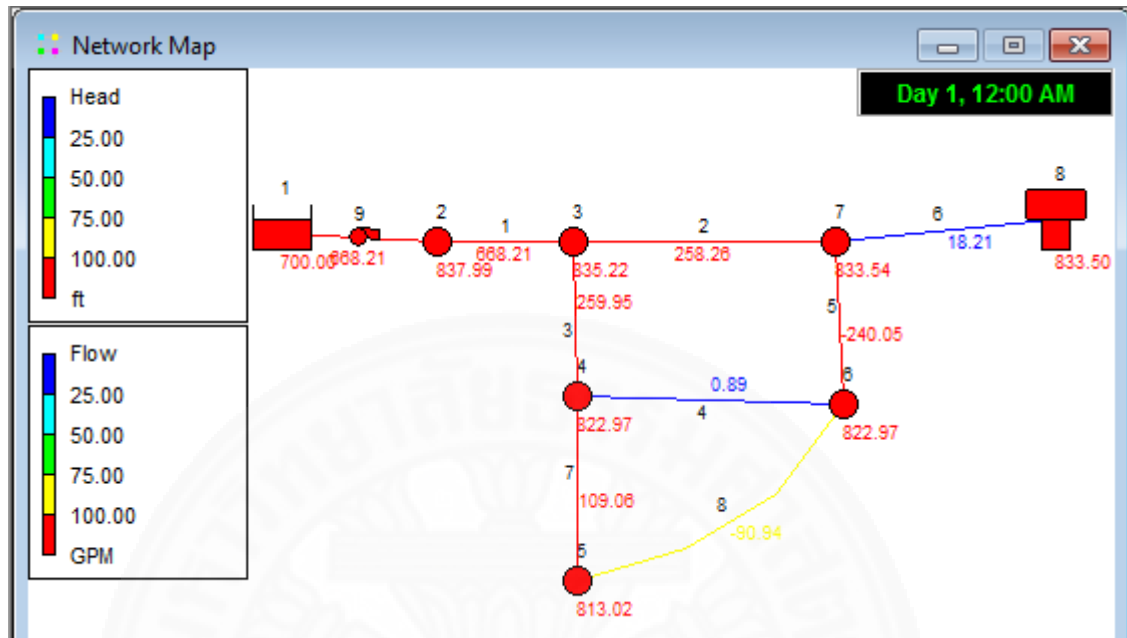
ยกตัวอย่างเช่น

Nodes: Demand

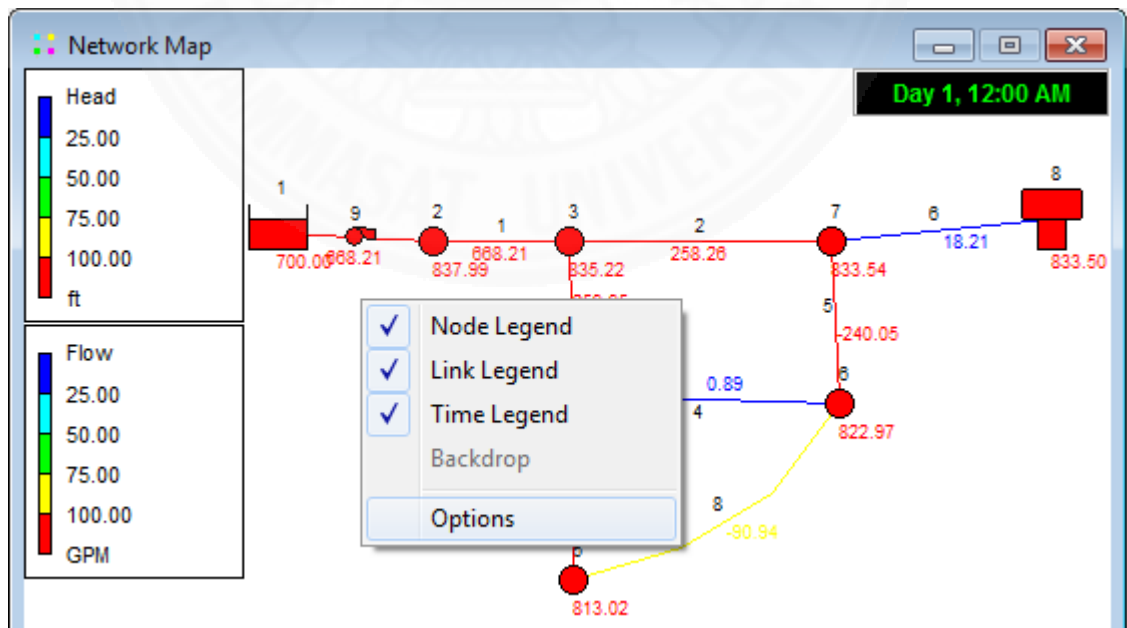
Links: Flow



โดยหน้าจอจะแสดงผลดังรูป



คลิกขวาวบริเวณ Network Map แล้วเลือกปุ่ม Options ดังรูป



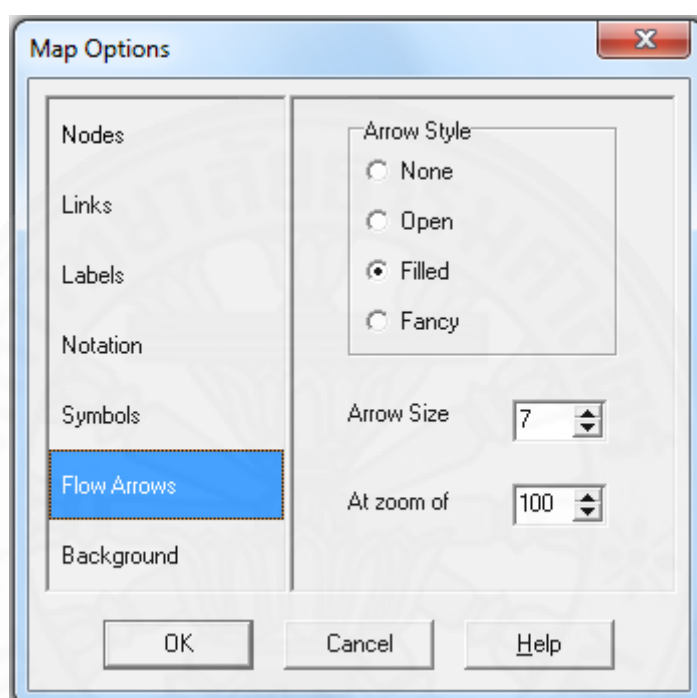
จะปรากฏหน้าจอ Map Options จากนั้นเลือก Flow Arrows แล้วตั้งค่าดังนี้

Arrows Style: Filled

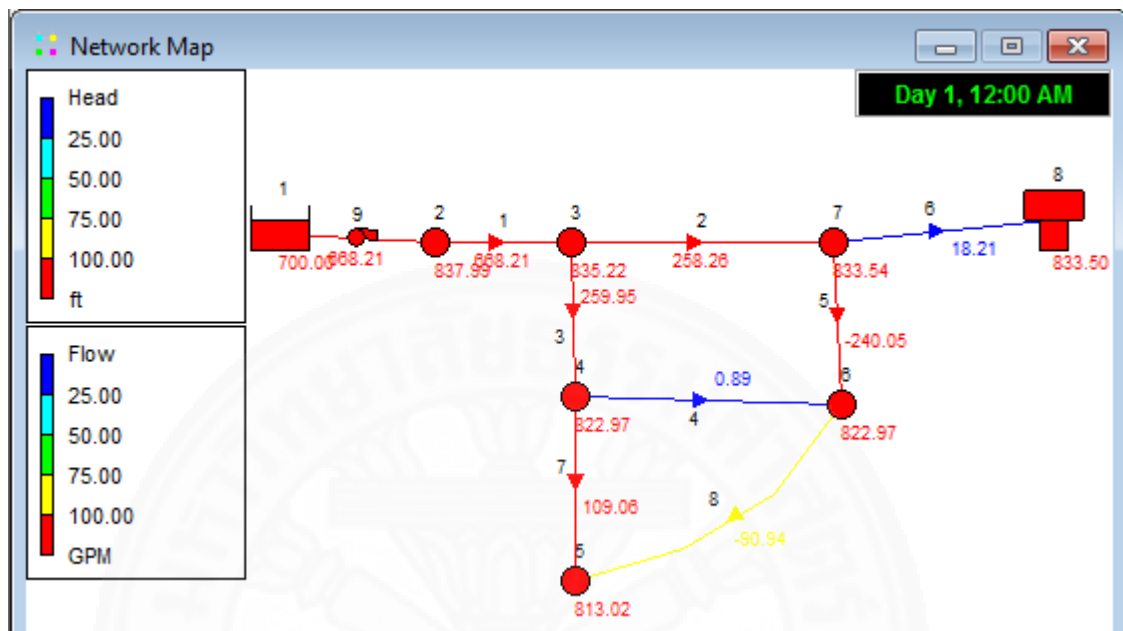
Arrow Size: 7

At zoom of: 100

จากนั้นกดปุ่ม OK



หน้าจอจะแสดงทิศทางการไหลของท่อแต่ละเส้นตามทิศของลูกศร

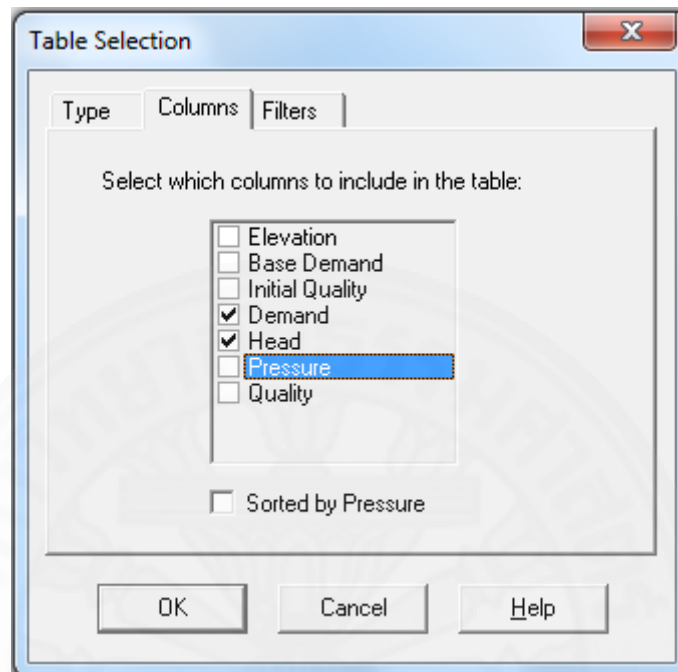


นอกจากนี้สามารถแสดงผลในรูปของตาราง โดยคลิกที่ปุ่ม Table แล้วเลือกข้อมูลที่ต้องการแสดงผล ยกตัวอย่างเช่น ต้องการทราบ Demand และ Head ของ Node ต่างๆ ที่แท็บเมนู Type Select the type of table create เลือก Network Nodes at ดังรูป

The Table Selection dialog box has the following settings:

- Tab:** Type
- Select the type of table to create:**
 - ☒ Network Nodes at (Time: 0:00 Hrs)
 - ☐ Network Links at
 - ☐ Time series for node
 - ☐ Time series for link
- Buttons:** OK, Cancel, Help

ที่แท็บเมนู Columns เลือกสิ่งที่ต้องการแสดงค่า เช่น Demand และ Head ดังรูป



จากนั้นกดปุ่ม OK หน้าจอจะแสดง Demand และ Head ของแต่ละ Node ดังรูป

Network Table - Nodes at 0:00 Hrs		
Node ID	Demand GPM	Head ft
Junc 2	0.00	837.99
Junc 3	150.00	835.22
Junc 4	150.00	822.97
Junc 5	200.00	813.02
Junc 6	150.00	822.97
Junc 7	0.00	833.54
Resvr 1	-668.21	700.00
Tank 8	18.21	833.50

ในส่วนของการแสดงผลในรูปแบบตารางต่อไปนี้แสดงตัวอย่างได้ดังรูปต่อไปนี้

Network Table - Links at 0:00 Hrs

Link ID	Flow GPM	Velocity fps	Unit Headloss ft/Kft	Friction Factor
Pipe 1	668.21	1.39	0.92	0.036
Pipe 2	258.26	0.73	0.34	0.040
Pipe 3	259.95	1.66	2.45	0.038
Pipe 4	0.89	0.01	0.00	0.099
Pipe 5	-240.05	1.53	2.11	0.039
Pipe 6	18.21	0.07	0.01	0.058
Pipe 7	109.06	1.24	1.99	0.042
Pipe 8	-90.94	1.03	1.42	0.043
Pump 9	668.21	0.00	-137.99	0.000

ภาคผนวก ข

Source Code

```
Imports System.IO
Imports System.Text
Imports System.Data
Public Class FrmPrincipal

'+++++
' This algorithm for optimization reservoirs head for supply water to meet
the pressure level of 28 interested nodes (Tris).
' This algorithm using for MWA main pipe only.
'+++++

Public Shared NPOP, T, NGEN As Integer      'NPOP = population per generation,NGEN
Number of generation
Public Shared F(NPOP - 1) As Single        'Objective function
Public Shared ObjNgen(24, 2) As Single     'Objective function value for
generation comparison

'For storage simulation pressure
Public Shared P1, P8, P10, P19, P21, P27, P28, P32, P36, P39, P43, P101, P104,
P107, P113, P122, P123, P125, P134, P137, P138, P146, P147, P148, P152, P153,
P155, P164 As Single

'For storage the best simulation pressure of interested node at each time
Public Shared P1B(24), P8B(24), P10B(24), P19B(24), P21B(24), P27B(24),
P28B(24), P32B(24), P36B(24), P39B(24), P43B(24), P101B(24), P104B(24),
P107B(24), P113B(24), P122B(24), P123B(24), P125B(24), P134B(24), P137B(24),
P138B(24), P146B(24), P147B(24), P148B(24), P152B(24), P153B(24), P155B(24),
P164B(24) As Single

'For storage required pressure at each time
Public Shared P1G(24), P8G(24), P10G(24), P19G(24), P21G(24), P27G(24),
P28G(24), P32G(24), P36G(24), P39G(24), P43G(24), P101G(24), P104G(24),
P107G(24), P113G(24), P122G(24), P123G(24), P125G(24), P134G(24), P137G(24),
P138G(24), P146G(24), P147G(24), P148G(24), P152G(24), P153G(24), P155G(24),
P164G(24) As Single

'Reservoir Head Declaration
Public Shared BANGKHEN03(NPOP - 1), BANGKHEN04(NPOP - 1), BANGPLEE(NPOP - 1),
DU1(NPOP - 1), KK(NPOP - 1), KLONGTAEY(NPOP - 1), LADKRABUNG(NPOP - 1),
LADPRAW(NPOP - 1), LUMPINEE(NPOP - 1), MAHASAWAT(NPOP - 1), MINBURI(NPOP - 1),
O1(NPOP - 1), PETKASEM(NPOP - 1), RATBURANA(NPOP - 1), SS(NPOP - 1),
SUMRONG(NPOP - 1), THAPRA(NPOP - 1), TONBURI(NPOP - 1), UU(NPOP - 1),
XX(NPOP - 1) As Single

'Upper and Lower reservoir head Declaration
Public BANGKHEN03MIN, BANGKHEN03MAX, BANGKHEN04MIN, BANGKHEN04MAX, BANGPLEEMIN,
BANGPLEEMAX, DU1MIN, DU1MAX, KKMIN, KKMAX, KLONGTAEYMIN, KLONGTAEYMAX,
LADKRABUNGMIN, LADKRABUNGMAX, LADPRAWMIN, LADPRAWMAX, LUMPINEEMIN, LUMPINEEMAX,
MAHASAWATMIN, MAHASAWATMAX, MINBURIMIN, MINBURIMAX, O1MIN, O1MAX, PETKASEMIN,
PETKASEMAX, RATBURANAMIN, RATBURANAMAX, SSMIN, SSMAX, SUMRONGMIN, SUMRONGMAX,
THAPRAMIN, THAPRAMAX, TONBURIMIN, TONBURIMAX, UUMIN, UUMAX, XXMIN, XXMAX As
Single
```

```
'The Best Reservoir Head Declaration 0 - 24 Hrs.
Public Shared FBEST(24), BANGKHEN03BEST(24), BANGKHEN04BEST(24),
BANGPLEEBEST(24), DU1BEST(24), KKBEST(24), KLONGTAEYBEST(24),
LADKRABUNGBEST(24), LADPRAWBEST(24), LUMPINEEBEST(24), MAHASAWATBEST(24),
MINBURIBEST(24), O1BEST(24), PETKASEMBEST(24), RATBURANABEST(24), SSBEST(24),
SUMRONGBEST(24), THAPRABEST(24), TONBURIBEST(24), UUBEST(24), XXBEST(24) As
Single
```

```
Private Structure TypeNode
    Dim ID As String           'Node ID
    Dim Elevation As Single    'Node elevation
    Dim BaseDemand As Single   'Base demand at node
    Dim ActualDemand As Single 'Actual demand
    Dim Head As Single         'Node head
    Dim Totalhead As Single    'Total head
    Dim Pressure As Single     'Pressure
End Structure
```

```
Private Structure TypePipe
    Dim ID As String           'Pipe ID
    Dim Flow As Single         'Flow in the pipe
    Dim Velocity As Single     'Flow velocity
    Dim Status As String       'Status
End Structure
```

```
Dim DirInp As String          'Epanet inp file path
Dim DirRpt As String          'Epanet rpt file path
Dim DirOut As String          'Epanet out file path
Dim Node() As TypeNode
Dim Pipe() As TypePipe
```

```
Private Sub FrmPrincipal_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles
MyBase.Load
    For i = 1 To 28
        DataGridView1.Rows.Add("")
        DataGridView2.Rows.Add("")
    Next

    For i = 1 To 21
        DataGridView3.Rows.Add("")
    Next
```

```
DataGridView1.Rows(0).Cells(0).Value = "P1"
DataGridView1.Rows(1).Cells(0).Value = "P8"
DataGridView1.Rows(2).Cells(0).Value = "P10"
DataGridView1.Rows(3).Cells(0).Value = "P19"
DataGridView1.Rows(4).Cells(0).Value = "P21"
DataGridView1.Rows(5).Cells(0).Value = "P27"
DataGridView1.Rows(6).Cells(0).Value = "P28"
DataGridView1.Rows(7).Cells(0).Value = "P32"
DataGridView1.Rows(8).Cells(0).Value = "P36"
DataGridView1.Rows(9).Cells(0).Value = "P39"
DataGridView1.Rows(10).Cells(0).Value = "P43"
DataGridView1.Rows(11).Cells(0).Value = "P101"
DataGridView1.Rows(12).Cells(0).Value = "P104"
DataGridView1.Rows(13).Cells(0).Value = "P107"
DataGridView1.Rows(14).Cells(0).Value = "P113"
DataGridView1.Rows(15).Cells(0).Value = "P122"
DataGridView1.Rows(16).Cells(0).Value = "P123"
```

```

DataGridView1.Rows(17).Cells(0).Value = "P125"
DataGridView1.Rows(18).Cells(0).Value = "P134"
DataGridView1.Rows(19).Cells(0).Value = "P137"
DataGridView1.Rows(20).Cells(0).Value = "P138"
DataGridView1.Rows(21).Cells(0).Value = "P146"
DataGridView1.Rows(22).Cells(0).Value = "P147"
DataGridView1.Rows(23).Cells(0).Value = "P148"
DataGridView1.Rows(24).Cells(0).Value = "P152"
DataGridView1.Rows(25).Cells(0).Value = "P153"
DataGridView1.Rows(26).Cells(0).Value = "P155"
DataGridView1.Rows(27).Cells(0).Value = "P164"

```

```

DataGridView2.Rows(0).Cells(0).Value = "P1*"
DataGridView2.Rows(1).Cells(0).Value = "P8*"
DataGridView2.Rows(2).Cells(0).Value = "P10*"
DataGridView2.Rows(3).Cells(0).Value = "P19*"
DataGridView2.Rows(4).Cells(0).Value = "P21*"
DataGridView2.Rows(5).Cells(0).Value = "P27*"
DataGridView2.Rows(6).Cells(0).Value = "P28*"
DataGridView2.Rows(7).Cells(0).Value = "P32*"
DataGridView2.Rows(8).Cells(0).Value = "P36*"
DataGridView2.Rows(9).Cells(0).Value = "P39*"
DataGridView2.Rows(10).Cells(0).Value = "P43*"
DataGridView2.Rows(11).Cells(0).Value = "P101*"
DataGridView2.Rows(12).Cells(0).Value = "P104*"
DataGridView2.Rows(13).Cells(0).Value = "P107*"
DataGridView2.Rows(14).Cells(0).Value = "P113*"
DataGridView2.Rows(15).Cells(0).Value = "P122*"
DataGridView2.Rows(16).Cells(0).Value = "P123*"
DataGridView2.Rows(17).Cells(0).Value = "P125*"
DataGridView2.Rows(18).Cells(0).Value = "P134*"
DataGridView2.Rows(19).Cells(0).Value = "P137*"
DataGridView2.Rows(20).Cells(0).Value = "P138*"
DataGridView2.Rows(21).Cells(0).Value = "P146*"
DataGridView2.Rows(22).Cells(0).Value = "P147*"
DataGridView2.Rows(23).Cells(0).Value = "P148*"
DataGridView2.Rows(24).Cells(0).Value = "P152*"
DataGridView2.Rows(25).Cells(0).Value = "P153*"
DataGridView2.Rows(26).Cells(0).Value = "P155*"
DataGridView2.Rows(27).Cells(0).Value = "P164*"

```

```

DataGridView3.Rows(0).Cells(0).Value = "BANGKHEN03"
DataGridView3.Rows(1).Cells(0).Value = "BANGKHEN04"
DataGridView3.Rows(2).Cells(0).Value = "BANGPLEE"
DataGridView3.Rows(3).Cells(0).Value = "DU1"
DataGridView3.Rows(4).Cells(0).Value = "K"
DataGridView3.Rows(5).Cells(0).Value = "KLONGTAEY"
DataGridView3.Rows(6).Cells(0).Value = "LADKRABUNG"
DataGridView3.Rows(7).Cells(0).Value = "LADPRAW"
DataGridView3.Rows(8).Cells(0).Value = "LUMPINEE"
DataGridView3.Rows(9).Cells(0).Value = "MAHASAWAT"
DataGridView3.Rows(10).Cells(0).Value = "MINBURI"
DataGridView3.Rows(11).Cells(0).Value = "O1"
DataGridView3.Rows(12).Cells(0).Value = "PETKASEM"
DataGridView3.Rows(13).Cells(0).Value = "RATBURANA"
DataGridView3.Rows(14).Cells(0).Value = "S"
DataGridView3.Rows(15).Cells(0).Value = "SUMRONG"
DataGridView3.Rows(16).Cells(0).Value = "THAPRA"
DataGridView3.Rows(17).Cells(0).Value = "TONBURI"

```

```

DataGridView3.Rows(18).Cells(0).Value = "U"
DataGridView3.Rows(19).Cells(0).Value = "X"
DataGridView3.Rows(20).Cells(0).Value = "OBJF"
End Sub

Private Sub Button1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Button1.Click

    'Open Required Head file (CSV)
    With OpenFileDialog
        .ShowReadOnly = True
        .InitialDirectory = System.Environment.CurrentDirectory
        .Filter = "Inp files (*.csv)|*.csv"
        .RestoreDirectory = True
        .Title = "Select csv file"
        If .ShowDialog() = DialogResult.OK Then TextBox1.Text = .FileName
    End With
    TextBox1.SelectionStart = Len(TextBox1.Text)
    Dim fname As String = TextBox1.Text
    Dim colsexpected As Integer = 5
    Dim thereader As New StreamReader(fname, Encoding.Default)
    Dim sline As String = ""
    Dim i As Integer

    i = 0
    Do
        sline = thereader.ReadLine
        If sline Is Nothing Then Exit Do
        If i > 28 Then Exit Do
        Dim words() As String = sline.Split(",")

        If i > 0 Then
            For ix = 1 To 25
                DataGridView1.Rows(i - 1).Cells(ix).Value = words(ix)
            Next
        End If
        i = i + 1
    Loop
    thereader.Close()

    'Specific goal head for each node
    For ix As Integer = 1 To 25
        P1G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(0).Cells(ix).Value)
        P8G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(1).Cells(ix).Value)
        P10G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(2).Cells(ix).Value)
        P19G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(3).Cells(ix).Value)
        P21G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(4).Cells(ix).Value)
        P27G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(5).Cells(ix).Value)
        P28G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(6).Cells(ix).Value)
        P32G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(7).Cells(ix).Value)
        P36G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(8).Cells(ix).Value)
        P39G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(9).Cells(ix).Value)
        P43G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(10).Cells(ix).Value)
        P101G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(11).Cells(ix).Value)
        P104G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(12).Cells(ix).Value)
        P107G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(13).Cells(ix).Value)
        P113G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(14).Cells(ix).Value)
        P122G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(15).Cells(ix).Value)
        P123G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(16).Cells(ix).Value)
    
```

```

P125G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(17).Cells(ix).Value)
P134G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(18).Cells(ix).Value)
P137G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(19).Cells(ix).Value)
P138G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(20).Cells(ix).Value)
P146G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(21).Cells(ix).Value)
P147G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(22).Cells(ix).Value)
P148G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(23).Cells(ix).Value)
P152G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(24).Cells(ix).Value)
P153G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(25).Cells(ix).Value)
P155G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(26).Cells(ix).Value)
P164G(ix - 1) = (DataGridView1.Rows(27).Cells(ix).Value)
Next

End Sub

Public Sub BtnOpen_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
BtnOpen.Click

    'Open Epanet file (INP)
    With OpenFD
        .ShowReadOnly = True
        .InitialDirectory = System.Environment.CurrentDirectory
        .Filter = "Inp files (*.inp)|*.inp"
        .RestoreDirectory = True
        .Title = "Select Inp file"
        If .ShowDialog() = DialogResult.OK Then TxtINP.Text = .FileName
    End With
    TxtINP.SelectionStart = Len(TxtINP.Text)

End Sub

Public Sub BtnOk_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
BtnOk.Click

'=====
'FIND MINIMUM POINT OF A FUNCTION USING GENETIC ALGORITHM
'ORIGINAL FORTRAN CODE WAS GENERATED BY Assoc. Prof. Dr. Dulyachot
Cholaseuk Mechanical Dept. Faculty of Engineering Thammasat University
'VISUAL BASIC CODE WAS MODIFIED BY RANGSAN WANNAPOP

'=====
'CROSSOVER and MUTATION Valiable Declaration
'SPECIFY Number of Population
NPOP = NPOPTB.Text
'Redimension variable arrays
ReDim F(NPOP - 1)
ReDim BANGKHEN03(NPOP - 1), BANGKHEN04(NPOP - 1), BANGPLEE(NPOP - 1),
DU1(NPOP - 1), KK(NPOP - 1), KLONGTAEY(NPOP - 1), LADKRABUNG(NPOP - 1),
LADPRAW(NPOP - 1), LUMPINEE(NPOP - 1), MAHASAWAT(NPOP - 1), MINBURI(NPOP - 1),
O1(NPOP - 1), PETKASEM(NPOP - 1), RATBURANA(NPOP - 1), SS(NPOP - 1),
SUMRONG(NPOP - 1), THAPRA(NPOP - 1), TONBURI(NPOP - 1), UU(NPOP - 1),
XX(NPOP - 1)
Dim TOL As Single = 0.0001 'TOL = Target resolution of objective
function
Dim MUTATE, R, RCROSS, RMUTATE, FBEST0 As Single      'R = Ratio to
weight toward the better of the parent during crossover
Dim NCROSS, NMUTATE, NOLD, NSHIFT, II, JJ, I As Integer

'Setting Upper and Lower Range of reservoir head

```

```

BANGKHEN03MIN = 10.0
BANGKHEN03MAX = 36.0
BANGKHEN04MIN = 10.0
BANGKHEN04MAX = 35.0
BANGPLEEMIN = 10.0
BANGPLEEMAX = 35.0
DU1MIN = 10.0
DU1MAX = 35.0
KKMIN = 10.0
KKMAX = 35.0
KLONGTAEYMIN = 10.0
KLONGTAEYMAX = 36.0
LADKRABUNGMIN = 10.0
LADKRABUNGMAX = 35.0
LADPRAWMIN = 10.0
LADPRAWMAX = 50.0
LUMPINEEMIN = 10.0
LUMPINEEMAX = 44.0
MAHASAWATMIN = 10.0
MAHASAWATMAX = 50.0
MINBURIMIN = 10.0
MINBURIMAX = 35.0
O1MIN = 10.0
O1MAX = 35.0
PETKASEMMIN = 10.0
PETKASEMMAX = 50.0
RATBURANAMIN = 10.0
RATBURANAMAX = 36.0
SSMIN = 10.0
SSMAX = 35.0
SUMRONGMIN = 10.0
SUMRONGMAX = 50.0
THAPRAMIN = 10.0
THAPRAMAX = 36.0
TONBURIMIN = 10.0
TONBURIMAX = 35.0
UUMIN = 10.0
UUMAX = 35.0
XXMIN = 10.0
XXMAX = 35.0

```

```

'Specify ratio of crossover and mutation
'R = RTB.Text      'R = Ratio to weight toward the better of the
parent during crossover
RCROSS = RCROSSTB.Text
RMUTATE = RMUTATETB.Text
NCROSS = RCROSS * NPOP
NMUTATE = RMUTATE * NPOP
NOLD = NPOP - NCROSS - NMUTATE
NGEN = NGENB.Text
'Redimension variable arrays
ReDim ObjNgen(24, NGEN)
Dim T As Integer    'Time Counter

Dim Err As Long
Dim nNodes, nLinks As Single
'Dim Err As Long, j As Single
'Dim nNodes, nLinks, k As Single
'Dim typLink As Long, typNode As Long

```

```

Dim ID As New StringBuilder(32)
Dim tt, ttt, nTime As Single
'Dim Value As Single
Dim ColIDNode As New Collection

DirInp = TxtINP.Text

'Specify the path where the .rpt and .out files will be created
DirRpt = DirInp.Substring(0, Len(DirInp) - 4) & ".rpt"
DirOut = DirInp.Substring(0, Len(DirInp) - 4) & ".out"

'=====
'METHOD 2.- Using the functions:
'ENopenH - ENinith - ENrunH - ENnextH - ENcloseH'
'=====
nTime = 14 * 3600.0# 'Collect information at 2:00 p.m.

Err = ENopen(DirInp, DirRpt, DirOut) 'Open Toolkit
Err = ENgetcount(EN_NODECOUNT, nNodes) 'Retrieve the number of nodes
Err = ENgetcount(EN_LINKCOUNT, nLinks) 'Retrieve the number of links
Err = ENopenH : If Err <> 0 Then Stop
Err = ENinith(1) : If Err <> 0 Then Stop

T = 0 'Start at 0 Oclock

'Run Hydraulic Simulation
Do 'Run until 24 Oclock
    FBEST(T) = 10 ^ 9
    FBEST0 = FBEST(T)
    'Start Creating Population
    For I = 0 To NPOP - 1
        BANGKHEN03(I) = Rnd() * (BANGKHEN03MAX - BANGKHEN03MIN) +
BANGKHEN03MIN
        BANGKHEN04(I) = Rnd() * (BANGKHEN04MAX - BANGKHEN04MIN) +
BANGKHEN04MIN
        BANGPLEE(I) = Rnd() * (BANGPLEEMAX - BANGPLEEMIN) + BANGPLEEMIN
        DU1(I) = Rnd() * (DU1MAX - DU1MIN) + DU1MIN
        KK(I) = Rnd() * (KKMAX - KKMIN) + KKMIN
        KLONGTAEY(I) = Rnd() * (KLONGTAEYMAX - KLONGTAEYMIN) +
KLONGTAEYMIN
        LADKRABUNG(I) = Rnd() * (LADKRABUNGMAX - LADKRABUNGMIN) +
LADKRABUNGMIN
        LADPRAW(I) = Rnd() * (LADPRAWMAX - LADPRAWMIN) + LADPRAWMIN
        LUMPINEE(I) = Rnd() * (LUMPINEEMAX - LUMPINEEMIN) + LUMPINEEMIN
        MAHASAWAT(I) = Rnd() * (MAHASAWATMAX - MAHASAWATMIN) +
MAHASAWATMIN
        MINBURI(I) = Rnd() * (MINBURIMAX - MINBURIMIN) + MINBURIMIN
        O1(I) = Rnd() * (O1MAX - O1MIN) + O1MIN
        PETKASEM(I) = Rnd() * (PETKASEMMAX - PETKASEMMIN) + PETKASEMMIN
        RATBURANA(I) = Rnd() * (RATBURANAMAX - RATBURANAMIN) +
RATBURANAMIN
        SS(I) = Rnd() * (SSMAX - SSMIN) + SSMIN
        SUMRONG(I) = Rnd() * (SUMRONGMAX - SUMRONGMIN) + SUMRONGMIN
        THAPRA(I) = Rnd() * (THAPRAMAX - THAPRAMIN) + THAPRAMIN
        TONBURI(I) = Rnd() * (TONBURIMAX - TONBURIMIN) + TONBURIMIN
        UU(I) = Rnd() * (UUMAX - UUMIN) + UUMIN
        XX(I) = Rnd() * (XXMAX - XXMIN) + XXMIN

'Specify Reservoir Head

```

SetHead(BANGKHEN03, BANGKHEN04, BANGPLEE, DU1, KK, KLONGTAEY,
LADKRABUNG, LADPRAW, LUMPINEE, MAHASAWAT, MINBURI, O1, PETKASEM, RATBURANA, SS,
SUMRONG, THAPRA, TONBURI, UU, XX, I)

'Run Hydraulic
Err = ENrunH(tt) : If Err > 6 Then Stop

'Retrieve Interested Node Head
GetPressure()

'Call Objective Function

OBJF(I, T)

If F(I) < FBEST(T) Then

FBEST(T) = F(I)

BANGKHEN03BEST(T) = BANGKHEN03(I)

BANGKHEN04BEST(T) = BANGKHEN04(I)

BANGPLEEBEST(T) = BANGPLEE(I)

DU1BEST(T) = DU1(I)

KKBEST(T) = KK(I)

KLONGTAEYBEST(T) = KLONGTAEY(I)

LADKRABUNGBEST(T) = LADKRABUNG(I)

LADPRAWBEST(T) = LADPRAW(I)

LUMPINEEBEST(T) = LUMPINEE(I)

MAHASAWATBEST(T) = MAHASAWAT(I)

MINBURIBEST(T) = MINBURI(I)

O1BEST(T) = O1(I)

PETKASEMBEST(T) = PETKASEM(I)

RATBURANABEST(T) = RATBURANA(I)

SSBEST(T) = SS(I)

SUMRONGBEST(T) = SUMRONG(I)

THAPRABEST(T) = THAPRA(I)

TONBURIBEST(T) = TONBURI(I)

UUBEST(T) = UU(I)

XXBEST(T) = XX(I)

P1B(T) = P1

P8B(T) = P8

P10B(T) = P10

P19B(T) = P19

P21B(T) = P21

P27B(T) = P27

P28B(T) = P28

P32B(T) = P32

P36B(T) = P36

P39B(T) = P39

P43B(T) = P43

P101B(T) = P101

P104B(T) = P104

P107B(T) = P107

P113B(T) = P113

P122B(T) = P122

P123B(T) = P123

P125B(T) = P125

P134B(T) = P134

P137B(T) = P137

P138B(T) = P138

P146B(T) = P146

P147B(T) = P147

P148B(T) = P148

P152B(T) = P152

```

        P153B(T) = P153
        P155B(T) = P155
        P164B(T) = P164
    End If

Next

'SELECT THE FITTEST POPULATION
SORT(BANGKHEN03, BANGKHEN04, BANGPLEE, DU1, KK, KLONGTAEY,
LADKRABUNG, LADPRAW, LUMPINEE, MAHASAWAT, MINBURI, 01, PETKASEM, RATBURANA, SS,
SUMRONG, THAPRA, TONBURI, UU, XX, F, NPOP)

'CREATE NEW GENERATION
For IG = 0 To NGEN
    'CROSSOVER
    NSHIFT = NOLD
    R = Rnd()

    For I = NSHIFT - 1 To NSHIFT + NCROSS - 1

        'BANGKHEN03
        II = Rnd() * NOLD
        JJ = Rnd() * NOLD
        If JJ = II Then
            Do While JJ = II
                JJ = Rnd() * NOLD
            Loop
        End If

        If F(II) < F(JJ) Then
            BANGKHEN03(I) = (R) * BANGKHEN03(II) + (1 - R) *
BANGKHEN03(JJ)
        Else
            BANGKHEN03(I) = (1 - R) * BANGKHEN03(II) + (R) *
BANGKHEN03(JJ)
        End If

        'BANGKHEN04
        II = Rnd() * NOLD
        JJ = Rnd() * NOLD
        If JJ = II Then
            Do While JJ = II
                JJ = Rnd() * NOLD
            Loop
        End If

        If F(II) < F(JJ) Then
            BANGKHEN04(I) = (R) * BANGKHEN04(II) + (1 - R) *
BANGKHEN04(JJ)
        Else
            BANGKHEN04(I) = (1 - R) * BANGKHEN04(II) + (R) *
BANGKHEN04(JJ)
        End If

        'BANGPLEE
        II = Rnd() * NOLD
        JJ = Rnd() * NOLD
        If JJ = II Then
            Do While JJ = II

```

```

        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    BANGPLEE(I) = (R) * BANGPLEE(II) + (1 - R) *
BANGPLEE(JJ)
Else
    BANGPLEE(I) = (1 - R) * BANGPLEE(II) + (R) *
BANGPLEE(JJ)
End If

'DU1
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    DU1(I) = (R) * DU1(II) + (1 - R) * DU1(JJ)
Else
    DU1(I) = (1 - R) * DU1(II) + (R) * DU1(JJ)
End If

'KK
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    KK(I) = (R) * KK(II) + (1 - R) * KK(JJ)
Else
    KK(I) = (1 - R) * KK(II) + (R) * KK(JJ)
End If

'KLONGTAEY
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    KLONGTAEY(I) = (R) * KLONGTAEY(II) + (1 - R) *
KLONGTAEY(JJ)
Else
    KLONGTAEY(I) = (1 - R) * KLONGTAEY(II) + (R) *
KLONGTAEY(JJ)
End If

```

```

'LADKRABUNG
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    LADKRABUNG(I) = (R) * LADKRABUNG(II) + (1 - R) *
LADKRABUNG(JJ)
Else
    LADKRABUNG(I) = (1 - R) * LADKRABUNG(II) + (R) *
LADKRABUNG(JJ)
End If

'LADPRAW
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    LADPRAW(I) = (R) * LADPRAW(II) + (1 - R) * LADPRAW(JJ)
Else
    LADPRAW(I) = (1 - R) * LADPRAW(II) + (R) * LADPRAW(JJ)
End If

'LUMPINEE
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    LUMPINEE(I) = (R) * LUMPINEE(II) + (1 - R) *
LUMPINEE(JJ)
Else
    LUMPINEE(I) = (1 - R) * LUMPINEE(II) + (R) *
LUMPINEE(JJ)
End If

'MAHASAWAT
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then

```

```

MAHASAWAT(JJ)      MAHASAWAT(I) = (R) * MAHASAWAT(II) + (1 - R) *
Else
MAHASAWAT(JJ)      MAHASAWAT(I) = (1 - R) * MAHASAWAT(II) + (R) *
End If

'MINBURI
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    MINBURI(I) = (R) * MINBURI(II) + (1 - R) * MINBURI(JJ)
Else
    MINBURI(I) = (1 - R) * MINBURI(II) + (R) * MINBURI(JJ)
End If

'O1
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    O1(I) = (R) * O1(II) + (1 - R) * O1(JJ)
Else
    O1(I) = (1 - R) * O1(II) + (R) * O1(JJ)
End If

'PETKASEM
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    PETKASEM(I) = (R) * PETKASEM(II) + (1 - R) *
PETKASEM(JJ)
Else
    PETKASEM(I) = (1 - R) * PETKASEM(II) + (R) *
PETKASEM(JJ)
End If

'RATBURANA
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II

```

```

        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    RATBURANA(I) = (R) * RATBURANA(II) + (1 - R) *
RATBURANA(JJ)
Else
    RATBURANA(I) = (1 - R) * RATBURANA(II) + (R) *
RATBURANA(JJ)
End If

'SS
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    SS(I) = (R) * SS(II) + (1 - R) * SS(JJ)
Else
    SS(I) = (1 - R) * SS(II) + (R) * SS(JJ)
End If

'SUMRONG
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    SUMRONG(I) = (R) * SUMRONG(II) + (1 - R) * SUMRONG(JJ)
Else
    SUMRONG(I) = (1 - R) * SUMRONG(II) + (R) * SUMRONG(JJ)
End If

'THAPRA
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    THAPRA(I) = (R) * THAPRA(II) + (1 - R) * THAPRA(JJ)
Else
    THAPRA(I) = (1 - R) * THAPRA(II) + (R) * THAPRA(JJ)
End If

'TONBURI
II = Rnd() * NOLD

```

```

JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    TONBURI(I) = (R) * TONBURI(II) + (1 - R) * TONBURI(JJ)
Else
    TONBURI(I) = (1 - R) * TONBURI(II) + (R) * TONBURI(JJ)
End If

'UU
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    UU(I) = (R) * UU(II) + (1 - R) * UU(JJ)
Else
    UU(I) = (1 - R) * UU(II) + (R) * UU(JJ)
End If

'XX
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    XX(I) = (R) * XX(II) + (1 - R) * XX(JJ)
Else
    XX(I) = (1 - R) * XX(II) + (R) * XX(JJ)
End If

'Specify Reservoir Head
SetHead(BANGKHEN03, BANGKHEN04, BANGPLEE, DU1, KK,
KLONGTAEY, LADKRABUNG, LADPRAW, LUMPINEE, MAHASAWAT, MINBURI, 01, PETKASEM,
RATBURANA, SS, SUMRONG, THAPRA, TONBURI, UU, XX, I)

'Run Hydraulic
Err = ENrunH(tt) : If Err > 6 Then Stop

'Retrieve Interested Node Head
GetPressure()

'Objective Function
OBJF(I, T)

If F(I) < FBEST(T) Then
    FBEST(T) = F(I)

```

```

BANGKHEN03BEST(T) = BANGKHEN03(I)
BANGKHEN04BEST(T) = BANGKHEN04(I)
BANGPLEEBEST(T) = BANGPLEE(I)
DU1BEST(T) = DU1(I)
KKBEST(T) = KK(I)
KLONGTAEYBEST(T) = KLONGTAEY(I)
LADKRABUNGBEST(T) = LADKRABUNG(I)
LADPRAWBEST(T) = LADPRAW(I)
LUMPINEEBEST(T) = LUMPINEE(I)
MAHASAWATBEST(T) = MAHASAWAT(I)
MINBURIBEST(T) = MINBURI(I)
O1BEST(T) = O1(I)
PETKASEMBEST(T) = PETKASEM(I)
RATBURANABEST(T) = RATBURANA(I)
SSBEST(T) = SS(I)
SUMRONGBEST(T) = SUMRONG(I)
THAPRABEST(T) = THAPRA(I)
TONBURIBEST(T) = TONBURI(I)
UUBEST(T) = UU(I)
XXBEST(T) = XX(I)
P1B(T) = P1
P8B(T) = P8
P10B(T) = P10
P19B(T) = P19
P21B(T) = P21
P27B(T) = P27
P28B(T) = P28
P32B(T) = P32
P36B(T) = P36
P39B(T) = P39
P43B(T) = P43
P101B(T) = P101
P104B(T) = P104
P107B(T) = P107
P113B(T) = P113
P122B(T) = P122
P123B(T) = P123
P125B(T) = P125
P134B(T) = P134
P137B(T) = P137
P138B(T) = P138
P146B(T) = P146
P147B(T) = P147
P148B(T) = P148
P152B(T) = P152
P153B(T) = P153
P155B(T) = P155
P164B(T) = P164
End If

Next                                'END CROSSOVER

'MUTATE
NSHIFT = NOLD + NCROSS

For I = NSHIFT To NPOP - 1
    'BANGKHEN03
    II = Rnd() * NOLD
    JJ = Rnd() * NOLD

```

```

If JJ = II Then
  Do While JJ = II
    JJ = Rnd() * NOLD
  Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
  BANGKHEN03(I) = (R) * BANGKHEN03(II) + (1 - R) *
BANGKHEN03(JJ)
Else
  BANGKHEN03(I) = (1 - R) * BANGKHEN03(II) + (R) *
BANGKHEN03(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
BANGKHEN03(I) = BANGKHEN03(I) + MUTATE * (BANGKHEN03(II) -
BANGKHEN03(JJ))

'BANGKHEN04
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
  Do While JJ = II
    JJ = Rnd() * NOLD
  Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
  BANGKHEN04(I) = (R) * BANGKHEN04(II) + (1 - R) *
BANGKHEN04(JJ)
Else
  BANGKHEN04(I) = (1 - R) * BANGKHEN04(II) + (R) *
BANGKHEN04(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
BANGKHEN04(I) = BANGKHEN04(I) + MUTATE * (BANGKHEN04(II) -
BANGKHEN04(JJ))

'BANGPLEE
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
  Do While JJ = II
    JJ = Rnd() * NOLD
  Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
  BANGPLEE(I) = (R) * BANGPLEE(II) + (1 - R) *
BANGPLEE(JJ)
Else
  BANGPLEE(I) = (1 - R) * BANGPLEE(II) + (R) *
BANGPLEE(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
BANGPLEE(I) = BANGPLEE(I) + MUTATE * (BANGPLEE(II) -
BANGPLEE(JJ))

'DU1

```

```

II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    DU1(I) = (R) * DU1(II) + (1 - R) * DU1(JJ)
Else
    DU1(I) = (1 - R) * DU1(II) + (R) * DU1(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
DU1(I) = DU1(I) + MUTATE * (DU1(II) - DU1(JJ))

'KK
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    KK(I) = (R) * KK(II) + (1 - R) * KK(JJ)
Else
    KK(I) = (1 - R) * KK(II) + (R) * KK(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
KK(I) = KK(I) + MUTATE * (KK(II) - KK(JJ))

'KLONGTAEY
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    KLONGTAEY(I) = (R) * KLONGTAEY(II) + (1 - R) *
KLONGTAEY(JJ)
Else
    KLONGTAEY(I) = (1 - R) * KLONGTAEY(II) + (R) *
KLONGTAEY(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
KLONGTAEY(I) = KLONGTAEY(I) + MUTATE * (KLONGTAEY(II) -
KLONGTAEY(JJ))

'LADKRABUNG
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD

```

```

        Loop
    End If

    If F(II) < F(JJ) Then
        LADKRABUNG(I) = (R) * LADKRABUNG(II) + (1 - R) *
LADKRABUNG(JJ)
    Else
        LADKRABUNG(I) = (1 - R) * LADKRABUNG(II) + (R) *
LADKRABUNG(JJ)
    End If
    MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
    LADKRABUNG(I) = LADKRABUNG(I) + MUTATE * (LADKRABUNG(II) -
LADKRABUNG(JJ))

    'LADPRAW
    II = Rnd() * NOLD
    JJ = Rnd() * NOLD
    If JJ = II Then
        Do While JJ = II
            JJ = Rnd() * NOLD
        Loop
    End If

    If F(II) < F(JJ) Then
        LADPRAW(I) = (R) * LADPRAW(II) + (1 - R) * LADPRAW(JJ)
    Else
        LADPRAW(I) = (1 - R) * LADPRAW(II) + (R) * LADPRAW(JJ)
    End If
    MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
    LADPRAW(I) = LADPRAW(I) + MUTATE * (LADPRAW(II) -
LADPRAW(JJ))

    'LUMPINEE
    II = Rnd() * NOLD
    JJ = Rnd() * NOLD
    If JJ = II Then
        Do While JJ = II
            JJ = Rnd() * NOLD
        Loop
    End If

    If F(II) < F(JJ) Then
        LUMPINEE(I) = (R) * LUMPINEE(II) + (1 - R) *
LUMPINEE(JJ)
    Else
        LUMPINEE(I) = (1 - R) * LUMPINEE(II) + (R) *
LUMPINEE(JJ)
    End If
    MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
    LUMPINEE(I) = LUMPINEE(I) + MUTATE * (LUMPINEE(II) -
LUMPINEE(JJ))

    'MAHASAWAT
    II = Rnd() * NOLD
    JJ = Rnd() * NOLD
    If JJ = II Then
        Do While JJ = II
            JJ = Rnd() * NOLD
        Loop

```

```

End If

If F(II) < F(JJ) Then
    MAHASAWAT(I) = (R) * MAHASAWAT(II) + (1 - R) *
MAHASAWAT(JJ)
Else
    MAHASAWAT(I) = (1 - R) * MAHASAWAT(II) + (R) *
MAHASAWAT(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
MAHASAWAT(I) = MAHASAWAT(I) + MUTATE * (MAHASAWAT(II) -
MAHASAWAT(JJ))

'MINBURI
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    MINBURI(I) = (R) * MINBURI(II) + (1 - R) * MINBURI(JJ)
Else
    MINBURI(I) = (1 - R) * MINBURI(II) + (R) * MINBURI(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
MINBURI(I) = MINBURI(I) + MUTATE * (MINBURI(II) -
MINBURI(JJ))

'O1
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    O1(I) = (R) * O1(II) + (1 - R) * O1(JJ)
Else
    O1(I) = (1 - R) * O1(II) + (R) * O1(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
O1(I) = O1(I) + MUTATE * (O1(II) - O1(JJ))

'PETKASEM
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then

```

```

PETKASEM(I) = (R) * PETKASEM(II) + (1 - R) *
PETKASEM(JJ)
Else
  PETKASEM(I) = (1 - R) * PETKASEM(II) + (R) *
PETKASEM(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
PETKASEM(I) = PETKASEM(I) + MUTATE * (PETKASEM(II) -
PETKASEM(JJ))

'RATBURANA
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
  Do While JJ = II
    JJ = Rnd() * NOLD
  Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
  RATBURANA(I) = (R) * RATBURANA(II) + (1 - R) *
RATBURANA(JJ)
Else
  RATBURANA(I) = (1 - R) * RATBURANA(II) + (R) *
RATBURANA(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
RATBURANA(I) = RATBURANA(I) + MUTATE * (RATBURANA(II) -
RATBURANA(JJ))

'SS
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
  Do While JJ = II
    JJ = Rnd() * NOLD
  Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
  SS(I) = (R) * SS(II) + (1 - R) * SS(JJ)
Else
  SS(I) = (1 - R) * SS(II) + (R) * SS(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
SS(I) = SS(I) + MUTATE * (SS(II) - SS(JJ))

'SUMRONG
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
  Do While JJ = II
    JJ = Rnd() * NOLD
  Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
  SUMRONG(I) = (R) * SUMRONG(II) + (1 - R) * SUMRONG(JJ)
Else

```

```

SUMRONG(I) = (1 - R) * SUMRONG(II) + (R) * SUMRONG(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
SUMRONG(I) = SUMRONG(I) + MUTATE * (SUMRONG(II) -
SUMRONG(JJ))

'THAPRA
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    THAPRA(I) = (R) * THAPRA(II) + (1 - R) * THAPRA(JJ)
Else
    THAPRA(I) = (1 - R) * THAPRA(II) + (R) * THAPRA(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
THAPRA(I) = THAPRA(I) + MUTATE * (THAPRA(II) - THAPRA(JJ))

'TONBURI
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    TONBURI(I) = (R) * TONBURI(II) + (1 - R) * TONBURI(JJ)
Else
    TONBURI(I) = (1 - R) * TONBURI(II) + (R) * TONBURI(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
TONBURI(I) = TONBURI(I) + MUTATE * (TONBURI(II) -
TONBURI(JJ))

'UU
II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    UU(I) = (R) * UU(II) + (1 - R) * UU(JJ)
Else
    UU(I) = (1 - R) * UU(II) + (R) * UU(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
UU(I) = UU(I) + MUTATE * (UU(II) - UU(JJ))

'XX

```

```

II = Rnd() * NOLD
JJ = Rnd() * NOLD
If JJ = II Then
    Do While JJ = II
        JJ = Rnd() * NOLD
    Loop
End If

If F(II) < F(JJ) Then
    XX(I) = (R) * XX(II) + (1 - R) * XX(JJ)
Else
    XX(I) = (1 - R) * XX(II) + (R) * XX(JJ)
End If
MUTATE = (Rnd() - 0.5) * 0.2
XX(I) = XX(I) + MUTATE * (XX(II) - XX(JJ))

'Specify Reservoir Head
SetHead(BANGKHEN03, BANGKHEN04, BANGPLEE, DU1, KK,
KLONGTAEY, LADKRABUNG, LADPRAW, LUMPINEE, MAHASAWAT, MINBURI, 01, PETKASEM,
RATBURANA, SS, SUMRONG, THAPRA, TONBURI, UU, XX, I)

'Run Hydraulic
Err = ENrunH(tt) : If Err > 6 Then Stop

'Retrieve Interested Node Pressure
GetPressure()

'Objective Function
OBJF(I, T)

'Storage FBEST
If F(I) < FBEST(T) Then
    FBEST(T) = F(I)
    BANGKHEN03BEST(T) = BANGKHEN03(I)
    BANGKHEN04BEST(T) = BANGKHEN04(I)
    BANGPLEEBEST(T) = BANGPLEE(I)
    DU1BEST(T) = DU1(I)
    KKBEST(T) = KK(I)
    KLONGTAEYBEST(T) = KLONGTAEY(I)
    LADKRABUNGBEST(T) = LADKRABUNG(I)
    LADPRAWBEST(T) = LADPRAW(I)
    LUMPINEEBEST(T) = LUMPINEE(I)
    MAHASAWATBEST(T) = MAHASAWAT(I)
    MINBURIBEST(T) = MINBURI(I)
    O1BEST(T) = O1(I)
    PETKASEMBEST(T) = PETKASEM(I)
    RATBURANABEST(T) = RATBURANA(I)
    SSBEST(T) = SS(I)
    SUMRONGBEST(T) = SUMRONG(I)
    THAPRABEST(T) = THAPRA(I)
    TONBURIBEST(T) = TONBURI(I)
    UUBEST(T) = UU(I)
    XXBEST(T) = XX(I)
    P1B(T) = P1
    P8B(T) = P8
    P10B(T) = P10
    P19B(T) = P19
    P21B(T) = P21

```

```

P27B(T) = P27
P28B(T) = P28
P32B(T) = P32
P36B(T) = P36
P39B(T) = P39
P43B(T) = P43
P101B(T) = P101
P104B(T) = P104
P107B(T) = P107
P113B(T) = P113
P122B(T) = P122
P123B(T) = P123
P125B(T) = P125
P134B(T) = P134
P137B(T) = P137
P138B(T) = P138
P146B(T) = P146
P147B(T) = P147
P148B(T) = P148
P152B(T) = P152
P153B(T) = P153
P155B(T) = P155
P164B(T) = P164
End If

Next                                     'End MUTATE

'SELECT THE FITTEST POPULATION
SORT(BANGKHEN03, BANGKHEN04, BANGPLEE, DU1, KK, KLONGTAEY,
LADKRABUNG, LADPRAW, LUMPINEE, MAHASAWAT, MINBURI, O1, PETKASEM, RATBURANA, SS,
SUMRONG,
      THAPRA, TONBURI, UU, XX, F, NPOP)
ObjNgen(T, IG) = F(0)

'If (Math.Abs((FBEST(T) - FBEST0) / FBEST0)) < TOL Then
'IG = NGEN + 1
'Else
'FBEST0 = FBEST(T)
'End If

Next                                     'End Gen

T += 1
Err = ENnextH(ttt)

Loop Until ttt = 0

'Open output text file

FileOpen(1, "ObjNgen.txt", OpenMode.Output)
'Write output data to text file
WriteLine(1, "NPOP=", NPOP, "RCROSS=", RCROSS, "RMUTATE=", RMUTATE,
"NGEN=", NGEN)
For T = 0 To 24
  WriteLine(1, "+++++")
  WriteLine(1, T)
  For IG = 0 To NGEN
    WriteLine(1, IG, ObjNgen(T, IG))
  Next

```

```

Next
Writeline(1, "++++")
' Close output file.
FileClose(1)

'Round to 1 digit
For T = 0 To 24
    FBEST(T) = Math.Round(FBEST(T), 1)
    BANGKHEN03BEST(T) = Math.Round(BANGKHEN03BEST(T), 1)
    BANGKHEN04BEST(T) = Math.Round(BANGKHEN04BEST(T), 1)
    BANGPLEEBEST(T) = Math.Round(BANGPLEEBEST(T), 1)
    DU1BEST(T) = Math.Round(DU1BEST(T), 1)
    KKBEST(T) = Math.Round(KKBEST(T), 1)
    KLONGTAEYBEST(T) = Math.Round(KLONGTAEYBEST(T), 1)
    LADKRABUNGBEST(T) = Math.Round(LADKRABUNGBEST(T), 1)
    LADPRAWBEST(T) = Math.Round(LADPRAWBEST(T), 1)
    LUMPINEEBEST(T) = Math.Round(LUMPINEEBEST(T), 1)
    MAHASAWATBEST(T) = Math.Round(MAHASAWATBEST(T), 1)
    MINBURIBEST(T) = Math.Round(MINBURIBEST(T), 1)
    O1BEST(T) = Math.Round(O1BEST(T), 1)
    PETKASEMBEST(T) = Math.Round(PETKASEMBEST(T), 1)
    RATBURANABEST(T) = Math.Round(RATBURANABEST(T), 1)
    SSBEST(T) = Math.Round(SSBEST(T), 1)
    SUMRONGBEST(T) = Math.Round(SUMRONGBEST(T), 1)
    THAPRABEST(T) = Math.Round(THAPRABEST(T), 1)
    TONBURIBEST(T) = Math.Round(TONBURIBEST(T), 1)
    UUBEST(T) = Math.Round(UUBEST(T), 1)
    XXBEST(T) = Math.Round(XXBEST(T), 1)
    P1B(T) = Math.Round(P1B(T), 1)
    P8B(T) = Math.Round(P8B(T), 1)
    P10B(T) = Math.Round(P10B(T), 1)
    P19B(T) = Math.Round(P19B(T), 1)
    P21B(T) = Math.Round(P21B(T), 1)
    P27B(T) = Math.Round(P27B(T), 1)
    P28B(T) = Math.Round(P28B(T), 1)
    P32B(T) = Math.Round(P32B(T), 1)
    P36B(T) = Math.Round(P36B(T), 1)
    P39B(T) = Math.Round(P39B(T), 1)
    P43B(T) = Math.Round(P43B(T), 1)
    P101B(T) = Math.Round(P101B(T), 1)
    P104B(T) = Math.Round(P104B(T), 1)
    P107B(T) = Math.Round(P107B(T), 1)
    P113B(T) = Math.Round(P113B(T), 1)
    P122B(T) = Math.Round(P122B(T), 1)
    P123B(T) = Math.Round(P123B(T), 1)
    P125B(T) = Math.Round(P125B(T), 1)
    P134B(T) = Math.Round(P134B(T), 1)
    P137B(T) = Math.Round(P137B(T), 1)
    P138B(T) = Math.Round(P138B(T), 1)
    P146B(T) = Math.Round(P146B(T), 1)
    P147B(T) = Math.Round(P147B(T), 1)
    P148B(T) = Math.Round(P148B(T), 1)
    P152B(T) = Math.Round(P152B(T), 1)
    P153B(T) = Math.Round(P153B(T), 1)
    P155B(T) = Math.Round(P155B(T), 1)
    P164B(T) = Math.Round(P164B(T), 1)
Next

```

```

'Display results on data table
'Interested node pressure
For ix = 1 To 25
    DataGridView2.Rows(0).Cells(ix).Value = P1B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(1).Cells(ix).Value = P8B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(2).Cells(ix).Value = P10B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(3).Cells(ix).Value = P19B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(4).Cells(ix).Value = P21B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(5).Cells(ix).Value = P27B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(6).Cells(ix).Value = P28B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(7).Cells(ix).Value = P32B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(8).Cells(ix).Value = P36B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(9).Cells(ix).Value = P39B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(10).Cells(ix).Value = P43B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(11).Cells(ix).Value = P101B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(12).Cells(ix).Value = P104B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(13).Cells(ix).Value = P107B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(14).Cells(ix).Value = P113B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(15).Cells(ix).Value = P122B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(16).Cells(ix).Value = P123B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(17).Cells(ix).Value = P125B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(18).Cells(ix).Value = P134B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(19).Cells(ix).Value = P137B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(20).Cells(ix).Value = P138B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(21).Cells(ix).Value = P146B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(22).Cells(ix).Value = P147B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(23).Cells(ix).Value = P148B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(24).Cells(ix).Value = P152B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(25).Cells(ix).Value = P153B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(26).Cells(ix).Value = P155B(ix - 1)
    DataGridView2.Rows(27).Cells(ix).Value = P164B(ix - 1)
Next

'Suggested Reservoir Head
For ix = 1 To 25
    DataGridView3.Rows(0).Cells(ix).Value = BANGKHEN03BEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(1).Cells(ix).Value = BANGKHEN04BEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(2).Cells(ix).Value = BANGPLEEBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(3).Cells(ix).Value = DU1BEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(4).Cells(ix).Value = KKBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(5).Cells(ix).Value = KLONGTAEYBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(6).Cells(ix).Value = LADKRABUNGBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(7).Cells(ix).Value = LADPRAWBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(8).Cells(ix).Value = LUMPINEEBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(9).Cells(ix).Value = MAHASAWATBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(10).Cells(ix).Value = MINBURIBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(11).Cells(ix).Value = O1BEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(12).Cells(ix).Value = PETKASEMBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(13).Cells(ix).Value = RATBURANABEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(14).Cells(ix).Value = SSBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(15).Cells(ix).Value = SUMRONGBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(16).Cells(ix).Value = THAPRABEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(17).Cells(ix).Value = TONBURIBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(18).Cells(ix).Value = UUBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(19).Cells(ix).Value = XXBEST(ix - 1)
    DataGridView3.Rows(20).Cells(ix).Value = FBEST(ix - 1)
Next

Err = ENsaveH()

```

```

Err = ENreport()

Err = ENclose()

MsgBox("Process finished")

End Sub

Private Sub Export01_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Export01.Click
    'create empty string
    Dim thecsvfile As String = String.Empty
    'get the column headers
    For Each column As DataGridViewColumn In DataGridView1.Columns
        thecsvfile = thecsvfile & column.HeaderText & ","
    Next
    'trim the last comma
    thecsvfile = thecsvfile.TrimEnd(",")
    'Add the line to the output
    thecsvfile = thecsvfile & vbCr & vbLf
    'get the rows
    For Each row As DataGridViewRow In DataGridView1.Rows
        'get the cells
        For Each cell As DataGridViewCell In row.Cells
            thecsvfile = thecsvfile & cell.FormattedValue.replace(",", "")
& ","
        Next
        'trim the last comma
        thecsvfile = thecsvfile.TrimEnd(",")
        'Add the line to the output
        thecsvfile = thecsvfile & vbCr & vbLf
    Next
    'write the file
    My.Computer.FileSystem.WriteAllText("Goal.csv", thecsvfile, False)

    MsgBox("Export csv finished")

End Sub

Private Sub Export02_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Export02.Click
    'create empty string
    Dim thecsvfile As String = String.Empty
    'get the column headers
    For Each column As DataGridViewColumn In DataGridView2.Columns
        thecsvfile = thecsvfile & column.HeaderText & ","
    Next
    'trim the last comma
    thecsvfile = thecsvfile.TrimEnd(",")
    'Add the line to the output
    thecsvfile = thecsvfile & vbCr & vbLf
    'get the rows
    For Each row As DataGridViewRow In DataGridView2.Rows
        'get the cells
        For Each cell As DataGridViewCell In row.Cells
            thecsvfile = thecsvfile & cell.FormattedValue.replace(",", "")
& ","
        Next

```

```

        'trim the last comma
        thecsvfile = thecsvfile.TrimEnd(",")
        'Add the line to the output
        thecsvfile = thecsvfile & vbCrLf & vbCrLf
    Next
    'write the file
    My.Computer.FileSystem.WriteAllText("Simulate.csv", thecsvfile, False)
    MsgBox("Export csv finished")

End Sub

Private Sub Export03_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Export03.Click
    'create empty string
    Dim thecsvfile As String = String.Empty
    'get the column headers
    For Each column As DataGridViewColumn In DataGridView3.Columns
        thecsvfile = thecsvfile & column.HeaderText & ","
    Next
    'trim the last comma
    thecsvfile = thecsvfile.TrimEnd(",")
    'Add the line to the output
    thecsvfile = thecsvfile & vbCrLf & vbCrLf
    'get the rows
    For Each row As DataGridViewRow In DataGridView3.Rows
        'get the cells
        For Each cell As DataGridViewCell In row.Cells
            thecsvfile = thecsvfile & cell.FormattedValue.replace(",", "")
            & ","
        Next
        'trim the last comma
        thecsvfile = thecsvfile.TrimEnd(",")
        'Add the line to the output
        thecsvfile = thecsvfile & vbCrLf & vbCrLf
    Next
    'write the file
    My.Computer.FileSystem.WriteAllText("ReservoirHead.csv", thecsvfile,
False)
    MsgBox("Export csv finished")
End Sub

Private Sub SORT(BANGKHEN03, BANGKHEN04, BANGPLEE, DU1, KK, KLONGTAEY,
LADKRABUNG, LADPRAW, LUMPINEE, MAHASAWAT, MINBURI, O1, PETKASEM, RATBURANA, SS,
SUMRONG,THAPRA, TONBURI, UU, XX, F, NPOP)

    Dim BANGKHEN031(NPOP - 1), BANGKHEN041(NPOP - 1), BANGPLEE1(NPOP - 1),
    DU11(NPOP - 1), KK1(NPOP - 1), KLONGTAEY1(NPOP - 1), LADKRABUNG1(NPOP - 1),
    LADPRAW1(NPOP - 1), LUMPINEE1(NPOP - 1), MAHASAWAT1(NPOP - 1), MINBURI1(NPOP -
    1), O11(NPOP - 1), PETKASEM1(NPOP - 1), RATBURANA1(NPOP - 1), SS1(NPOP - 1),
    SUMRONG1(NPOP - 1), THAPRA1(NPOP - 1), TONBURI1(NPOP - 1), UU1(NPOP - 1),
    XX1(NPOP - 1) As Single

    'TEMPORARY VARIABLE STORAGE
    Dim BANGKHEN03TMP, BANGKHEN04TMP, BANGPLEETMP, DU1TMP, KKTMP,
    KLONGTAEYTMP, LADKRABUNGTMP, LADPRAWTMP,LUMPINEETMP, MAHASAWATTMP, MINBURITMP,
    O1TMP, PETKASEMTMP, RATBURANATMP, SSTMP, SUMRONGTMP,THAPRATMP, TONBURITMP,
    UUTMP, XXTMP As Single

    Dim F1(NPOP - 1), FMIN As Single

```

```

Dim IBEST As Integer

For II = 0 To (NPOP - 1)
    FMIN = F(0) + 1
    IBEST = 0

    For I = 0 To NPOP - II - 1

        If (F(I) < FMIN) Then
            IBEST = I
            FMIN = F(I)
            BANGKHEN03TMP = BANGKHEN03(I)
            BANGKHEN04TMP = BANGKHEN04(I)
            BANGPLEETMP = BANGPLEE(I)
            DU1TMP = DU1(I)
            KKTMP = KK(I)
            KLONGTAEYTMP = KLONGTAEY(I)
            LADKRABUNGTMP = LADKRABUNG(I)
            LADPRAWTMP = LADPRAW(I)
            LUMPINEETMP = LUMPINEE(I)
            MAHASAWATTMP = MAHASAWAT(I)
            MINBURITMP = MINBURI(I)
            O1TMP = O1(I)
            PETKASEMTMP = PETKASEM(I)
            RATBURANATMP = RATBURANA(I)
            SSTMP = SS(I)
            SUMRONGTMP = SUMRONG(I)
            THAPRATMP = THAPRA(I)
            TONBURITMP = TONBURI(I)
            UUTMP = UU(I)
            XXTMP = XX(I)
        End If

    Next

    F1(II) = FMIN
    BANGKHEN031(II) = BANGKHEN03TMP
    BANGKHEN041(II) = BANGKHEN04TMP
    BANGPLEE1(II) = BANGPLEETMP
    DU11(II) = DU1TMP
    KK1(II) = KKTMP
    KLONGTAEY1(II) = KLONGTAEYTMP
    LADKRABUNG1(II) = LADKRABUNGTMP
    LADPRAW1(II) = LADPRAWTMP
    LUMPINEE1(II) = LUMPINEETMP
    MAHASAWAT1(II) = MAHASAWATTMP
    MINBURI1(II) = MINBURITMP
    O11(II) = O1TMP
    PETKASEM1(II) = PETKASEMTMP
    RATBURANA1(II) = RATBURANATMP
    SS1(II) = SSTMP
    SUMRONG1(II) = SUMRONGTMP
    THAPRA1(II) = THAPRATMP
    TONBURI1(II) = TONBURITMP
    UU1(II) = UUTMP
    XX1(II) = XXTMP

```

```

For I = IBEST To NPOP - 2
    F(I) = F(I + 1)
    BANGKHEN03(I) = BANGKHEN03(I + 1)
    BANGKHEN04(I) = BANGKHEN04(I + 1)
    BANGPLEE(I) = BANGPLEE(I + 1)
    DU1(I) = DU1(I + 1)
    KK(I) = KK(I + 1)
    KLONGTAEY(I) = KLONGTAEY(I + 1)
    LADKRABUNG(I) = LADKRABUNG(I + 1)
    LADPRAW(I) = LADPRAW(I + 1)
    LUMPINEE(I) = LUMPINEE(I + 1)
    MAHASAWAT(I) = MAHASAWAT(I + 1)
    MINBURI(I) = MINBURI(I + 1)
    O1(I) = O1(I + 1)
    PETKASEM(I) = PETKASEM(I + 1)
    RATBURANA(I) = RATBURANA(I + 1)
    SS(I) = SS(I + 1)
    SUMRONG(I) = SUMRONG(I + 1)
    THAPRA(I) = THAPRA(I + 1)
    TONBURI(I) = TONBURI(I + 1)
    UU(I) = UU(I + 1)
    XX(I) = XX(I + 1)
Next
Next

'Transfer arranged min-max F1 back to F1 and others reservoir head
For I = 0 To NPOP - 1
    F(I) = F1(I)
    BANGKHEN03(I) = BANGKHEN031(I)
    BANGKHEN04(I) = BANGKHEN041(I)
    BANGPLEE(I) = BANGPLEE1(I)
    DU1(I) = DU11(I)
    KK(I) = KK1(I)
    KLONGTAEY(I) = KLONGTAEY1(I)
    LADKRABUNG(I) = LADKRABUNG1(I)
    LADPRAW(I) = LADPRAW1(I)
    LUMPINEE(I) = LUMPINEE1(I)
    MAHASAWAT(I) = MAHASAWAT1(I)
    MINBURI(I) = MINBURI1(I)
    O1(I) = O11(I)
    PETKASEM(I) = PETKASEM1(I)
    RATBURANA(I) = RATBURANA1(I)
    SS(I) = SS1(I)
    SUMRONG(I) = SUMRONG1(I)
    THAPRA(I) = THAPRA1(I)
    TONBURI(I) = TONBURI1(I)
    UU(I) = UU1(I)
    XX(I) = XX1(I)

Next

End Sub

Private Sub SetHead(BANGKHEN03, BANGKHEN04, BANGPLEE, DU1, KK, KLONGTAEY,
LADKRABUNG, LADPRAW, LUMPINEE,
MAHASAWAT, MINBURI, O1, PETKASEM, RATBURANA, SS,
SUMRONG, THAPRA, TONBURI, UU, XX, I)
'Set Reservoir Head
Dim index As Integer

```

Dim Err As Long

```

Err = ENgetnodeindex("BANGKHEN03", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, BANGKHEN03(I))

Err = ENgetnodeindex("BANGKHEN04", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, BANGKHEN04(I))

Err = ENgetnodeindex("BANGPLEE", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, BANGPLEE(I))

Err = ENgetnodeindex("DU1", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, DU1(I))

Err = ENgetnodeindex("K", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, KK(I))

Err = ENgetnodeindex("KLONGTAEY", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, KLONGTAEY(I))

Err = ENgetnodeindex("LADKRABUNG", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, LADKRABUNG(I))

Err = ENgetnodeindex("LADPRAW", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, LADPRAW(I))

Err = ENgetnodeindex("LUMPINEE", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, LUMPINEE(I))

Err = ENgetnodeindex("MAHASAWAT", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, MAHASAWAT(I))

Err = ENgetnodeindex("MINBURI", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, MINBURI(I))

Err = ENgetnodeindex("O1", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, O1(I))

Err = ENgetnodeindex("PETKASEM", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, PETKASEM(I))

Err = ENgetnodeindex("RATBURANA", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, RATBURANA(I))

Err = ENgetnodeindex("S", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, SS(I))

Err = ENgetnodeindex("SUMRONG", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, SUMRONG(I))

Err = ENgetnodeindex("THAPRA", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, THAPRA(I))

Err = ENgetnodeindex("TONBURI", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, TONBURI(I))

Err = ENgetnodeindex("U", index)
Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, UU(I))

```

```

    Err = ENgetnodeindex("X", index)
    Err = ENsetnodevalue(index, EN_ELEVATION, XX(I))
End Sub

Public Sub GetPressure()
    'Retrieve Interested Node Pressure
    Dim Err As Long
    Dim index As Integer
    Dim Value As Single

    Err = ENgetnodeindex("3013", index)           'P1 node
    Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
    P1 = Value

    Err = ENgetnodeindex("U002", index)           'P8 node
    Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
    P8 = Value

    Err = ENgetnodeindex("3893", index)           'P10 node
    Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
    P10 = Value

    Err = ENgetnodeindex("P19", index)            'P19 node
    Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
    P19 = Value

    Err = ENgetnodeindex("P21", index)            'P21 node
    Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
    P21 = Value

    Err = ENgetnodeindex("6119", index)           'P27 node
    Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
    P27 = Value

    Err = ENgetnodeindex("2527", index)           'P28 node
    Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
    P28 = Value

    Err = ENgetnodeindex("P32", index)            'P32 node
    Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
    P32 = Value

    Err = ENgetnodeindex("P60", index)            'P36 node
    Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
    P36 = Value

    Err = ENgetnodeindex("P39", index)            'P39 node
    Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
    P39 = Value

    Err = ENgetnodeindex("11008", index)          'P43 node
    Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
    P43 = Value

    Err = ENgetnodeindex("9004", index)           'P101 node
    Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
    P101 = Value

```

```

Err = ENgetnodeindex("U234", index)          'P104 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P104 = Value

Err = ENgetnodeindex("U216", index)          'P107 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P107 = Value

Err = ENgetnodeindex("P113", index)          'P113 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P113 = Value

Err = ENgetnodeindex("9005", index)          'P122 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P122 = Value

Err = ENgetnodeindex("7694", index)          'P123 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P123 = Value

Err = ENgetnodeindex("P125", index)          'P125 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P125 = Value

Err = ENgetnodeindex("10756", index)         'P134 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P134 = Value

Err = ENgetnodeindex("9717", index)          'P137 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P137 = Value

Err = ENgetnodeindex("10131", index)         'P138 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P138 = Value

Err = ENgetnodeindex("P146", index)          'P146 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P146 = Value

Err = ENgetnodeindex("6456", index)          'P147 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P147 = Value

Err = ENgetnodeindex("9373", index)          'P148 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P148 = Value

Err = ENgetnodeindex("3147", index)          'P152 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P152 = Value

Err = ENgetnodeindex("U220", index)          'P153 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P153 = Value

Err = ENgetnodeindex("U148", index)          'P155 node
Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
P155 = Value

```

```

        Err = ENgetnodeindex("11114", index)           'P164 node
        Err = ENgetnodevalue(index, EN_PRESSURE, Value)
        P164 = Value
    End Sub

    Public Sub OBJF(I, T)
        'Objective Function
        F(I) = Math.Abs(P1 - P1G(T))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P8 - P8G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P10 - P10G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P19 - P19G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P21 - P21G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P27 - P27G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P28 - P28G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P32 - P32G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P36 - P36G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P39 - P39G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P43 - P43G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P101 - P101G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P104 - P104G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P107 - P107G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P113 - P113G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P122 - P122G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P123 - P123G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P125 - P125G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P134 - P134G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P137 - P137G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P138 - P138G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P146 - P146G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P147 - P147G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P148 - P148G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P152 - P152G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P153 - P153G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P155 - P155G(T)))
        F(I) = F(I) + (Math.Abs(P164 - P164G(T)))
    End Sub
End Class

```

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายรังสรรค์ วรรณภพ
วันเดือนปีเกิด	12 พฤษภาคม 2525
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2547: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2552: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่ง	อาจารย์พิเศษ สาขาเทคโนโลยียานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์แพทย์
ทุนการศึกษา (ถ้ามี)	2557-2559: ทุนผู้ช่วยวิจัย โครงการปริญญาเอก
ผลงานทางวิชาการ	

Rangsan Wannapop, Thira Jearsiripongkul and Thawatchai Boonluang (2014). Effect of copper wire placement speed analysis on Actuator Arm by Finite Element. Advanced Materials Research Vols. 931-932 pp 994-998.

Rangsan Wannapop, Thira Jearsiripongkul and Thanathum Songsee (2014). Development of Automatic Copper Wire Locating System for HDD Manufacturing Process: Image Processing Part. Advanced Materials Research Vols. 931-932 pp 1342-1347.

Rangsan Wannapop, Thira Jearsiripongkul and Krit Jiamjiroch (2016). Effect of elevation to accuracy in water pipeline network simulation. KKU ENGINEERING JOURNAL 2016; 43 (S3):454-458.

รังสรรค์ วรรณภพ ธีระ เจียรศิริพงษ์กุล กริช เจียมจิโรจน์ และ โกเมศ เพิ่มพูลโชคคณา (2558). การพัฒนาซอฟต์แวร์ EPAnet โดยใช้ภาษา Java. การประชุมวิชาการวิศวกรรมแหล่งน้ำแห่งชาติ ครั้งที่ 6.

Rangsan Wannapop, Thira Jearsiripongkul and Krit Jiamjiroch (2017). Elevation Effect in Urban Water Distribution Model. The 4th International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering (ICMME 2017).

Rangsan Wannapop, Thira Jearsiripongkul and Krit Jiamjiroch (2019). EFFECT of Nodal Elevation Revision In Water Distribution System: A Case Study of Metropolitan Waterworks Authority, Thailand. International Journal of GEOMATE, Jan. 2019, Vol.16, Issue 53, pp.184 - 189

ประสบการณ์ทำงาน

2548-2550: วิศวกรโครงการ

บริษัทอีซูมอเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

2552-2553: อาจารย์พิเศษรายวิชาการเขียนโปรแกรม

สำหรับวิศวกร มหาวิทยาลัยศรีปทุม

