ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

ปริญญา

วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ	วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การพัฒนาแบบจำลองระบบท่อ

Pipe Network Model Development

นามผู้วิจัย นางสาวนิลุบล รังโคตร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(รองศาสตราจารย์ชัยวัฒน์ ขยันการนาวี, M.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(อาจารย์จิระวัฒน์ กณะสุต, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นภาพร เปี่ยมสง่า, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาแบบจำลองระบบท่อ

Pipe Network Model Development

โดย

นางสาวนิลุบล รังโคตร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นิลุบล รังโคตร 2555: การพัฒนาแบบจำลองระบบท่อ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ชัยวัฒน์ ขยันการนาวี, M.Eng. 135 หน้า

โดยทั่วไปการออกแบบระบบท่อส่งน้ำจะพิจารณาความเหมาะสมด้านชลศาสตร์ อย่างไรก็ตามการพิจารณาความเหมาะสมด้านชลศาสตร์เพียงด้านเดียวนั้น ไม่ได้หมายความว่าขนาดท่อที่เลือกมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานแล้ว หากพิจารณาด้านเศรษฐศาสตร์ควบคู่กันไป การเลือกใช้ขนาดท่อที่เหมาะสำหรับใช้เป็นท่อรับแรงดันนั้น จะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการสูบส่ง และในอนาคตอัตราค่าไฟฟ้ามีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ค่าไฟฟ้ามีผลกระทบต่อค่าลงทุนเมื่อคิดตลอดอายุโครงการ กรณีที่เลือกท่อขนาดเล็กจะทำให้ค่าเฮดสูญเสียของระบบมีค่าสูง ต้องใช้พลังงานในการสูบส่งมาก แต่ค่าลงทุนก่อสร้างจะมีราคาถูก ส่วนกรณีที่เลือกท่อขนาดใหญ่ จะทำให้ค่าเฮดสูญเสียของระบบลดลง สามารถลดพลังงานในการสูบลงได้ แต่ค่าลงทุนก่อสร้างจะมีราคาสูง

ดังนั้นในการศึกษานี้ได้นำวิธีการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำที่พิจารณา ค่าไฟ อายุโครงการ อัตราดอกเบี้ย และค่าบำรุงรักษา โดยหาความเหมาะสมจากเงินลงทุนทั้งหมดตลอดอายุโครงการที่มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบเป็นราคาปัจจุบันให้สามารถคำนวณผ่านระบบโปรแกรมประยุกต์บนเว็บไซต์ ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงระบบการวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น โดยไม่ต้องติดตั้งโปรแกรมลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งาน จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พบว่าอัตราค่าไฟฟ้า อัตราดอกเบี้ย และชนิดท่อ มีผลต่อการเลือกขนาดท่อ หากอัตราค่าไฟฟ้าสูงขนาดท่อที่เลือกใช้จะมีขนาดใหญ่ ขณะเดียวกันหากอัตราดอกเบี้ยสูงขนาดท่อที่เลือกใช้จะมีขนาดเล็ก

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Nilubon Rangkot 2012: Pipe Network Model Development. Master of Engineering (Water Resources Engineering), Major Field: Water Resources Engineering, Department of Water Resources Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Chaiwat Kayankarnavy, M.Eng. 135 pages.

In general, the consideration in designing water pipe network will be based on suitability in terms of hydraulics. However, the consideration on suitability with regard to hydraulics alone does not mean that the selected size of pipeline is suitable for functional purpose. When considering the economics together with the selection of suitable pipeline to be used as pressurized pipe, electricity will be required in distribution process and the electricity fee is likely to increase in the future. As a result, the electricity fee will affect the investment when calculating throughout the period of the project. In the event that small pipeline is selected, head loss value of the system will be increased and high energy will be required for distribution process but the construction cost will be cheaper. In the event that large pipe is selected, head loss value of the system will be decreased and low energy will be required for distribution process but the construction cost will be higher.

Therefore, this study has used pipeline system analytical method that takes electricity fee, interest rate and maintenance fee into the consideration by determining the suitability of the lowest amount of total investment cost throughout the period of the project when comparing to current costs and then adapted it so that calculation can be made on web application. By doing so, users will be able to easily access analytical system without having to install program on their computers. Comparison of the results showed that electricity fee, Interest rate and type of pipe can affect the size of the pipe. The high electric cost is a large pipe. Meanwhile, the high interest rates using the pipe is smaller.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

จากที่เริ่มเข้าเรียนตั้งแต่ภาคต้นของปีการศึกษา 2552 ได้ผ่านการฝึกฝน การทดสอบหลายขั้นตอน จนจึงวันที่ได้ผ่านการทดสอบด่านสุดท้ายและสำเร็จการศึกษาในภาคฤดูร้อนปีการศึกษา 2555 ซึ่งวันนี้จะดำเนินมาถึงไม่ได้ หากไม่มีรองศาสตราจารย์ชัยวัฒน์ ขยันการนาวี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ อบรมสั่งสอนทั้งการเรียนการศึกษารวมถึงแนวทางการดำเนินชีวิต ต้องขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์อย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย และกราบขอบพระคุณอาจารย์จิระวัฒน์ กณะสุต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง และขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำทุกท่าน ที่ประสิทธิประสาทวิชาอบรมสั่งสอนจนจบการศึกษา

ขอขอบคุณพี่ต้อมที่กระตุ้นให้เริ่มลงมือทำวิทยางานวิทยานิพนธ์ และช่วยสอนเทคนิคให้สามารถใช้ภาษา Visual Basic ขอบคุณเพื่อนนิสิตปริญญาโทที่ได้ช่วยเหลือทั้งการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ ขอบคุณเพื่อนชลประทานรุ่น 60 ทุกคนที่ช่วยหาข้อมูลประกอบการทำวิทยานิพนธ์ ทั้งยังสร้างความสนุกสนานระหว่างเรียนไม่ให้เครียดจนเกินไป คอยให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจ และคอยดูแลเมื่อมีปัญหา ขอบคุณพี่องุ่นที่ช่วยแนะนำจัดตารางแผนการทำงานวิทยานิพนธ์ ขอบคุณเปิ้ลที่ช่วยดำเนินการเอกสารทางการศึกษา ขอบคุณพี่อ้วนที่อำนวยความสะดวกในการสอบทุกครั้ง

ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอบมอบแด่บิดา มารดาผู้ให้กำเนิดและทุกคนในครอบครัว ญาติผู้ใหญ่ที่คอยอบรมเลี้ยงดูเมื่อยังเป็นเด็ก ขอบพระคุณที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดี ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาตั้งแต่เริ่มอ่านเขียน จนจบการศึกษานี้ ข้าพเจ้าจะนำความรู้ความสามารถเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อพัฒนาตนเอง และประเทศชาติต่อไป

นิลุบล รังโคตร

เมษายน 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	67
อุปกรณ์	67
วิธีการ	67
ผลและวิจารณ์	91
สรุปและข้อเสนอแนะ	115
สรุป	115
ข้อเสนอแนะ	117
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	118
ภาคผนวก	119
ภาคผนวก ก คู่มือการการใช้งานระบบ Web calculator	120
ภาคผนวก ข หน้าจอการทำงานของ Web Calculator	128
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	135

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน (K) ในกรณีต่างๆ	11
2	ค่าสัมประสิทธิ์ของฮาเซน-วิลเลี่ยม (C) กับท่อชนิดต่างๆ	12
3	ค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิ่ง (n)	14
4	ความดันบรรยากาศเทียบให้เป็นความสูงของแท่งน้ำที่ระดับความสูงต่างๆ	22
5	ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ	23
6	การวิเคราะห์เปรียบเทียบการใช้แท็งก์น้ำคอนกรีต และแท็งก์น้ำเหล็ก	49
7	ข้อมูลรายละเอียดของระบบท่อส่งน้ำในส่วนของ Pipe Data โซนที่ 1	80
8	ข้อมูลรายละเอียดของระบบท่อส่งน้ำในส่วนของ Node Data โซนที่ 1	81
9	ข้อมูลรายละเอียดของระบบท่อส่งน้ำในส่วนของ Pipe Data โซนที่ 2	83
10	ข้อมูลรายละเอียดของระบบท่อส่งน้ำในส่วนของ Node Data โซนที่ 2	84
11	ข้อมูลรายละเอียดของท่อผันน้ำในส่วนของ Pipe Data	89
12	ข้อมูลรายละเอียดของท่อผันน้ำในส่วนของ Node Data	89
13	แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator ด้วยแบบจำลอง Modifies PNDM	92
14	ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator โซนการส่งน้ำที่ 1 ด้าน Pipe Data	93
15	ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator โซนการส่งน้ำที่ 1 ด้าน ราคา	94
16	ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator โซนการส่งน้ำที่ 1 ด้าน Node Data	95
17	ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator โซนการส่งน้ำที่ 2 ด้าน Pipe Data	96

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
18	ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator โซนการส่งน้ำที่ 2 ด้าน ราคา	97
19	ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator โซนการส่งน้ำที่ 2 ด้าน Node Data	98
20	ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านโปรแกรม EPANET โซนการส่งน้ำที่ 1 ด้าน Pipe Data และ Node Data	101
21	ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านโปรแกรม EPANET โซนการส่งน้ำที่ 2 ด้าน Pipe Data และ Node Data	102
22	ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator และ โปรแกรม EPANET ในส่วนของ Node Data	103
23	ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator และ โปรแกรม EPANET ในส่วนของ Pipe Data	105
24	เปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลาง ราคาก่อสร้าง และราคาปัจจุบันของท่อ HDPE PN 10	109
25	เปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลาง ราคาก่อสร้าง และราคาปัจจุบันของท่อเหล็ก	111
26	เปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลาง ราคาก่อสร้าง และราคาปัจจุบันของท่อ HDPE กับท่อเหล็ก โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง น้อยกว่า 1.0 เมตร เป็นท่อ HDPE และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1.0 เมตร เป็นท่อเหล็ก	113

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงความต่อเนื่องของการไหลที่บีบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid)	5
2	พารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการพลังงานของการไหลในท่อ	6
3	Moody Diagram สำหรับหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ (Friction Factor)	10
4	ลักษณะทั่วไปของโค้งเดินระบบ (System Head Curve)	16
5	Pump Rating Curve for Low Specific Speed	19
6	Graphic Description of NPSHa	24
7	โครงข่ายท่อแบบปิด (Closed Loop Type Network)	30
8	แสดงระบบท่อโครงข่ายแบบเปิด ที่ส่งน้ำจากอ่างเก็บน้ำ A ไปยังบ่อเก็บน้ำดิบของระบบส่งน้ำ B C และ D โดย F เป็นปริมาณน้ำที่ปล่อยออกจากจุด J โดยตรง	32
9	ขั้นตอนและรายละเอียดในการพิจารณาชนิดของท่อส่งน้ำที่เหมาะสม	40
10	กราฟแสดงการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน	58
11	ผังการทำงานโดยทั่วไปของการวิเคราะห์ข้อมูล	70
12	ผังการทำงานของ Local Optimization Module	71
13	ผังการทำงานของ Global Optimization Module	72
14	ผังการทำงานของการแสดงผลบนเว็บไซต์	73
15	แผนที่แสดงตำแหน่งที่ตั้งโครงการ	75
16	พื้นที่ชลประทานของโครงการส่วนที่ 1	76
17	พื้นที่ชลประทานของโครงการส่วนที่ 2	77
18	Schematic Diagram โครงการชลประทานระบบท่อ	78
19	Schematic Diagram โครงการชลประทานระบบท่อ โซนที่ 1	79
20	Schematic Diagram โครงการชลประทานระบบท่อ โซนที่ 2	82
21	โครงข่ายท่อผันน้ำจากลำน้ำชีไปลงอ่างเก็บน้ำหนองบ่อ	87

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	Schematic Diagram โครงข่ายท่อผันน้ำ	88
23	เปรียบเทียบขนาดท่อจากการวิเคราะห์ผ่าน Web Calculator กับขนาดท่อจากแบบรายละเอียดของโครงการ	99
24	กราฟเปรียบเทียบราคาระหว่างท่อเหล็ก กับท่อ HDPE PN 10	108
25	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างราคาโครงการกับอัตราค่าไฟฟ้าเมื่ออัตราดอกเบี้ยคงที่ กรณีท่อ HDPE	110
26	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างราคาโครงการกับอัตราค่าไฟฟ้าเมื่ออัตราดอกเบี้ยคงที่ กรณีท่อท่อเหล็ก	112
27	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างราคาโครงการกับอัตราค่าไฟฟ้าเมื่ออัตราดอกเบี้ยคงที่ กรณีท่อท่อเหล็ก และ ท่อ HDPE	114

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การพัฒนาแบบจำลองระบบท่อ

Pipe Network Model Development

คำนำ

ระบบส่งน้ำด้วยท่อมีสองรูปแบบใหญ่ๆ คือ การส่งน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค และการส่งน้ำเพื่อการชลประทาน โครงการส่งน้ำด้วยระบบท่อนั้นส่วนมากจะมีความซับซ้อน ทำให้การวิเคราะห์เพื่อออกแบบระบบดังกล่าวค่อนข้างเสียเวลาและมีความยุ่งยาก จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์ระบบท่อยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น โปรแกรมมีลิขสิทธิ์ต้องซื้อราคาแพง ส่วนโปรแกรมที่สามารถใช้ได้ฟรีนั้น ก็ไม่สามารถวิเคราะห์ทั้งระบบให้ครบทั้งทางด้านชลศาสตร์และเศรษฐศาสตร์การลงทุนได้ และโปรแกรมในการวิเคราะห์ระบบท่อบางโปรแกรมก็ยังเป็นระบบปฏิบัติการแบบ DOS ซึ่งมีความยุ่งยากในการใช้งาน ดังนั้นหากสามารถพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ระบบท่อให้เป็นระบบปฏิบัติการ Windows Application สามารถวิเคราะห์ท่อให้มีความเหมาะสมทั้งทางด้านชลศาสตร์และด้านเศรษฐศาสตร์ของโครงการ คงจะทำให้การวิเคราะห์ระบบท่อของโครงการมีความสะดวกรวดเร็วขึ้น

การออกแบบระบบท่อส่งน้ำนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ส่วนมากจะคำนึงถึงความเหมาะสมด้านชลศาสตร์ของระบบซึ่งจะส่งผลให้ค่าลงทุนของโครงการมีค่าต่ำสุดเนื่องจากจะได้ขนาดท่อที่เล็กที่สุด อย่างไรก็ตามหากพิจารณาโครงการในระยะยาว การลงทุนในโครงการส่งน้ำด้วยระบบท่อ ไม่ได้มีเพียงค่าก่อสร้างโครงการเท่านั้น ยังมีค่าบำรุงรักษาในแต่ละปี รวมถึงค่าไฟฟ้าที่เป็นภาระของโครงการ หากพิจารณาระบบในด้านความเหมาะสมทางชลศาสตร์แต่เพียงด้านเดียว ค่าลงทุนของโครงการด้านอื่นๆ อาจจะมีค่าสูงขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในการศึกษาวิจัยประกอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำให้มีฟังก์ชั่นการใช้งานครอบคลุมทั้งทางด้านชลศาสตร์และด้านเศรษฐศาสตร์ให้สามารถทำงานบนระบบ Web Application ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำสามารถทำงานได้บนเว็บไซต์ ไม่จำเป็นต้องติดตั้งโปรแกรมในเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำให้การใช้งานสะดวกยิ่งขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำให้มีฟังก์ชั่นการใช้งานครอบคลุมทั้งทางด้านชลศาสตร์และด้านเศรษฐศาสตร์ให้สามารถทำงานบนระบบโปรแกรมประยุกต์บนเว็บไซต์

2. เพื่อให้ผู้ใช้งานเข้าถึงการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำได้ง่ายขึ้น

ขอบเขตการศึกษา

1. รวบรวมข้อมูล รวมถึงวิธีการแก้ปัญหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำ

2. ศึกษาภาษาคอมพิวเตอร์เพื่อทำการพัฒนาแบบจำลองให้สามารถวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำให้เป็นไปตามทฤษฎีทางด้านชลศาสตร์ และสามารถวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์พร้อมทั้งให้สามารถใช้งานบน Web Application ได้

3. นำแบบจำลองที่ได้จากการพัฒนาไปออกแบบระบบท่อส่งน้ำกับพื้นที่โครงการที่ได้มีการศึกษาไว้แล้ว แล้วทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางด้านชลศาสตร์ที่ได้กับแบบจำลอง EPANET 2.0

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

ชลศาสตร์การไหลในท่อภายใต้แรงดัน

1. สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

ของไหลในสภาวะคงที่ (Steady State) มีบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible) และเป็นการไหลแบบ 1 มิติ มวลของของไหลย่อมมีค่าเท่ากันทุก ๆ หน้าตัด หรือ เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลความเร็วเฉลี่ย และพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังนี้

$$Q = A \times V \qquad (1)$$

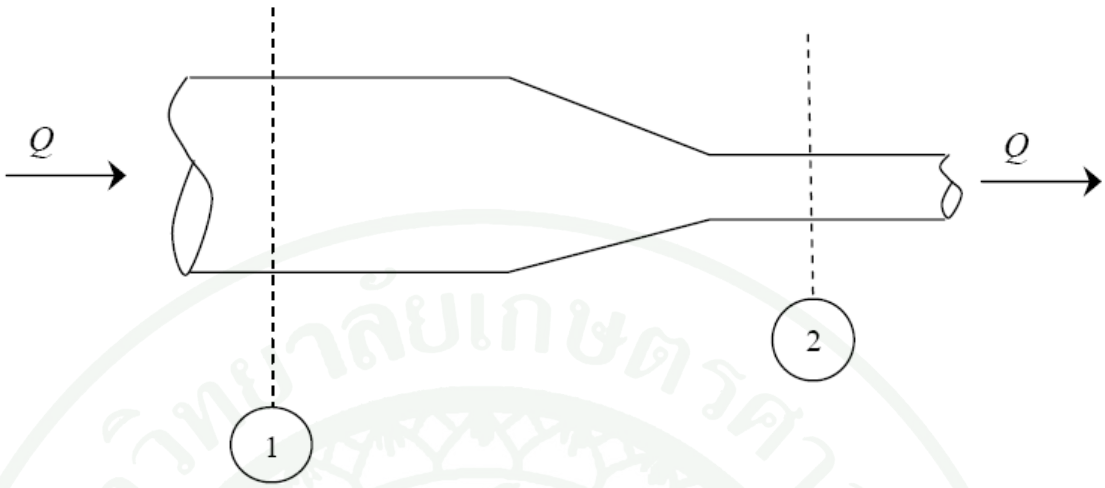
เมื่อ Q = อัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)

V = ความเร็วเฉลี่ย (เมตร/วินาที)

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อ (ตารางเมตร)

จากสมการดังกล่าวจะเห็นว่า เมื่อพื้นที่หน้าตัดของท่อลดลง ความเร็วของการไหลจะเพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราการไหลของน้ำคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 แสดงความต่อเนื่องของการไหลที่บีบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid)

ที่มา : Fealtherstone and Nalluri (1995)

2. สมการพลังงาน (Energy Equation)

พลังงานทั้งหมด ณ จุดใดจุดหนึ่งในระบบเส้นท่อจะเท่ากับผลรวมของ พลังงานศักย์ (Elevation Head) พลังงานความดัน (Pressure Head) และพลังงานจลน์ (Velocity Head) ดังนี้

$$E = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \qquad (2)$$

เมื่อ E = พลังงานรวมทั้งหมด (เมตร)

Z = พลังงานศักย์หรือระดับท่อเหนือเส้นอ้างอิง (เมตร)

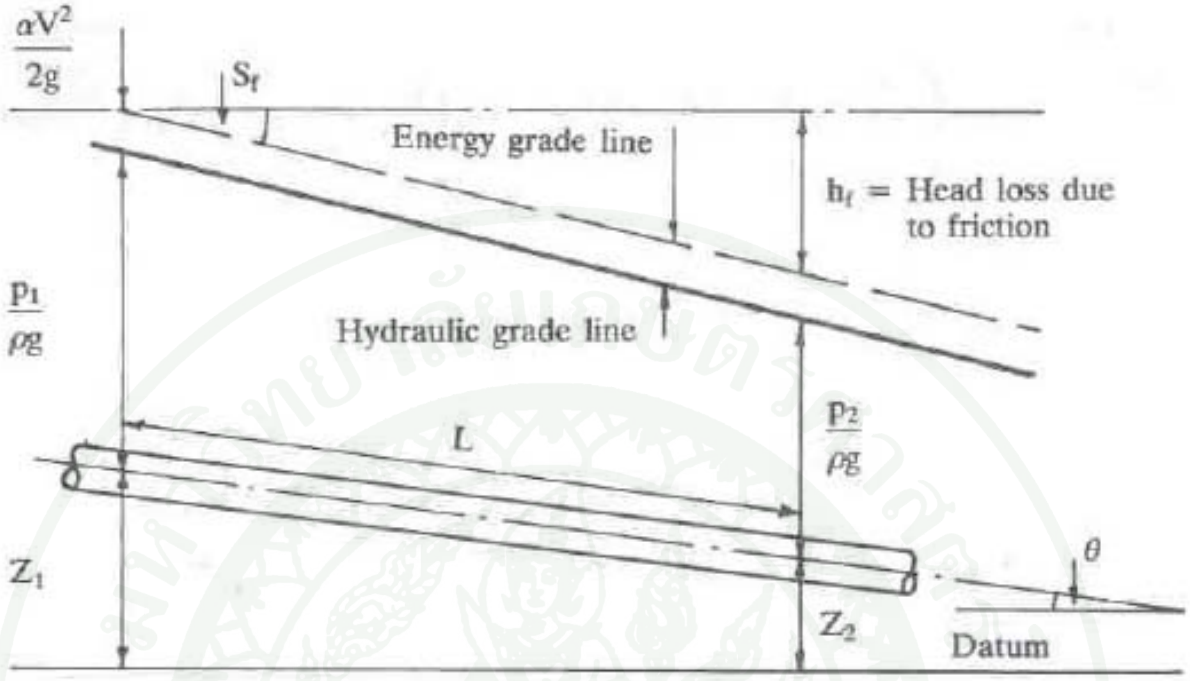
P = ความดัน (นิวตัน/ตารางเมตร)

V = ความเร็วของการไหล (เมตร/วินาที)

γ = ความถ่วงจำเพาะของของไหล (นิวตัน/ตารางเมตร)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที^{2})

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 2 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการพลังงานของการไหลในท่อ

ที่มา : Fealtherstone and Nalluri (1995)

ดังแสดงในภาพที่ 2 เส้นตรงในแนวดิ่งผ่านจุดที่ 1 แสดงให้เห็นถึงพลังงานรวมทั้งหมด พลังงานความดันจะเท่ากับความสูงของน้ำในหลอดพิโซมิเตอร์ (Piezometer Tube) ที่ต่อเข้ากับเส้นท่อ ณ จุดนั้น พลังงานศักย์จะเท่ากับความสูงของเส้นท่อ ณ จุดนั้นเทียบกับระดับอ้างอิง หากรวมพลังงานทั้งสองดังกล่าวจะได้พลังงานชลศาสตร์ (Hydraulic Head) เมื่อนำพลังงานชลศาสตร์รวมกับพลังงานจลน์ จะได้พลังงานรวมทั้งหมด (Total Energy)

ถ้าจะเปรียบเทียบพลังงานรวมทั้งหมด ระหว่างจุดสองจุดในระบบเส้นท่อจะได้ดังสมการที่ 3

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_l \qquad (3)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ Z_1 = ระดับเหนือเส้นอ้างอิงที่หน้าตัดที่ 1 (เมตร)

Z_2 = ระดับเหนือเส้นอ้างอิงที่หน้าตัดที่ 2 (เมตร)

P_1 = ความดันที่หน้าตัดที่ 1 (เมตร)

P_2 = ความดันที่หน้าตัดที่ 2 (เมตร)

V_1 = ความเร็วของการไหลที่หน้าตัดที่ 1 (เมตร/วินาที)

V_2 = ความเร็วของการไหลที่หน้าตัดที่ 2 (เมตร/วินาที)

h_l = พลังงานที่สูญเสียไป (เมตร)

γ = ความถ่วงจำเพาะของของไหล (กิโลนิวตัน/ตารางเมตร)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที^{2})

ค่าพลังงานที่สูญเสียไป (h_l) สามารถหาได้จากสมการต่าง ๆ ดังนี้

1. สมการของดาร์ซี – ไวสบัส (Darcy – Weisbach's Equation) สำหรับสมการนี้ จะแบ่งพลังงานสูญเสียออกเป็น 2 ส่วน คือ

1.1 พลังงานสูญเสียหลัก (Major loss) h_m เป็นพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในเส้นท่อ

$$h_m = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \qquad (4)$$

เมื่อ h_m = พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในเส้นท่อ (เมตร)

f = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ (Friction Factor)

L = ความยาวท่อ (เมตร)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (เมตร)

$\frac{V^2}{2g}$ = Velocity Head (เมตร)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดยที่ค่า f สามารถหาได้จากสมการที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าอัตราการไหล หรือ Renolds Number (Re) ดังต่อไปนี้

Hagen – Poiseuille Formular ใช้สำหรับ Re < 2,000

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}} \qquad (5)$$

Colebrook – White Equation ใช้สำหรับ Re > 4,000

$$f = \frac{0.25}{\left[\ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{\mathrm{Re}^{0.9}}\right)\right]^2} \qquad (6)$$

การประมาณค่าจาก Moody Diagram : ซึ่งแสดงในภาพที่ 3 ใช้สำหรับ 2,000 < Re < 4,000 หรือใช้จากสมการต่อไปนี้

$$f = (X1 + R(X2 + R(X3 + X4))) \qquad (7)$$

โดยที่ $R = \frac{\mathrm{Re}}{2000}$ (8)

$$X1 = 7FA - FB \qquad (9)$$

$$X2 = 0.128 - 17FA + 2.5FB \qquad (10)$$

$$X3 = -0.128 + 13FA - 2FA \qquad (11)$$

$$X4 = R(0.032 - 3FA + 0.5FB) \qquad (12)$$

$$FA = (Y3)^{-2} \qquad (13)$$

$$FB = FA\left(2 - \frac{0.00514215}{(Y2)(Y3)}\right) \qquad (14)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

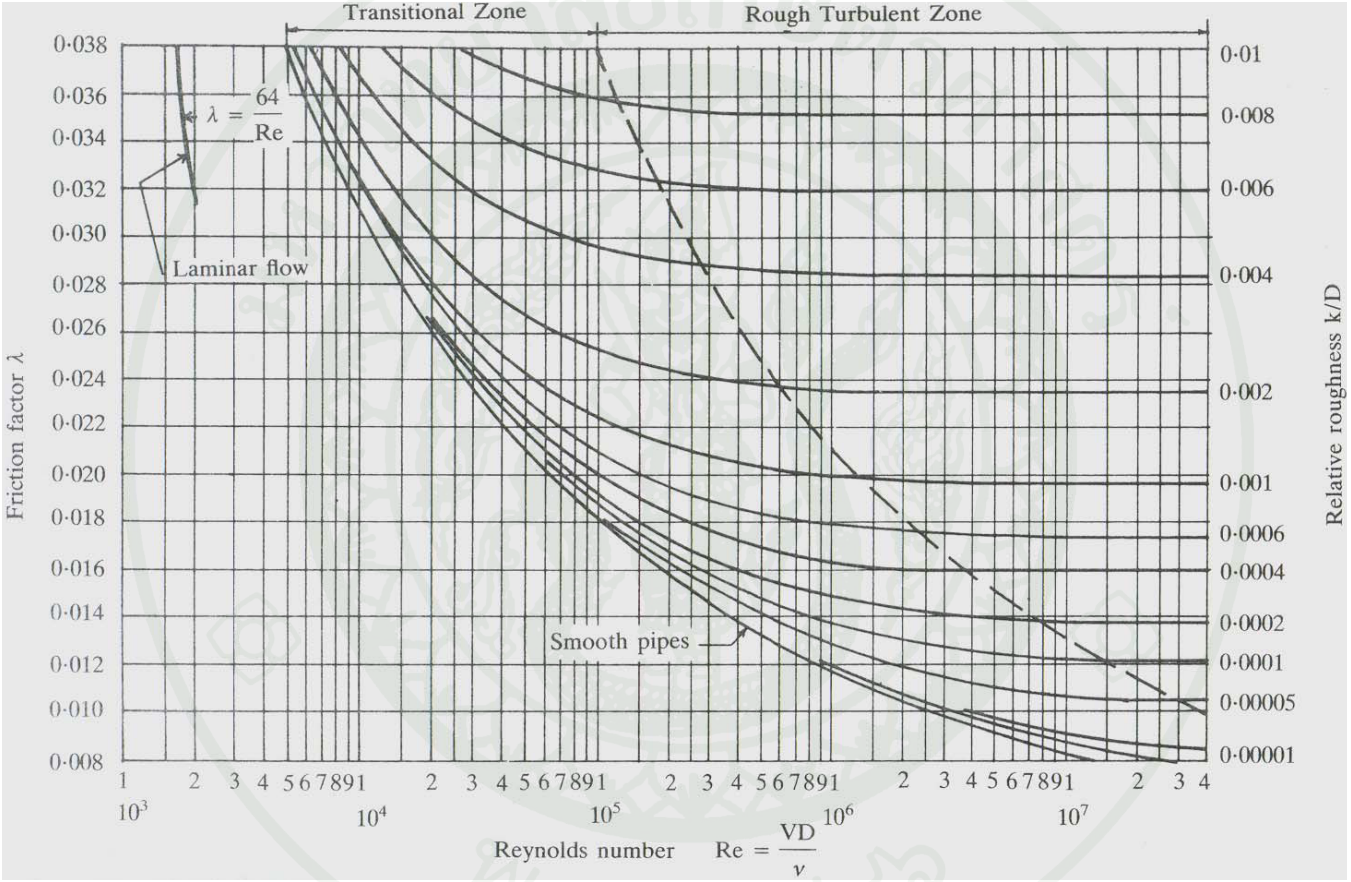
$$Y2 = \frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{\mathrm{Re}^{0.9}} \quad (15)$$

$$Y3 = -0.86859 Ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{4000^{0.9}}\right) \quad (16)$$

เมื่อ ε = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของท่อ

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เมตร)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 Moody Diagram สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ (Friction Factor)

ที่มา : Fealtherstone and Nalluri (1995)

1.2 พลังงานสูญเสียรอง (Minor loss) h_n เป็นพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากข้อต่อประตูน้ำ และการเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ เป็นต้น

$$h_n = K\frac{V^2}{2g} \qquad (17)$$

เมื่อ h_n = พลังงานการสูญเสียรอง (เมตร)

K = สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน

$\frac{V^2}{2g}$ = Velocity Head (เมตร)

โดยที่ค่า K สามารถหาได้จากตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน (K) ในกรณีต่าง ๆ

อุปกรณ์	สัมประสิทธิ์ การสูญเสียพลังงาน, K	ความยาวเทียบเท่า (ขนาดท่อ)
ข้อต่อที (ตรง)	0.60	20
ข้อต่อที (แยกสาขา)	1.80	60
ข้อโค้ง 90°	-	-
รัศมีสั้น	0.90	32
รัศมีปานกลาง	0.75	27
รัศมียาว	0.60	20
ข้อโค้ง 45°	0.42	15
ประตูน้ำ	0.48	17
เช็ควาล์ว	3.70	135
วาล์วผีเสื้อ	1.20	40

ที่มา : Fealtherstone and Nalluri (1995)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. สมการของฮาเซน – วิลเลี่ยม (Hazen – Williams's Equation) สมการนี้เป็นสมการชี้กำลัง มีรูปแบบดังนี้

$$V = 0.354CD^{0.63}S^{0.54} \qquad (18)$$

เมื่อ V = ความเร็ว (เมตร/วินาที)

C = สัมประสิทธิ์ของฮาเซน – วิลเลี่ยม

D = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (เมตร)

S = ความลาดชันของเส้นพลังงาน (เมตรต่อเมตร)

โดยที่ค่า C สามารถหาได้จากตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของฮาเซน – วิลเลี่ยม (C) กับท่อชนิดต่าง ๆ

Pipe Material	**C**
Asbestos cement	140
Cast iron	-
Cement Lined	130 to 150
New, lined	130
5-yr-old, unlined	120
20-yr-old, unlined	100
Concrete	130
Copper	130 to 140
Plastic	140 to 150
New welded steel	120
New riveted steel	110

ที่มา : Fealtherstone and Nalluri (1995)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หรือจะเขียนสมการที่ 18 ในรูปของอัตราการไหลได้ดังนี้

$$Q = 0.278CD^{2.63}S^{0.54} \quad (19)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)

จากสมการที่ 19 สามารถเขียนแสดงค่าสูญเสียพลังงานในรูปของอัตราการไหลของน้ำได้ดังนี้

$$h_l = K_p Q^{1.852} \quad (20)$$

เมื่อ $$K_p = \frac{10.678L}{C^{1.852}D^{4.87}} \quad (21)$$

3. สมการของแมนนิ่ง (Manning's equation) เป็นสมการชี้กำลังที่มักนิยมใช้ในทางน้ำเปิดและบางครั้งอาจใช้สำหรับการไหลในท่อ มีรูปแบบดังนี้

$$V = \frac{1}{n}R^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

เมื่อ V = ความเร็ว (เมตร/วินาที)

n = สัมประสิทธิ์ของ Manning

R = รัศมีชลศาสตร์ = A/P = D/4 สำหรับท่อกลม

A = พื้นที่หน้าตัดของของไหล (ตารางเมตร)

P = เส้นขอบเปียก (เมตร)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เมตร)

S = ความลาดชันของเส้นพลังงาน (เมตร/เมตร)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดยที่ค่า n สามารถหาได้จากตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ของแมนนิ่ง (n)

Surface	Best	Good	Fair	Bad
Uncoated cast iron pipe	0.012	0.013	0.014	0.015
Coated cast iron pipe	0.011	0.012	0.013	-
Concrete pipe	0.012	0.013	0.015	0.016
Common clay drainage line	0.011	0.012	0.014	0.017
Concrete – line channels	0.012	0.014	0,016	0.018
Canal with rough stony beds,				
Weeds on earth banks	0.025	0.030	0.035	0.040
Canal with earth bottom,				
Rubble sides	0.028	0.030	0.033	0.035
Natural stream channel :				
Very weedy reaches	0.075	0.100	0.125	0.150

ที่มา : Fealtherstone and Nalluri (1995)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชลศาสตร์ของเครื่องสูบน้ำ

การคัดเลือกใช้เครื่องสูบน้ำสำหรับงานเฉพาะจะขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบและความสามารถของเครื่องสูบน้ำว่าจะใช้กันได้หรือไม่ การวิเคราะห์ความต้องการความสูงของการสูบน้ำและปริมาณน้ำของระบบ (System Head Discharge Requirement) หรือเรียกว่าโค้งเดินระบบ (System Head Curves) สำหรับเครื่องสูบน้ำที่สูบน้ำจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง (Free Surface) อาจเขียนสมการความสูงของการสูบน้ำได้ดังนี้

$$H_P = \Delta Z + H_f + H_m \qquad (23)$$

หรือ $$H_P = \Delta Z + CQ^2 \qquad (24)$$

เมื่อ H_P = ความสูงของการสูบน้ำ

ΔZ = Static Head = ความแตกของระดับผิวน้ำระหว่าง 2 จุด

H_f = ความสูญเสียเนื่องจากความฝืดในท่อเชื่อมระหว่าง 2 จุด

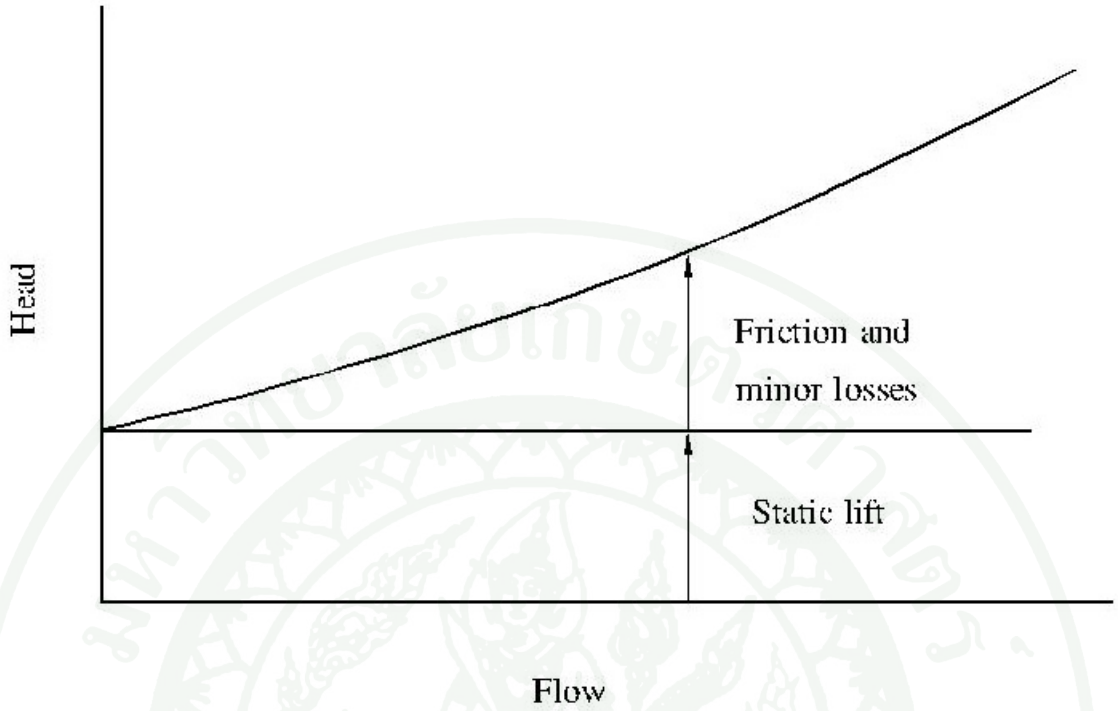
H_m = ความสูญเสียเนื่องจาก Minor Losses

เมื่อ $C = K_f + K_m = \sum\left(\frac{fL}{2gdA^2} + \frac{K_m}{2gA^2}\right)$

K_m = ผลรวมของสัมประสิทธิ์ Minor Loss

ภาพที่ 4 แสดงรูปร่างทั่วไปของโค้งเดินระบบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำระหว่างจุดที่พิจารณาสูบน้ำ 2 จุด กับความสูญเสียทั้งหมดในท่อที่ค่อนข้างมีค่ามาก รูปร่างของโค้งเดินระบบจะขึ้นอยู่กับผลต่างของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำกับการสูญเสียเนื่องจากความฝืดในท่อทั้งหมด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 ลักษณะทั่วไปของโค้งเดินระบบ(System Head Curve)

ที่มา : Fealtherstone and Nalluri (1995)

ก่อนที่จะคัดเลือกเครื่องสูบน้ำที่จะใช้กับระบบท่อใด ๆ ข้อมูลต่าง ๆ ของระบบท่อนั้น ๆ จะต้องทราบเพื่อสร้างโค้งเดินระบบขึ้นมา ถ้าระดับผิวน้ำของจุด 2 จุดที่พิจารณามีความผันแปร ก็ต้องสร้างโค้งเดินระบบขึ้นมาหลายเส้น ให้สอดคล้องกับระดับน้ำที่ผันแปร ข้อมูลช่วงของการเดินเครื่องสูบน้ำ (Operating Range) ต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วยในขั้นตอนของการคัดเลือกเครื่องสูบน้ำ ซึ่งอาจจะใช้เครื่องสูบน้ำเครื่องเดียวหรือหลายเครื่องก็ได้

เมื่อทราบโค้งเดินระบบ คุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำ (Pump Characteristic หรือ H-Q Curve ของเครื่องสูบน้ำ) และจุดเดินระบบของเครื่องสูบน้ำ (Approximate Operating Point) ก็สามารถเลือกเครื่องสูบน้ำได้ ซึ่งถ้าสามารถเลือกการเดินระบบได้ใกล้เคียงกับ Rated Condition ก็จะได้การเดินระบบที่ประสิทธิภาพสูงสุด (Best Efficiency Point หรือ bep) ไม่เกิด Cavitation ไม่เกิดการสั่นหรือสิ่งไม่พึงประสงค์อื่นๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. ความสูงของการสูบน้ำ (Total Dynamic Head, TDH)

เมื่อเครื่องสูบน้ำถูกติดตั้งในระบบท่อ (In Lined Pump) สมการพลังงานระหว่างด้านดูด(Suction) และด้านส่ง (Delivery) เขียนได้ดังนี้

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + H_P = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + H_f$$

หรือ $$H_P = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} + Z_2 - Z_1 + H_f \qquad (25)$$

เมื่อเครื่องสูบน้ำถูกติดตั้งในระบบท่อ (In Lined Pump) สมการพลังงานระหว่างด้านดูด (Suction) และด้านส่ง (Delivery) เขียนได้ดังนี้

1) การเพิ่มขึ้นของ Dynamic Head $(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g})$ เกิดจากการใช้ท่อส่งเล็กกว่าท่อดูด
2) การเพิ่มขึ้นของ Pressure Head $(\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma})$
3) การเปลี่ยนแปลงของระดับด้านดูดและด้านส่ง $(Z_2 - Z_1)$
4) ความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานจากหน้าตัด 1 ไป หน้าตัด 2 (H_f)

ถ้าเครื่องสูบน้ำติดตั้งอยู่ระหว่างจุด 2 จุดที่มีผิวน้ำสัมผัสกับอากาศสมการ 25 ก็จะเป็น

$$H_f = (Z_2 - Z_1) + H_f$$

ภาพที่ 5 เป็นกราฟแสดงคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ประกอบด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางของ Impeller 3 ขนาดเป็นกราฟ A B และ C ในรูปจะประกอบด้วย ความสูงของการสูบน้ำ ปริมาณน้ำ ประสิทธิภาพ Net Positive Suction Head และ Brake

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

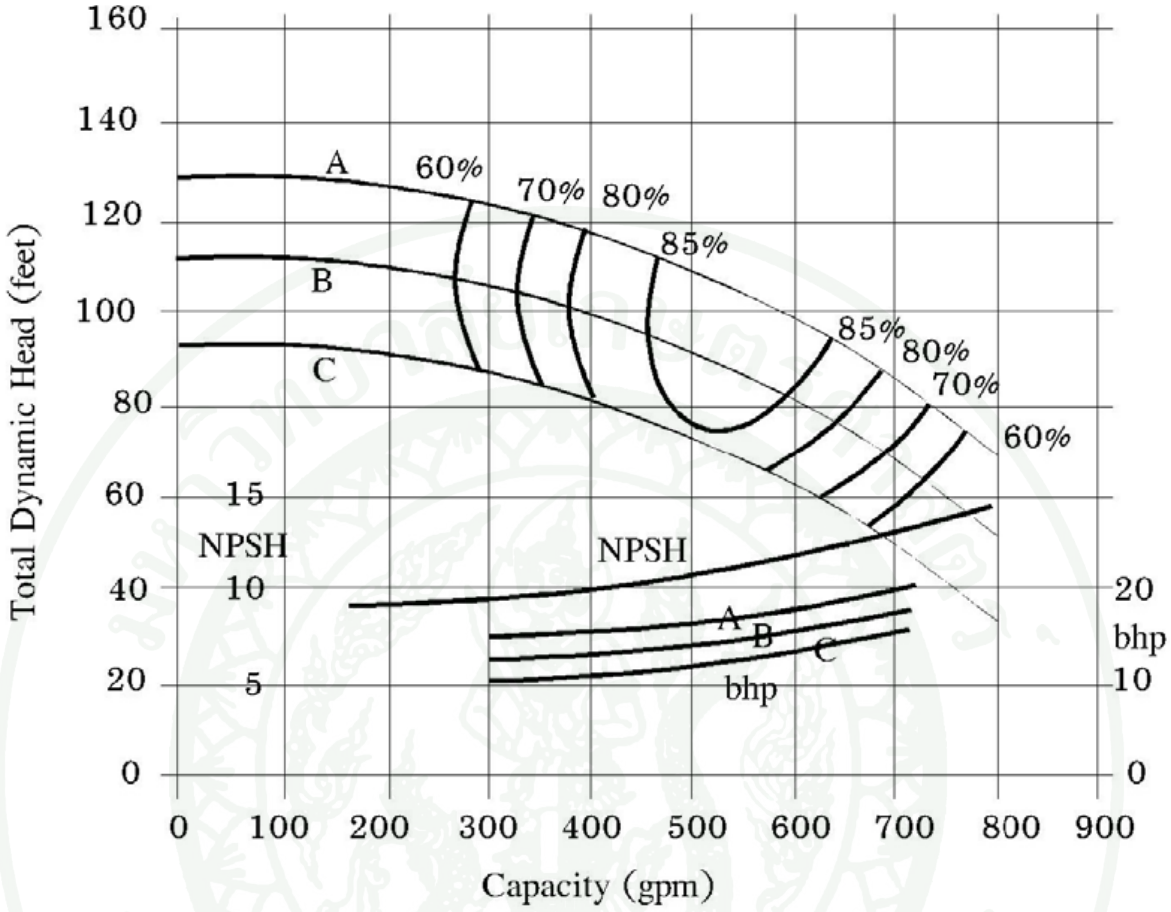
Horsepower ซึ่งจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (bep) หรือ Nornal Operating Point จะอยู่ตรงกลางของพื้นที่ประมาณ 85%

เพื่อง่ายในการคำนวณโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณก็แสดงโค้งของเครื่องสูบน้ำเป็นสมการ สำหรับเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่มี Normal Characteristic Curve เดินระบบใกล้กับจุดที่ออกแบบ ความสูงของการสูบน้ำจะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำดังสมการ

$$H_P = H_o - C_1 Q - C_2 Q^2 \qquad (26)$$

C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ของแต่ละโค้งของเครื่องสูบน้ำ (Pump Curve) โดยที่ค่าคงที่ทั้ง 2 นี้หาค่าได้โดยแทนค่า H_o และค่า H กับ Q ที่ได้จากจุดที่ใกล้จุดที่ออกแบบ 2 จุด ลงในสมการ 26 แล้วแก้สมการดังกล่าวจะได้ค่า C_1 และ C_2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 5 Pump Rating Curve for Low Specific Speed

ที่มา : ชัยวัฒน์ (2546)

2. พลังงานกล (Mechanical Power) และพลังงานไฟฟ้า (Electrical Power)

กำลังม้าของเครื่องสูบน้ำที่ส่งไปยังของเหลวหรือ Water Horsepower คำนวณจากสมการ

$$whp = \frac{Q\gamma H_P}{550} \qquad (27)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำ ลบ.ฟุตต่อวินาที

γ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ 62.4 ปอนด์ต่อลบ.ฟุต

H_P = ความสูงของการสูบน้ำ (TDH) ฟุต ได้จากสมการ (25)

หรือ $$whp = \frac{sgQH_P}{3960}$$

เมื่อ sg = ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

Q = ปริมาณน้ำ แกลลอนต่อนาที

กำลังม้าที่ต้องการขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำหรือ Brake Horsepower (bhp) เขียนได้ดังสมการ

$$bhp = \frac{whp}{e_P} \qquad (28)$$

เมื่อ e_P = ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ $(e_P = \frac{whp}{bhp})$

กำลังม้าทั้งหมดที่ให้กับมอเตอร์ (Total Input Horsepower, hp)

$$h_P = \frac{whp}{e_P e_m} \qquad (29)$$

เมื่อ e_m = ประสิทธิภาพของมอเตอร์

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในรูปของ Kilowatts (KW) ซึ่งได้ความสัมพันธ์กับกำลังม้าดังนี้ 1 h_P เท่ากับ 746 Watts ส่วนการคำนวณค่าใช้พลังงานไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของ Kilowatts-Hours (kw – h)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ bhp สัมพันธ์กับปริมาณน้ำ สำหรับเครื่องสูบน้ำแบบแรงหนีศูนย์กลางที่มีความเร็วจำเพาะต่ำแสดงอยู่ในภาพที่ 5 ซึ่ง bhp จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นแต่ถ้าเป็นเครื่องสูบน้ำที่มีความเร็วจำเพาะสูง กำลังม้าที่ใกล้กับ Shutoff Head จะเพิ่มอย่างรวดเร็ว

ในการคำนวณหา Whp และคัดเลือกจุดเดินระบบที่ดีที่สุดของเครื่องสูบน้ำ จำเป็นต้องกำหนดประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ จากภาพที่ 5 สามารถคาดการณ์พลังงานที่ให้กับมอเตอร์และพลังงานที่ออกมาของแต่ละปริมาณการไหลได้ จุดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเรียกว่าจุดออกแบบ (Design Point) หรือจุดที่มีตำแหน่งอยู่ที่ Hdesign และ Qdesign ดังนั้นเมื่อจะคัดเลือกเครื่องสูบน้ำก็ควรเลือกเครื่องสูบน้ำที่เดินระบบใกล้จุดออกแบบหรือจุดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด (Best Efficiency Point, bep)

ในการคัดเลือกเครื่องสูบน้ำสำหรับเดินระบบส่วนมากจะคัดเลือกจากเส้นผ่าศูนย์กลางของImpeller หลาย ๆ ขนาด เช่น กราฟ A B และ C ของภาพที่ 5 โดยที่กราฟ A จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางของ Impeller ใหญ่สุด เงื่อนไขที่เครื่องสูบน้ำที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Impeller ที่แตกต่างกัน จะทำให้การคัดเลือกเครื่องสูบน้ำมีความยืดหยุ่นและได้เครื่องสูบน้ำที่สอดคล้องกับโค้งเดินระบบและเดินระบบใกล้จุดออกแบบแต่ละ Impeller จะมีกราฟ Brake HorsePower แยกจากกัน แต่มีกราฟ Net Positive Suction Head Required (NPSHr) เส้นเดียวกัน

3. Net Positive Suction Head (NPSH)

คุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำที่เหมาะสมเมื่อเดินระบบแล้วจะต้องไม่เกิด Cavitation โดยที่เครื่องสูบน้ำเมื่อเกิด Cavitation อันเนื่องมาจาก Suction Pressure ลดลง จะทำให้เกิดความเสียหายจากการกัดกร่อนตัวเครื่องสูบน้ำและส่วนอื่น ๆ อันจะทำให้คุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำ (Pump Performance) แย่ลงต่อไป ขณะเดียวกันก่อนเกิด Cavitation จะเกิดฟองอากาศขึ้น ซึ่งถ้ามีมากก็จะทำให้คุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำแย่ลงเช่นเดียวกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความดันที่ต้องการทางด้านท่อดูดของเครื่องสูบน้ำเพื่อป้องกันการเกิด Cavitation เรียกว่าNet Positive Suction Head Required ($NPSH_r$) ซึ่งหาค่าได้โดยทำการทดสอบเครื่องสูบน้ำ (Pump Test) ในการออกแบบเครื่องสูบน้ำนั้น Net Positive Suction Head Available ($NPSH_a$) จะต้องมากกว่า $NPSH_r$ เสมอ

สำหรับเครื่องสูบน้ำที่สูบน้ำจากแหล่งน้ำที่มีผิวน้ำสัมผัสอากาศ (Free Surface) นั้นจะคำนวณค่า $NPSH_a$ ได้ดังนี้

$$NPSH_a = H_b - H_{va} + Z_s - H_f \qquad (30)$$

เมื่อ H_b = ความดันบรรยากาศต่ำสุด (Minimum Absolute Barometric Pressure Head)

H_{va} = ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Absolute Vapor Pressure) ของน้ำที่อุณหภูมิสูงสุด

Z_a = ระยะจากผิวน้ำในบ่อสูบถึงระดับศูนย์กลางท่อดูดของเครื่องสูบน้ำ (จะมีค่าเป็นลบถ้าผิวน้ำอยู่ต่ำกว่าเครื่องสูบน้ำ)

H_f = ความสูญเสียจากความฝืดและ Minor Losses ในท่อดูดของเครื่องสูบน้ำ

ตารางที่ 4 ความดันบรรยากาศเทียบให้เป็นความสูงของแท่งน้ำที่ระดับความสูงต่าง ๆ

ระดับ (ม.รทก.)	0	200	400	800	1,000	1,500	2,000	3,000
ความดัน (ม.)	10.33	10.20	9.85	9.33	9.17	8.64	8.12	7.16

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (C°)	0	10	20	30	40	60	80	100
ความดัน (ม.)	0.06	0.13	0.24	0.43	0.75	2.03	4.83	10.30

ในกรณีที่เครื่องสูบน้ำจากท่อ (In Lined Pump) ได้

$$Z_s - H_f = \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g}$$

$$NPSH_a = H_b - H_{va} + \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} \qquad (31)$$

คำจำกัดความของ $NPSH_a$ และความสัมพันธ์ของสมการ (30) และ (31) แสดงได้ในภาพที่ 6 โดยที่ $NPSH_a$ จะเป็นระยะในแนวดิ่งระหว่างเส้นความดันไอสมบูรณ์(Absolute Vapor Pressure)กับเส้นพลังงาน(Energy Grade Line ,EGL)

แต่ในทางปฏิบัติแล้วเครื่องสูบน้ำจะต้องติดตั้งให้ต่ำลงพอสมควรเพื่อลดปัญหา Cavitation นั่นคือ $NPSH_a$ ต้องมากกว่า $NPSH_r$ อย่างเหมาะสม ซึ่งตัวแปรสำคัญที่จะมีผลต่อการติดตั้งเครื่องสูบน้ำ คือ ความแปรปรวนของระดับนำในบ่อสูบ โดย $NPSH_a$ ต้องพิจารณาจากระดับต่ำสุดของผิวน้ำในบ่อสูบ และ $NPSH_r$ จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการกำหนดค่า $NPSH_r$ ของเครื่องสูบน้ำต้องพิจารณาจากปริมาณน้ำที่เครื่องสูบน้ำได้สูงสุด

Cavitation Constant ของ Thoma (σ) หาได้จากสมการ

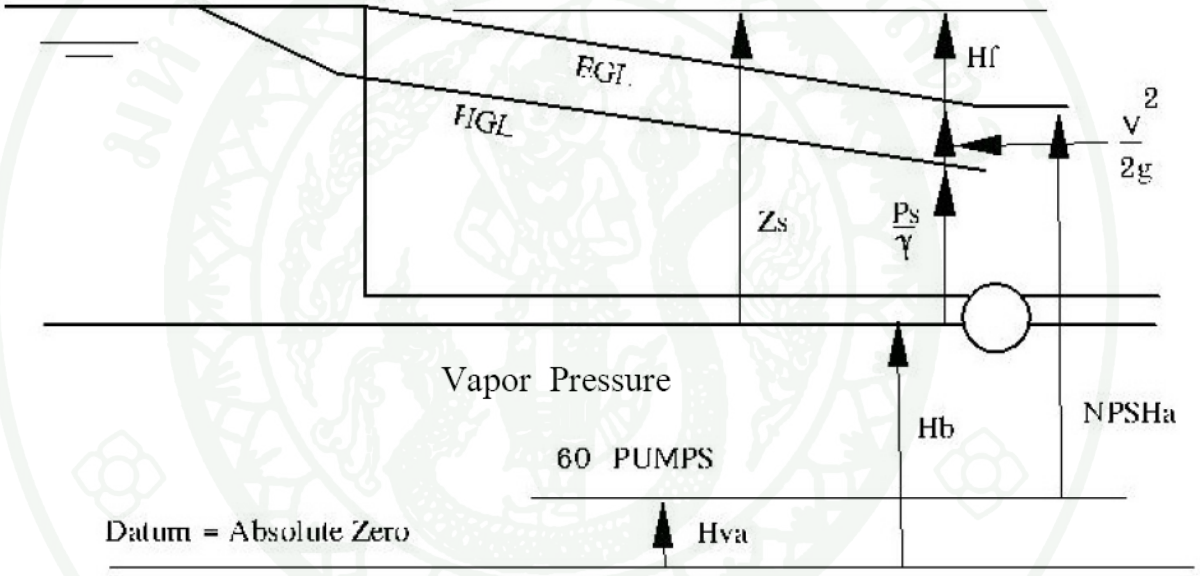
$$\sigma = \frac{NPSH_r}{H_p} \qquad (32)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ความเร็วจำเพาะ (Specific Speed, N_s)

ความเร็วจำเพาะ (N_s) มีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ (N) ปริมาณน้ำ (Q) และความสูงของการสูบน้ำ (H_p) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$N_s = \frac{NQ^{0.5}}{H_p^{0.75}} \qquad (33)$$



ภาพที่ 6 Graphic Description of NPSHa

ที่มา : ชัยวัฒน์ (2546)

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำ แกลลอนต่อนาที (gpm)

H_p = ความสูงของการสูบน้ำ (TDH) ฟุต

N = ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ รอบต่อนาที (rpm)

โดยที่ Q และ H_p อยู่ที่ Best Efficiency Point (bep)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เครื่องสูบน้ำถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ซึ่งขึ้นอยู่กับ Flow Pattern ภายในเครื่องสูบน้ำ และขนาดของความเร็วจำเพาะ เครื่องสูบน้ำแบบ Radial Flow หรือ Turbine Pump ให้ความสูงของการสูบน้ำสูงมากและปริมาณน้ำน้อย มีค่าความเร็วจำเพาะน้อยมีค่าอยู่ระหว่าง 500-2,000 เครื่องสูบน้ำแบบ Mixed Flow ให้ความสูงของการสูบน้ำพอสมควรและปริมาณน้ำพอสมควร มีความเร็วจำเพาะอยู่ปานกลาง มีค่าอยู่ระหว่าง 2,000-7,000 และเครื่องสูบน้ำแบบ Axial Flow หรือ Propeller จะให้ปริมาณน้ำสูงมากและความสูงของการสูบน้ำต่ำมีค่าความเร็วจำเพาะสูงมากอยู่ระหว่าง 7,000-15,000 ความเร็วจำเพาะของเครื่องสูบน้ำจะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ ซึ่งความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำโดยทั่วไปจะมีค่า 450 900 1800 3600 รอบต่อนาที (rpm) โดยความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำสูง ๆ เหมาะสำหรับเครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก

5. ความเร็วจำเพาะด้านดูด (Suction Specific Speed)

จะใช้อธิบายลักษณะของ Cavitation ของ Impeller ความเร็วจำเพาะด้านดูด (S) หาค่าได้ดังนี้

$$S = \frac{NQ^{0.5}}{NPSH_r^{0.75}} \qquad (34)$$

เมื่อ N = ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ รอบต่อนาที (rpm)

Q = ปริมาณน้ำที่ bep แกลลอนต่อนาที (gpm)

$NPSH_r$ = Net Positive Suction Head Requiredที่ bep ฟุต

ถ้าค่า S สูงจะทำให้เกิด Cavitation อย่างรุนแรง ค่าสูงสุดของ S สำหรับเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง คือประมาณ 9,000 เครื่องสูบน้ำในท้องตลาดมี S อยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 7,000 Boiler-Feed และ Condensate Pumps มีค่า S อยู่ระหว่าง 12,000 ถึง 18,000 ซึ่งส่วนใหญ่แล้วค่า S ได้จากบริษัทผู้ผลิตเครื่องสูบน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. กฎความคล้ายคลึง (Similarity Laws)

$$\frac{Q}{ND^3} = Constant \tag{35}$$

$$\frac{H_p}{N^2D^2} = Constant \tag{36}$$

การประยุกต์ใช้สมการทั้งสอง เช่น การทดสอบแบบจำลองของเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำ การออกแบบของจริง ใช้ค่า D_1 N_1 Q_1 และ H_{p1} ถ้า D_2 และ N_2 ถูกคัดเลือกเป็นตัวแปรอิสระแล้ว Q_2 และ H_{p2} คำนวณได้โดยตรงจากสมการ

$$Q_2 = Q_1\left(\frac{N_2}{N_1}\right)\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \tag{37}$$

$$H_{p2} = H_{p1}\left[\frac{N_2D_2}{N_1D_1}\right]^2 \tag{38}$$

เมื่อ $D_2 = D_1$ จากสมการ 37 และ 38 จะได้ $Q_2 = 2Q_1$ และ $H_{p2} = 4H_{p1}$ โดยที่ whp จากสมการ 27 เพิ่มขึ้น 8 เท่า

เมื่อเพิ่มเส้นผ่าศูนย์กลางของ Impeller ขึ้น 25% จากสมการ 37 และ 38 เมื่อ $N_1 = N_2$ จะได้ $Q_2 = (1.25)^3 Q_1$, $H_{p2} = (1.25)^2 H_{p1}$ และ Whp เพิ่มขึ้น $(1.25)^5$ เท่า

7. การคัดเลือกเครื่องสูบน้ำ (Pump Selection)

เครื่องสูบน้ำถูกคัดเลือกให้เหมาะกับความต้องการของระบบ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเดินระบบด้วยปริมาณน้ำเป็นช่วง ตามการเปลี่ยนแปลงความต้องการน้ำ การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในบ่อสูบหรือบ่อส่ง หรือการเปลี่ยนแปลงการสูญเสียจากความฝืดหรือ Minor Losses เพื่อความ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ยืดหยุ่นและความน่าไว้วางใจ จึงนิยมใช้เครื่องสูบน้ำหลายเครื่องมาต่อแบบขนานกัน ถ้าต้องการแรงดันที่สูงก็ใช้เครื่องสูบน้ำหลายเครื่องมาต่ออนุกรมกัน เมื่อความต้องการน้ำเพิ่มก็ติดตั้งเครื่องสูบน้ำเพิ่ม

ในการออกแบบและคัดเลือกเครื่องสูบน้ำผู้ออกแบบนิยมคัดเลือกเครื่องสูบน้ำหลายยี่ห้อจากบริษัทผู้ผลิตหลายราย เพื่อจะได้เครื่องสูบน้ำที่มีจุดออกแบบ(Design Point) ใกล้กับจุดเดินระบบ(Operating Point) และนั่นทำให้สามารถเดินระบบที่ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบตลอดช่วงการเดินระบบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์ระบบกระจายน้ำ

การวิเคราะห์ระบบท่อจะครอบคลุมการคำนวณหาปริมาณน้ำไหลในท่อและความสูงของน้ำที่สอดคล้องกับสมการทรงมวล (Continuity Equation) และ สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Equation)

1. สมการทรงมวล (Continuity Equation)

ผลรวมของปริมาณน้ำที่จุดบรรจบของท่อ(Node) รวมทั้งปริมาณน้ำที่ปล่อยออกที่จุดบรรจบจะเท่ากับศูนย์ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sum_{I=1}^{I=NP(J)} Q_{IJ} - F_J = 0, J = 1, NJ \qquad (39)$$

เมื่อ Q_{IJ} = ปริมาณน้ำที่ไหลในท่อ IJ ที่จุด I

$NP(J)$ = จำนวนท่อที่จุดบรรจบ J

F_J = ปริมาณน้ำที่ปล่อยออกที่จุด J

N_J = จำนวนจุดบรรจบทั้งหมดในระบบท่อ

2. สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Equation)

ผลรวมของความสูญเสียความสูงของน้ำทั้งหมดในท่อ รวมทั้งความสูงของน้ำที่เกิดจากสูบน้ำ (In-line Booster Pumps) ของระบบโครงข่ายท่อแบบปิด(Closed Loop) เท่ากับศูนย์ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sum_{J=1}^{J=NP(I)} hl_{IJ} - Hm_{IJ} = 0, I = 1, NL \qquad (40)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ hl_{IJ} = Head loss ในท่อ J ของ loop I

Hm_{IJ} = Manometric head ที่เกิดจากเครื่องสูบน้ำในแนวท่อ IJ

เมื่อแทนค่าสมการที่คำนวณหา Head Loss ของน้ำไหลในท่อลงในสมการ (39) และ (40) จะได้สมการเป็นแบบ Non-Linear ซึ่งไม่มีวิธีการที่จะแก้สมการได้โดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์ระบบท่อจึงใช้วิธีการทำซ้ำ (Iterative) ซึ่งนิยมใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ระบบท่อที่มีโครงข่ายท่อจำนวนมาก

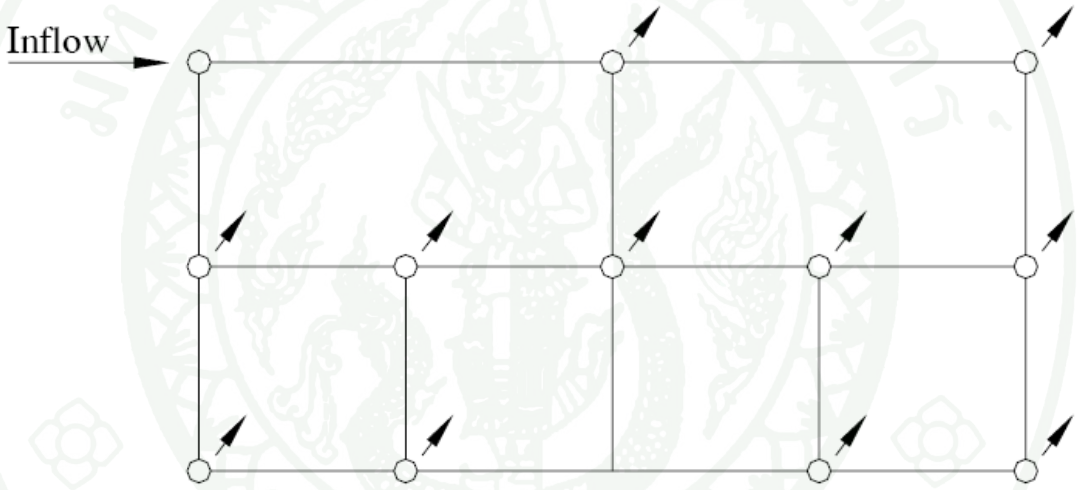
Professor Hardy-Cross ได้แนะนำวิธีการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายท่อแบบปิด เริ่มต้นจากการสมมุติปริมาณน้ำที่ไหลในท่อให้สอดคล้องกับสมการทรงมวล (39) แล้วปรับแก้ (Correction) ปริมาณน้ำที่ไหลในท่อของแต่ละวงรอบ (Loop) ไปเรื่อย ๆ จนสมการ Energy Conservation (40) ได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจทุกวงรอบ (มี Tolerance เล็กน้อย)

ต่อมา Cornish ได้แนะนำวิธีการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายท่อแบบปิด โดยเริ่มต้นจากสมมติระดับน้ำที่จุดบรรจบ (Node) แล้วปรับแก้จนสมการทรงมวล (39) ได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจทุกจุดบรรจบ (มี Tolerance เล็กน้อย) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งระบบโครงข่ายท่อแบบปิดและแบบเปิดโดยใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ได้ แต่จะใช้เวลาในการวิเคราะห์พอสมควร เนื่องจากค่าทางชลศาสตร์ (Hydraulic Parameters) จะต้องปรับแก้ตลอดเวลา วิธีการของ Newton-Raphson และ Linear Theory ที่นำเอาสมการ (39) และสมการ (40) มาประยุกต์เป็นระบบสมการ Linear และพัฒนาความสัมพันธ์ของ Head Loss กับปริมาณน้ำ (Flow Rate) เพื่อช่วยในการปรับค่าทางชลศาสตร์ (Flow หรือ Heads) ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ระบบท่อเร็วขึ้นกว่าวิธีการของ Professor Hardy - Cross และ Cornish แต่ต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์เท่านั้น โดยเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับขนาดของโครงข่ายระบบท่อ (Pipe Network) เช่นจำนวนท่อและจุดบรรจบ เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. วิธี Head Balance (Loop Method)

วิธีนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายกับระบบท่อแบบโครงข่ายปิด (Closed-Loop Pipe Networks) ซึ่งแนะนำโดย Professor Hardy-Cross นิยมเรียกกันว่า Hardy-Cross Method ภาพที่ 7 แสดงท่อหลักของระบบจ่ายน้ำประปา ปริมาณน้ำไหลออกจะอยู่ที่จุดบรรจบ (Nodes หรือ Junctions) ซึ่งจะทำให้การไหลในท่อระหว่างจุดบรรจบเป็น Uniform Flow ทำให้การวิเคราะห์ระบบท่อง่ายขึ้น



ภาพที่ 7 โครงข่ายท่อแบบปิด (Closed Loop Type Network)

สำหรับโครงข่ายท่อที่กำหนดให้ เมื่อทราบค่าปริมาณน้ำที่ไหลออกที่จุดบรรจบ ก็จะใช้วิธีการทำซ้ำโดยสมมติค่าปริมาณน้ำไหลเริ่มต้นของท่อ ซึ่งแต่ละจุดบรรจบจะสอดคล้องกับสมการทรงมวล

Head Balance คือข้อกำหนดที่ผลรวมของ Head Losses ภายในวงรอบจะเป็นศูนย์ โดยการไหลตามเข็มนาฬิกาจะมีค่าเป็นบวก (เช่นเดียวกับ Head Losses)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่า Head loss สำหรับท่อเดียวคำนวณจากการสมการ

$$h_L = KQ^2 \tag{41}$$

ถ้าการไหลเกิดความผิดพลาด ΔQ สมการ (41) เขียนใหม่ได้เป็น

$$h_L = K(Q + \Delta Q)^2$$

$$h_L = K(Q^2 + 2Q\Delta Q + \Delta Q^2$$

เมื่อ ΔQ มีค่าน้อยมาก ๆ ; ΔQ^2 ก็ยิ่งมีค่าน้อยสามารถตัดทิ้งได้

$$h_L = K(Q^2 + 2Q\Delta Q)$$

ภายในวงรอบ ; $\sum h_L = 0$; ΔQ เท่ากันทุกท่อตามหลัก Continuity

$$\sum h_L = \sum KQ^2 + 2\Delta Q \sum KQ = 0$$

$$\Delta Q = -\frac{\sum KQ^2}{2\sum KQ}$$

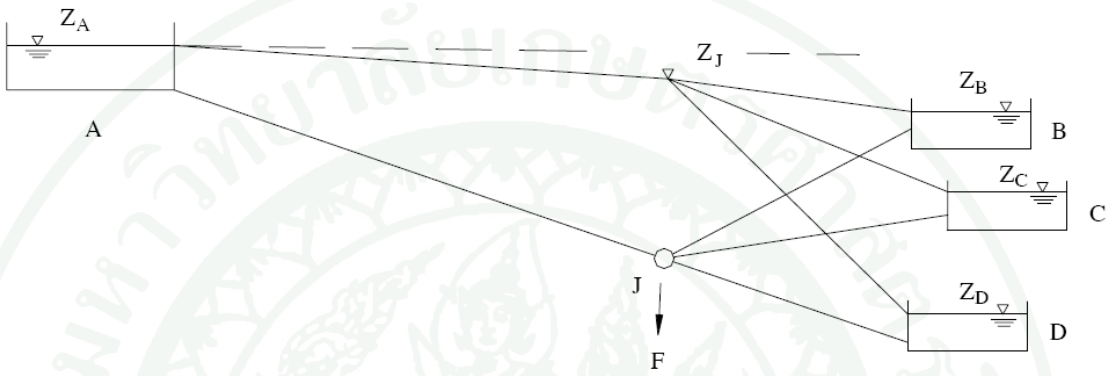
$$\Delta Q = -\frac{\sum KQ^2}{2\sum \frac{KQ^2}{Q}} \tag{42}$$

หรือ $$\Delta Q = -\frac{\sum h}{2\sum \frac{h}{Q}} \tag{43}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ h = Head Losses ในท่อตามปริมาณน้ำที่สมมุติ

4. วิธี Quantity Balance (Nodal Method)



ภาพที่ 8 แสดงระบบท่อโครงข่ายแบบเปิด ที่ส่งน้ำจากอ่างเก็บน้ำ A ไปยังบ่อเก็บน้ำดิบของระบบส่งน้ำ B C และ D โดย F เป็นปริมาณน้ำที่ปล่อยออกจากจุด J โดยตรง

In General
$$\begin{bmatrix} Z_A - Z_J \\ Z_B - Z_J \\ \vdots \\ Z_I - Z_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (SING)K_{AJ}(|Q_{AJ}|)^2 \\ (SING)K_{BJ}(|Q_{BJ}|)^2 \\ \vdots \\ (SING)K_{IJ}(|Q_{IJ}|)^2 \end{bmatrix} \qquad (44)$$

(SIGN) = + หรือ – ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ (Z_I-Z_J)

ดังนั้นปริมาณน้ำไหลเข้าจุดบรรจบจะเป็นบวกและปริมาณน้ำไหลออกจากจุดบรรจบจะเป็นลบ K_{IJ} ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ Friction Loss และ Minor Loss สมการทรงมวลสำหรับปริมาณน้ำที่ไหลที่จุด J คือ

$$\sum Q_{IJ} - F = (Q_{AJ} + Q_{BJ} + Q_{CJ} + Q_{DJ} - F) = 0 \qquad (45)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตรวจสอบสมการ (44) และ (45) แล้ว จะเห็นว่าเมื่อค่า Z_J ถูกต้อง จะทำให้ได้ปริมาณน้ำ Q_{IJ} ที่คำนวณได้จากสมการ (44) ซึ่งจะเป็นปริมาณน้ำที่ทำให้สมการ (45) มีค่าใกล้เคียงศูนย์

จัดรูปสมการ (44) ใหม่ได้

$$[Q_{IJ}] = \left[(sign)\left(\frac{|Z_I - Z_J|}{K_{IJ}} \right)^{1/2} \right] \tag{46}$$

ค่าของ Z_J ก็หาได้จากวิธีการทำซ้ำ โดยเริ่มต้นจากสมมติค่า Z_J แล้วคำนวณปริมาณน้ำที่ไหลในแต่ละท่อจากสมการ (46) และทดสอบสมการทรงมวล (45) ว่าได้ค่าเท่ากับศูนย์หรือใกล้เคียงหรือไม่ ถ้า $(\sum Q_{IJ} - F) \neq 0$ (มากกว่าค่าที่ยอมรับได้) ต้องปรับแก้ค่า ΔZ_J ได้ค่า Z_J ใหม่ แล้วดำเนินการทำซ้ำจนได้สมการ (45) มีค่าใกล้เคียงศูนย์โดยที่

$$\Delta Z_J = \frac{2(\sum Q_{IJ} - F_J)}{\sum \frac{Q_{IJ}}{hL_{IJ}}}$$

$$K_I = \frac{\lambda L}{2gDA^2} + \frac{C_m}{2gA^2}$$

$$K_I = (K_f + K_m) \tag{47}$$

เมื่อ C_m = ผลรวมของสัมประสิทธิ์ Minor Losses

λ = Friction Factor จาก Moody Chart หรือจากสมการของ Barr

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\left(\frac{k}{3.7D} + \frac{5.1286}{(Re)^{0.89}} \right) \tag{48}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แทนค่า Darcy-Colebrook-White ลงในสมการ (46) เขียนสมการใหม่ได้

$$Q = -2A\sqrt{2gD\frac{h_f}{L}}\log\left[\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51v}{D\sqrt{2gD\frac{h_f}{L}}}\right] \qquad (49)$$

ทุกท่อค่า h_{fIJ} (Friction Head Loss) เริ่มต้นเท่ากับ Z_I- Z_J แล้วคำนวณหาปริมาณน้ำ (Q_{IJ}) จากสมการ (49) และค่า h_{fIJ} จะปรับแก้ใหม่จากสมการ

$$h_{fIJ} = (Z_I - Z_J) - K_m Q_{IJ}^2 \qquad (50)$$

5. วิธี Gradient Method

วิธีการที่ใช้แก้ปัญหาการไหลในระบบท่อส่งน้ำ และสมการการสูญเสียวิธีนั้น จะใช้ลักษณะทางชลศาสตร์ในแต่ละช่วงเวลาที่เกิดขึ้นในระบบท่อส่งน้ำ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ Node และ loop Todini and Pilati (1987) เรียกชื่อวิธีการนี้ว่า “Gradient Method” และยังมีวิธีการคำนวณในทำนองเดียวกันที่เสนอโดย Hamam and Brameller (1971) ใช้วิธี “Hybrid Method” และ Osiacacz (1987) ใช้วิธี “Newton Loop – Node Method” ความแตกต่างของแต่ละวิธีคือ วิธีการปรับปรุงค่าอัตราการไหลในระบบท่อ หลังจากคำนวณค่า Head ในแต่ละ Node ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้วิธีการของ Todini’s เพราะว่าง่ายต่อการคำนวณและให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องเช่นเดียวกับวิธีอื่น ๆ โดยมีหลักการ ดังนี้

สมมุติในระบบท่อส่งน้ำมีจำนวนจุดแยกทั้งหมด N node และ NF คือจุดที่กำหนดระดับพลังงานได้แน่นอน (อ่างเก็บน้ำ,ถังสูง,สถานีสูบน้ำ) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล – Head Loss ในเส้นท่อระหว่างจุด I และ j ได้ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \qquad (51)$$

เมื่อ H = ค่า Head ที่จุดต่าง ๆ (Nodal Head)

h = Head Loss

r = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Resistance Coefficient)

Q = อัตราการไหล

m = สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (Minor Loss Coefficient)

ค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนี้จะขึ้นอยู่กับสมการที่ใช้คำนวณหาค่า Head Loss ในกรณีที่เป็นเครื่องสูบน้ำ ค่า Head Loss (จะมีค่าลบเนื่องจากเป็น Head ที่ใส่เข้าไปในระบบ Q =V × A) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ Power Law ได้ ดังนี้

$$h_{ij} = -\omega^2 \left(h_o - r\left(\frac{Q_{ij}}{\omega} \right)^n \right) \qquad (52)$$

เมื่อ h_o = ค่า Head ของเครื่องสูบน้ำ

W = ความเร็วสัมพัทธ์ที่กำหนด

r,n = Pump Cure Coefficients

ขั้นต่อมาสามารถสรุปสมการการไหลรอบ Node ใด ๆ ทั้งหมดจากสมการการไหลต่อเนื่อง (Flow Continuity)

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \qquad \text{for i = 1,…,N} \qquad (53)$$

เมื่อ Di = ความต้องการน้ำที่จุด i หรือน้ำที่ไหลเข้ามาในระบบ (ในกรณีที่น้ำไหลเข้ามาเครื่องหมายเปลี่ยนเป็นบวก)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ถ้าเราทราบค่า Head เริ่มต้นที่จุดกำหนดจุดใด ๆ เราจะสามารถคำนวณหาค่า Head , H_{ij} ค่าอัตราการไหล , Q_{ij} ที่จุดใด ๆ ได้ตามสมการ 51 และ 53

การคำนวณโดยวิธี Gradient Method จะเริ่มต้นโดยในครั้งแรกจะประมาณค่าอัตราการไหล ในแต่ละท่อ โดยอาจจะสมมุติไม่ถูกต้องตามสมการการไหลต่อเนื่อง และทำการคำนวณแบบวนน้ำ ค่า Head ที่คำนวณได้ในครั้งใหม่สามารถเขียนให้อยู่ในรูป Matrix ได้ ดังนี้

$$[A]\ \ [H] = [F] \tag{54}$$

เมื่อ [A] = Jacobian Matrix ขนาด N x N

[H] = Vector Matrix ขนาด N x 1 ของตัวที่ไม่ทราบค่า คือ Nodal Head

[F] = Vector Matrix ขนาด N x 1 ของเทอมที่อยู่ฝั่งขวาของสมการ

แนวเส้นทแยงมุมของ Jacobian Matrix กำหนดให้เป็น

$$A_{ii} = \sum_{j} p_{ij} \tag{55}$$

และส่วนที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ หรือ ไม่ใช่แนวเส้นทแยงมุมของ Matrix จะมีค่า

$$A_{ij} = -p_{ij} \tag{56}$$

เมื่อ p_{ij} = ส่วนกลับของค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของค่า Head Loss ที่เชื่อมต่อระหว่างจุด i และ j

ในกรณีที่เป็นท่อ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$p_{ii} = \frac{1}{nr\left|Q_{ij}\right|^{n-1} + 2m\left|Q_{ij}\right|} \tag{57}$$

ในกรณีที่เป็นเครื่องสูบน้ำ

$$p_{ii} = \frac{1}{n\omega^2 r\left(Q_{ij}/\omega\right)^{n-1}} \tag{58}$$

ส่วนเทอมทางขวามือของสมการ 54 จะมีค่าเท่ากับอัตราการไหลสุทธิที่ไม่สมดุลในแต่ละจุดที่หาค่ารวมกับค่าอัตราการไหลที่คูณด้วยเฟคเตอร์ปรับแก้ จะเท่ากับ

$$F_i = \left|\left(\sum_j Q_{ij} - D_i\right) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{ij}\right| H_f \tag{59}$$

เมื่อเทอมสุดท้ายของสมการจะใช้กับช่วงใด ๆ ที่เชื่อมต่อกับ จุด i กับจุดที่กำหนด Head แน่นอน (จุด f) และค่าเฟคเตอร์ปรับแก้อัตราการไหล Y_{ij} ในกรณีที่เป็นท่อ จะเท่ากับ

$$y_{ij} = p_{ij}\left(r\left|Q_{ij}\right|^n + m\left|Q_{ij}\right|^2\right) sng\left(Q_{ij}\right) \tag{60}$$

ในกรณีที่เป็นเครื่องสูบน้ำ

$$y_{ij} = -p_{ij}\omega^2\left(h_0 - r\left(Q_{ij}/\omega\right)^n\right) \tag{61}$$

เมื่อ Sng(x) = เครื่องหมายบอกทิศทางจะเท่ากับ 1 เมื่อ X > O นอกจากนี้ให้ใช้ค่า -1 (แต่ในกรณีที่เป็นเครื่องสูบน้ำ Qij จะเป็นบวกเสมอ)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หลังจากที่ค่า Head ค่าใหม่สามารถคำนวณออกมาได้แล้วโดยสมการ 54 ค่าอัตราการไหลค่าใหม่ สามารถหาได้โดย

$$Q_{ij} = Q_{ij} - \left(y_{ij} - p_{ij}\left(H_i - H_j\right)\right) \qquad (62)$$

ถ้าผลรวมของค่าสมบูรณ์ของอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลง เทียบกับค่าอัตราการไหลทั้งหมดในแต่ละเส้นท่อ มีค่ามากกว่าค่าที่ยอมให้ (เช่น 0.0001) ดังนั้น จึงต้องทำการคำนวณสมการ 54 และ 62 ใหม่อีกครั้ง และค่าอัตราการไหลที่ถูกปรับปรุงโดยสมการ 62 จะเป็นค่าอัตราการไหลรอบ ๆ จุดใด ๆ ที่คำนวณในครั้งต่อไป และเมื่อคำนวณอัตราการไหลไม่เปลี่ยนแปลงมาก หรือยอมรับผลการคำนวณ ก็จะได้คำตอบในระบบท่อที่ต้องการ

การเลือกชนิดท่อและวัสดุท่อส่งน้ำ

การเลือกใช้วัสดุท่อที่มีความเหมาะสมนั้น สามารถสรุปได้ 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาข้อมูลทางด้านเทคนิค

ขั้นตอนที่ 2 ลักษณะการใช้งานและการบำรุงรักษา

ขั้นตอนที่ 3 การพิจารณาออกแบบโครงสร้างท่อ

ขั้นตอนที่ 4 การเปรียบเทียบด้านราคา

ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดที่ต้องพิจารณา ตามภาพที่ 9

ขั้นตอนที่ 1 การพิจารณาข้อมูลเทคนิคของท่อนั้น จะพิจารณาถึงขนาดและชั้นความดันของท่อที่มีจำหน่ายเพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการคำนวณวิเคราะห์หาความดันที่ต้องการของระบบสูบน้ำได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้จะพิจารณาถึงคุณสมบัติของน้ำที่จะส่งผ่านท่อ เช่น ความเป็นกรดเป็นด่าง แนวโน้มในการกัดกร่อน ความสามารถในการับแรงรวมทั้งสภาพการจราจรในบริเวณที่มีการวางท่อ เพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกวัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนของดินในโครงการได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

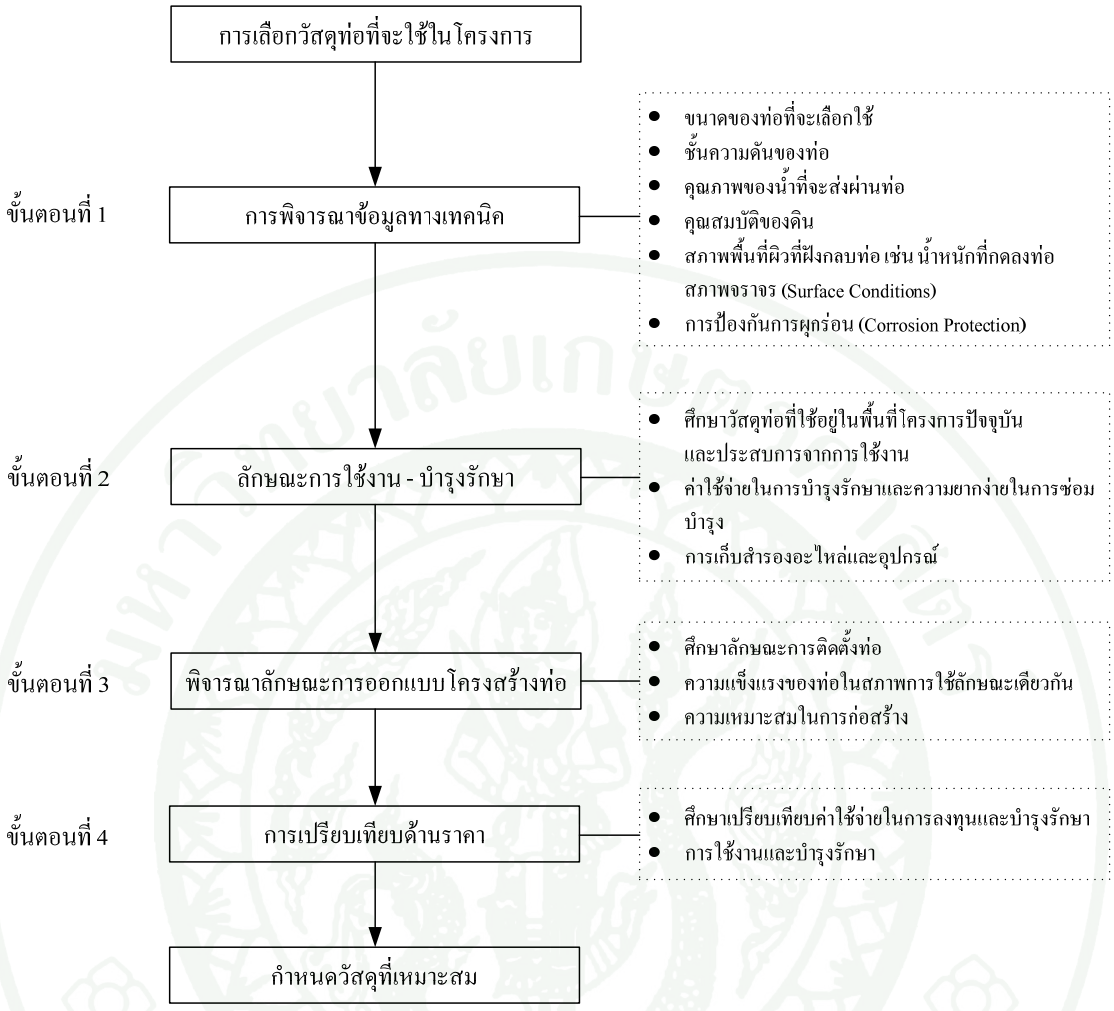
หรือเตรียมวิธีป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสม เช่น Cathodic Protection ของท่อเหล็กเหนียว และเลือกชั้นความดันที่ทนต่อน้ำหนักที่กดลงบนท่อได้

ขั้นตอนที่ 2 การพิจารณาลักษณะการใช้งานและบำรุงรักษานั้น อาจจะประมวลผลการใช้งานของวัสดุท่อที่ใช้อยู่ในโครงการ หรือพื้นที่ใกล้เคียงเพื่อให้ทราบถึงปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริง รวมถึงรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับแนวทางวิธีการตลอดจนค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง เพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการเลือกท่อ โดยท่อที่เหมาะสมนั้นควรซ่อมบำรุงรักษาได้ง่าย โดยใช้เพียงบุคคลในท้องถิ่นและสามารถหาอะไหล่ได้ง่าย รวมทั้งมีประวัติการใช้งานในท้องที่โครงการหรือพื้นที่ใกล้เคียงที่ดี ไม่มีปัญหาการชำรุดเสียหายมากเกินไปนัก

ขั้นตอนที่ 3 การพิจารณาลักษณะการออกแบบโครงสร้างที่เกี่ยวกับระบบท่อนั้น พิจารณาถึงลักษณะการติดตั้งท่อ และความจำเป็นของการใช้โครงสร้างในการรองรับท่อ ซึ่งนับเป็นส่วนที่มีผลกับราคาค่าก่อสร้างพอสมควร เช่น ในกรณีที่มีการวางท่อผ่านคลอง หรือ แม่น้ำ ก็ต้องมีการทำแท่นรองรับท่อ หรือมีการใช้คอนกรีตถ่วงท่อ หรือ อาจต้องมีการเดินท่อลอด ต้องมีการศึกษาว่าท่อชนิดใดควรใช้วิธีการรองรับท่อแบบใดจึงจะเหมาะสม มีประสิทธิภาพ และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายต่ำสุด

ขั้นตอนที่ 4 การพิจารณาเปรียบเทียบด้านราคา ทำการประมาณราคาค่าก่อสร้างเพื่อเปรียบเทียบด้านต้นทุนค่าก่อสร้าง รวมทั้งค่าดำเนินการบำรุงรักษาของท่อแต่ละแบบ ท่อที่เหมาะสมจะเป็นท่อที่สามารถส่งน้ำได้โดยเกิดปัญหาน้อยที่สุด และทำให้ค่าใช้จ่ายของโครงการโดยรวมทั้งค่าก่อสร้างและค่าดำเนินการและบำรุงรักษาต่ำสุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 9 ขั้นตอนและรายละเอียดในการพิจารณาชนิดของท่อส่งน้ำที่เหมาะสม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์

การศึกษาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการด้านวิศวกรรมมีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์ว่าผลตอบแทนหรือผลประโยชน์ที่จะได้จากการดำเนินงานตามโครงการคุ้มค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการหรือไม่ เนื่องจากโครงการด้านวิศวกรรมมักจะต้องใช้เงินลงทุนก่อสร้างและค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงานบำรุงรักษาสูงมาก เงินสำหรับค่าใช้จ่ายต่างๆเหล่านี้ได้มาจากเงินงบประมาณแผ่นดิน เงินกู้จากสถาบันการเงินภายในประเทศหรือต่างประเทศ เนื่องจากรัฐบาลต้องดำเนินงานพัฒนาประเทศทุกๆด้านทั่งทั้งประเทศ โครงการวิศวกรรมต่างๆ เพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมจึงมีมาก และต้องเสียค่าใช้จ่ายเกินกว่างบประมาณแผ่นดินที่มีอยู่ในแต่ละปี โครงการที่มีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์เท่านั้นจึงได้รับการพิจารณาอนุมัติให้ดำเนินการ นอกจากโครงการที่มีจุดมุ่งหมายหลักและมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อการพัฒนาสังคมหรือความมั่นคงของประเทศ สำหรับโครงการที่ได้เงินสำหรับลงทุนและค่าใช้จ่ายจากเงินกู้จากสถาบันการเงินต่างๆการกู้เงินก็ได้กำหนดให้ผลตอบแทนหรือผลประโยชน์ที่จะได้จากการดำเนินงานตามโครงการต้องเพียงพอต่อการชำระหนี้ ในขณะเดียวกันสถาบันการเงินซึ่งเป็นเจ้าของเงินกู้ก็ต้องการความมั่นใจเช่นเดียวกันว่าผลตอบแทนหรือผลประโยชน์ที่ได้จากการดำเนินโครงการที่ใช้เงินลงทุนจากเงินที่กู้ไปนั้นมากเพียงพอที่เจ้าของโครงการสามารถนำมาชำระหนี้ทั้งเงินต้นและดอกเบี้ยได้ โครงการด้านวิศวกรรมทุกโครงการจึงต้องมีการศึกษาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์รวมอยู่ด้วย

การวิเคราะห์โครงการในบทนี้หมายความถึงการศึกษาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการตามจุดมุ่งหมายดังนี้

1. วิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการเพื่อพิจารณาดำเนินงานตามโครงการหรือยกเลิกโครงการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. วิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการที่มีวิธีดำเนินงานวิธีต่างๆซึ่งมีความเหมาะสมทางวิศวกรรม เพื่อพิจารณาเลือกดำเนินงานโครงการตามวิธีการดำเนินงานที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ที่สุด

ทั้งนี้วิธีการวิเคราะห์โครงการที่ได้รับการนำมาใช้ทางด้านเศรษฐศาตร์วิศวกรรม ซึ่งแต่ละวิธีก็มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โครงการที่มีรายได้และค่าใช้จ่ายในลักษณะต่างๆกัน วิธีการวิเคราะห์โครงการเหล่านี้ได้แก่

1. วิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี
2. วิธีค่าเงินปัจจุบัน
3. วิธีเงินลงทุนโครงการ
4. วิธีอัตราผลตอบแทน
5. วิธีจุดคุ้มทุน
6. วิธีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน

ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่าความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในครั้งนี้จะใช้การวิเคราะห์โดยวิธีเงินลงทุนโครงการ เพราะจะพิจารณาเฉพาะเงินลงทุนโครงการ ค่าดำเนินการ และค่าบำรุงรักษา โดยไม่พิจารณาถึงผลตอบแทนที่ได้จากโครงการ รูปแบบของระบบท่อส่งน้ำที่มีความเหมาะสมที่สุด คือระบบท่อส่งน้ำที่ให้ค่าลงทุนต่ำสุด ดังนี้

1. การวิเคราะห์โดยวิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี

การดำเนินงานโครงการทางวิศวกรรม รายได้หรือผลประโยชน์จากโครงการ และค่าใช้จ่ายของโครงการมีลักษณะเช่นเดียวกับการดำเนินงานธุรกิจอื่น ๆ ทั่วไป คือ รายได้และรายจ่ายจะเปลี่ยนไปทุกปี ในช่วงแรกของการดำเนินงานอาจจะไม่มีรายได้จากโครงการหรือมีรายได้ต่ำ แล้วเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งโครงการดังกล่าวจะให้รายได้สม่ำเสมอเกือบเท่ากันทุกปี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

และค่อย ๆ ลดลงในช่วงสุดท้ายของโครงการ ในขณะเดียวกันค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงานโครงการก็ไม่แน่นอน เช่น อัตราค่าจ้างแรงงานที่เพิ่มขึ้น ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาเครื่องจักรก็แปรผันตามสภาพและการใช้งานโดยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออายุใช้งานเครื่องจักรมากขึ้น ฯลฯ ดังได้กล่าวในบทก่อนโครงการทางวิศวกรรมย่อยวิธีการดำเนินงานที่มีความเหมาะสมทางวิศวกรรมหลายวิธี และมักจะประกอบด้วยวิธีการดำเนินงานที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายลงทุนสูงแต่ค่าใช้จ่ายดำเนินงานต่ำ และวิธีการดำเนินงานที่เสียค่าใช้จ่ายลงทุนต่ำ แต่ค่าใช้จ่ายดำเนินงานสูง การวิเคราะห์รายได้และรายจ่ายของโครงการหรือการเปรียบเทียบผลประโยชน์ที่ได้รับจากการดำเนินงานวิธีต่าง ๆ จึงไม่สามารถทำโดยการศึกษาตัวเลขแสดงรายได้และรายจ่ายที่แปรเปลี่ยนตลอดโครงการได้ การคำนวณหาจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีเพื่อใช้เป็นดัชนีแสดงผลประโยชน์ที่จะได้จากโครงการจึงจะสะดวกและง่ายสำหรับผู้พิจารณาโครงการจะนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกวิธีดำเนินงานโครงการ วิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีนี้จึงได้รับการนำมาใช้วิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการต่าง ๆ โดยทั่วไป

วิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี มิใช่การนำรายได้และรายจ่ายของโครงการมาศึกษาหาค่าเฉลี่ยตามวิธีทางคณิตศาสตร์ แต่เป็นการนำเอาหลักการที่ค่าของเงินมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามเวลาตามหลักเศรษฐศาสตร์มาใช้คำนวณเปลี่ยนรายได้และรายจ่ายของโครงการเป็นจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันทุกปี ดังวิธีที่ได้แสดงในบทก่อน ข้อสำคัญที่ผู้ศึกษาวิชาเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมและผู้ทำการวิเคราะห์โครงการจะต้องตระหนักอยู่เสมอคือ จำนวนเงินซึ่งแสดงโดยตัวเลขเท่ากันในแต่ละปีนี้มิได้หมายความว่าค่าของเงินในแต่ละปีเท่ากัน ค่าของเงินที่แท้จริงในแต่ละปีจะแตกต่างกัน แต่การแสดงผลประโยชน์ของโครงการเป็นจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีด้วยตัวเลขที่เท่า ๆ กันทุกปีเหมาะต่อการเปรียบเทียบการดำเนินงานโครงการตามวิธีต่าง ๆ เนื่องจากถ้าหากวิธีการดำเนินงานโครงการวิธีใดวิธีหนึ่งให้ผลประโยชน์มากกว่าวิธีการดำเนินงานโครงการอีกวิธีหนึ่งเป็นจำนวนเงินเท่าใดแล้วย่อมหมายถึงว่าทุก ๆ ปี ผลประโยชน์ที่จะได้จากการดำเนินงานโดยสองวิธีนี้จะแตกต่างกันเป็นจำนวนเงินเท่ากันตลอดระยะเวลาโครงการ เช่น สมมติการใช้รถแทรคเตอร์ขนาดเล็กทำไร่จะให้ผลประโยชน์สุทธิ หลังจากคำนวณหักค่าใช้จ่ายลงทุนซื้อรถ ค่าบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายอื่น ๆ โดยวิธีคำนวณจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีได้จำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี 15,000 บาท และการใช้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รถแทรคเตอร์ขนาดใหญ่ทำไร่จะให้ผลประโยชน์สุทธิจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี20,000 บาท หมายความว่าตลอดระยะเวลาการใช้รถแทรคเตอร์ทั้งสองแบบ ทุก ๆ ปี การใช้รถแทรคเตอร์ขนาดใหญ่จะให้ผลประโยชน์มากกว่าการใช้รถแทรคเตอร์ขนาดเล็กเมื่อทำการวิเคราะห์ตลอดระยะเวลาของโครงการแล้วเป็นจำนวนเงิน 5,000 บาท แต่ทั้งนี้ถ้าพิจารณาเฉพาะปีใดปีหนึ่งรายได้สุทธิของการใช้แทรคเตอร์ขนาดใหญ่อาจจะต่ำกว่ารายได้สุทธิของการใช้รถแทรคเตอร์ขนาดเล็กในปีเดียวกัน เช่น ปีที่เริ่มต้นโครงการ ค่าใช้จ่ายสำหรับซื้อรถแทรคเตอร์ขนาดใหญ่ย่อมสูงกว่าค่าใช้จ่ายสำหรับซื้อรถแทรคเตอร์ขนาดเล็ก

หลังจากวิเคราะห์โครงการโดยวิธีคำนวณจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี คือ การเปลี่ยนเงินลงทุน ค่าใช้จ่ายดำเนินงานต่าง ๆ และผลประโยชน์ของโครงการทั้งหมดเป็นจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี และรวมรายรับ รายจ่ายที่ได้เปลี่ยนเป็นจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีเหล่านี้เป็นจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีของโครงการซึ่งมีสูตรการคำนวณคือ

$$UAC = (A/P, i\%, n)\left[l + \sum (P/F, i\%, t)(B_t - C_t)\right] \qquad (63)$$

โดยที่ UAC คือ จำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีของโครงการ

l คือ ค่าใช้จ่ายเมื่อเริ่มโครงการหรือจำนวนเงินลงทุน

B_t คือ รายได้ของโครงการในปีที่ t

C_t คือ รายจ่ายของโครงการในปีที่ t

n คือ ระยะเวลาดำเนินงานของโครงการ

i คือ อัตราคิดลดหรืออัตราผลประโยชน์ตอบแทนของโครงการ

วิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีเหมาะสำหรับการวิเคราะห์โครงการที่รายได้สุทธิในแต่ละปีเท่ากันซึ่งเมื่อรวมค่าลงทุนโครงการ และรายได้จากการขายอุปกรณ์ของโครงการเมื่อสิ้นสุดโครงการแล้วสูตรการคำนวณจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีของโครงการคือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$UAC = l(A/P, i\%, n) + AC + S(A/F, i\%, n) \qquad (64)$$

โดยที่ 1 คือ ค่าใช้จ่ายลงทุนโครงการ

AC คือ รายได้สุทธิจากโครงการซึ่งเท่ากันทุกปี

S คือ รายได้จากการขายอุปกรณ์ของโครงการ

ในกรณีของโครงการที่รายได้สุทธิในแต่ละปีคงที่เท่ากันเช่นนี้ การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการโดยวิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีจะสะดวกง่ายกว่าการใช้วิธีการวิเคราะห์วิธีอื่น ๆ และโดยปกติการคาดคะเนรายรับและรายจ่ายของโครงการผู้ทำการวิเคราะห์ก็จะทำการคาดคะเนในรูปของรายรับรายจ่ายในแต่ละปีอยู่แล้ว การใช้วิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีวิเคราะห์โครงการจะได้ผลถูกต้องถ้าผู้ทำการวิเคราะห์สามารถคาดคะเนสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ได้ถูกต้องคือ

1) ความถูกต้องของการคาดประมาณรายได้จากการขายเครื่องอุปกรณ์ของโครงการเมื่อสิ้นสุดโครงการ

2) กำหนดอัตราผลตอบแทนหรืออัตราคิดลดที่จะนำมาใช้วิเคราะห์โครงการ

3) ถ้ารายได้สุทธิจากการดำเนินงานโครงการในแต่ละปีมีค่าคงที่หรือมีการเพิ่มหรือลดด้วยจำนวนคงที่ทุกปี ควรพิจารณาใช้วิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีวิเคราะห์โครงการนี้

4) เปลี่ยนค่าลงทุนโครงการและรายได้จากการขายเครื่องอุปกรณ์ของโครงการและจำนวนเงินที่เพิ่มหรือลดคงที่ทุกปี ของวิธีการดำเนินงานต่าง ๆ ของโครงการเป็นจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีโดยใช้อัตราผลตอบแทนหรืออัตราคิดลดสำหรับการคำนวณอัตราเดียวกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5) คำนวณจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีรวมของวิธีการดำเนินงานโครงการทุก ๆ วิธี และนำเอาวิธีการดำเนินงานที่ให้จำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีเป็นบวกมาพิจารณาต่อไป

6) เลือกวิธีการดำเนินงานที่ให้ผลตอบแทนเป็นจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีสูงสุดเป็นวิธีการดำเนินงานโครงการ

7) ในกรณีที่วิธีการดำเนินงานหลาย ๆ วิธีให้ผลประโยชน์เช่นเดียวกันที่ไม่สามารถคำนวณเป็นมูลค่าได้หรือมีค่าใกล้เคียงกัน เลือกวิธีการดำเนินงานที่เสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีต่ำที่สุดเป็นวิธีการดำเนินงานโครงการ

2. การวิเคราะห์โดยวิธีค่าเงินปัจจุบัน

วิธีค่าเงินปัจจุบันเป็นวิธีการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการทางวิศวกรรมวิธีหนึ่งซึ่งได้รับความนิยมและได้รับการนำมาใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมทั้งสองลักษณะคือ

1) วิเคราะห์ผลตอบแทนที่จะได้รับจากการลงทุนโครงการ

2) เปรียบเทียบผลตอบแทนที่จะได้รับจากโครงการเนื่องจากการใช้วิธีดำเนินงานต่างกัน

หลักการการวิเคราะห์โดยวิธีค่าเงินปัจจุบัน คือ การเปลี่ยนเงินลงทุน ค่าใช้จ่ายดำเนินงานต่าง ๆ และผลประโยชน์ของโครงการทั้งหมด เป็นค่าเงินปัจจุบัน ผู้ทำการวิเคราะห์สามารถที่จะเปลี่ยนค่าใช้จ่ายและรายได้ที่จะได้รับในอนาคตแต่ละรายการเป็นค่าเงินปัจจุบันตามสูตรซึ่งได้กล่าวในบทก่อน และรวมรายรับรายจ่ายที่ได้เปลี่ยนเป็นค่าเงินปัจจุบันแล้วเหล่านี้เป็นค่าเงินปัจจุบันของโครงการ ซึ่งมีสูตรการคำนวณ คือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$PW = l + \sum_{t=1}^{n} (P/F, i\%, t)(B_t - C_t) \qquad (65)$$

โดยที่ PW คือ ค่าเงินปัจจุบันของโครงการ

l คือ ค่าใช้จ่ายโครงการเมื่อเริ่มโครงการหรือค่าเงินลงทุน

B_t คือ รายได้ของโครงการในปีที่ t

C_t คือ รายจ่ายของโครงการในปีที่ t

n คือ ระยะเวลาดำเนินงานของโครงการ

i คือ อัตราคิดลดหรืออัตราผลประโยชน์ตอบแทนของโครงการ

การใช้วิธีค่าเงินปัจจุบันวิเคราะห์ผลตอบแทนที่จะได้รับจากการลงทุนโครงการทำให้ผู้พิจารณาโครงการสามารถตัดสินใจที่จะรับโครงการหรือไม่รับโครงการได้ง่าย เนื่องจากวิธีนี้ได้แสดงให้เห็นถึงผลต่างระหว่างค่าเงินปัจจุบันของรายได้และรายจ่ายของโครงการ โครงการที่มีค่าเงินปัจจุบันของโครงการเป็นบวก คือ โครงการที่มีรายได้มากกว่ารายจ่ายเป็นโครงการที่มีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ จึงเป็นโครงการที่ควรรับไว้พิจารณาต่อไป ในบางกรณีถึงแม้ว่าค่าเงินปัจจุบันของโครงการเป็นบวก แต่มีค่าต่ำกว่าเป้าหมายที่ผู้พิจารณาโครงการกำหนดไว้ โครงการดังกล่าวก็ต้องล้มเลิกไป สำหรับโครงการที่มีค่าเงินปัจจุบันเป็นลบซึ่งก็คือโครงการที่รายจ่ายมากกว่ารายได้หรือผลประโยชน์จึงเป็นโครงการที่ไม่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ มักจะไม่ได้รับการพิจารณาให้ดำเนินงาน ยกเว้นในกรณีที่มีเหตุผลความเหมาะสมทางสังคม และความเหมาะสมทางรัฐศาสตร์ เป็นจุดมุ่งหมายสำคัญของโครงการ

การเปรียบเทียบผลตอบแทนที่ได้รับจากโครงการเนื่องจากการใช้วิธีการดำเนินงานต่าง ๆกัน โดยวิธีการเปรียบเทียบค่าเงินปัจจุบันของโครงการจากวิธีการดำเนินงานเหล่านี้ทำให้ผู้พิจารณาโครงการสามารถเห็นความแตกต่างของรายได้สุทธิของโครงการเป็นค่าเงินปัจจุบันจากการใช้วิธีการดำเนินงานต่าง ๆ กันได้อย่างเด่นชัด และโดยปรกติวิธีการดำเนินงานโครงการที่ให้ผลตอบแทนสูงที่สุดมักจะเป็นวิธีที่ได้รับการพิจารณาและนำมาใช้กับโครงการนั้น แต่สำหรับในกรณีที่โครงการที่วิธีการดำเนินงานทุกๆ วิธีให้รายได้ของแต่ละปีเท่ากันการเปรียบเทียบก็สามารถ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าเงินปัจจุบันของค่าใช้จ่ายจากวิธีการดำเนินงานโครงการต่าง ๆ วิธีการดำเนินงานโครงการที่มีค่าเงินปัจจุบันของค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์กว่าวิธีอื่น ๆ และมักจะเป็นวิธีที่ได้รับการพิจารณาสำหรับนำมาใช้กับโครงการเช่นกัน

หลักสำคัญในการวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการดำเนินงานต่างๆ ของโครงการโดยวิธีค่าเงินปัจจุบันของโครงการอีกประการหนึ่ง คือ อายุของโครงการของวิธีการดำเนินงานทุกๆ วิธีที่นำมาวิเคราะห์จะต้องเท่ากัน เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์ผลตอบแทนในปัจจุบันที่ได้จากผลประโยชน์ในอนาคตของโครงการ ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องกำหนดระยะเวลาการดำเนินงานตามโครงการหรือระยะเวลาของการประกอบกิจการตามวิธีต่าง ๆ เท่ากัน โดยปรกติ อายุของโครงการของวิธีการดำเนินงานต่าง ๆ เช่น อายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่าง ๆ อายุการใช้งานของเครื่องจักรและอื่น ๆ จะไม่เท่ากัน การใช้วิธีค่าเงินปัจจุบันวิเคราะห์โครงการลักษณะเช่นนี้จึงต้องคำนวณค่าคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของอายุโครงการของวิธีการดำเนินงานทุกวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ และใช้ค่า ค.ร.น. ที่ได้นี้เป็นกำหนดระยะเวลาที่นำมาใช้วิเคราะห์ เช่น การเปรียบเทียบแท็งก์น้ำคอนกรีต ซึ่งคาดว่ามีอายุใช้งานได้ 40 ปี และ แท็งก์น้ำเหล็กซึ่งคาดว่าจะสามารถใช้งานได้ 30 ปี ระยะเวลาที่จะนำมาใช้วิเคราะห์คือ 120 ปี (ค.ร.น.ของ 40 และ 30) การวิเคราะห์เปรียบเทียบโดยค่าเงินปัจจุบันจึงต้องตั้งสมมติฐานว่าเมื่อวิธีการดำเนินงานวิธีใดครบอายุการใช้งาน ให้โครงการนั้นดำเนินงานต่อไปในลักษณะเดิมโดยการเปลี่ยนอุปกรณ์ เครื่องจักรใหม่ชนิดเดียวกัน และรายได้และรายจ่ายของการดำเนินงานเหมือนกับการใช้อุปกรณ์เครื่องจักรอันเดิม เช่น ในกรณีของแท็งก์น้ำคอนกรีตและแท็งก์น้ำเหล็ก รายละเอียดของการวิเคราะห์เปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 6

สิ่งหนึ่งที่ผู้ทำการวิเคราะห์โครงการและผู้พิจารณาโครงการจะต้องตระหนัก คือ ผลลัพธ์ที่ได้รับจากการวิเคราะห์และสมมติฐานที่ใช้อาจมิใช่สภาพที่แท้จริงของวิธีการดำเนินงานในอนาคต เนื่องจากความก้าวหน้าทางวิทยาการและสภาพสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไป จึงไม่มีโครงการใดที่จะดำเนินงานในลักษณะเดียวกัน เช่น ใช้แท็งก์น้ำคอนกรีตหรือแท็งก์น้ำเหล็กแบบเดิมต่อเนื่องกันเป็นเวลา 120 ปี แต่ทั้งนี้การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ของโครงการโดยวิธีต่างๆ ล้วน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แต่ใช้สมมติฐานดังกล่าวทั้งสิ้น การวิเคราะห์โดยวิธีใช้ค่าเงินปัจจุบันได้แสดงให้เห็นการใช้สมมติฐานอย่างเด่นชัด ในขณะที่การวิเคราะห์โดยวิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีก็ใช้สมมติฐานนี้เช่นเดียวกันในการเปรียบเทียบวิธีการดำเนินงานวิธีต่างกัน การกำหนดจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีเท่าเดิมก็คือ การสมมติว่าโครงการนั้นดำเนินงานต่อไปในลักษณะเดิม โดยการเปลี่ยนอุปกรณ์เครื่องจักรใหม่ชนิดเดียวกัน แต่ไม่ได้แสดงไว้ในการวิเคราะห์เท่านั้น

การวิเคราะห์โดยวิธีค่าเงินปัจจุบันยากและละเอียดกว่าการใช้วิธีค่าเฉลี่ยเท่ากันรายปี เนื่องจากจะต้องวิเคราะห์โดยกำหนดระยะเวลาการดำเนินงานตามวิธีต่าง ๆ เท่ากันตามที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่การวิเคราะห์โดยวิธีค่าเงินปัจจุบันนี้ในกรณีที่สามารถคาดคะเนสภาพการณ์ในอนาคตก็อาจจะไม่นำสมมติฐานการเปลี่ยนอุปกรณ์เครื่องจักรแบบเดิม และรายได้รายจ่ายลักษณะเดิมมาใช้

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์เปรียบเทียบการใช้แท็งก์น้ำคอนกรีต และ แท็งก์น้ำเหล็ก

ปีที่	แท็งก์น้ำคอนกรีต	แท็งก์น้ำเหล็ก
ปัจจุบัน	แท็งก์น้ำคอนกรีตอันแรก	แท็งก์น้ำเหล็กอันแรก
30	-	แท็งก์น้ำเหล็กอันแรกหมดอายุการใช้งาน เปลี่ยนใช้แท็งก์น้ำเหล็กอันที่สอง
40	แท็งก์น้ำคอนกรีตอันแรกหมดอายุการใช้งาน เปลี่ยนใช้แท็งก์คอนกรีตอันที่สอง	-
60	-	แท็งก์น้ำเหล็กอันที่สองหมดอายุการใช้งาน เปลี่ยนใช้แท็งก์น้ำเหล็กอันที่สาม
80	แท็งก์น้ำคอนกรีตอันที่สองหมดอายุการใช้งาน เปลี่ยนใช้แท็งก์น้ำคอนกรีตอันที่สาม	-
90	-	แท็งก์น้ำเหล็กอันที่สามหมดอายุการใช้งาน เปลี่ยนใช้แท็งก์น้ำเหล็กอันที่สี่
120	แท็งก์น้ำคอนกรีตอันที่สามหมดอายุการใช้งาน	แท็งก์น้ำเหล็กอันที่สี่หมดอายุการใช้งาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์ก็สามารถทำได้โดยให้เปลี่ยนอุปกรณ์เครื่องจักรแบบใหม่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสิ่งเหล่านี้ วิธีค่าเงินปัจจุบันนี้จึงเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โครงการที่สัมพันธ์กับความก้าวหน้าทางวิทยาการ เช่น โครงการที่มีการใช้เครื่องจักร และโครงการที่คำนึงความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์เป็นจุดมุ่งหมายสำคัญ ซึ่งการวิเคราะห์โดยวิธีค่าเงินปัจจุบันสามารถใช้อัตราคิดลดหรืออัตราผลตอบแทนในช่วงเวลาต่าง ๆ แตกต่างกันได้ ทำให้สามารถลดความผิดพลาดของการวิเคราะห์อันเนื่องมาจากผลกระทบจากสภาวะเงินเฟ้อ แต่การวิเคราะห์โดยวิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีไม่สามารถปรับอัตราคิดลดหรืออัตราผลตอบแทนในช่วงต่าง ๆ ให้แตกต่างกันได้ การใช้วิธีค่าเงินปัจจุบันวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการจะได้ผลคาดคะเนที่ถูกต้องเพียงใดจึงขึ้นอยู่กับความแม่นยำที่ผู้ทำการวิเคราะห์ สามารถคาดประมาณเหตุการณ์ในอนาคตต่างๆ เหล่านี้ คือ

1. ความถูกต้องของการคาดประมาณรายจ่ายและกำหนดเวลาที่โครงการจะต้องจ่ายค่าใช้จ่ายนี้

2. การตัดสินใจกำหนดอัตราผลตอบแทนจากโครงการหรืออัตราคิดลดที่นำมาใช้คำนวณเปลี่ยนรายได้และรายจ่ายในอนาคตเป็นค่าเงินปัจจุบัน

สรุปได้ว่าหลักการและขั้นตอนของการใช้วิธีค่าเงินปัจจุบันวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการทางวิศวกรรมมีดังนี้

1) กำหนดเวลาปัจจุบันเป็นเวลาเริ่มต้นโครงการสำหรับการคำนวณ แม้ว่าวิธีการดำเนินงานของโครงการบางวิธีอาจจะเริ่มต้นในอนาคต แต่วิธีการดำเนินงานบางวิธีอาจสามารถเริ่มดำเนินงานได้ทันทีการวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการดำเนินงาน จึงต้องใช้เวลาที่เริ่มต้นโครงการเวลาเดียวกันดังได้กล่าวในบทก่อนแล้วถึงค่าของเงินที่เปลี่ยนแปรไปตามเวลา การกำหนดเวลาต่างกันค่าเงินย่อมมีผลกระทบต่อความถูกต้องของการวิเคราะห์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2) คำนวณรายได้และรายจ่ายของวิธีการดำเนินงานโครงการทุกๆ วิธี

3) กำหนดอัตราผลตอบแทนหรืออัตราคิดลดที่จะนำมาใช้วิเคราะห์

4) กำหนดระยะเวลาของการดำเนินงานโครงการของทุกวิธีการดำเนินงานให้เท่ากัน ดังได้กล่าวแล้วในกรณีที่วิธีการดำเนินงานมีระยะเวลาการดำเนินงานไม่เท่ากัน ค่าคูณร่วมน้อยของระยะเวลาดำเนินงานทุกวิธีเป็นระยะเวลาของโครงการที่นำมาใช้วิเคราะห์

5) เปลี่ยนรายได้และรายจ่ายในอนาคตของวิธีการดำเนินงานต่าง ๆ ของโครงการเป็นค่าเงินปัจจุบันโดยใช้อัตราผลตอบแทนหรืออัตราคิดลดอัตราเดียวกัน แม้ว่าวิธีการดำเนินงานวิธีต่างๆ อาจจะใช้เงินลงทุนจากแหล่งเงินต่างกัน หรือ อัตราคิดลดต่างกัน แต่ในการเปรียบเทียบจะต้องกำหนดอัตราเท่ากัน

6) คำนวณค่าเงินปัจจุบันสุทธิของวิธีการดำเนินงานโครงการทุกๆ วิธี และนำเอาวิธีการดำเนินงานที่ให้ค่าเงินปัจจุบันเป็นบวกมาพิจารณาต่อไป

7) เลือกวิธีการดำเนินงานที่ให้ผลตอบแทนเป็นค่าเงินปัจจุบันสูงสุดเป็นวิธีการดำเนินงานโครงการ

8) ในกรณีที่วิธีการดำเนินงานหลายๆ วิธีให้ผลประโยชน์เช่นเดียวกันที่ไม่สามารถคำนวณเป็นมูลค่าได้ หรือ มีค่าใกล้เคียงกัน เลือกวิธีการดำเนินงานที่เสียค่าใช้จ่ายเป็นค่าเงินปัจจุบันต่ำที่สุดเป็นวิธีการดำเนินงานโครงการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การวิเคราะห์โดยวิธีเงินลงทุนโครงการ

โครงการวิศวกรรมที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อการพัฒนาประเทศและสาธารณประโยชน์บางโครงการประกอบด้วยลักษณะต่างๆดังนี้

1) เป็นโครงการเพื่อการพัฒนาสังคม
2) เป็นโครงการที่ไม่คำนึงถึงรายได้ที่จะได้จากโครงการ
3) เป็นโครงการที่ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นถาวรวัตถุ

การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโครงการที่ประกอบด้วยลักษณะทั้งสี่ประการเช่นนี้ เป็นการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาเลือกวิธีดำเนินงานโครงการที่ใช้เงินลงทุนต่ำที่สุดโดยที่วิธีการดำเนินงานซึ่งมีความเหมาะสมทางวิศวกรรมเหล่านี้จะต้องอำนวยประโยชน์บรรลุตามวัตถุประสงค์ของโครงการเหมือนกัน

การวิเคราะห์โดยวิธีเงินลงทุนโครงการเป็นการเปลี่ยนค่าใช้จ่ายต่างๆ ของโครงการเป็นค่าเงินปัจจุบัน แต่วิธีเงินลงทุนโครงการแตกต่างจากวิธีค่าเงินปัจจุบันอยู่ 2 ประการ คือ วิธีเงินลงทุนโครงการใช้สำหรับวิเคราะห์โครงการที่ไม่มีรายได้ การวิเคราะห์จึงคำนวณเฉพาะเงินลงทุนก่อสร้างและค่าใช้จ่ายดำเนินงานโครงการ และโครงการดังกล่าวนี้มีระยะเวลาการดำเนินงานยาวนานจนสามารถสมมติว่าเป็นโครงการที่ใช้ได้ตลอดไป โดยปรกติโครงการที่มีระยะเวลาการดำเนินงานเกินกว่า 50 ปี ก็สามารถใช้สมมติฐานนี้ได้ และโครงการลักษณะเช่นนี้มักจะประกอบด้วยค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายสำหรับการซ่อมแซมใหญ่เมื่อดำเนินงานได้ระยะเวลาหนึ่ง และค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา ดังนั้นสูตรใช้คำนวณเงินลงทุนคือ

$$CC = l + R(P/F, i\%, n) + A_C / i \qquad (66)$$

โดยที่ CC คือ เงินลุงทนโครงการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

I คือ ค่าใช้จ่ายลงทุนโครงการเมื่อเริ่มโครงการ

R คือ ค่าใช้จ่ายสำหรับการซ่อมแซม

N คือ ปีที่ทำการซ่อมแซม

AC คือ ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาต่อปี

i คือ อัตราคิดลดหรืออัตราผลตอบแทน

(P/F, i%, n) คือ การคำนวณค่าเงินปัจจุบันจากเงินในอนาคตตามสมการ

$$P = F\left[\frac{1}{(1+i)^n}\right] \qquad (67)$$

โดยที่ P คือ จำนวนเงินปัจจุบัน

F คือ จำนวนเงินในอนาคต

4. การวิเคราะห์โดยวิธีอัตราผลตอบแทน

ผลตอบแทน คือ ผลประโยชน์ที่ผู้ประกอบกิจการได้รับตอบแทนจากการลงทุน ซึ่งเมื่อนำเอาผลตอบแทนที่ได้รับหลังจากการลงทุนระยะเวลาหนึ่งมาคิดคำนวณเป็นร้อยละของค่าใช้จ่ายที่ลงทุนไป ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนี้เรียกว่า อัตราผลตอบแทน โดยปรกติระยะเวลาที่นำมาใช้สำหรับการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนคือ 1 ปี อัตราตอบแทนมีความหมายต่างๆ กันตามลักษณะของการศึกษาในแขนงต่างๆ คือ

1) ด้านบัญชี อัตราผลตอบแทนคือ อัตราส่วนคิดเป็นร้อยละของกำไรสุทธิตามบัญชีต่อเงินลงทุนตามบัญชี

2) ด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม อัตราผลตอบแทนคือ อัตราคิดลดที่ทำให้ค่าเงินปัจจุบันของรายได้ของโครงการเท่ากับค่าเงินปัจจุบันของค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการ

3) ด้านบริหารธุรกิจ อัตราผลตอบแทนคือ อัตราส่วนคิดเป็นร้อยละของค่าเงินปัจจุบันของกำไรต่อค่าเงินปัจจุบันของการลงทุน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ โดย วิธีค่าเงินปัจจุบัน หรือวิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี ผู้ทำการวิเคราะห์ต้องกำหนดอัตราผลตอบแทนเพื่อใช้คำนวณ อัตราผลตอบแทนอาจกำหนดโดย อัตราคิดลดเงินกู้ อัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่ต้องการ หรืออื่นๆ เพื่อวิเคราะห์หาผลประโยชน์ที่จะได้จากโครงการในรูปของค่าเงินปัจจุบันหรือจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี แต่การวิเคราะห์โครงการโดยวิธีหาอัตราผลตอบแทนผู้ทำการวิเคราะห์จะต้องคำนวณหาอัตราผลตอบแทนจากสมการที่กำหนดให้ค่าเงินปัจจุบันของรายได้จากโครงการเท่ากับค่าเงินปัจจุบันของรายจ่ายของโครงการ หรือ ค่าเงินปัจจุบันรวมของโครงการเท่ากับศูนย์ดังนี้

$$l + \sum_{t=1}^{n} (P/F, i\%, t) + (B_t - C_t) = 0 \qquad (68)$$

โดยที่ i คือ อัตราผลตอบแทนของโครงการที่ต้องการทราบค่า

l คือ ค่าใช้จ่ายลงทุนเมื่อเริ่มโครงการหรือค่าเงินลงทุน

B_t คือ รายได้ของโครงการในปีที่ t

C_t คือ รายจ่ายของโครงการในปีที่ t

n คือ ระยะเวลาดำเนินงานของโครงการ

วิธีการวิเคราะห์หาอัตราผลตอบแทนของโครงการสามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาที่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีค่าเงินปัจจุบันหรือวิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี คือ

1) วิเคราะห์หาอัตราผลตอบแทนของโครงการเพื่อประกอบการพิจารณาตัดสินใจดำเนินงานตามโครงการถ้าอัตราผลตอบแทนสูงกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่กำหนดไว้ และยกเลิกโครงการในกรณีที่อัตราผลตอบแทนที่จะได้ ต่ำกว่าเป้าหมายหรืออัตราคิดลดที่กำหนดไว้

2) วิเคราะห์หาอัตราผลตอบแทนของวิธีการดำเนินงานวิธีต่าง ๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบและพิจารณาเลือกวิธีการดำเนินงาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การใช้วิธีอัตราผลตอบแทนวิเคราะห์โครงการจะยุ่งยากและใช้เวลามากกว่าการวิเคราะห์โดยวิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี หรือวิธีค่าเงินปัจจุบัน เนื่องจากการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนจากสมการจะต้องสมมติค่าอัตราผลตอบแทนแล้วทดสอบว่าค่าเงินปัจจุบันของโครงการเท่ากับศูนย์ตามสมการหรือไม่ ซึ่งถ้าค่าอัตราผลตอบแทนที่สมมติขึ้นนี้ไม่ทำให้ค่าตัวประกอบด้านซ้ายมือและตัวประกอบด้านขวามือของสมการสอดคล้องกันก็จำเป็นต้องสมมติอัตราผลตอบแทนใหม่และทำการสมมติอัตราผลตอบแทนค่าอื่นๆ ต่อไปจนกว่าค่าเงินปัจจุบันของโครงการเท่ากับศูนย์ ซึ่งโดยปรกติก็ต้องทำการสมมติค่าอัตราผลตอบแทนและทำการคำนวณหลายครั้งแต่ในปัจจุบัน เครื่องคำนวณสำหรับนักบริหารธุรกิจหลายๆ แบบ ได้ออกแบบไว้สำหรับการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนนี้ หรือ การใช้เครื่องคอมพิวเตอร์คำนวณผลลัพธ์ ทำให้การวิเคราะห์โครงการด้วยวิธีดังกล่าวนี้สะดวกรวดเร็ว ข้อยุ่งยากอีกประการหนึ่งของการใช้วิธีอัตราผลตอบแทนวิเคราะห์โครงการคือ ในบางกรณีผลลัพธ์จากการคำนวณอาจจะมีอัตราผลตอบแทนหลายค่าที่สามารถทำให้ค่าเงินปัจจุบันของโครงการเท่ากับศูนย์ได้ เช่น ในกรณีที่โครงการจำเป็นต้องจ่ายค่าใช้จ่ายสูงในช่วงกลางของการดำเนินงานทำให้เงินได้ของโครงการแต่ละปีมีค่าเป็น - + - + สลับกัน อาจมีอัตราผลตอบแทนสองอัตรา แต่โดยปรกติ อัตราผลตอบแทนที่คำนวณได้จะแตกต่างกันมากเช่น 20 % และ 400 % ทำให้ผู้ทำการวิเคราะห์สามารถพิจารณาได้ว่าควรเลือกผลลัพธ์ค่าใดจากปัญหาดังกล่าวควรจะนำอัตราผลตอบแทนที่คำนวณได้นี้มาทำการทดสอบและสนับสนุนโดยวิธีค่าเงินปัจจุบันแต่โดยปรกติโครงการด้านวิศวกรรมมักจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในช่วงแรกและได้รายได้ในภายหลัง ซึ่งผลลัพธ์จะได้อัตราผลตอบแทนเพียงค่าเดียว สำหรับข้อยุ่งยากของการใช้วิธีอัตราผลตอบแทนวิเคราะห์เลือกวิธีการดำเนินงานของโครงการก็คือ ต้องคำนวณอัตราผลตอบแทนของการลงทุนเพิ่มเติม เนื่องจากวิธีการดำเนินงานต่างๆ ใช้ค่าใช้จ่ายต่างกัน

ข้อดีของการใช้วิธีอัตราผลตอบแทนวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการคือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงอัตราผลตอบแทนจากการลงทุนซึ่งผู้พิจารณาโครงการและบุคคลส่วนใหญ่จะสามารถเข้าใจสถานภาพของผลตอบแทนที่ได้จากการลงทุนได้ง่ายกว่าวิธีการวิเคราะห์วิธีอื่น ๆ เนื่องจากคล้ายคลึงกับดอกเบี้ยที่ได้จากเงินฝากธนาคารซึ่งใช้อยู่ในวงการต่างๆ ทั่วไป ในขณะที่วิธีค่าเงินปัจจุบันหรือจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี เป็นที่เข้าใจและใช้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เฉพาะในวงการเศรษฐศาสตร์ บริหารธุรกิจ และวงการอื่นๆ ไม่มากนัก ข้อดีอีกประการหนึ่งของวิธีนี้คือ ในกรณีที่มีเงินทุนสำหรับโครงการจำกัด ผู้ทำการวิเคราะห์สามารถนำเอาวิธีอัตราผลตอบแทนนี้วิเคราะห์จัดลำดับวิธีการดำเนินงานต่างๆ ซึ่งให้อัตราผลตอบแทนต่างกันได้

สรุปขั้นตอนการใช้วิธีอัตราผลตอบแทนวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการดังนี้

1) คำนวณรายได้และรายจ่ายของวิธีการดำเนินงานโครงการทุกๆ วิธี

2) กำหนดอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่จะยอมรับให้ดำเนินงานตามโครงการ

3) ศึกษารายละเอียดของวิธีการดำเนินงานวิธีต่างๆ ของโครงการที่จะนำมาวิเคราะห์ ทั้งนี้ระยะเวลาการดำเนินงานของทุกๆ วิธีจะต้องเท่ากัน เช่นเดียวกับการใช้วิธีค่าเงินปัจจุบันวิเคราะห์โครงการ

4) คำนวณหาอัตราผลตอบแทนจากวิธีการดำเนินงานทุกวิธี นำเอาวิธีการดำเนินงานที่ให้อัตราผลตอบแทนสูงกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่กำหนดไว้มาพิจารณาต่อไป ในกรณีที่เป็นโครงการเงินกู้ อัตราผลตอบแทนขั้นต่ำต้องไม่ต่ำกว่าอัตราคิดลด ตัดวิธีการดำเนินงานที่ให้อัตราผลตอบแทนต่ำกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำออกจากการพิจารณา

5) ในกรณีที่วิธีการดำเนินงานวิธีต่าง ๆ ของโครงการใช้ค่าใช้จ่ายลงทุนต่างกันให้นำเอาวิธีการดำเนินงานต่าง ๆ ที่ผ่านการพิจารณาตามขั้นตอนที่ 4 มาจัดลำดับตามค่าใช้จ่ายลงทุนจากน้อยไปหามาก

6) นำเอาวิธีการดำเนินงานลำดับที่ 1 และ 2 มาคำนวณผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายลงทุนที่เพิ่มขึ้น และคำนวณหาอัตราผลตอบแทนของเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้นนี้ ถ้าอัตราผลตอบแทนนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สูงกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำ เลือกเอาวิธีการดำเนินงานลำดับที่ 2 มาพิจารณาต่อไป ถ้าอัตราผลตอบแทนต่ำกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำก็เลือกวิธีการดำเนินงานลำดับที่ 1 มาพิจารณาต่อไป

7) นำเอาวิธีการดำเนินงานลำดับที่ 1 หรือ 2 ที่ได้รับเลือกตามขั้นตอนที่ 6 มาเปรียบเทียบกับวิธีการดำเนินงานลำดับที่ 3 ตามวิธีในขั้นตอนที่ 6 และทำเช่นนี้เรื่อยไปจนครบวิธีการดำเนินงานของโครงการ

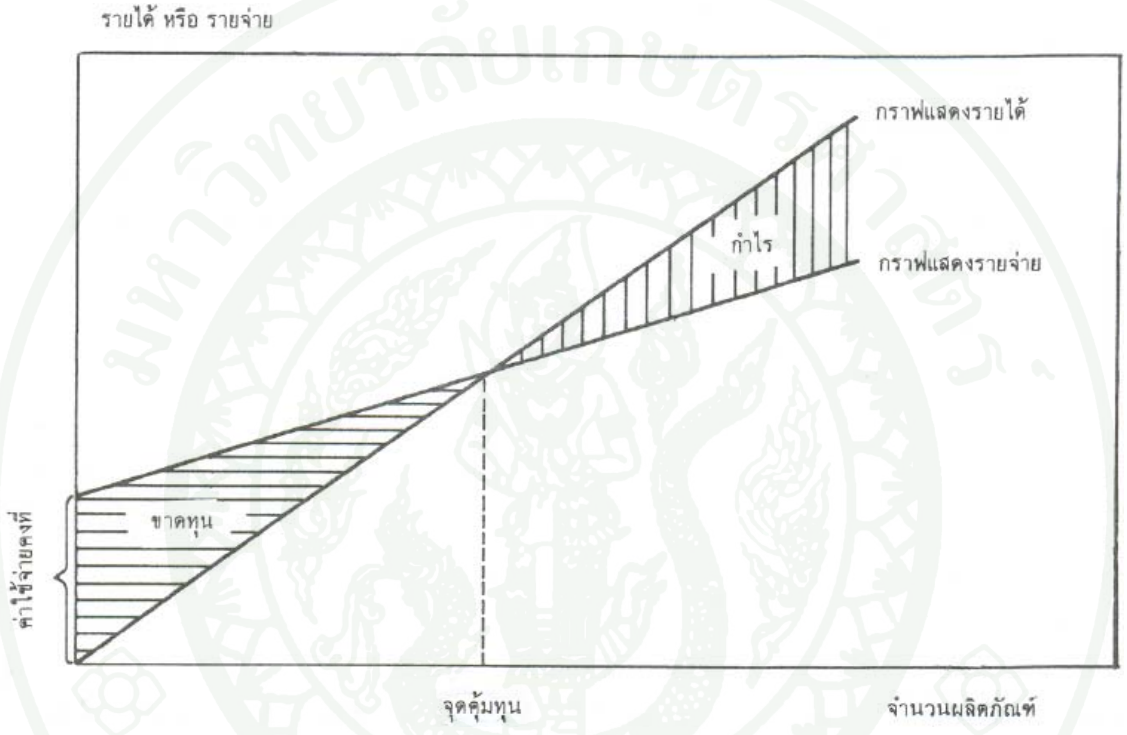
8) ในกรณีที่อัตราผลตอบแทนของเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำทุกครั้งของการวิเคราะห์ วิธีการดำเนินงานของโครงการที่ได้รับพิจารณาเลือกคือ วิธีการดำเนินงานที่ใช้เงินลงทุนสูงสุด แต่ถ้าอัตราผลตอบแทนของเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้น ต่ำกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำทุกครั้ง ก็ควรเลือกวิธีการดำเนินงานที่ใช้เงินลงทุนต่ำสุด ส่วนวิธีการดำเนินงานลำดับอื่น ๆ จะได้รับเลือกเมื่ออัตราผลตอบแทนของเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดำเนินงานลำดับที่ต่ำกว่า แต่อัตราผลตอบแทนของเงินลงทุนเพิ่มขึ้นต่ำกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำทุกครั้งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดำเนินงานที่มีลำดับสูงกว่า

5. การวิเคราะห์โดยวิธีจุดคุ้มทุน

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนด้านบริหารธุรกิจ คือ การวิเคราะห์หาวิธีการดำเนินงานเพื่อให้รายได้ที่ได้จากการประกอบการเท่ากับค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้เพื่อประกอบกิจการ เช่น การวิเคราะห์หาจำนวนสินค้าที่ต้องขายเพื่อให้เท่าทุน หรือ จำนวนสินค้าที่ต้องขายเพื่อให้ได้กำไรตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ วิธีการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนได้รับการประยุกต์และนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมต่าง ๆ เช่น การคำนวณหาจำนวนผลิตภัณฑ์ที่โรงงานอุตสาหกรรมต้องทำการผลิตเพื่อให้คุ้มทุน โดยปรกติในขบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ค่าใช้จ่ายสำหรับการผลิตจะประกอบด้วยค่าใช้จ่ายคงที่ และ ค่าใช้จ่ายแปร ค่าใช้จ่ายคงที่ คือ ค่าใช้จ่ายที่ผู้ประกอบกิจการต้องจ่ายเพื่อดำเนินการเป็นจำนวนคงที่ไม่ว่าจะทำการผลิตผลิตภัณฑ์จำนวนเท่าไร เช่น ค่าเช่าโรงงานค่าเครื่องจักร ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร ค่าใช้จ่ายด้านบริหาร เป็นต้น ส่วนค่าใช้จ่ายแปร คือ ค่าใช้จ่ายที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แปรผันตามจำนวนผลิต เช่น ค่าวัตถุดิบ ค่าจ้างคนงาน ค่าไฟฟ้า เป็นต้น โดยทั่วไปค่าใช้จ่ายแปรมักจะสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ผลิต และ รายได้จากการประกอบกิจการก็จะสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนผลิตภัณฑ์ที่จำหน่าย โดยสมมติฐานว่าจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเท่ากับจำนวนผลิตภัณฑ์ที่จำหน่าย กราฟแสดงการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน จะมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 10 กราฟแสดงการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน

วิธีการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนอีกวิธีหนึ่ง คือ การใช้สมการคณิตศาสตร์แสดงรายได้เท่ากับค่าใช้จ่ายรวมกับผลกำไรดังนี้

$$PX = F + CX + B \tag{69}$$

หรือ $$X = \frac{F + B}{P - C} \tag{70}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดยที่ X คือ จำนวนผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตและจำหน่าย

P คือ ราคาขายสำหรับผลิตภัณฑ์หนึ่งชิ้น

F คือ ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับการดำเนินงานผลิต

C คือ ค่าใช้จ่ายแปรสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์หนึ่งชิ้น

B คือ กำไรที่ผู้ประกอบกิจการต้องการ ในกรณีที่ไม่คำนึงถึงผลกำไร ค่า B เท่ากับศูนย์

การจำแนกค่าใช้จ่ายของการประกอบกิจการเป็นค่าใช้จ่ายคงที่หรือค่าใช้จ่ายแปรขึ้นอยู่กับสถานภาพและลักษณะของกิจการ เช่น กิจการที่ไม่ได้ใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อการผลิต แต่ใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อให้แสงสว่างในโรงงาน ค่าไฟฟ้าก็จะเป็นค่าใช้จ่ายคงที่ ในทำนองเดียวกัน ในบางกรณีค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรก็เป็นค่าใช้จ่ายแปรเนื่องจากแปรผัน ตามจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเป็นต้น

วิธีการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับการประยุกต์นำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการทางวิศวกรรม และวิธีการวิเคราะห์วิธีนี้มักจะใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาที่วิธีการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมอื่นๆ ไม่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาได้สองกรณีดังนี้

1) ปัญหาทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมที่ไม่ทราบค่าตัวแปรบางตัว

2) การพิจารณาตัดสินใจเลือกวิธีการดำเนินงานโครงการจากวิธีการดำเนินงานหลายๆวิธี ซึ่งมีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในสถานภาพต่างๆกัน

การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโครงการทางวิศวกรรมบางครั้งผู้ทำการวิเคราะห์ไม่สามารถรู้ค่าตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งด้วยเหตุผลบางประการ เช่น โดยปรกติ การวิเคราะห์โครงการต่าง ๆ ผู้ทำการวิเคราะห์จะรู้ระยะเวลาอายุของโครงการ และ การ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลงทุนโครงการ แต่ในบางกรณีผู้ทำการวิเคราะห์ไม่รู้หรือไม่สามารถกำหนดอายุของโครงการได้ ในกรณีเช่นนี้วิธีการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนจะได้รับการนำมาใช้เพื่อหาระยะเวลาที่จะต้องดำเนินงานโครงการเพื่อคุ้มค่าการลงทุน วิธีการดำเนินงานที่คาดว่าจะต้องใช้ระยะเวลาดำเนินงานนาน จึงจะคุ้มทุนก็มักจะไม่ได้รับการพิจารณาให้ใช้เป็นวิธีดำเนินงาน วิธีการดำเนินงานที่สามารถคุ้มทุนในระยะเวลาสั้นที่สุดจึงมักจะได้รับเลือกใช้สำหรับการดำเนินงานโครงการ

การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน นอกจากจะใช้เพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่ไม่ทราบค่าตัวแปรตัวใดตัวหนึ่ง วิธีการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนยังได้รับการนำมาใช้วิเคราะห์ตัดสินใจเลือกวิธีการดำเนินงานของโครงการเนื่องจากวิธีการดำเนินงานวิธีหนึ่งมีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์กว่าวิธีการดำเนินงานอีกวิธีหนึ่งเฉพาะในสถานภาพหนึ่ง แต่เมื่อสถานภาพต่าง ๆ เปลี่ยนไป วิธีการดำเนินงานวิธีหลังกลับมีความเหมาะสมกว่าวิธีการดำเนินงานวิธีแรก ผู้พิจารณาโครงการจึงต้องทำการวิเคราะห์โครงการ โดยการหาจุดที่วิธีการดำเนินงานทั้งสองวิธีมีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์เท่ากัน เพื่อนำมาพิจารณาตัดสินใจเลือกวิธีการดำเนินงาน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การหาจุดเปลี่ยนวิธีการดำเนินงานซึ่งมักจะเป็นกำหนดระยะเวลาโครงการที่ผู้พิจารณาโครงการจะเลือกวิธีการดำเนินงานวิธีหนึ่งแทนการเลือกวิธีการดำเนินงานอีกวิธีหนึ่ง วิธีการวิเคราะห์นี้จึงอาจเรียกได้ว่าวิธีการหาจุดเปลี่ยน แต่เนื่องจากเป็นการนำเอาหลักการและวิธีของการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนมาใช้จึงเรียกกันโดยทั่วไปว่าการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน ถึงแม้ว่าจะไม่ได้เป็นการวิเคราะห์หาจุดที่รายได้จากโครงการเท่ากับรายจ่ายของโครงการ ในกรณีที่โครงการมีวิธีการดำเนินงานมากกว่าสองวิธี จะต้องทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการดำเนินงานครั้งละคู่จนกระทั่งได้วิธีการดำเนินงานที่ดีที่สุด

6. การวิเคราะห์โดยวิธีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน

การประกอบธุรกิจ เจ้าของกิจกรรมย่อมต้องคำนึงถึงรายได้ที่จะได้รับจากการประกอบกิจการและค่าใช้จ่ายในการดำเนินกิจการ เพื่อให้ธุรกิจได้ผลกำไรเพียงพอและสามารถดำเนินกิจการต่อไป สำหรับการบริหารงานโครงการต่างๆ ของรัฐบาลซึ่งล้วนแต่เป็นกิจการสาธารณูปโภค การดำเนินงานจึงมิได้คำนึงถึงผลกำไร จุดมุ่งหมายของโครงการก็เพื่อการพัฒนาประเทศและการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บริการด้านสวัสดิการแก่ประชาชน เช่น กิจการประปามีจุดมุ่งหมาย เพื่อให้ราษฎรมีน้ำสะอาดใช้ โครงการบรรเทาหรือแก้ไขปัญหาภัยพิบัติจากอุทกภัยก็เพื่อช่วยไม่ให้ชีวิตและทรัพย์สินของราษฎรเสียหายเป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการของรัฐบาลจึงต้องคำนึงถึงผลประโยชน์ที่ราษฎรจะได้รับมากกว่าผลกำไร แต่เนื่องจากบางกรณี โครงการเหล่านี้ไม่ได้ใช้เงินจากงบประมาณแผ่นดินเท่านั้น ค่าใช้จ่ายสำหรับโครงการบางส่วนได้มาจากเงินกู้จากสถาบันการเงินหรือเงินช่วยเหลือจากองค์การต่าง ๆ โครงการต่าง ๆ จึงต้องมีการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์โดยวิธีหาอัตราส่วนของผลประโยชน์ที่ได้รับต่อค่าใช้จ่ายที่ลงทุน

ทั้งนี้ผลประโยชน์ที่ได้จะต้องมากกว่าเงินลงทุน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนจะต้องมากกว่าหนึ่ง ในกรณีที่โครงการได้รับเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายทั้งหมดจากงบประมาณแผ่นดิน รัฐบาลก็มีโครงการต่างๆ ที่จะต้องดำเนินงานเพื่อการพัฒนาประเทศมากมาย โครงการต่างๆ เหล่านี้จึงต้องมีการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์และผลประโยชน์จะต้องมากกว่าเงินลงทุนเช่นเดียวกัน

วิธีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน เป็นวิธีการวิเคราะห์อีกวิธีหนึ่งที่ผู้วิเคราะห์โครงการนิยมนำมาใช้พิจารณาตัดสินใจเลือกวิธีการดำเนินงานของโครงการ วิธีการดำเนินงานที่เลือกนี้ก็คือ วิธีที่ให้ผลประโยชน์ที่ดีที่สุด ผลประโยชน์ของโครงการ หมายถึง สิ่งที่เป็นประโยชน์ที่ได้รับเพิ่มขึ้นทั้งในด้านทรัพย์สินและสวัสดิการจากโครงการ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพที่ไม่มีการดำเนินงานโครงการ ผลประโยชน์นี้แบ่งออกเป็นสองประเภทได้ดังนี้

1) ผลประโยชน์ที่ได้รับตอบแทนจากโครงการ เช่น ผลผลิตที่ได้เพิ่มขึ้นจากโครงการชลประทานพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ เป็นต้น

2) ผลประโยชน์ที่ได้ในรูปของการลดความเสียหายและการประหยัดค่าใช้จ่าย เช่น โครงการบรรเทาอุทกภัย การประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับการคมนาคม เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การคำนวณผลประโยชน์ของโครงการจะต้องรวมผลประโยชน์ทุกๆ ผลประโยชน์ที่ได้จากโครงการ ผลประโยชน์เป็นได้ทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลง เช่น โครงการบรรเทาอุทกภัยซึ่งมีผลประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นคือ ลดความเสียหายของทรัพย์สินและอื่นๆ แต่ก็มีผลประโยชน์ที่ลดลงรวมอยู่ด้วย เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพของปุ๋ยตามธรรมชาติ ซึ่งอาจจะทำให้การเพาะปลูกได้ผลผลิตลดน้อยลง การคำนวณผลประโยชน์โครงการจึงต้องรวมผลประโยชน์ที่ลดลงนี้เข้ากับผลประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นจากโครงการดังสมการสูตร

$$B = B_P + B_N \tag{71}$$

โดยที่ B คือ ผลประโยชน์ของโครงการ

B_P คือ ผลรวมของผลประโยชน์ที่เพิ่มขึ้น

B_N คือ ผลรวมของผลประโยชน์ที่ลดลง ดังนั้น B_N จะมีเครื่องหมายลบ

หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง การคำนวณผลประโยชน์ของโครงการ นอกจากคำนวณผลประโยชน์ที่ได้จากจุดมุ่งหมายหลักของโครงการแล้ว จะต้องรวมผลประโยชน์และความเสียหายเนื่องจากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโครงการด้วยตามสูตร

$$B = B_{PP} + B_{EI} \tag{72}$$

โดยที่ B_{PP} คือ ผลรวมของผลประโยชน์ที่จะได้จากการดำเนินงานตามจุดมุ่งหมายต่างๆ ของโครงการ

B_{EI} คือ ผลรวมของผลประโยชน์และความเสียหายเนื่องจากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโครงการ

การดำเนินงานโครงการใดโครงการหนึ่ง ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโครงการมีความหมายรวมทั้งผลดีและผลเสียต่อสภาพสิ่งแวดล้อม เช่น การสร้างเขื่อนและอ่างเก็บน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านการประมง คือ อ่างเก็บน้ำกลายเป็นแหล่งน้ำที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำ ทำให้สามารถได้ผลผลิตทางประมงเพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านที่ดี แต่ในขณะเดียวกันสัตว์น้ำบางชนิดอาจจะต้องย้ายถิ่นฐานไปที่อื่นหรือสูญพันธุ์ ซึ่งก็คือ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านความเสียหาย ดังนั้น B_{EI} มีเครื่องหมายเป็นได้ทั้งบวกและลบ สิ่งที่พึงสังเกตจากสมการทั้งสองคือ ค่าของ B_{PP} จะต้องน้อยกว่าค่าของ B_P เนื่องจาก B_P คือ ผลประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด แต่ B_{PP} เป็นผลประโยชน์เฉพาะส่วนที่ได้จากการดำเนินงานตามจุดมุ่งหมายของโครงการเท่านั้น

เงินลงทุนโครงการหมายถึง ค่าใช้จ่ายทั้งหมดตลอดโครงการ เงินลงทุนโครงการจึงเป็นผลรวมของค่าใช้จ่ายลงทุนเริ่มแรกของโครงการ เช่น ค่าก่อสร้างและดอกเบี้ยระหว่างการก่อสร้างค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงาน เช่น ค่าจ้าง ค่าบำรุงรักษา ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ของโครงการตลอดจนค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงานอันเนื่องมาจาก ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโครงการเช่น ค่าชดเชยการย้ายถิ่นฐาน ค่าใช้จ่ายเพื่อแก้ไขปัญหามลภาวะ เป็นต้น เงินลงทุนโครงการจึงสามารถคำนวณได้ตามสูตร

$$C = C_{PP} + C_{PR} + C_{EI}$$

โดยที่ C คือ เงินลงทุนของโครงการ

C_{PP} คือ เงินลงทุนเพื่อการดำเนินงานตามจุดมุ่งหมายต่าง ๆ ของโครงการ

C_{PR} คือ เงินลงทุนเพื่อการดำเนินงานที่สัมพันธ์กับโครงการโดยได้ผลตอบแทน

C_{EI} คือ ค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงานอันเนื่องมาจากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การคำนวณอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน จะต้องเปลี่ยนรายได้และรายจ่ายทั้งหมดทั้งของผลประโยชน์และเงินลงทุน เป็นค่าเงินปัจจุบัน หรือ จำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี ในกรณีที่ใช้ค่าเงินปัจจุบัน อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนคำนวณได้จากสมการ

$$B/C = \frac{B_0 + \sum_{t=1}^{n} (P/F, i\%, t) B_t}{I + \sum_{t=1}^{n} (P/F, i\%, t) C_t} \qquad (74)$$

โดยที่ B_O คือ ผลรวมของผลประโยชน์ของโครงการปีปัจจุบัน

B_t คือ ผลรวมของผลประโยชน์ปีที่ t

C_t คือ ผลรวมของค่าใช้จ่ายปีที่ t

I คือ ค่าใช้จ่ายเมื่อเริ่มโครงการหรือค่าเงินลงทุน

ในกรณีที่ผลรวมของผลประโยชน์ของแต่ละปีตลอดโครงการมีค่าเท่ากัน และผลรวมของค่าใช้จ่ายแต่ละปีก็มีค่าเท่ากันเช่นกัน การคำนวณโดยวิธีจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปีจะสะดวกกว่าการใช้ค่าเงินปัจจุบัน โดยปรกติ B_O จะมีค่าเป็นศูนย์ นอกจากโครงการที่จะได้รับเงินจากการขายอุปกรณ์ของโครงการเดิม ในบางกรณีจะไม่มีรายได้จากโครงการในช่วงแรกของการดำเนินงาน เช่น โครงการที่ต้องใช้เวลาก่อสร้างนานๆ

วิธีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อการลงทุน เป็นวิธีที่มีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์และการพิจารณาตัดสินใจเลือกวิธีดำเนินงานของโครงการมากวิธีหนึ่ง แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ ในบางกรณีผู้ทำการวิเคราะห์จะต้องประสพปัญหาที่จะเลือกกำหนดผลของโครงการเป็นค่าใช้จ่าย หรือกำหนดเป็นผลประโยชน์ที่ลดลง ซึ่งมีผลต่ออัตราส่วนผลประโยชน์ต่อการลงทุนที่คำนวณได้ และอาจทำให้การตัดสินใจเลือกวิธีการดำเนินงานต่างจากวิธีการดำเนินงานที่เลือกจากผลการวิเคราะห์วิธีอื่นๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปขั้นตอนการใช้วิธีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อการลงทุนวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการมีดังนี้

1) คำนวณรายได้และรายจ่ายของวิธีการดำเนินงานโครงการทุก ๆ วิธีตามรายละเอียดที่ได้กล่าวมาแล้ว

2) กำหนดอัตราผลตอบแทนหรืออัตราคิดลด และนำมาใช้คำนวณเปลี่ยนรายได้และรายจ่ายของโครงการเป็นค่าเงินปัจจุบัน หรือจำนวนเงินเฉลี่ยเท่ากันรายปี

3) คำนวณอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อการลงทุนของวิธีการดำเนินงานของโครงการทุกๆ วิธี

4) เลือกวิธีการดำเนินงานที่อัตราส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุนมีค่ามากกกว่าหนึ่งมาพิจารณาในขั้นต่อไป

5) ในกรณีที่วิธีการดำเนินงานวิธีต่าง ๆ ของโครงการใช้ค่าใช้จ่ายลงทุนต่างกันให้นำเอาวิธีการดำเนินงานต่างๆ ที่ผ่านการพิจารณาตามขั้นตอนที่ 4 มาจัดลำดับตามค่าใช้จ่ายลงทุนจากน้อยไปหามาก

6) นำเอาวิธีการดำเนินงานลำดับที่ 1 และ 2 มาคำนวณผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายลงทุนที่เพิ่มขึ้นและ คำนวณอัตราส่วนผลประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นต่อเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้น ถ้าอัตราส่วนนี้มากกว่าหนึ่งเลือกเอาวิธีการดำเนินงานลำดับที่ 2 มาพิจารณาต่อไป ถ้าอัตราส่วนน้อยกว่าหนึ่งก็เลือกวิธีการดำเนินงานลำดับที่ 1 มาพิจารณาต่อไป

7) นำเอาวิธีการดำเนินงานลำดับที่ 1 หรือ 2 ที่เลือกตามขั้นตอนที่ 6 มาเปรียบเทียบกับวิธีการดำเนินงานลำดับที่ 3 ตามวิธีในขึ้นตอนที่ 6 และทำเช่นนี้เรื่อยไปจนครบทุกวิธีการดำเนินงานของโครงการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8) ในกรณีที่อัตราส่วนผลประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นแต่เงินลงทุนที่เพิ่มขึ้นมากกว่าหนึ่งทุกครั้งของการวิเคราะห์วิธีการดำเนินงานของโครงการที่จะได้รับพิจารณาเลือกคือวิธีการดำเนินงานที่เงินลงทุนสูงสุด แต่ถ้าอัตราส่วนผลประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าหนึ่งทุกครั้ง ก็ควรเลือกวิธีการดำเนินงานที่เงินลงทุนต่ำสุด ส่วนวิธีการดำเนินงานลำดับอื่น ๆ จะได้รับเลือกเมื่ออัตราส่วนผลประโยชน์ที่เพิ่มขึ้นต่อเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้นมีค่ามากกกว่าหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดำเนินงาน ลำดับที่ต่ำกว่า แต่ อัตราส่วนน้อยกว่าหนึ่งทุกครั้งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดำเนินงานที่ลำดับสูงกว่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 ชุด
2. แบบจำลอง EPANET Version 2.0 ของ Water Supply and Water Resources Division – Environmental Protection Agency's พร้อมคู่มือ
3. โปรแกรม Visual Studio
4. โปรแกรม Microsoft Office
5. อุปกรณ์บันทึกข้อมูล เช่น แผ่นดิสก์ เป็นต้น

วิธีการ

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำให้มีฟังก์ชั่นการใช้งานครอบคลุมทั้งด้านชลศาสตร์และด้านเศรษฐศาสตร์ให้สามารถทำงานบนระบบโปรแกรมประยุกต์บนเว็บไซต์ ซึ่งวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำให้สามารถทำงานได้บนเว็บไซต์ ประกอบด้วยการทำงานสองส่วน คือ ระบบการวิเคราะห์ข้อมูล และ ระบบการแสดงผลบนบนเว็บไซต์ และเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลระบบท่อผ่านการทำงานดังกล่าว สามารถนำผลการวิเคราะห์มาช่วยในการตัดสินใจแนวทางเลือกที่มีความเหมาะสม เพื่อลดค่าลงทุนของโครงการรวมถึงลดพลังงานไฟฟ้าในการสูบน้ำ

การเลือกขนาดท่อที่มีความเหมาะสมด้านวิศวกรรม

การวิเคราะห์ระบบท่อในที่นี้เป็นชลศาสตร์ภายใต้แรงดัน และเป็นกรณีการไหลแบบคงที่ (Steady State) ซึ่งจะใช้ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหลภายใต้แรงดันที่กล่าวไว้แล้วในขั้นตรวจ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสาร ทั้ง สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการพลังงาน (Energy Equation) รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชลศาสตร์ของเครื่องสูบน้ำ (Pump Hydraulic)

- ความดันที่พิจารณาไม่เกินความดันที่ท่อแต่ละชนิดรับได้
- เลือกชนิดท่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน
- ออกแบบระบบท่อให้ความเร็วในเส้นท่ออยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ทฤษฎีของการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำจะพิจารณา Head Loss ต่อความยาวท่อ โดยใช้ Hazen-Williams's Equation ดังสมการที่ 75

$$h_f = \frac{10.678 \cdot L}{C^{1.852} D^{4.87}} \cdot Q^{1.852} \qquad (75)$$

เมื่อ h_f คือ ค่าการสูญเสีย Head Loss (เมตร)

L คือ ความยาวเส้นท่อ (เมตร)

Q คือ อัตราการไหลของน้ำ (ลบ.ม./วินาที)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นท่อ (เมตร)

C คือ สัมประสิทธิ์สำหรับเส้นท่อ (Hazen William Coefficient) ซึ่งจำแนกตามชนิดท่อดังตารางที่ 2

การเลือกขนาดท่อที่มีความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์

เมื่อเลือกขนาดท่อที่มีความเหมาะสมด้านวิศวกรรมแล้ว นำมาวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อหาค่าลงทุนและค่าดำเนินการถูกที่สุด โดยทำการหาค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นรายปี ได้แก่ ค่าบำรุงรักษา และค่าไฟฟ้าที่เกิดจากการสูบน้ำ แล้วคิดเป็นเงินลงทุนปัจจุบันเพื่อรวมกับค่าก่อสร้างโครงการ ดังสมการที่ 76

$$\text{Total Cost} = \text{Construction Cost} + (\text{Electric Cost} + \text{Maintenance Cost}) \times \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right) \qquad (76)$$

เมื่อ Total Cost คือ ค่าลงทุนปัจจุบัน

Construction Cost คือ ค่าก่อสร้างโครงการ

Electric Cost คือ ค่าไฟฟ้าจากการสูบน้ำรายปี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Maintenance Cost คือ ค่าบำรุงรักษารายปี

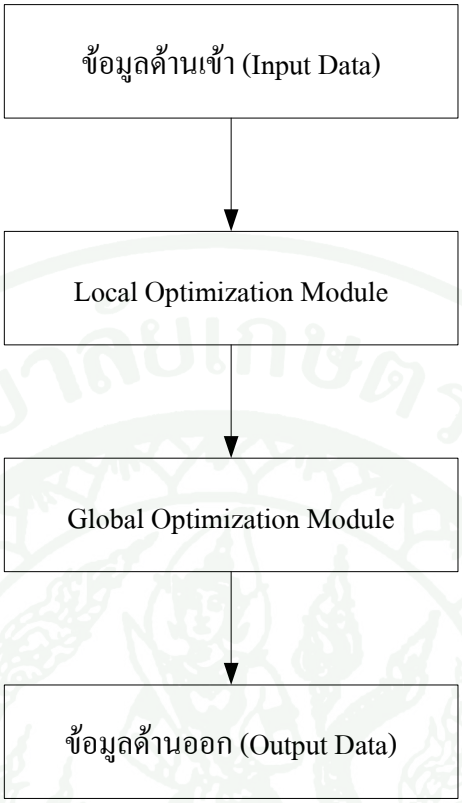
i คือ อัตราคิดลด

n คือ ระยะเวลาโครงการ

การทำงานของระบบการวิเคราะห์

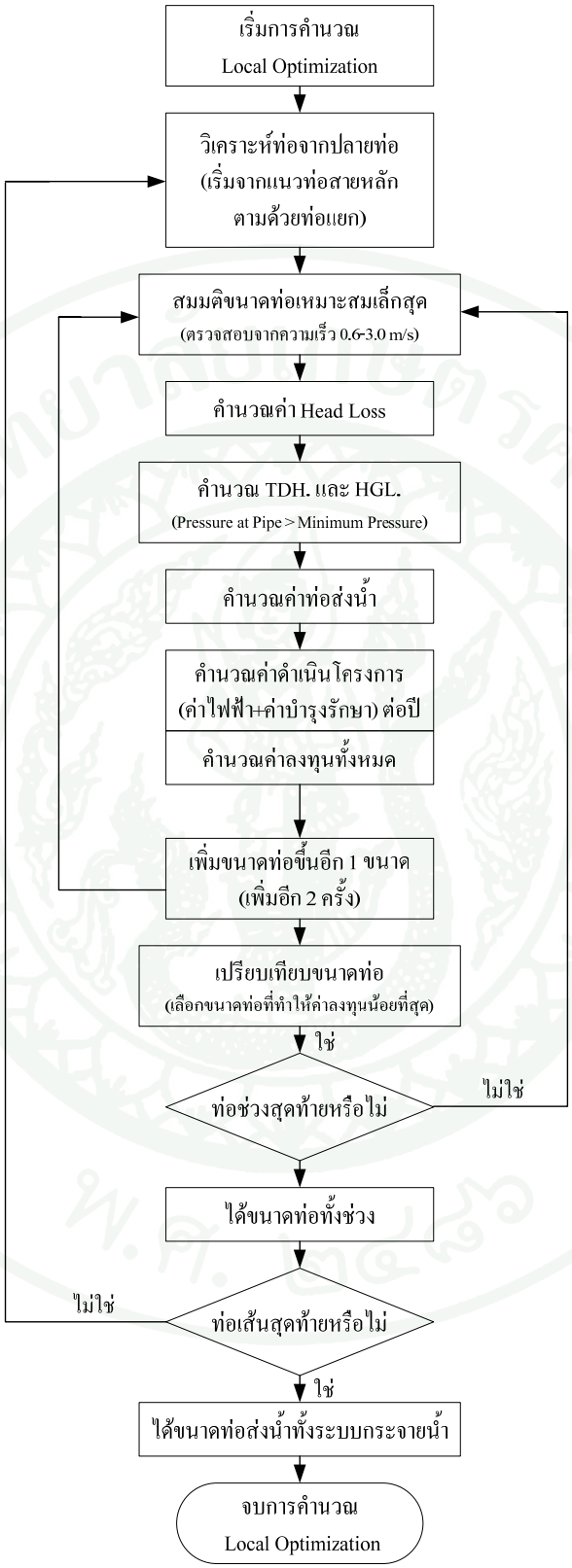
ระบบการวิเคราะห์ดังกล่าววิเคราะห์ผ่านโปรแกรม PNDM.exe ซึ่งทำเพิ่ม Source Code ด้านการแสดงผล โปรแกรมดังกล่าวสามารถทำงานได้บนระบบปฏิบัติการ Windows XP โดยต้องมีการเตรียมข้อมูลนำเข้าเป็น text file นามสกุล Input.Inp จากนั้นจะเข้าสู่การวิเคราะห์ Local Optimization เพื่อหาขนาดท่อที่เหมาะสมตามเงื่อนไขที่กำหนดทั้งทางด้านชลศาสตร์และด้านเศรษฐศาสตร์ จากนั้นจะส่งข้อมูลขนาดท่อที่เลือกใช้ไปสู่การวิเคราะห์ในส่วนของ Global Optimization เพื่อตรวจสอบ Residual Pressure ที่จุดปลายท่อของท่อส่งน้ำ ถ้า Residual Pressure มากกว่าที่กำหนดและสามารถลดขนาดท่อลงได้ให้ลดขนาดท่อลงอีก จากนั้นก็จะได้ขนาดท่อที่เลือกแล้วจะแสงดผลในรูปของ text file นามสกุล Output.Out ผังการทำงานของระบบการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 11 ถึง ภาพที่ 13

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



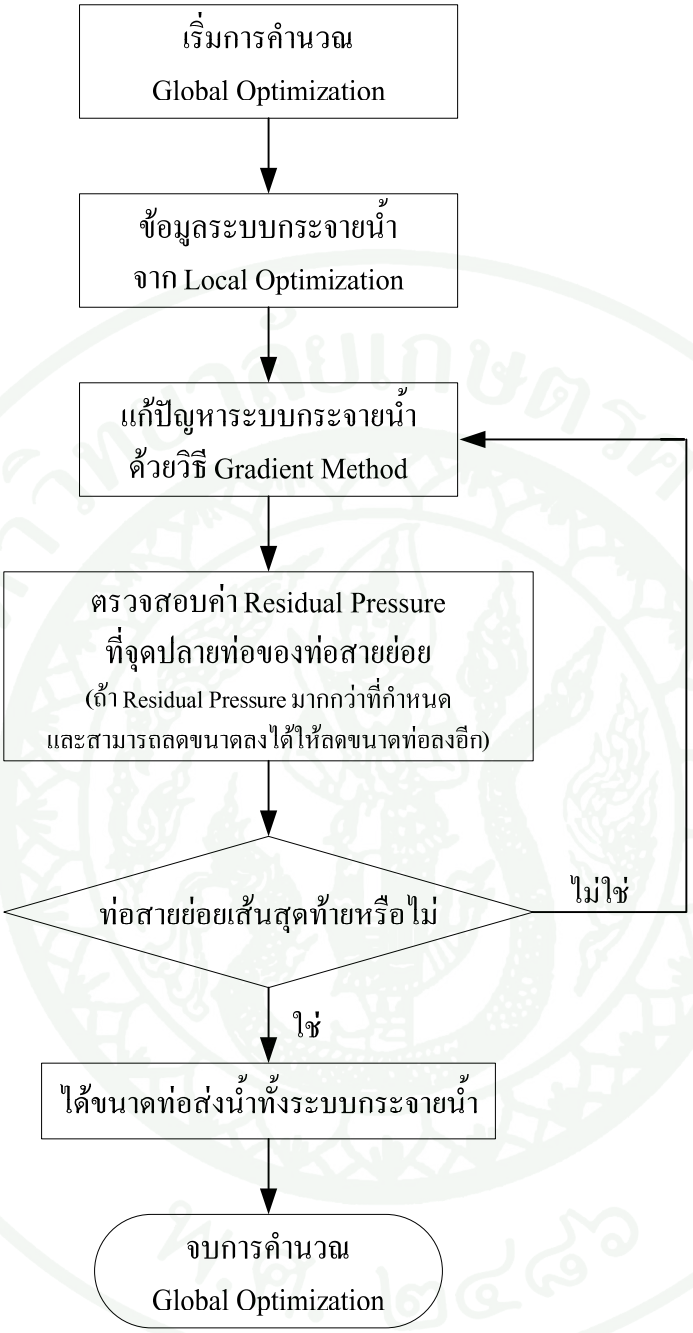
ภาพที่ 11 ผังการทำงานโดยทั่วไปของการวิเคราะห์ข้อมูล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 12 ผังการทำงานของ Local Optimization Module

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

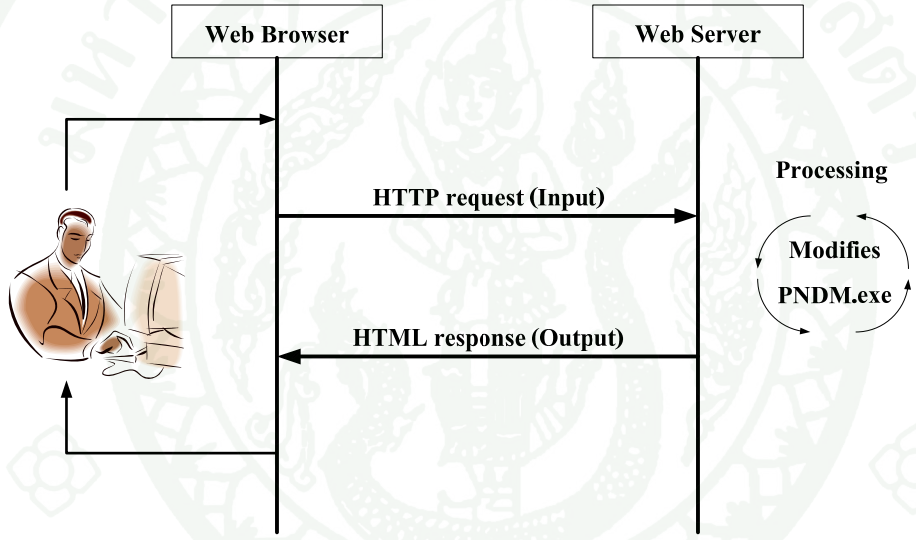


ภาพที่ 13 ผังการทำงานของ Global Optimization Module

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระบบการแสดงผลบนเว็บไซต์

ระบบการวิเคราะห์และแสดงผลผ่านเว็บไซต์ เมื่อเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เรียบร้อยแล้ว จะเป็นการส่งข้อมูลดังกล่าวเข้าสู่การวิเคราะห์ผ่านเว็บไซต์ โดยการ Upload ข้อมูลดังกล่าวไปยัง Sever เพื่อวิเคราะห์ตามระบบการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Modifies PNDM จากนั้นจะส่งผ่านผลการวิเคราะห์มายัง Browser โดยการ Download แสดงผังการทำงานโดยทั่วไปของการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านระบบ Web Calculatorดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ผังการทำงานของการแสดงผลบนเว็บไซต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

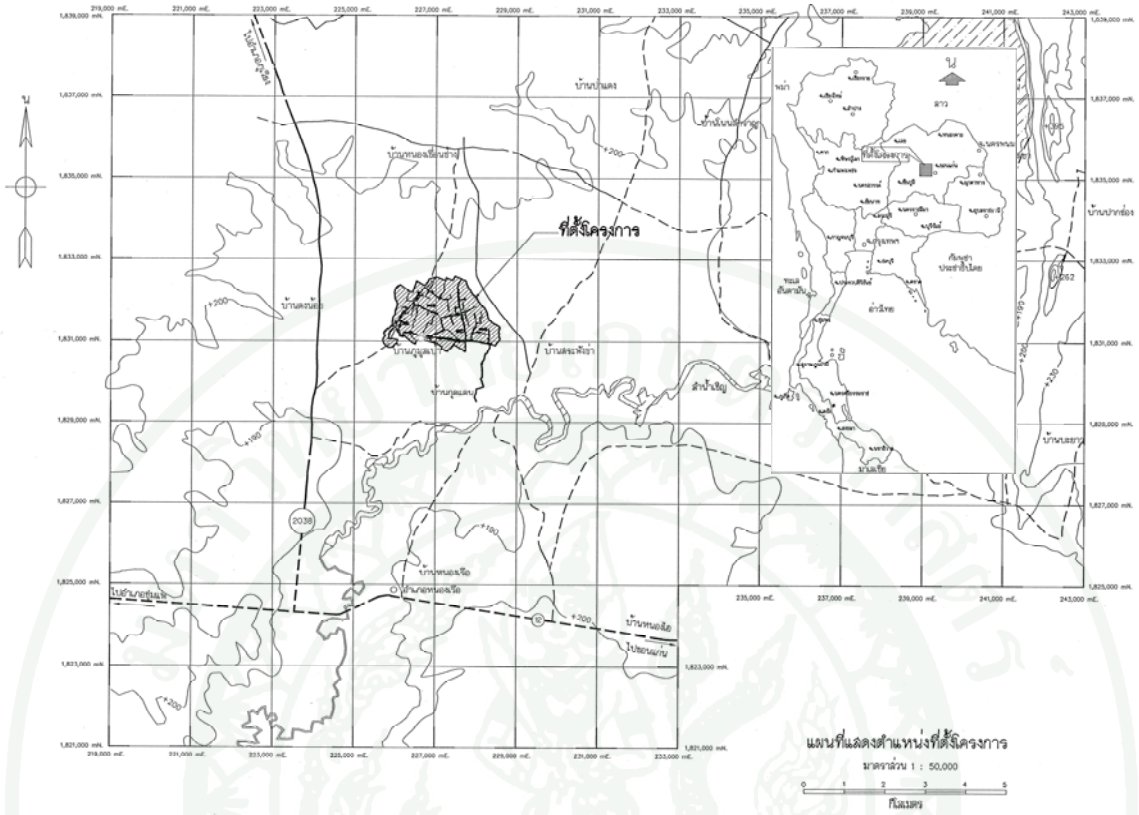
การประยุกต์ใช้แบบจำลองกับพื้นที่ศึกษา

กรณีที่ 1

โครงการชลประทานระบบท่อส่งน้ำ โครงการนำร่องเร่งด่วน โครงการย่อยที่ 01 สถานีสูบน้ำบ้านกุดแคน อ.หนองเรือ จ.ขอนแก่น ของกรมชลประทาน สูบน้ำจากลำน้ำเชิญ บริเวณบ้านกุดแคน อ.หนองเรือ จ.ขอนแก่น แสดงที่ตั้งโครงการดังรูปที่ 15 และมีรายละเอียดโครงการสรุปได้ดังนี้

1) ชื่อโครงการ โครงการชลประทานระบบท่อส่งน้ำ โครงการย่อยที่ 01 สถานีสูบน้ำบ้านกุดแคน อ.หนองเรือ จ.ขอนแก่น
2) ที่ตั้งโครงการ บ้านกุดแคน อ.หนองเรือ จ.ขอนแก่น
3) แหล่งน้ำ ลำน้ำเชิญ
4) พื้นที่โครงการ Zone1 =862 ไร่ Zone2 =993 ไร่ แสดงพื้นที่ชลประทานของโครงการดังรูปที่ 16 และ รูปที่ 17
5) ค่าชลภาระ 0.0001 ลบ.ม./วินาที/ไร่
6) ความยาวท่อส่งน้ำจากจุดสูบถึงถังพักน้ำประมาณ 8.63 กิโลเมตร
7) ขนาดท่อ
   - ท่อ HDPE PN 6.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 – 630 มม.
   - ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 – 200 มม.
8) สถานีสูบน้ำ
   - ให้เครื่องสูบน้ำทำงานวันละ 12 ชั่วโมง
   - ปริมาณน้ำที่สูบ = 0.278 ลบ.ม./วินาที จำนวน 2 เครื่อง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

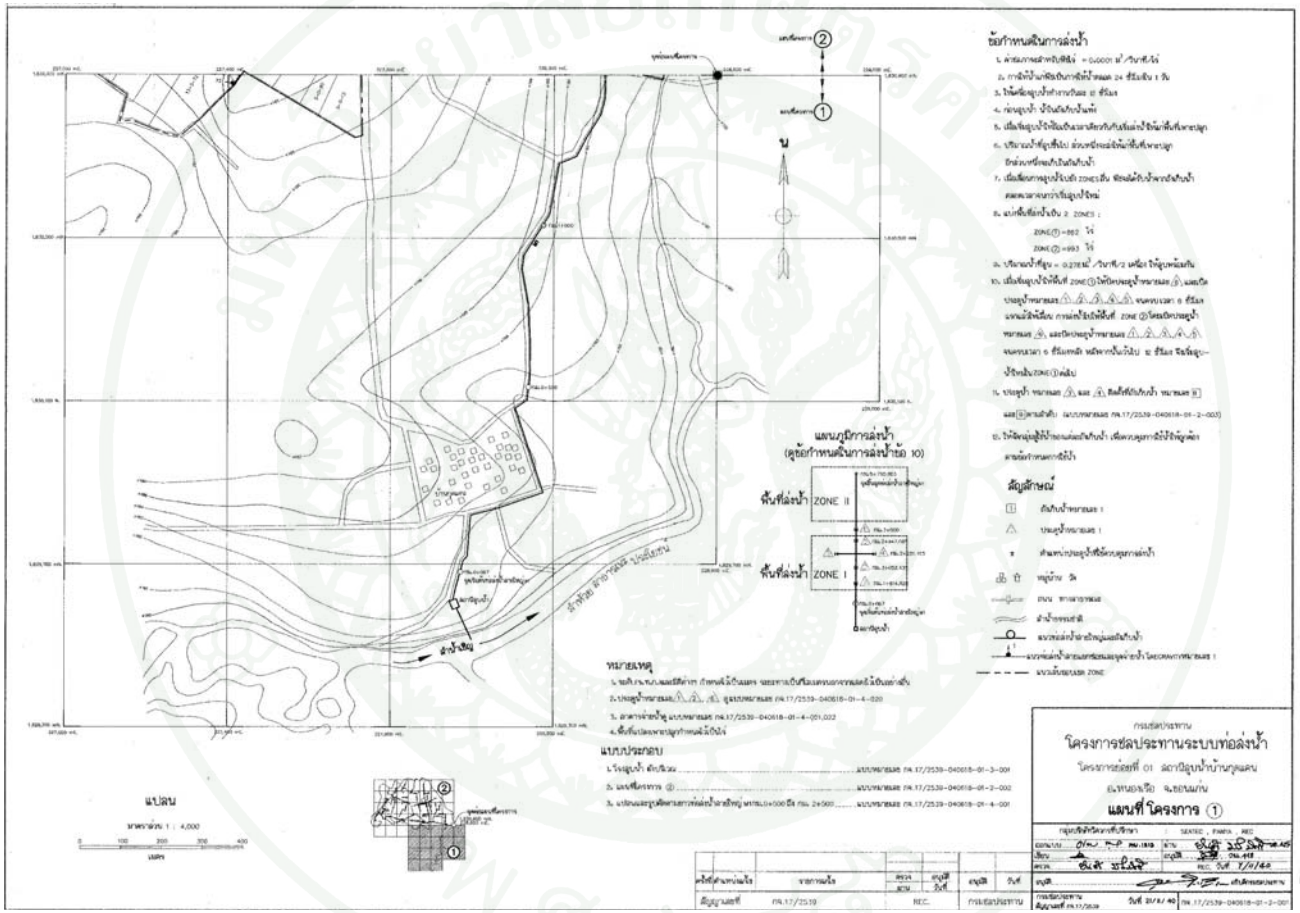


ภาพที่ 15 แผนที่แสดงตำแหน่งที่ตั้งโครงการ

ที่มา : กรมชลประทาน (2540)

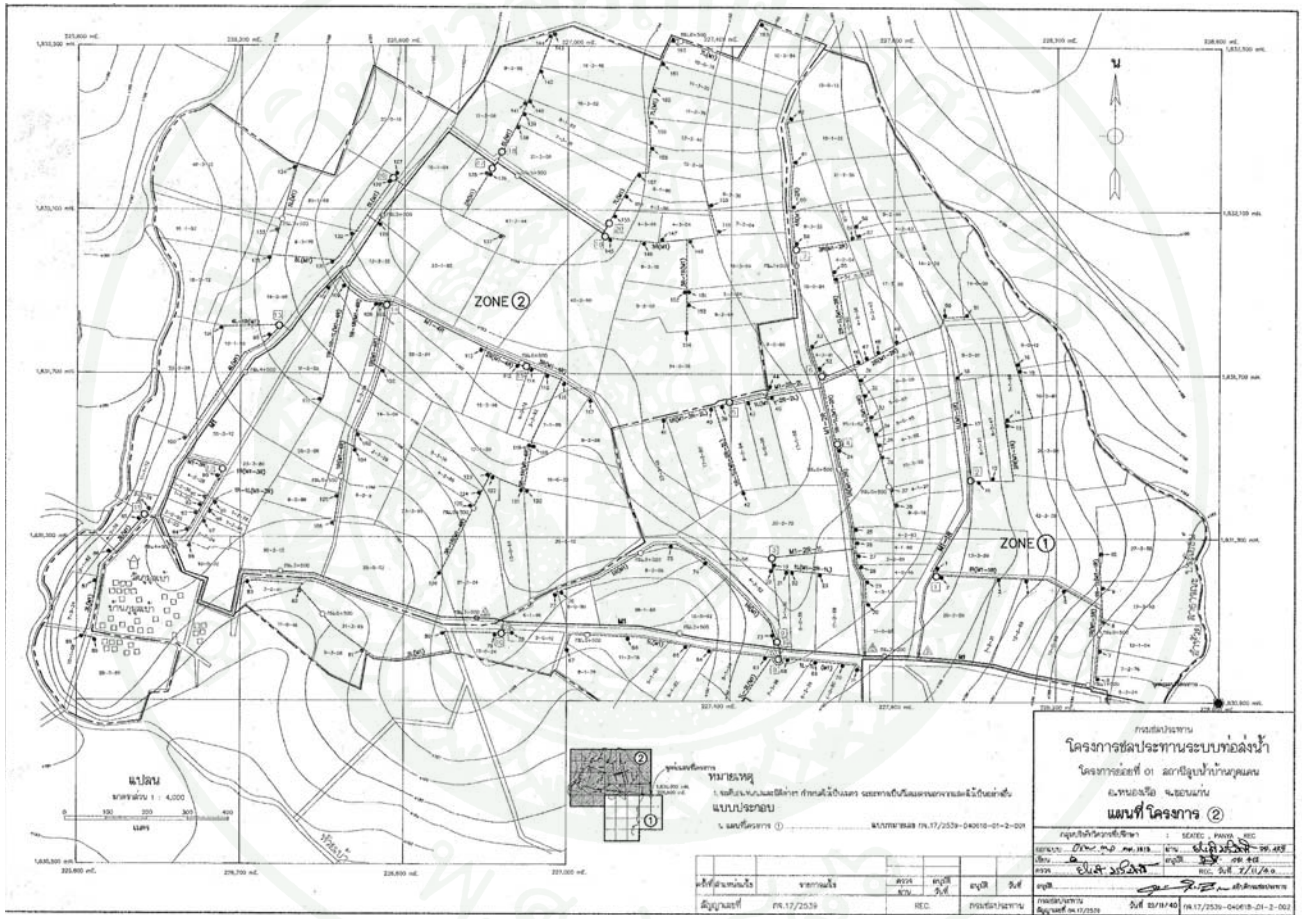
จากภาพที่ 16 และภาพที่ 17 นำมาเขียน Schematic Diagram ได้ดังภาพที่ 18 สำหรับการวิเคราะห์ระบบดังกล่าวผ่าน Web Calculator แบ่งโซนการส่งน้ำเป็น 2 โซน โดยโซนที่ 1 แสดง Schematic Diagram ดังภาพที่ 19 แล้วแสดง รายละเอียดของ Pipe Data และ Node Data ดังตารางที่ 7 และตารางที่ 8 ตามลำดับ ส่วนโซนการส่งน้ำที่ 2 Schematic Diagram ดังภาพที่ 20 แล้วแสดงรายละเอียดของ Pipe Data และ Node Data ดังตารางที่ 9 และตารางที่ 10 ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



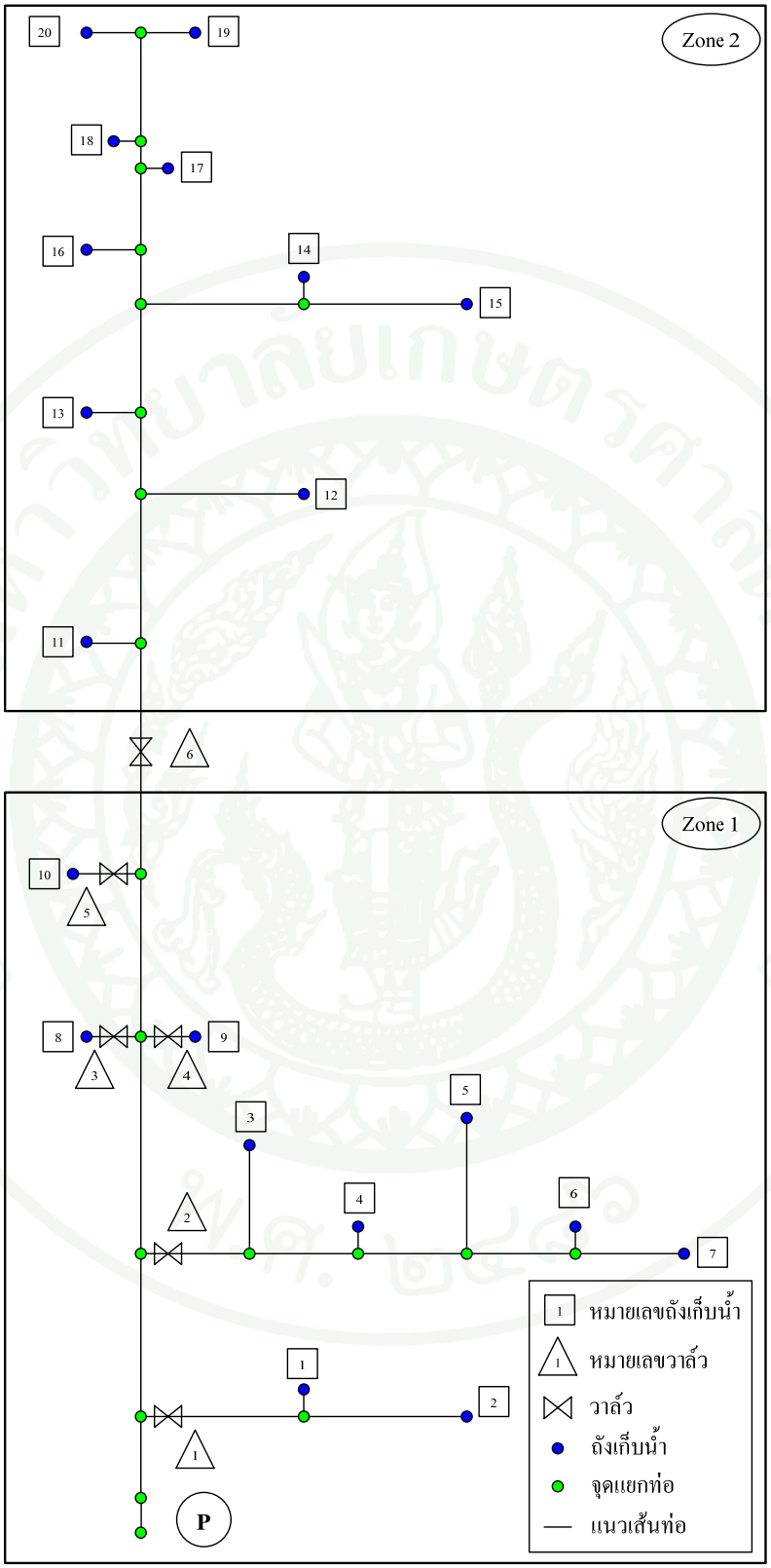
ภาพที่ 16 พื้นที่ชลประทานของโครงการส่วนที่ 1

ที่มา : กรมชลประทาน (2540)



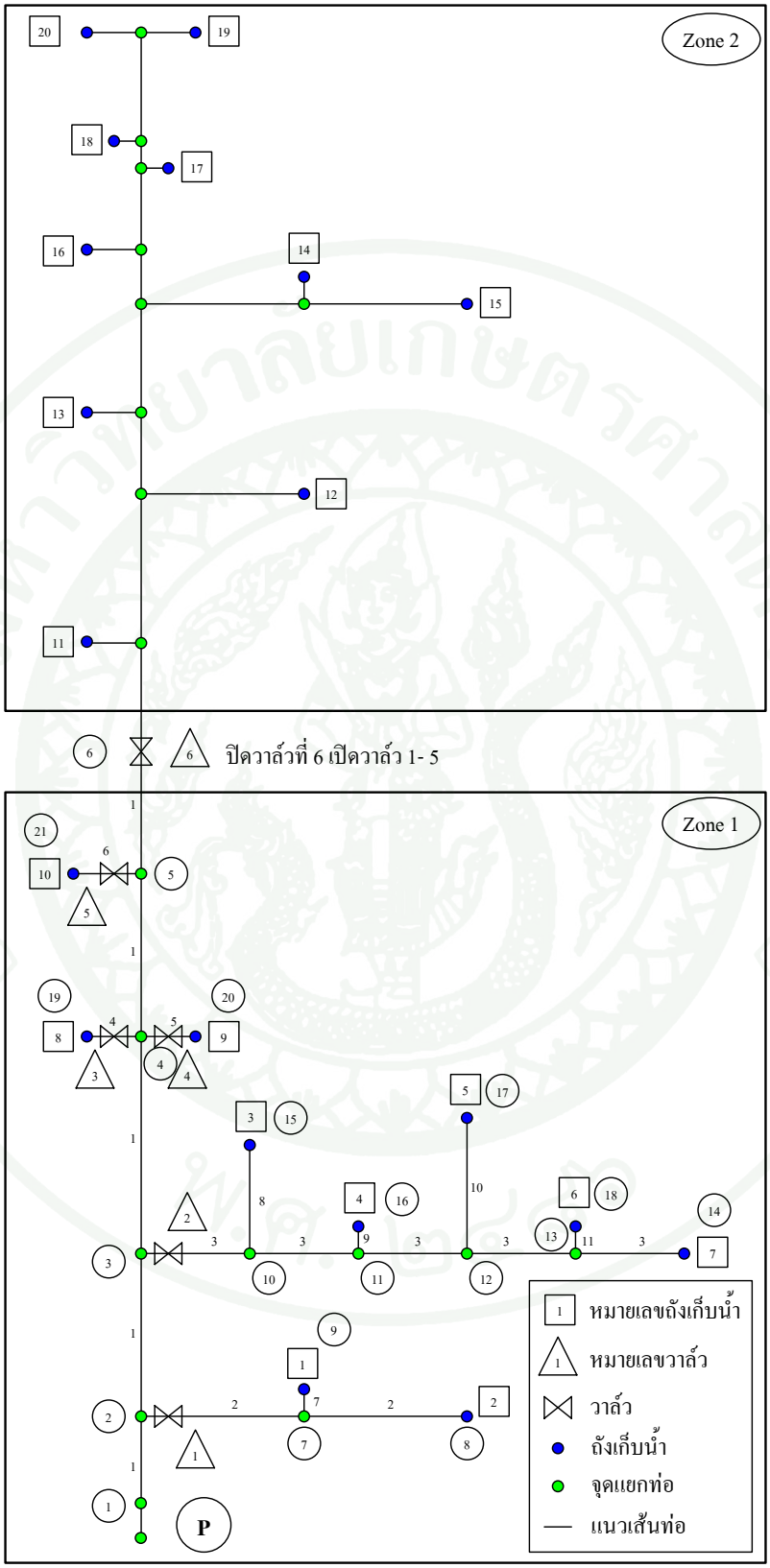
ภาพที่ 17 พื้นที่ชลประทานของโครงการส่วนที่ 2

ที่มา : กรมชลประทาน (2540)



ภาพที่ 18 Schematic Diagram โครงการชลประทานระบบท่อ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 19 Schematic Diagram โครงการชลประทานระบบท่อ โซนที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 ข้อมูลรายละเอียดของท่อผันน้ำในส่วนของ Pipe Data โซนที่ 1

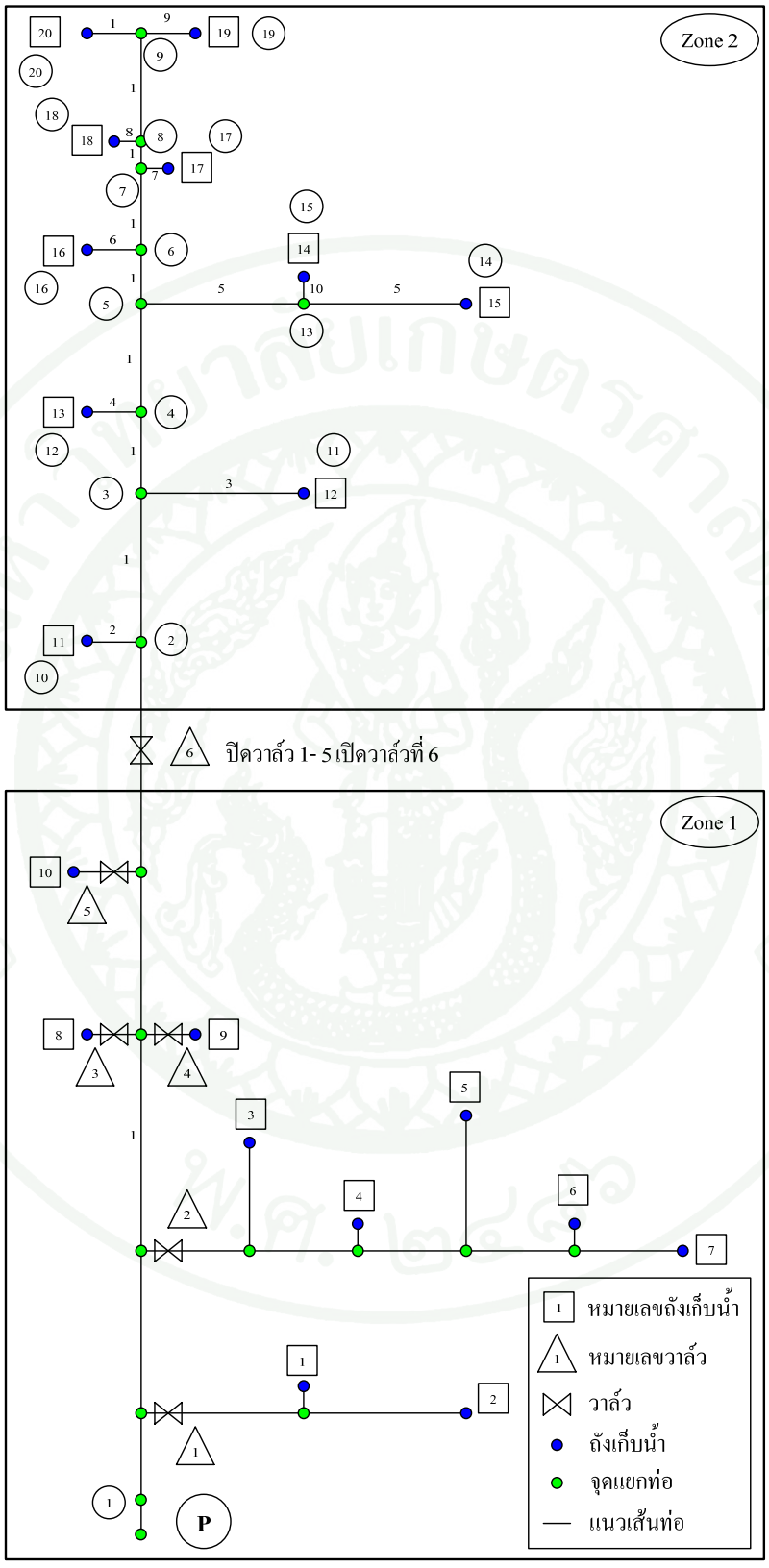
Pipe No.	From Node	To Node	Length (m.)	Line Index
1	1	2	1847.82	1
2	2	3	137.62	1
3	3	4	198.98	1
4	4	5	695.68	1
5	5	6	1133.41	1
6	2	7	230.34	2
7	7	8	201.70	2
8	3	10	271.21	2
9	10	11	289.17	3
10	11	12	127.14	3
11	12	13	20.05	3
12	13	14	328.36	3
13	4	19	10.00	4
14	4	20	15.00	5
15	5	21	16.10	6
16	7	9	10.00	7
17	10	15	185.85	8
18	11	16	10.00	9
19	12	17	224.43	10
20	13	18	10.00	11

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 8 ข้อมูลรายละเอียดของท่อผันน้ำในส่วนของ Node Data โซนที่ 1

Node No.	Elevation (m.MSL)	Demand (lps)
1	182.500	0
2	188.300	0
3	189.192	0
4	188.985	0
5	187.257	0
6	184.798	220.598
7	189.194	0
8	188.800	24.546
9	189.194	28.9655
10	190.555	0
11	190.700	0
12	190.700	0
13	190.700	0
14	190.700	17.032
15	190.500	5.299
16	190.700	22.791
17	191.800	23.91
18	190.700	15.797
19	188.985	18.042
20	189.800	11.612
21	187.257	11.699

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 20 Schematic Diagram โครงการชลประทานระบบท่อ โซนที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 ข้อมูลรายละเอียดของท่อผันน้ำในส่วนของ Pipe Data โซนที่ 2

Pipe No.	From Node	To Node	Length (m.)	Line Index
1	1	2	4013.51	1
2	2	3	168.93	1
3	3	4	398.32	1
4	4	5	190.52	1
5	5	6	253.27	1
6	6	7	328.20	1
7	7	8	19.94	1
8	8	9	311.11	1
9	2	10	21.10	2
10	3	11	99.02	3
11	4	12	20.00	4
12	5	13	163.42	5
13	13	14	341.59	5
14	13	15	10.00	11
15	6	16	21.07	6
16	7	17	20.00	7
17	8	18	30.00	8
18	9	19	15.00	9
19	9	20	30.00	10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 10 ข้อมูลรายละเอียดของท่อผันน้ำในส่วนของ Node Data โซนที่ 2

Node No.	Elevation (m.MSL)	Demand (lps)
1	182.500	0
2	184.798	0
3	185.477	0
4	188.334	0
5	189.668	0
6	191.441	0
7	193.000	0
8	193.000	0
9	193.000	0
10	184.798	12.402
11	186.000	5.837
12	188.334	8.880
13	190.625	0
14	191.800	44.941
15	190.625	28.612
16	191.441	32.182
17	193.000	19.500
18	193.000	19.007
19	193.000	32.164
20	193.000	17.074

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาเปรียบเทียบการออกแบบระบบท่อส่งน้ำด้วย Web calculator

1) การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ระบบท่อ จากข้อกำหนดการคำนวณระบบท่อส่งน้ำกรณีที่ 2 โดยเงื่อนไขการวิเคราะห์เบื้องต้นตามข้อมูลตามแบบรายละเอียดโครงการชลประทานระบบท่อส่งน้ำ โครงการนำร่องเร่งด่วน โครงการย่อยที่ 01 สถานีสูบน้ำบ้านกุดแคน อ.หนองเรือ จ.ขอนแก่น ของกรมชลประทาน มีรายละเอียดของเงื่อนไขดังนี้

- ค่าชลภาระ 0.0001 ลบ.ม./วินาที/ไร่
- เครื่องสูบน้ำทำงานวันละ 12 ชั่วโมง โซนละ 6 ชั่วโมง
- แบ่งพื้นที่ส่งน้ำเป็น 2 โซน

  โซนที่ 1 = 862 ไร่

  โซนที่ 2 = 993 ไร่
- ปริมาณน้ำที่สูบ = 0.278 ลบ.ม./วินาที/2 เครื่อง
- ค่า C ของท่อ HDPE และ ท่อ PVC = 140

เมื่อทำการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำตามเงื่อนไขที่รวบรวมได้แล้วทำการเปรียบเทียบขนาดท่อส่งน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์ผ่านระบบ Web Calculator กับขนาดตามแบบรายละเอียดของโครงการว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร

2) จากผลการวิเคราะห์ผ่านระบบ Web Calculator ในข้อ 1 นำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและอัตราการไหล ไปวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม EPANET แล้วเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์

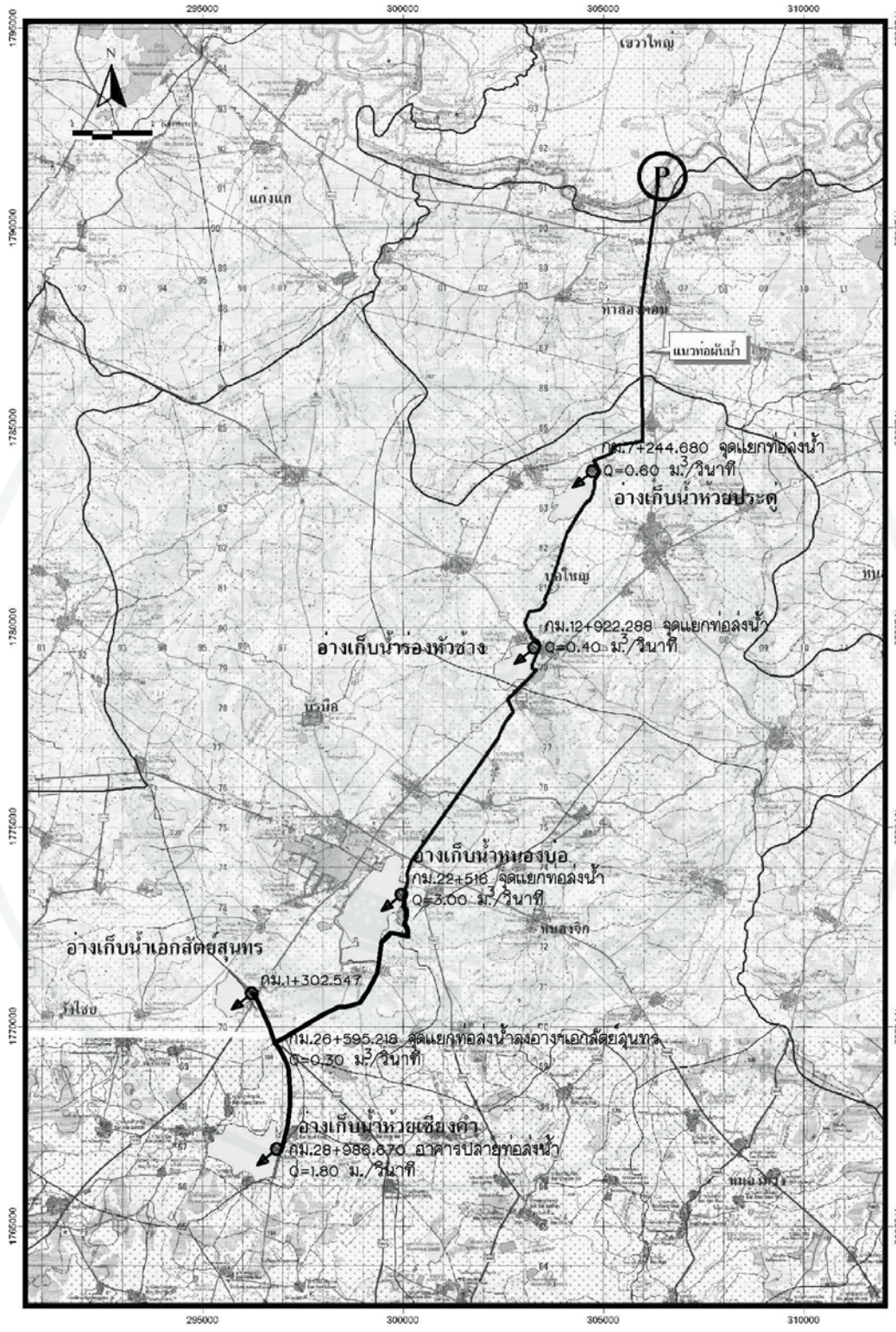
กรณีที่ 2

โครงการผันน้ำและเพิ่มพื้นที่เกษตรกรรมโดยระบบท่อผันน้ำจากลำน้ำชี บริเวณ อ.เมือง จ.มหาสารคาม ไปลงอ่างเก็บน้ำหนองบ่อ อ.บรบือ จ.มหาสารคาม ของกรมชลประทาน โครงข่ายท่อผันน้ำแสดงในภาพที่ 21 มีรายละเอียดโครงการสรุปได้ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1) ชื่อโครงการ โครงการผันน้ำและเพิ่มพื้นที่เกษตรกรรมโดยระบบท่อผันน้ำจากลำน้ำชีบริเวณ อ.เมือง จ.มหาสารคาม ไปลงอ่างเก็บน้ำหนองบ่อ อ.บรบือ จ.มหาสารคาม
2) ที่ตั้งโครงการ อ.เมือง จ.มหาสารคาม
3) แหล่งน้ำ ลำน้ำชี
4) ลักษณะโครงการ เป็นโครงการผันน้ำจากแม่น้ำชี โดยมีจุดปล่อยน้ำลงอ่างเก็บน้ำห้วยประดู่ที่กม.7+244.680 ปริมาณ 0.60 ลบ.ม./วินาที อ่างเก็บน้ำร่องหัวช้างที่ กม.12+922.288 ปริมาณ 0.40 ลบ.ม./วินาที อ่างเก็บน้ำหนองบ่อที่กม.22+516 ปริมาณ 3.00 ลบ.ม./วินาที จุดแยกอ่างเก็บน้ำสัตย์สุนทรที่กม.26+595.218 ปริมาณ 0.30 ลบ.ม./วินาที และอ่างเก็บน้ำเชียงคำที่กม.28+986.670 ปริมาณ 1.80 ลบ.ม./วินาที รวมระยะทางตามแนวท่อสายหลักประมาณ 29 กิโลเมตร
5) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผันน้ำ 500 – 1,200 มม.
6) อัตราการไหลที่สถานีสูบ 6.10 ลบ.ม. / วินาที

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

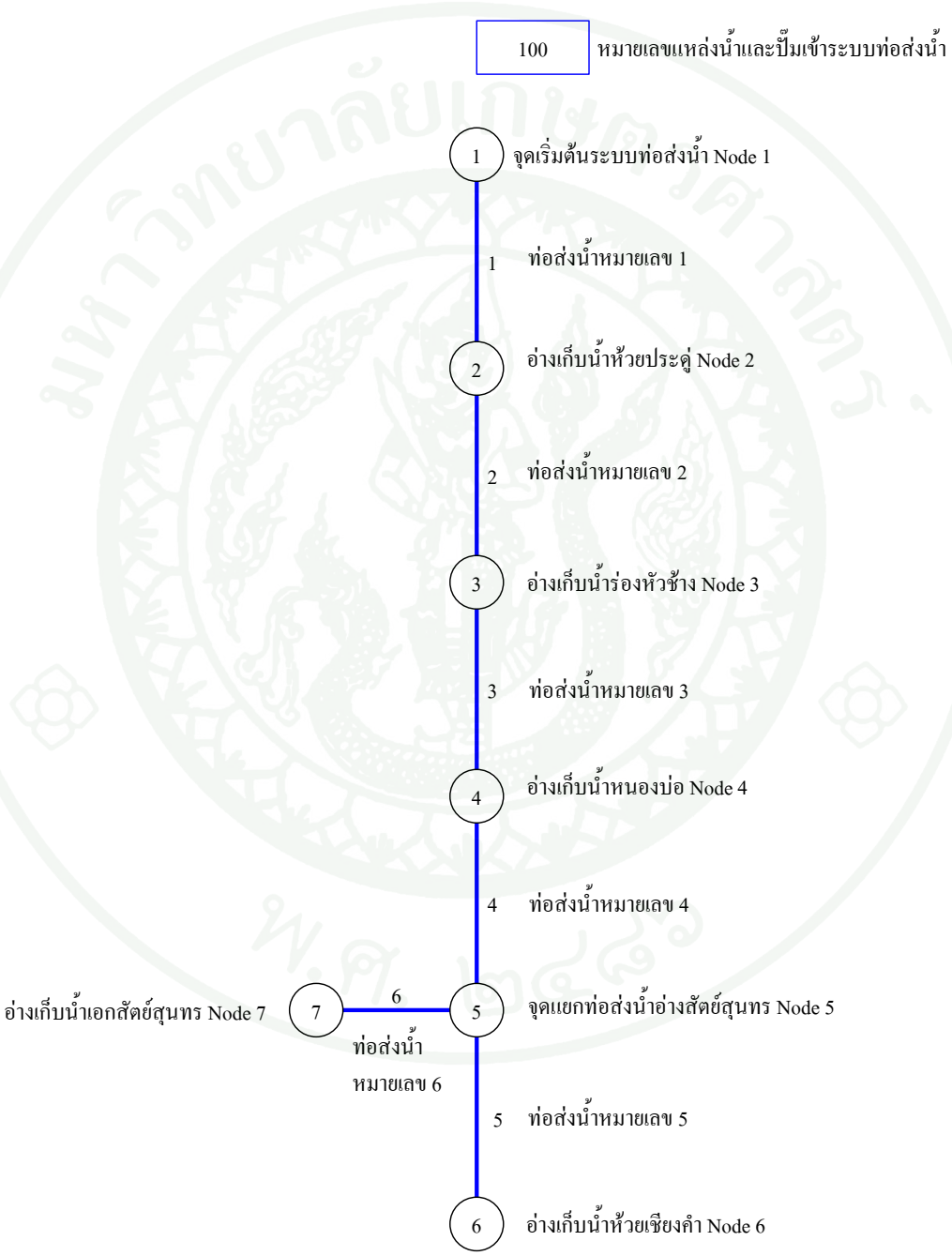


ภาพที่ 21 โครงข่ายท่อผันน้ำจากลำน้ำชีไปลงอ่างเก็บน้ำหนองบ่อ

ที่มา : กรมชลประทาน (2548)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากภาพที่ 21 นำมาเขียน Schematic Diagram สำหรับวิเคราะห์ผ่านระบบ Web Calculator ดังภาพที่ 22 แสดงรายละเอียดของ Pipe Data และ Node Data ดังตารางที่ 11 และตารางที่ 12 ตามลำดับ



ภาพที่ 22 Schematic Diagram โครงข่ายท่อผันน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 11 ข้อมูลรายละเอียดของท่อผันน้ำในส่วนของ Pipe Data

Pipe No.	From Node	To Node	Length (m.)	Line Index
1	1	2	7244.68	1
2	2	3	5677.61	1
3	3	4	9593.71	1
4	4	5	4079.22	1
5	5	6	2391.45	1
6	5	7	1302.55	2

ตารางที่ 12 ข้อมูลรายละเอียดของท่อผันน้ำในส่วนของ Node Data

Node No.	Elevation (m.MSL)	Demand (lps)
1	148.5	0
2	156.5	600
3	163.2	400
4	167.0	3000
5	189.0	0
6	178.0	1800
7	179.0	300

การศึกษาเปรียบเทียบการออกแบบระบบท่อผันน้ำด้วย Web calculator

1) การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ระบบท่อ กรณีค่าไฟฟ้าคงที่ 1.48 บาท/kw อัตราคิดลดเปลี่ยนแปลง 8% 10% และ 12% โดยกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบให้ค่าไฟฟ้าคงที่แบ่งเป็น 3 กรณีดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- กรณีที่ 1 กำหนดค่าไฟฟ้าเท่ากับ 1.48 บาท/kw. อัตราคิดลดเท่ากับ 8%
- กรณีที่ 2 กำหนดค่าไฟฟ้าเท่ากับ 1.48 บาท/kw. อัตราคิดลดเท่ากับ 10%
- กรณีที่ 3 กำหนดค่าไฟฟ้าเท่ากับ 1.48 บาท/kw. อัตราคิดลดเท่ากับ 12%

2) การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ระบบท่อ กรณีค่าไฟคงที่ 2.50 บาท/kw อัตราคิดลดเปลี่ยนแปลง 8% 10% และ 12% โดยกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบให้ค่าไฟฟ้าคงที่แบ่งเป็น 3 กรณีดังนี้

- กรณีที่ 4 กำหนดค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2.50 บาท/kw. อัตราคิดลดเท่ากับ 8%
- กรณีที่ 5 กำหนดค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2.50 บาท/kw. อัตราคิดลดเท่ากับ 10%
- กรณีที่ 6 กำหนดค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2.50 บาท/kw. อัตราคิดลดเท่ากับ 12%

3) การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ระบบท่อ กรณีค่าไฟคงที่ 3.25 บาท/kw อัตราคิดลดเปลี่ยนแปลง 8% 10% และ 12% โดยกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบให้ค่าไฟฟ้าคงที่แบ่งเป็น 3 กรณีดังนี้

- กรณีที่ 7 กำหนดค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.25 บาท/kw. อัตราคิดลดเท่ากับ 8%
- กรณีที่ 8 กำหนดค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.25 บาท/kw. อัตราคิดลดเท่ากับ 10%
- กรณีที่ 9 กำหนดค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.25 บาท/kw. อัตราคิดลดเท่ากับ 12%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

กรณีที่ 1. ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำ โครงการชลประทานระบบท่อส่งน้ำ โครงการนำร่องเร่งด่วน โครงการย่อยที่ 01 สถานีสูบน้ำบ้านกุดแคน อ.หนองเรือ จ.ขอนแก่น ของกรมชลประทาน ผ่านระบบ Web Calculator ด้วยโปรแกรม Modifies PNDM

จากการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำดังกล่าว โดยกำหนดเงื่อนไขการวิเคราะห์ด้านชลศาสตร์และเศรษฐศาสตร์ โดยใช้อัตราค่าไฟฟ้าในช่วง off peak คือ 2.18 บาท/kw อายุโครงการ 30 ปี อัตราคิดลด 8% จำนวนชั่วโมงการสูบโซนละ 6 ชั่วโมง แสดงรายละเอียดขนาดท่อที่ได้จากการวิเคราะห์ผ่านระบบ Web Calculator ด้วยโปรแกรม Modifies PNDM ดังตารางที่ 13 โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ 1 วิเคราะห์ระบบส่งน้ำโซนที่ 1 แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 14 ถึงตารางที่ 16 และส่วนที่ 2 วิเคราะห์ระบบส่งน้ำโซนที่ 2 แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 17 ถึงตารางที่ 19 และแสดงผลการวิเคราะห์ระบบส่งน้ำโซนที่ 1 ผ่านโปรแกรม EPANET 2.0 ดังตารางที่ 20 แสดงผลการวิเคราะห์ระบบส่งน้ำโซนที่ 2 ผ่านโปรแกรม EPANET 2.0 ดังตารางที่ 21 แล้วทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้านชลศาสตร์ของระบบท่อส่งน้ำที่วิเคราะห์ผ่านระบบ Web Calculator ด้วยโปรแกรม Modifies PNDM กับ ระบบท่อส่งน้ำที่วิเคราะห์ผ่านโปรแกรม EPANET 2.0 โดยทำการเปรียบ Pressure ในส่วนของ Node Data พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเป็น 0.00 % ดังตารางที่ 22 และเปรียบเทียบ Headloss/1000 ในเส้นท่อในส่วนของ Pipe Data พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเป็น 0.00 % เช่นกัน ดังตารางที่ 23 แล้วเปรียบเทียบขนาดท่อจากระบบการวิเคราะห์ผ่าน Web Calculator กับขนาดท่อจากแบบรายละเอียดของโครงการ ดังภาพที่ 23 รวมราคาท่อของโครงการ 31,672,105 บาท ค่าไฟฟ้าในการสูบน้ำทั้งสองโซน 231,821 บาท/ปี ค่าบำรุงรักษา 1,583,605 บาท/ปี เมื่อคิดเป็นราคาปัจจุบัน ราคาของโครงการรวมทั้งสิ้น 56,661,134 บาท

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 13 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator ด้วยโปรแกรม Modifies PNDM

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ มม.	ราคาขนาดท่อ บาท/ม.	ความยาวท่อ ม.	ราคาท่อ บาท
55	101.2	185.9	18,798.7
65	158.6	99.0	15,699.6
80	230.0	82.2	18,906.0
100	334.0	294.4	98,339.6
125	550.2	616.1	339,019.4
150	770.0	719.1	553,722.4
200	1,060.0	1,054.9	1,118,141.0
250	1,490.0	581.5	866,390.3
400	3,210.0	2,923.5	9,384,306.6
500	4,850.0	1,847.8	8,961,927.0
รวม		**8,404.4**	**21,375,250.6**

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 14 ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator โซนการส่งน้ำที่ 1 ด้าน Pipe Data

Pipe No.	From Node	To Node	Length (m.)	Flow (l/s)	Diameter (mm.)	Velocity (m/s)	Headloss /1000m	Construction Cost (baht)	Maintenace Cost (baht)
1	1	2	1847.82	400.30	630	1.28	2.14	13,821,693	69,108
2	2	3	137.62	346.78	500	1.77	5.05	667,433	3,337
3	3	4	198.98	261.95	500	1.33	3.00	965,053	4,825
4	4	5	695.68	232.30	500	1.18	2.40	3,374,048	16,870
5	5	6	1133.41	220.60	500	1.12	2.18	5,497,048	27,485
6	2	7	230.34	53.52	200	1.70	13.76	244,158	1,221
7	7	8	201.70	24.55	150	1.39	13.19	155,308	777
8	3	10	271.21	84.83	250	1.73	10.89	404,098	2,020
9	10	11	289.17	79.53	250	1.62	9.66	430,868	2,154
10	11	12	127.14	56.74	200	1.81	15.33	134,768	674
11	12	13	20.05	32.83	200	1.05	5.56	21,255	106
12	13	14	328.36	17.03	150	0.96	6.70	252,836	1,264
13	4	19	10.00	18.04	125	1.47	18.12	5,500	28
14	4	20	15.00	11.61	100	1.48	23.75	5,010	25
15	5	21	16.10	11.70	100	1.49	24.09	5,377	27
16	7	9	10.00	28.97	150	1.64	17.92	7,700	39
17	10	15	185.85	5.30	65	1.60	45.32	29,551	148
18	11	16	10.00	22.79	125	1.86	27.93	5,500	28
19	12	17	224.43	23.91	150	1.35	12.56	172,813	864
20	13	18	10.00	15.80	125	1.29	14.17	5,500	28

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 15 ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator โซนการส่งน้ำที่ 1 ด้านราคา

SumConstruction Cost	=	26,205,518.00	Baht
SumMaintenace Cost	=	131,027.59	Baht/Year
Electric Cost	=	108,195.88	Baht/Year
PV Cost	=	2,693,126.00	Baht
Total Cost	=	28,898,644.00	Baht

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 16 ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator โซนการส่งน้ำที่ 1 ด้าน Node Data

Node No.	Elevation (m.)	Demand (l/s)	Head (m.)	Pressure (m.)
1	182.50	0.00	249.00	66.50
2	188.30	0.00	237.78	49.48
3	189.19	0.00	235.88	46.69
4	188.99	0.00	234.25	45.26
5	187.26	0.00	229.67	42.41
6	184.80	220.60	222.90	38.10
7	189.19	0.00	225.91	36.72
8	188.80	24.55	219.95	31.15
9	189.19	28.97	225.51	36.32
10	190.55	0.00	227.81	37.26
11	190.70	0.00	220.17	29.47
12	190.70	0.00	212.87	22.17
13	190.70	0.00	212.45	21.75
14	190.70	17.03	207.52	16.82
15	190.50	5.30	210.28	19.78
16	190.70	22.79	219.40	28.70
17	191.80	23.91	194.14	2.34
18	190.70	15.80	211.30	20.60
19	188.99	18.04	233.75	44.76
20	189.80	11.61	233.27	43.47
21	187.26	11.70	228.61	41.35
100	174.00	-400.29	174.00	0.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 17 ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator โซนการส่งน้ำที่ 2 ด้าน Pipe Data

Pipe No.	From Node	To Node	Length (m.)	Flow (l/s)	Diameter (mm.)	Velocity (m/s)	Headloss /1000m	Construction Cost (baht)	Maintenace Cost (baht)
1	1	2	4013.51	220.59	500	1.12	2.18	19,465,510	97,328
2	2	3	168.93	208.19	500	1.06	1.96	819,320	4,097
3	3	4	398.32	202.35	400	1.61	5.52	1,278,620	6,393
4	4	5	190.52	193.47	400	1.54	5.08	611,563	3,058
5	5	6	253.27	119.92	400	0.95	2.09	812,997	4,065
6	6	7	328.20	87.74	315	1.13	3.76	731,886	3,659
7	7	8	19.94	68.24	250	1.39	7.28	29,708	149
8	8	9	311.11	49.23	250	1.00	3.97	463,560	2,318
9	2	10	21.10	12.40	100	1.58	26.83	7,047	35
10	3	11	99.02	5.84	65	1.76	54.24	15,744	79
11	4	12	20.00	8.88	80	1.77	42.87	4,600	23
12	5	13	163.42	73.55	250	1.50	8.36	243,496	1,217
13	13	14	341.59	44.94	200	1.43	9.95	362,088	1,810
14	13	15	10.00	28.61	150	1.62	17.51	7,700	39
15	6	16	21.07	32.18	150	1.82	21.77	16,224	81
16	7	17	20.00	19.50	125	1.59	20.93	11,000	55
17	8	18	30.00	19.01	125	1.55	19.96	16,500	83
18	9	19	15.00	32.16	150	1.82	21.75	11,550	58
19	9	20	30.00	17.07	150	0.97	6.73	23,100	116

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 18 ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator โซนการส่งน้ำที่ 2 ด้านราคา

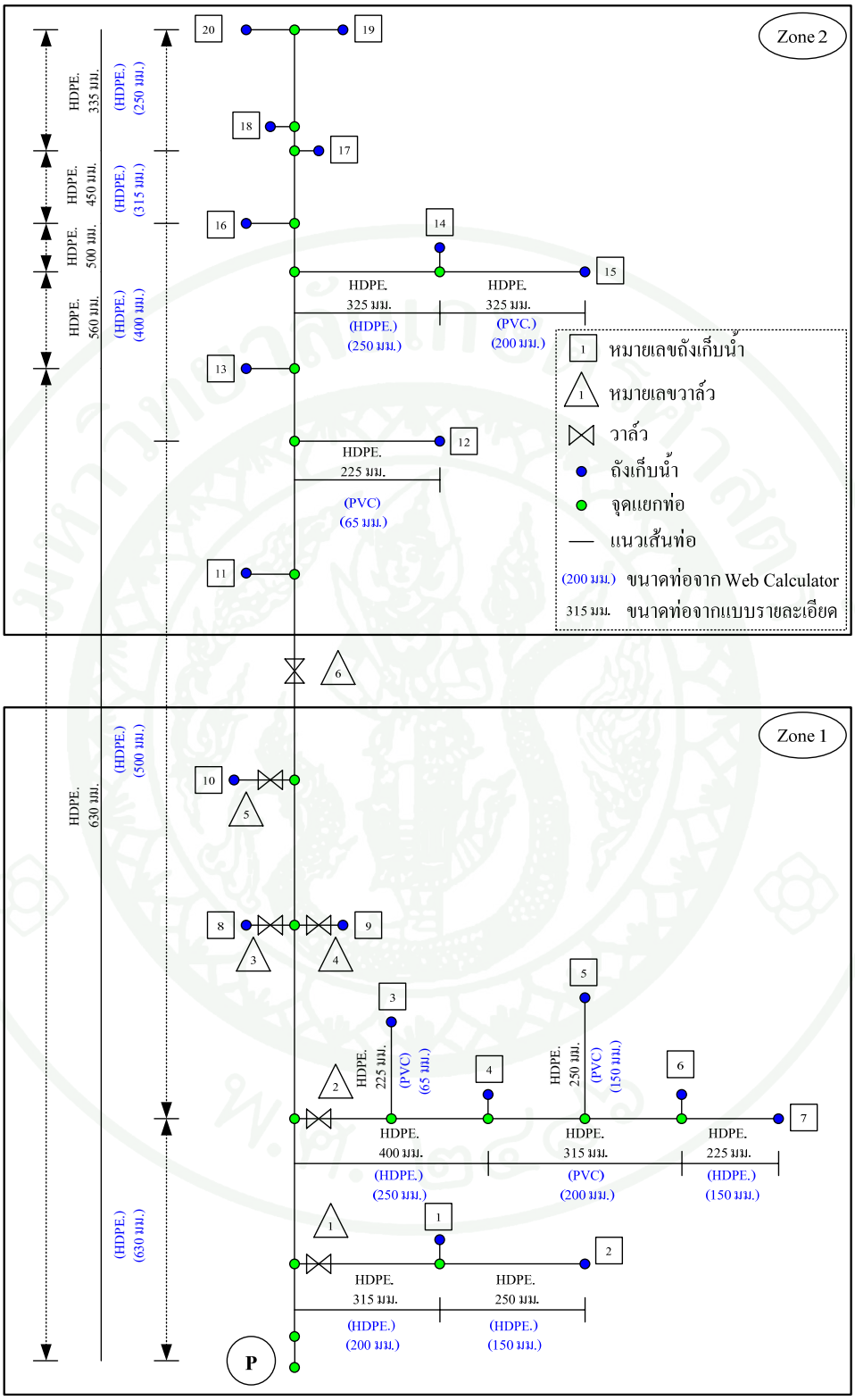
SumConstruction Cost	=	24,932,212.00	Baht
SumMaintenace Cost	=	124,661.05	Baht/Year
Electric Cost	=	123,624.65	Baht/Year
PV Cost	=	2,795,146.50	Baht
Total Cost	=	27,727,358.00	Baht

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 19 ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านระบบ Web Calculator โซนการส่งน้ำที่ 2 ด้าน Node Data

Node No.	Elevation (m.)	Demand (l/s)	Head (m.)	Pressure (m.)
1	182.50	0.00	211.00	28.50
2	184.80	0.00	202.24	17.44
3	185.48	0.00	201.90	16.42
4	188.33	0.00	199.71	11.38
5	189.67	0.00	198.74	9.07
6	191.44	0.00	198.21	6.77
7	193.00	0.00	196.97	3.97
8	193.00	0.00	196.83	3.83
9	193.00	0.00	195.59	2.59
10	184.80	12.40	201.67	16.87
11	186.00	5.84	196.53	10.53
12	188.33	8.88	198.85	10.52
13	190.62	0.00	197.37	6.75
14	191.80	44.94	193.97	2.17
15	190.62	28.61	197.20	6.58
16	191.44	32.18	197.75	6.31
17	193.00	19.50	196.55	3.55
18	193.00	19.01	196.23	3.23
19	193.00	32.16	195.27	2.27
20	193.00	17.07	195.39	2.39
100	174.00	-220.60	174.00	0.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 23 เปรียบเทียบขนาดท่อจากการวิเคราะห์ผ่าน Web Calculator กับขนาดท่อจากแบบรายละเอียดของโครงการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อนำระบบโครงข่ายท่อส่งน้ำโซนที่ 1 และ โซนที่ 2 ดังกล่าว มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม EPANET โดยใช้ขนาดท่อที่ได้จากผลการวิเคราะห์ผ่านระบบ Web Calculator จะได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 20 และ ตารางที่ 21 จากนั้นนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยระบบ Web Calculator กับ การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม EPANET แสดงผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 22 และ ตารางที่ 23

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 20 ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านโปรแกรม EPANET โซนการส่งน้ำที่ 1 ด้าน Pipe Data และ Node Data

Node Results:

Node	Demand L/s	Head m	Pressure m	
1	0.0	209.00	26.50	
2	0.0	205.05	16.75	
3	0.0	204.36	15.17	
4	0.0	203.76	14.77	
5	0.0	202.09	14.83	
6	220.6	199.61	14.81	
7	0.0	201.88	12.69	
8	24.6	199.22	10.42	
9	29.0	201.70	12.51	
10	0.0	201.40	10.85	
11	0.0	198.61	7.91	
12	0.0	196.66	5.96	
13	0.0	196.55	5.85	
14	17.0	194.35	3.65	
15	5.3	192.98	2.48	
16	22.8	198.33	7.63	
17	23.9	193.84	2.04	
18	15.8	196.41	5.71	
19	18.0	203.58	14.59	
20	11.6	203.40	13.60	
21	11.7	201.70	14.44	
100	-400.3	174.00	0.00	Reservoir

Link Results:

Link	Flow L/s	Velocity m/s	Headloss /1000m	
1	400.3	1.28	2.14	
2	346.8	1.77	5.05	
3	262.0	1.33	3.00	
4	232.3	1.18	2.40	
5	220.6	1.12	2.18	
6	53.5	1.70	13.76	
7	24.6	1.39	13.19	
8	84.8	1.73	10.89	
9	79.5	1.62	9.66	
10	56.7	1.81	15.33	
11	32.8	1.05	5.57	
12	17.0	0.96	6.70	
13	18.0	1.47	18.12	
14	11.6	1.48	23.75	
15	11.7	1.49	24.09	
16	29.0	1.64	17.92	
17	5.3	1.60	45.32	
18	22.8	1.86	27.93	
19	23.9	1.35	12.56	
20	15.8	1.29	14.17	
100	400.3	0.00	-35	Pump

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 21 ผลการออกแบบระบบท่อส่งน้ำผ่านโปรแกรม EPANET โซนการส่งน้ำที่ 2 ด้าน Pipe Data และ Node Data

Node Results:

Node	Demand L/s	Head m	Pressure m	
1	0.0	211.00	28.50	
2	0.0	202.24	17.44	
3	0.0	201.90	16.42	
4	0.0	199.71	11.38	
5	0.0	198.74	9.07	
6	0.0	198.21	6.77	
7	0.0	196.97	3.97	
8	0.0	196.83	3.83	
9	0.0	195.59	2.59	
10	12.4	201.67	16.87	
11	5.8	196.53	10.53	
12	8.9	198.85	10.52	
13	0.0	197.37	6.75	
14	44.9	193.97	2.17	
15	28.6	197.20	6.58	
16	32.2	197.75	6.31	
17	19.5	196.55	3.55	
18	19.0	196.23	3.23	
19	32.2	195.27	2.27	
20	17.1	195.39	2.39	
100	-220.6	174.00	0.00	Reservoir

Link Results:

Link	Flow L/s	Velocity m/s	Headloss /1000m	
1	220.6	1.12	2.18	
2	208.2	1.06	1.96	
3	202.4	1.61	5.52	
4	193.5	1.54	5.08	
5	119.9	0.95	2.09	
6	87.7	1.13	3.76	
7	68.2	1.39	7.28	
8	49.2	1.00	3.97	
9	12.4	1.58	26.83	
10	5.8	1.76	54.24	
11	8.9	1.77	42.87	
12	73.6	1.50	8.36	
13	44.9	1.43	9.95	
14	28.6	1.62	17.51	
15	32.2	1.82	21.77	
16	19.5	1.59	20.93	
17	19.0	1.55	19.96	
18	32.2	1.82	21.75	
19	17.1	0.97	6.73	
100	220.6	0.00	-37	Pump

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 22 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำผ่าน ระบบ Web Calculator และ โปรแกรม EPANET ในส่วนของ Node Data

Node No.	Elevation (m.MSL.)	Demand (lps)	Web Calculator Pressure (m.)	EPANET Pressure (m.)	% Difference
Zone 1					
1	182.5	0	26.5	26.5	0.00
2	188.3	0	16.75	16.75	0.00
3	189.19	0	15.17	15.17	0.00
4	188.99	0	14.77	14.77	0.00
5	187.26	0	14.83	14.83	0.00
6	184.8	220.6	14.81	14.81	0.00
7	189.19	0	12.69	12.69	0.00
8	188.8	24.55	10.42	10.42	0.00
9	189.19	28.97	12.51	12.51	0.00
10	190.55	0	10.85	10.85	0.00
11	190.7	0	7.91	7.91	0.00
12	190.7	0	5.96	5.96	0.00
13	190.7	0	5.85	5.85	0.00
14	190.7	17.03	3.65	3.65	0.00
15	190.5	5.3	2.48	2.48	0.00
16	190.7	22.79	7.63	7.63	0.00
17	191.8	23.91	2.04	2.04	0.00
18	190.7	15.8	5.71	5.71	0.00
19	188.99	18.04	14.59	14.59	0.00
20	189.8	11.61	13.6	13.6	0.00
21	187.26	11.7	14.44	14.44	0.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 22 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำระหว่างผ่าน ระบบ Web Calculator และ โปรแกรม EPANET ในส่วนของ Node Data (ต่อ)

Node No.	Elevation (m.MSL.)	Demand (lps)	Web Calculator Pressure (m.)	EPANET Pressure (m.)	% Difference
Zone 2					
1	182.5	0	28.5	28.5	0.00
2	184.8	0	17.44	17.44	0.00
3	185.48	0	16.42	16.42	0.00
4	188.33	0	11.38	11.38	0.00
5	189.67	0	9.07	9.07	0.00
6	191.44	0	6.77	6.77	0.00
7	193	0	3.97	3.97	0.00
8	193	0	3.83	3.83	0.00
9	193	0	2.59	2.59	0.00
10	184.8	12.4	16.87	16.87	0.00
11	186	5.84	10.53	10.53	0.00
12	188.33	8.88	10.52	10.52	0.00
13	190.62	0	6.75	6.75	0.00
14	191.8	44.94	2.17	2.17	0.00
15	190.62	28.61	6.58	6.58	0.00
16	191.44	32.18	6.31	6.31	0.00
17	193	19.5	3.55	3.55	0.00
18	193	19.01	3.23	3.23	0.00
19	193	32.16	2.27	2.27	0.00
20	193	17.07	2.39	2.39	0.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 23 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำระหว่างผ่าน ระบบ Web Calculator และ โปรแกรม EPANET ในส่วนของ Pipe Data

Pipe No.	Length (m.)	Diameter (mm.)	Web Calculator Headloss/1000 m.	EPANET Headloss/1000 m.	% Difference
Zone 1					
1	1847.8	630	2.14	2.14	0.00
2	137.62	500	5.05	5.05	0.00
3	198.98	500	3	3	0.00
4	695.68	500	2.4	2.4	0.00
5	1133.4	500	2.18	2.18	0.00
6	230.34	200	13.76	13.76	0.00
7	201.7	150	13.19	13.19	0.00
8	271.21	250	10.89	10.89	0.00
9	289.17	250	9.66	9.66	0.00
10	127.14	200	15.33	15.33	0.00
11	20.05	200	5.56	5.57	0.18
12	328.36	150	6.7	6.7	0.00
13	10	125	18.12	18.12	0.00
14	15	100	23.75	23.75	0.00
15	16.1	100	24.09	24.09	0.00
16	10	150	17.92	17.92	0.00
17	185.85	65	45.32	45.32	0.00
18	10	125	27.93	27.93	0.00
19	224.43	150	12.56	12.56	0.00
20	10	125	14.17	14.17	0.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 23 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำระหว่างผ่าน ระบบ Web Calculator และ โปรแกรม EPANET ในส่วนของ Pipe Data (ต่อ)

Pipe No.	Length (m.)	Diameter (mm.)	Web Calculator Headloss/1000 m.	EPANET Headloss/1000 m.	% Difference
Zone 2					
1	4013.5	500	2.18	2.18	0.00
2	168.93	500	1.96	1.96	0.00
3	398.32	400	5.52	5.52	0.00
4	190.52	400	5.08	5.08	0.00
5	253.27	400	2.09	2.09	0.00
6	328.2	315	3.76	3.76	0.00
7	19.94	250	7.28	7.28	0.00
8	311.11	250	3.97	3.97	0.00
9	21.1	100	26.83	26.83	0.00
10	99.02	65	54.24	54.24	0.00
11	20	80	42.87	42.87	0.00
12	163.42	250	8.36	8.36	0.00
13	341.59	200	9.95	9.95	0.00
14	10	150	17.51	17.51	0.00
15	21.07	150	21.77	21.77	0.00
16	20	125	20.93	20.93	0.00
17	30	125	19.96	19.96	0.00
18	15	150	21.75	21.75	0.00
19	30	150	6.73	6.73	0.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กรณีที่ 2. ผลการออกแบบระบบท่อผันน้ำ โครงการผันน้ำและเพิ่มพื้นที่เกษตรกรรมโดยระบบท่อผันน้ำจากลำน้ำชี บริเวณ อ.เมือง จ.มหาสารคาม ผ่านระบบ Web Calculator ด้วยแบบจำลอง Modifies PNDM

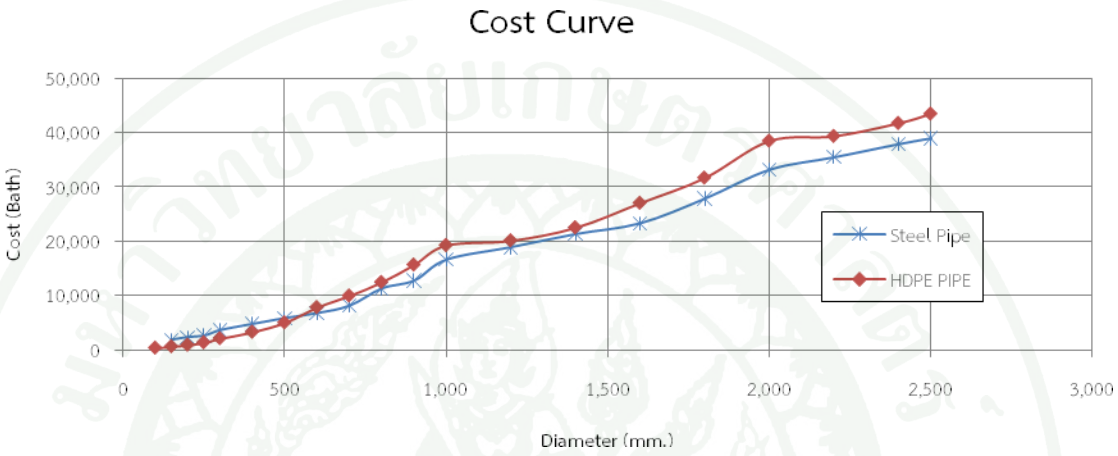
กรณีนี้ได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากการใช้ราคาท่อสองชนิด คือ ท่อเหล็กและท่อ HDPE ขนาดท่อตั้งแต่ 0.1-1.0 เมตร ประเมินโดยบริษัทที่ปรึกษา ส่วนขนาดท่อที่มากกว่า 1.0 ม. ใช้ค่าโดยประมาณเบื้องต้น แสดงการเปรียบเทียบราคากับขนาดท่อดังภาพที่ 24 สำหรับกรณีการวิเคราะห์ ใช้อัตราค่าไฟฟ้า 3 ค่า คือ 1.48 2.50 และ 3.25 บาทต่อกิโลวัตต์ ใช้อัตราคิดลด 8 10 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุโครงการ 30 ปี แสดงผลการวิเคราะห์เมื่อชนิดท่อที่เลือกใช้เป็นท่อ HDPE PN10 ดังตารางที่ 24 ชนิดท่อที่เลือกใช้เป็นท่อเหล็กดังตารางที่ 25 และชนิดท่อที่เลือกใช้เป็นท่อเหล็กร่วมกับท่อ HDPE PN10 ตารางที่ 26 รวมถึงกราฟเปรียบเทียบราคาโครงการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราค่าไฟฟ้าของท่อชนิดแต่ละชนิด ดังภาพที่ 24 ถึงภาพที่ 26 ตามลำดับ

จากตารางที่ 24 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์เมื่อเลือกชนิดท่อเป็นท่อ HDPE PN10 พบว่าขนาดท่อมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อราคาค่าไฟฟ้ามีการปรับในอัตราที่สูงขึ้น พร้อมทั้งมีผลทำให้ราคารวมของโครงการแปรผันตามไปด้วย ดังภาพที่ 24 ในทำนองเดียวกันเมื่อเปลี่ยนท่อเป็นท่อเหล็ก และท่อเหล็กร่วมกับท่อ HDPE PN10 ก็มีลักษณะเดียวกันข้างต้น

จากตารางที่ 24 ตารางที่ 25 และตารางที่ 26 แสดงขนาดที่โครงการเลือกใช้ โดยเปลี่ยนชนิดท่อตามผลการศึกษา และใช้อัตราค่าไฟฟ้า 1.48 บาท/kw และ อัตราคิดลด 8% พบว่าเมื่อชนิดท่อเป็นท่อ HDPE PN10 มีผลให้ราคารวมของโครงการเท่ากับ 1,023.4 ล้านบาท สูงกว่าขนาดท่อที่ผ่านระบบการวิเคราะห์ของโปรแกรม modifies PNDM ซึ่งเท่ากับ 996.3 ล้านบาท ส่วนเมื่อชนิดท่อเป็นท่อเหล็ก มีผลให้ราคารวมของโครงการเท่ากับ 914.0 ล้านบาท ต่ำกว่าขนาดท่อที่ผ่านระบบการวิเคราะห์ของโปรแกรม modifies PNDM ซึ่งเท่ากับ 1,024.5 ล้านบาท และเมื่อชนิดท่อเป็นท่อเหล็กร่วมกับท่อ HDPE PN10 มีผลให้ราคารวมของโครงการเท่ากับ 905.2 ล้านบาท ต่ำกว่าขนาดท่อที่ผ่านระบบการวิเคราะห์ของโปรแกรม modifies PNDM ซึ่งเท่ากับ 1,022.0 ล้านบาท ในกรณีหลัง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทั้งสองกรณีที่ผลด้านราคาของระบบการวิเคราะห์ของโปรแกรม modifies PNDM มีค่าสูงกว่าขนาดท่อของโครงการ อาจเกิดจากราคาค่าไฟฟ้ามีค่าต่ำจึงยังไม่มีผลกับราคาโครงการมากนักเมื่อเทียบกับราคาท่อส่งน้ำที่มีค่าสูงกว่ามาก



ภาพที่ 24 กราฟเปรียบเทียบราคาระหว่างท่อเหล็ก กับท่อ HDPE PN 10

ที่มา : บริษัทโปรเกรส เทคโนโลยี คอนซัลแท็นส์ จำกัด (2554)

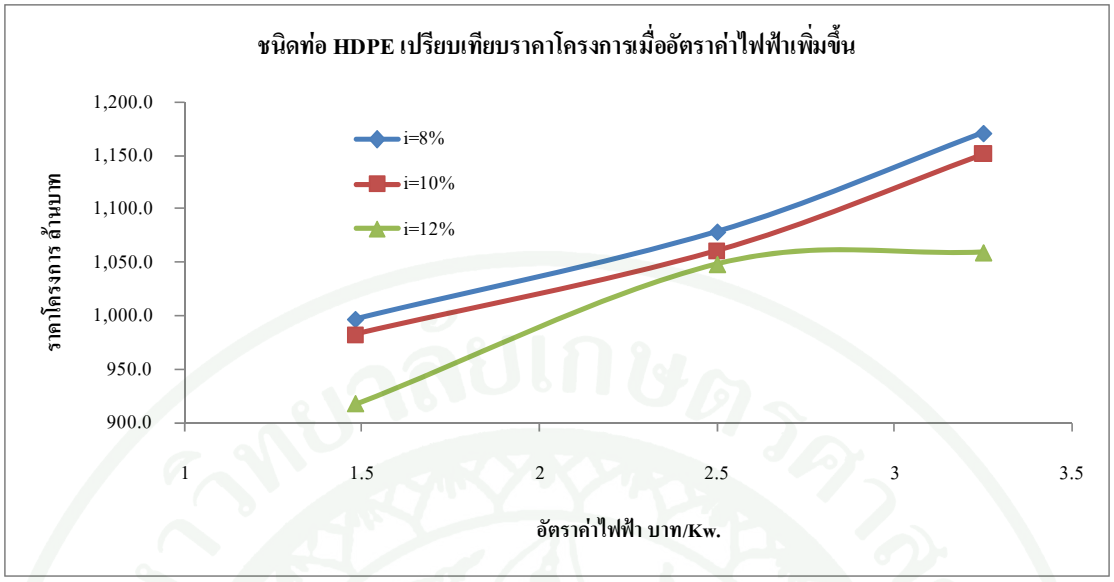
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 24 เปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลาง ราคาก่อสร้าง และราคาปัจจุบันของท่อ HDPE PN10

Elec. Cost (Baht/Kw.)			1.48	1.48	1.48	1.48	2.5	2.5	2.5	3.25	3.25	3.25
Discount Rate (%)			8	8	10	12	8	10	12	8	10	12
Form		To	(project)	Diameter mm.								
0+000	-	7+245	2000	2200	2200	1800	2400	2400	2400	2400	2400	2400
7+245	-	12+922	2000	1800	1800	1800	2200	2200	2200	2400	2400	2200
12+922	-	22+516	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	2000	2000	1800
22+516	-	26+595	1200	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
26+595	-	28+987	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
0+000	-	1+303	500	400	400	400	400	400	400	400	400	400

Elec. Cost (Baht/Kw.)	1.48	1.48	1.48	1.48	2.5	2.5	2.5	3.25	3.25	3.25
Discount Rate (%)	8	8	10	12	8	10	12	8	10	12
	(project)	(million Baht)								
Sum Construction Cost	936	911	911	856	972	972	972	1,051	1,051	972
Sum Maintenance Cost	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5
Electric Cost	3	3	3	3	5	5	5	5	5	6
PV Cost	87	85	71	61	106	89	76	120	101	87
Total Cost	1,023	996	982	917	1,078	1,061	1,048	1,171	1,152	1,059

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 25 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างราคาโครงการกับอัตราค่าไฟฟ้าเมื่ออัตราดอกเบี้ยคงที่ กรณีท่อ HDPE

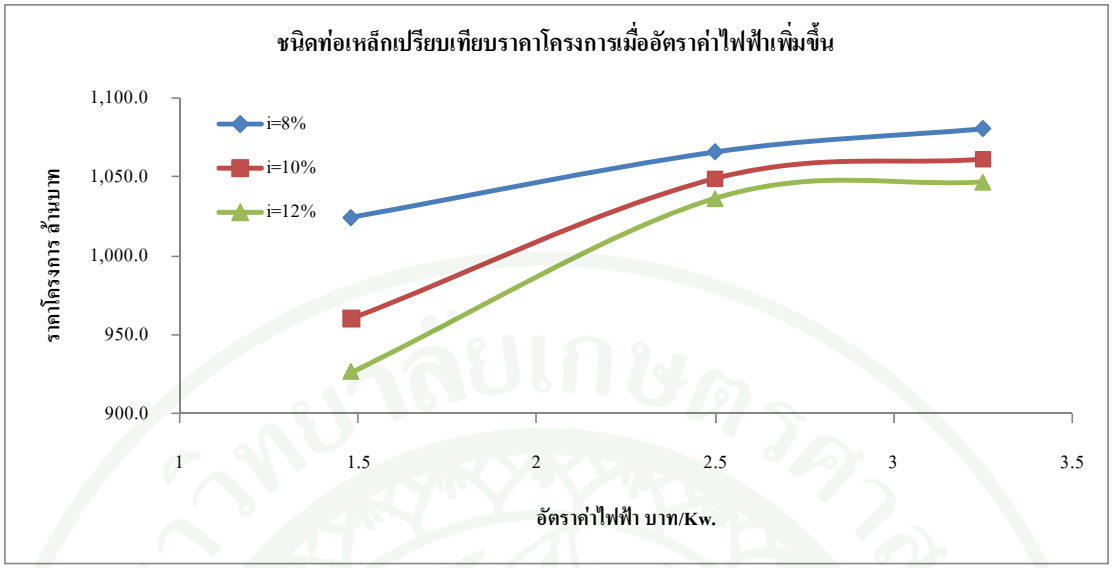
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 25 เปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลาง ราคาก่อสร้าง และราคาปัจจุบันของท่อเหล็ก

Elec. Cost (Baht/Kw.)			1.48	1.48	1.48	1.48	2.5	2.5	2.5	3.25	3.25	3.25
Discount Rate (%)			8	8	10	12	8	10	12	8	10	12
Form		To	(project)	Diameter mm.								
0+000	-	7+245	2000	2400	2400	2200	2500	2500	2500	2500	2500	2500
7+245	-	12+922	2000	2200	2200	2200	2400	2400	2400	2400	2400	2400
12+922	-	22+516	1800	2000	1800	1800	2000	2000	2000	2000	2000	2000
22+516	-	26+595	1200	1600	1600	1400	1600	1600	1600	1600	1600	1600
26+595	-	28+987	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
0+000	-	1+303	500	500	500	400	500	500	500	500	500	500

Elec. Cost (Baht/Kw.)	1.48	1.48	1.48	1.48	2.5	2.5	2.5	3.25	3.25	3.25
Discount Rate (%)	8	8	10	12	8	10	12	8	10	12
	(project)	(million Baht)								
Sum Construction Cost	825	941	891	864	963	963	963	963	963	963
Sum Maintenance Cost	4	5	4	4	5	5	5	5	5	5
Electric Cost	4	3	3	4	4	4	4	6	6	6
PV Cost	89	83	70	63	103	86	73	117	98	84
Total Cost	914	1,025	960	927	1,066	1,049	1,037	1,080	1,061	1,047

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 26 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างราคาโครงการกับอัตราค่าไฟฟ้าเมื่ออัตราดอกเบี้ยคงที่ กรณีท่อเหล็ก

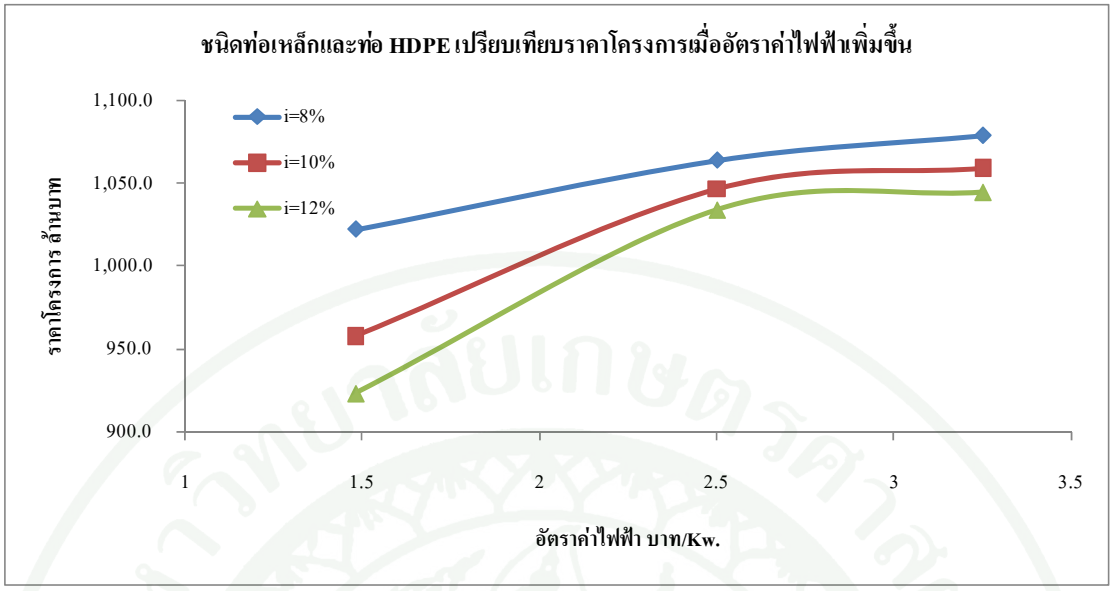
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 26 เปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลาง ราคาก่อสร้าง และราคาปัจจุบันของท่อHDPE กับท่อเหล็ก โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง น้อยกว่า 1.0 เมตร เป็นท่อ HDPE และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1.0 เมตร เป็นท่อเหล็ก

Elec. Cost (Baht/Kw.)			1.48	1.48	1.48	1.48	2.5	2.5	2.5	3.25	3.25	3.25
Discount Rate (%)			8	8	10	12	8	10	12	8	10	12
Form		To	(project)	Diameter mm.								
0+000	-	7+245	2000	2400	2400	2200	2500	2500	2500	2500	2500	2500
7+245	-	12+922	2000	2200	2200	2200	2400	2400	2400	2400	2400	2400
12+922	-	22+516	1800	2000	1800	1800	2000	2000	2000	2000	2000	2000
22+516	-	26+595	1200	1600	1600	1400	1600	1600	1600	1600	1600	1600
26+595	-	28+987	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
0+000	-	1+303	500	400	400	400	400	400	400	400	400	400

Elec. Cost (Baht/Kw.)	1.48	1.48	1.48	1.48	2.5	2.5	2.5	3.25	3.25	3.25
Discount Rate (%)	8	8	10	12	8	10	12	8	10	12
	(project)	(million Baht)								
Sum Construction Cost	824	938	887	862	960	960	960	960	960	960
Sum Maintenance Cost	4	5	4	4	5	5	5	5	5	5
Electric Cost	3	3	3	3	4	4	4	6	6	6
PV Cost	81	84	70	61	104	87	74	119	100	85
Total Cost	905	1,022	958	923	1,064	1,047	1,034	1,079	1,059	1,045

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 27 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างราคาโครงการกับอัตราค่าไฟฟ้าเมื่ออัตราดอกเบี้ยคงที่ กรณีท่อเหล็ก และ ท่อ HDPE

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำด้วยระบบ Web Calculator คือการออกแบบระบบท่อส่งน้ำโดยเลือกขนาดท่อจากความเหมาะสมด้านค่าลงทุนน้อยสุด ใช้ระบบการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PNDM ซึ่งพิจารณาค่าก่อสร้าง อัตราคิดลด อายุโครงการ ค่าไฟฟ้า และค่าบำรุงรักษา ทำการวิเคราะห์ผ่านเว็บไซต์ จากผู้ใช้งาน หรือ User จากนั้นระบบการวิเคราะห์จะทำงานบน Server แล้วจะส่งผลการวิเคราะห์กลับมายังผู้ใช้งาน

ในการศึกษานี้ได้นำโครงการชลประทาน 2 โครงการมาวิเคราะห์ คือ โครงการชลประทานระบบท่อส่งน้ำ โครงการนำร่องเร่งด่วน โครงการย่อยที่ 01 สถานีสูบน้ำบ้านกุดแคน อ.หนองเรือ จ.ขอนแก่น ของกรมชลประทาน และโครงการผันน้ำและเพิ่มพื้นที่เกษตรกรรมโดยระบบท่อผันน้ำจากลำน้ำชี บริเวณ อ.เมือง จ.มหาสารคาม ไปลงอ่างเก็บน้ำหนองบ่อ อ.บรบือ จ.มหาสารคาม ของกรมชลประทาน ทั้งสองโครงการมีข้อแตกต่างกันคือ โครงการแรกเป็นโครงการชลประทานระบบท่อส่งน้ำ พื้นที่ชลประทานประมาณ 1,855 ไร่ สูบน้ำจากลำน้ำเชิญไปยังถังพักน้ำแล้วปล่อยน้ำตามแรงโน้มถ่วงเข้าสู่แปลงเพาะปลูกของเกษตรกร ขนาดท่อเป็นท่อขนาดเล็กขนาด 65 – 630 มม.ส่วนโครงการที่สองเป็นโครงการผันน้ำปริมาณน้ำในเส้นท่อมีปริมาณมากประมาณ 6.10 ลบ.ม./วินาที ท่อผันน้ำที่ได้จากการออกแบบมีขนาดใหญ่ 500 – 1,200 มม.

ผลการศึกษาโครงการชลประทานระบบท่อส่งน้ำ ทำการวิเคราะห์โดยใช้อัตราค่าไฟฟ้าในช่วง off peak คือ 2.18 บาท/kw อายุโครงการ 30 ปี อัตราคิดลด 8% จำนวนชั่วโมงการสูบโซนละ 6 ชั่วโมง ทำการเปรียบเทียบขนาดท่อจากการวิเคราะห์กับขนาดท่อของโครงการจากแบบรายละเอียด และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำที่ผ่านระบบ Web Calculator กับ การวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำผ่าน โปรแกรม EPANET พบว่าจากการเปรียบเทียบขนาดท่อที่ได้จากการวิเคราะห์กับแบบรายละเอียด ขนาดท่อมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่ขนาดท่อบางช่วงจากการวิเคราะห์มี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขนาดเล็กกว่า ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าทางโครงการอาจจะเลือกขนาดท่อที่ใช้ให้ใกล้เคียงกันเพื่อสะดวกในการก่อสร้าง ส่วนในการเปรียบเทียบการคำนวณจาก Web Calculator กับโปรแกรม EPANET พบว่า % ความแตกต่างของผลการคำนวณที่ได้เกือบ 0.00%

ผลการศึกษาโครงการผันน้ำได้ทำการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ โดยเปลี่ยนแปลงค่าไฟฟ้าที่ 1.48 2.50 และ3.25 บาท/kw อัตราคิดลด 8% 10% และ 12% ใช้ชนิดท่อในการวิเคราะห์เป็นสามกรณีคือ ใช้ท่อHDPE ท่อเหล็ก และท่อเหล็กรวมกับท่อHDPE จากผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่ออัตราค่าไฟฟ้าปรับตัวสูงขึ้น ราคาโครงการก็มีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากต้องทำการเพิ่มขนาดท่อส่งน้ำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดเฮดสูญเสียในระบบ เพื่อไม่ให้ราคาค่าไฟฟ้าของโครงการมีค่าสูงซึ่งจะเป็นภาระให้กับโครงการในระยะยาว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

ระบบการวิเคราะห์ดังกล่าวพัฒนาให้สามารถวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำผ่านเว็บไซต์โดยโปรแกรม PNDM ที่พัฒนาโดย มนต์เทพ มะเปี่ยม, 2547 ซึ่งโปรแกรมสามารถเลือกขนาดที่เหมาะสมตามเงื่อนไขด้านราคาค่าลงทุนน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามระบบการวิเคราะห์ดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ไฟล์นำเข้าสำหรับวิเคราะห์เป็น text file ซึ่งต้องจัดเรียงไฟล์ตามแบบฟอร์มที่กำหนดโปรแกรมจึงจะสามารถทำงานได้

2. ระบบการวิเคราะห์สามารถวิเคราะห์เลือกขนาดท่อได้ แต่ไม่สามารถ Simulate เพื่อเลือกขนาดท่อโดยผู้ใช้งานได้ ดังนั้นหากต้องการใส่ขนาดและชนิดท่อบางช่วงที่ต้องการ เมื่อผ่านการวิเคราะห์จากระบบ Web Calculator แล้ว อาจจะใช้โปรแกรม EPANET ในการ Simulate ประกอบด้วย

3. ในส่วนของการวิเคราะห์ราคาโครงการในโปรแกรมยังไม่ครอบคลุมถึงราคาที่มีการเปลี่ยนอุปกรณ์ระหว่างอายุโครงการ หากจะให้ครอบคลุมในส่วนนี้จะต้อง Source Code ในส่วนนี้เพิ่มเติม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชัยวัฒน์ ขยันการนาวี. 2545. **วิศวกรรมชลศาสตร์.** ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พิรพร หมุนสนิท. 2552. **Visual basic 2008 และ Visual C# 2008.** เคพีที, กรุงเทพฯ.

มนต์เทพ มะเปี่ยม. 2547. **การพัฒนาแบบจำลองเพื่อออกแบบระบบท่อส่งน้ำ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วริทธิ์ อึ๊งภากรณ์. 2533. **การออกแบบระบบท่อภายในอาคาร.** ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วิบูลย์ บุญยธโรกุล. 2540. **การวางแผนและออกแบบงานสูบน้ำ.** ศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย, กรุงเทพฯ.

สัจจะ จรัสรุ่งรวีวร. 2552. **เริ่มต้น Visual C# 2008 ฉบับสมบูรณ์.** ไอดีซี อินโฟ, นนทบุรี

สันติ ทองพำนัก.2534. **การไหลทางน้ำเปิด.** ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ.

Chow Ven Te. 1964. **Open Channel Hydraulics.** McGraw-Hill, New York.

Todini, E. & Pilati, S. 1987. **A gradient method for the analysis of pipe networks**. International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution Leicester Polytechnic, UK.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานระบบ Web Calculator

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คู่มือการใช้งานแบบจำลอง

แบบจำลอง PNDM เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำ โดยพิจารณาเลือกขนาดท่อจากความเหมาะสมด้านราคาตลอดอายุโครงการ สามารถวิเคราะห์ระบบท่อแยก Branch เช่นโครงการส่งน้ำชลประทานระบบท่อภายใต้แรงดันที่มีระบบสูบส่งน้ำ โครงการท่อผันน้ำ เป็นต้น แบบจำลอง PNDM พัฒนาขึ้นมาโดย มนต์เทพ มะเปี่ยม, 2547 แล้วนำมาดัดแปลงให้วิเคราะห์ผ่านระบบ Web Application ซึ่งจะต้อง Input ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เป็น text file นามสกุล .Inp ข้อมูลที่ต้องเตรียมนำเข้าสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองมีดังนี้

1. ข้อมูล Pipe Data ทำการกำหนดหมายเลขท่อแต่ละท่อนในระบบ ระบุการเชื่อมต่อของจุดต่อพร้อมกำหนดหมายเลขที่จุดต้นท่อและจุดปลายท่อ รวมถึงความยาวท่อแต่ละท่อน แล้วกำหนดหมายเลขใน Line ท่อที่แยกออกจากท่อสายหลัก เช่น ท่อสายหลักเป็น Line หมายเลข 1 ท่อที่แยกออกจากท่อสายหลักเป็น Line หมายเลข 2, 3… ไปเรื่อยๆ ตามลำดับ

2. ข้อมูล Node Data เป็นข้อมูลของจุดเชื่อมต่อของระบบท่อ ซึ่งอาจเป็นจุดปล่อยน้ำที่จะต้องมีข้อมูลอัตราการไหลและระดับอ้างอิง หรือ จุดแยกท่อซึ่งมีข้อมูลอ้างอิงเพียงอย่างเดียว พร้อมระบุหมายเลขเพื่อใช้อ้างอิงจุดเชื่อมต่อสำหรับนำเข้าข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ในแบบจำลอง

3. ข้อมูล Reservoir Node เป็นข้อมูลแหล่งน้ำสำหรับนำเข้าระบบท่อส่งน้ำ ต้องกำหนดหมายเลขและระดับอ้างอิง

4. ข้อมูล Pump Link เป็นข้อมูลของปั๊มที่เชื่อมระหว่างแหล่งน้ำ Reservoir Node กับ Node Data เพื่อเข้าสู่ระบบท่อ ทำการกำหนดหมายเลขปั๊มซึ่งจะเป็นหมายเลขเดียวกับ Reservoir Node แล้วระบุการเชื่อมต่อไปสู่ Node แรกเพื่อเข้าสู่ระบบท่อ พร้อมกับใส่ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์และประสิทธิภาพปั๊ม โดยทั่วไปใช้ 80% และ 90% ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. ข้อมูล Optimization Data เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับหาค่าความเหมาะสมซึ่งเป็นรายละเอียดด้านเศรษฐศาสตร์ของโครงการประกอบด้วย อัตราดอกเบี้ยค่าตอบแทนของโครงการ อายุโครงการ อัตราค่าไฟฟ้าในการสูบน้ำ และค่าเปอร์เซ็นต์บำรุงรักษาของโครงการ

- อัตราดอกเบี้ยที่ใช้ 8% 10% และ 12%
- อายุโครงการชลประทานทั่วไปใช้อายุประมาณ 30 ปี
- อัตราค่าไฟฟ้าใช้อัตราค่าไฟใช้อัตราค่าไฟฟ้าสูบน้ำเพื่อการเกษตร ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 7 สูบน้ำเพื่อการเกษตรของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคปี 2554 เป็นดังนี้

ประเภทที่ 7 สูบน้ำเพื่อการเกษตร

สำหรับการใช้ไฟฟ้ากับเครื่องสูบน้ำเพื่อการเกษตรของหน่วยงานราชการ สหกรณ์เพื่อการเกษตร กลุ่มเกษตรกรที่จดทะเบียนจัดตั้งกลุ่มเกษตรกรกลุ่มเกษตรกรที่หน่วยราชการรับรองโดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว

7.1 อัตราปกติ

	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	115.16	
100 หน่วยแรก (หน่วยที่ 0 - 100)	1.6033	
เกิน 100 หน่วยขึ้นไป (หน่วยที่ 101 เป็นต้นไป)	2.7549	

7.2 อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU)

	ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)		ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	Peak	Peak	Off Peak	
7.2.1 แรงดัน 22-33 กิโลโวลท์	132.93	3.6531	2.1495	228.17
7.2.2 แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลท์	210.00	3.7989	2.1827	228.17

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัตราขั้นต่ำ : ประเภทที่ 7.2 ค่าไฟฟ้าต่ำสุดต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 70 ของค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดในรอบ 12 เดือน ที่ผ่านมาสิ้นสุดในเดือนปัจจุบัน

หมายเหตุ 1. กรณีติดตั้งเครื่องวัดไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงซึ่งเป็นสมบัติของผู้ใช้ไฟฟ้า หรือหม้อแปลงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (เฉพาะที่ติดตั้งเครื่องวัดไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำประกอบ ซี.ที.) ให้คำนวณกิโลวัตต์ และหน่วยคิดเงินเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 2 เพื่อครอบคลุมการสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมิได้วัดรวมไว้ด้วย

2. ประเภทที่ 7.2 เป็นอัตราเลือก เมื่อใช้แล้วจะกลับไปใช้อัตราประเภทที่ 7.1 ไม่ได้ ทั้งนี้ผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องชำระค่าเครื่องวัด TOU และหรือค่าใช้จ่ายอื่นตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด

ข้อกำหนดช่วงเวลาอัตรา TOU

Peak : เวลา 09.00 น. – 22.00 น. วันจันทร์ – ศุกร์ และวันพืชมงคล

Off Peak : เวลา 22.00 น. – 09.00 น. วันเสาร์ – อาทิตย์, วันแรงงานแห่งชาติ, วันพืชมงคลที่ตรงกับวันเสาร์ – อาทิตย์ และ วันหยุดราชการตามปกติ (ไม่รวมวันหยุดชดเชย)

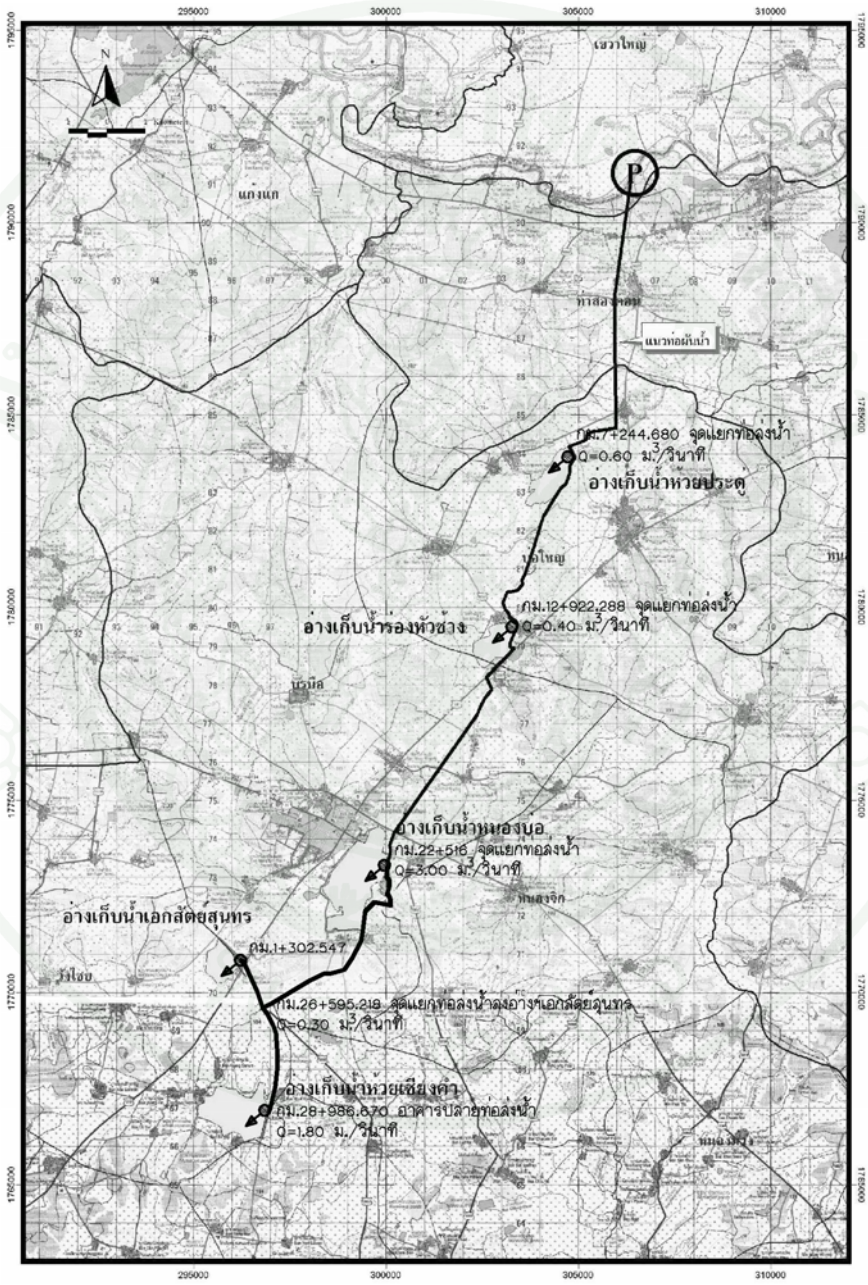
- เปอร์เซ็นต์ค่าบำรุงรักษารายปี ในที่นี้ใช้ 0.5% ของราคาโครงการ

6. ข้อมูล Commercial Diameter เป็นข้อมูลขนาดท่อที่มีขายตามท้องตลาด พร้อมระบุราคาท่อแต่ละขนาด และค่าสัมประสิทธิ์สำหรับเส้นท่อ (Hazen William Coefficient)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตัวอย่างการเตรียมข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง Input.inp

1. โครงข่ายท่อผันน้ำ



ภาพผนวกที่ ก1 โครงข่ายท่อผันน้ำ

ที่มา : กรมชลประทาน (2548)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

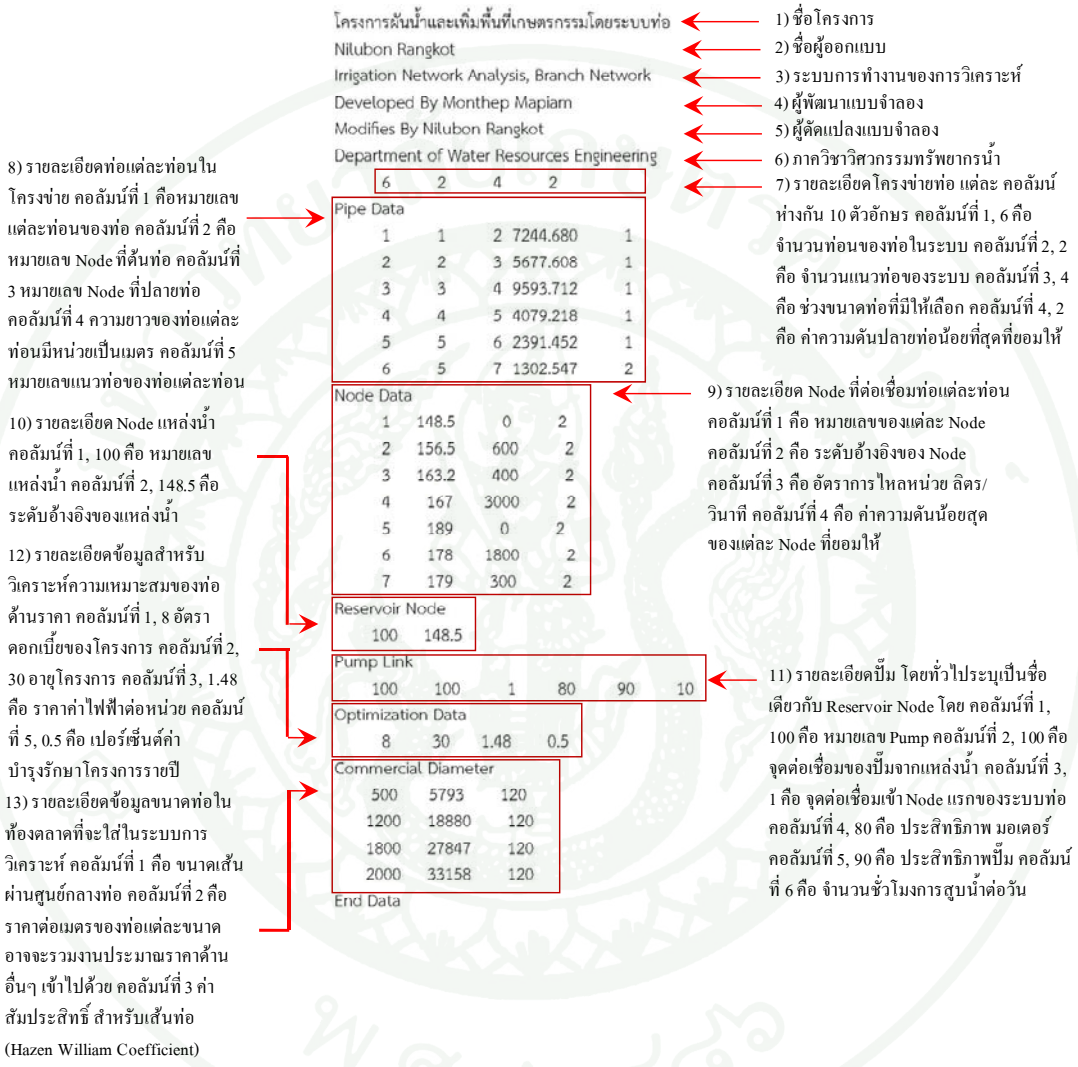
จากรูปโครงข่ายท่อผันน้ำนำมาเขียน Schematic Diagram เพื่อกำหนด Node Number และ Pipe Number ดังภาพภาคผนวกที่ ก2

ภาพผนวกที่ ก2 Schematic Diagram โครงข่ายท่อผันน้ำแสดงการกำหนดชื่อ Node Number และ Pipe Number

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จาก Schematic Diagram ในรูปที่ 2 จัดรูปแบบให้อยู่ในรูป text file ได้ดังภาพ

ภาคผนวกที่ ก3



ภาพผนวกที่ ก3 แบบฟอร์มข้อมูลนำเข้าระบบการวิเคราะห์ในรูป text file

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากข้อมูลนำเข้าในภาพภาคผนวกที่ ก3 เมื่อผ่านระบบการวิเคราะห์จะได้ Output.Out ดังภาคผนวกที่ ก4

```
**************************************************************************
*                              P N D M                                   *
*                       Pipe Network Design Model                        *
*      Department of Water Resources Engineering / Kasetsart University   *
*                              Version 1.0                               *
**************************************************************************

:Title of Project:
โครงการผันน้ำและเพิ่มพื้นที่เกษตรกรรมโดยระบบท่อ

:Name of Design:
Nilubon Rangkot
:Pipe Results:
============================================================
 Pipe  From   To   Length    Flow  Diameter  Velocity  Headloss  Headloss
  No.  Node  Node     (m.)   (l/s)    (mm.)     (m/s)     (m.)     /1000m
============================================================
   1     1     2  7244.68  6100.00  1800.00      2.40     17.72      2.45
   2     2     3  5677.61  5500.00  1800.00      2.16     11.46      2.02
   3     3     4  9593.71  5100.00  1800.00      2.00     16.84      1.76
   4     4     5  4079.22  2100.00  1200.00      1.86      9.98      2.45
   5     5     6  2391.45  1800.00  1200.00      1.59      4.40      1.84
   6     5     7  1302.55   300.00   500.00      1.53      6.17      4.74
 100   100     1          6100.00                          99.00  Pump
============================================================
 Pipe  From   To   Length    Construction    Maintenace Cost
  No.  Node  Node     (m.)     Cost (baht)       (baht)
============================================================
   1     1     2  7244.68    201742608.00      1008713.06
   2     2     3  5677.61    158104352.00       790521.75
   3     3     4  9593.71    267156096.00      1335780.50
   4     4     5  4079.22     77015640.00       385078.19
   5     5     6  2391.45     45150612.00       225753.06
   6     5     7  1302.55      7545655.00        37728.27
============================================================
:Node Results:
=========================================
 Node  Elevation  Demand   Head  Pressure
  No.     (m.)     (l/s)   (m.)     (m.)
=========================================
   1     148.50     0.00  247.50    99.00
   2     156.50   600.00  229.78    73.28
   3     163.20   400.00  218.32    55.12
   4     167.00  3000.00  201.48    34.48
   5     189.00     0.00  191.50     2.50
   6     178.00  1800.00  187.11     9.11
   7     179.00   300.00  185.33     6.33
 100     148.50 -6100.00  148.50     0.00 Reservoir
=========================================
:Cost Results:
=========================================
SumConstruction Cost =      756714944   Bath

SumMaintenace Cost =       3783574.75   Bath / Year

Electric Cost =            2192084.25   Bath / Year

NPV Cost =    67272672    Bath

Total Cost =   823987584   Bath
=========================================
```

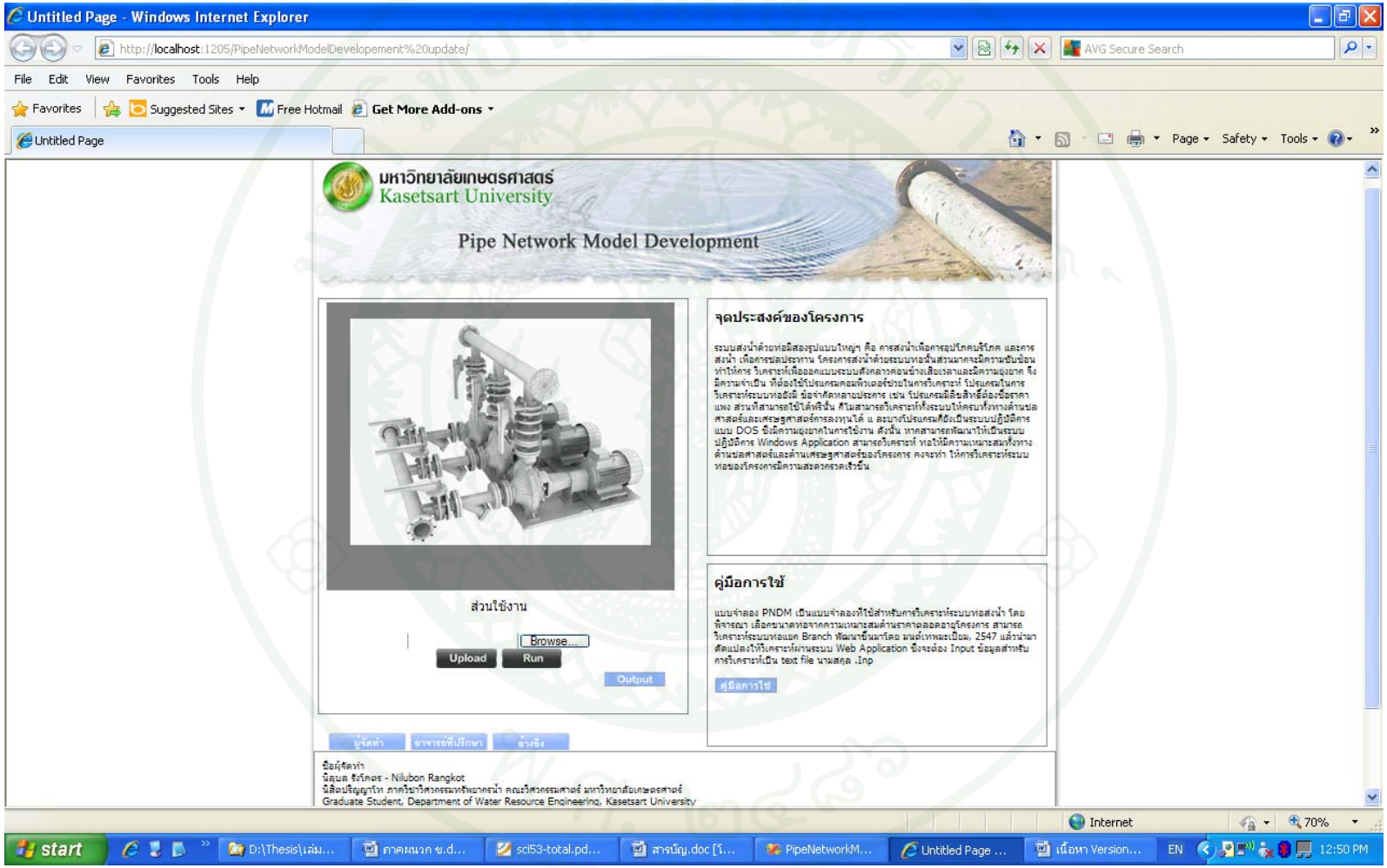
ภาพผนวกที่ ก4 ผลการวิเคราะห์ระบบท่อส่งน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

หน้าจอการทำงานของ Web Calculator Pipe Network Model Development

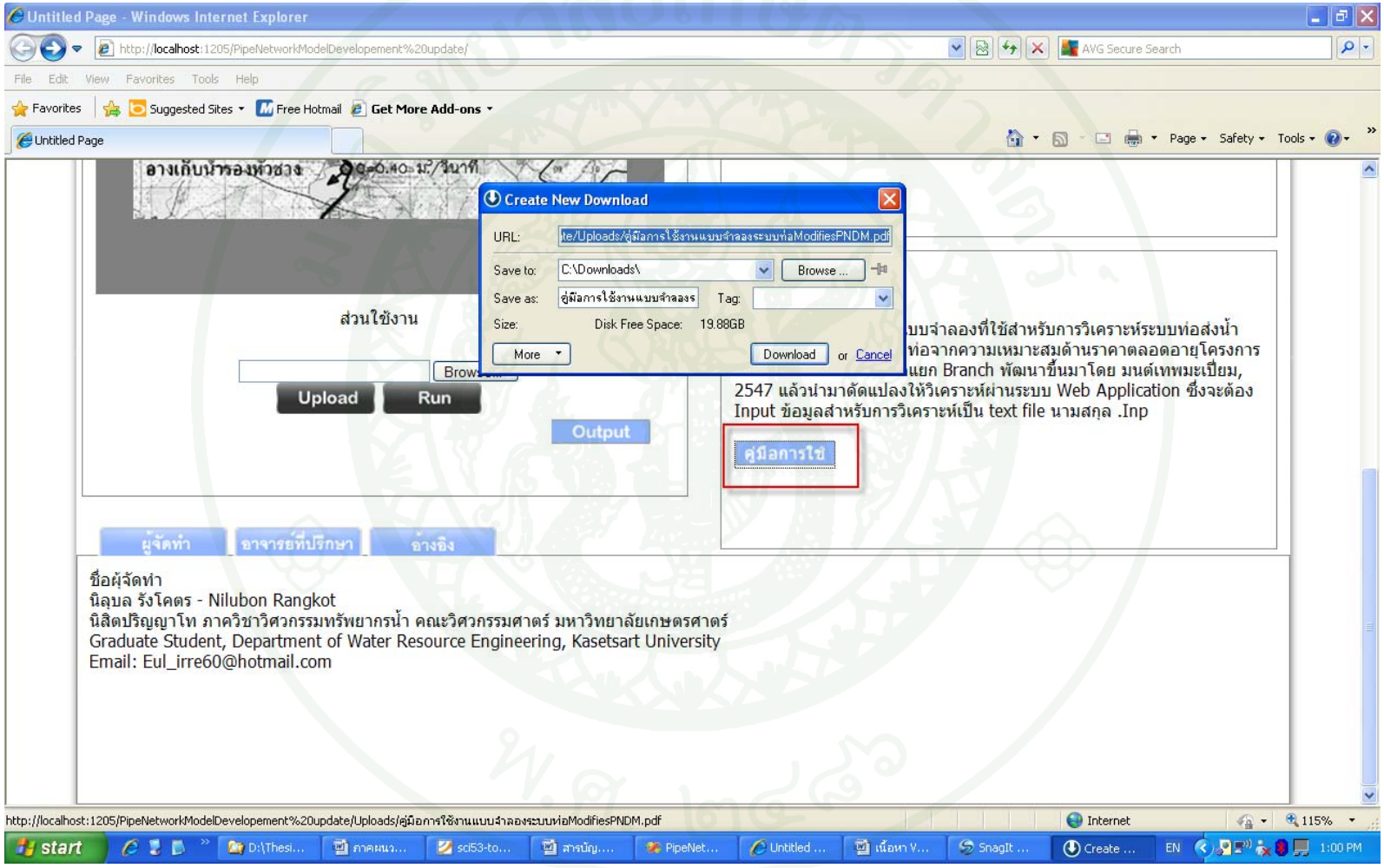
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



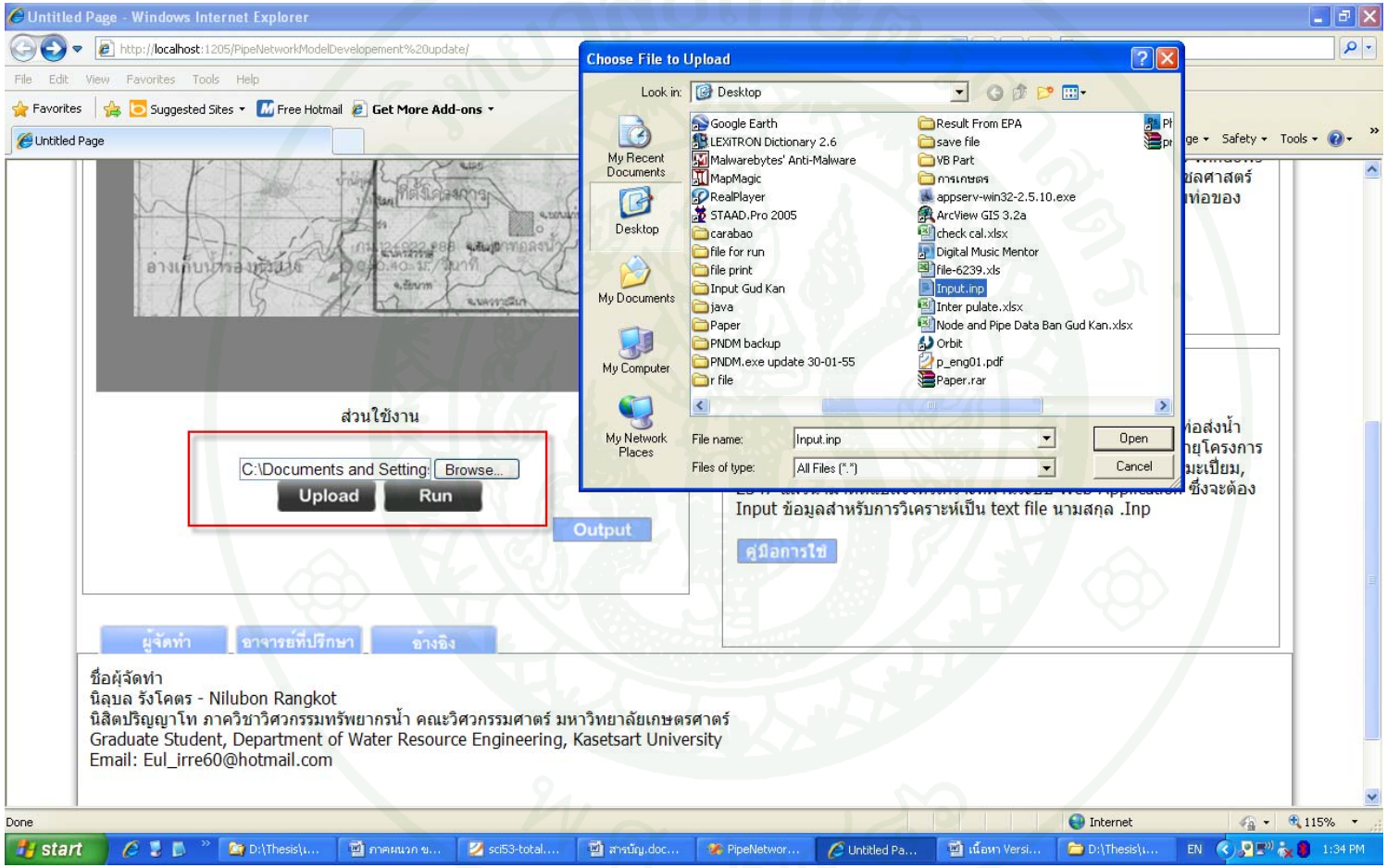
ภาพผนวกที่ ข1 หน้าจอแสดงผลการทำงานของระบบ Web Calculator

ภาพผนวกที่ ข2 ส่วนใช้งานในหน้าจอแสดงผล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

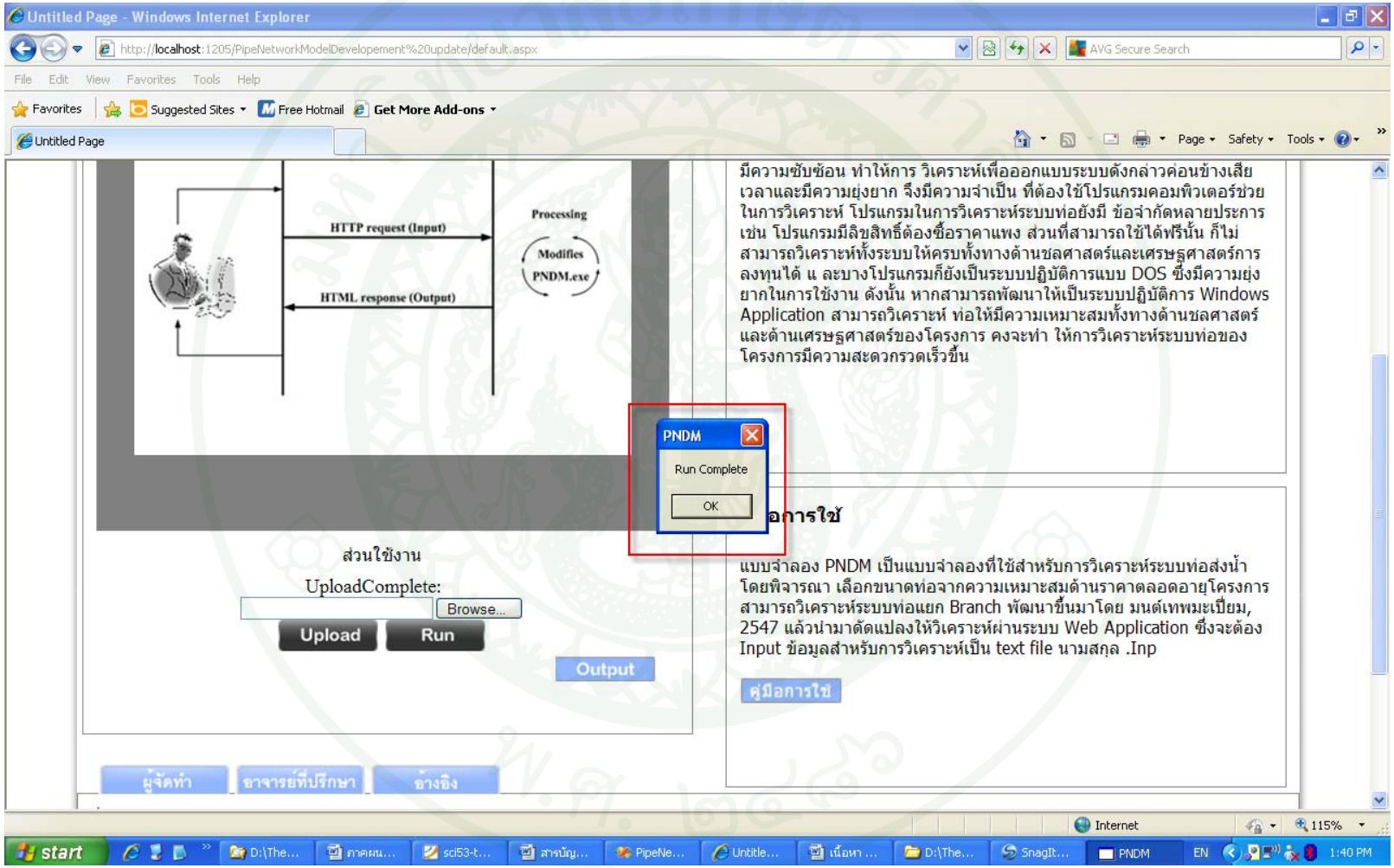


ภาพผนวกที่ ข3 ส่วน Download คู่มือการใช้งาน

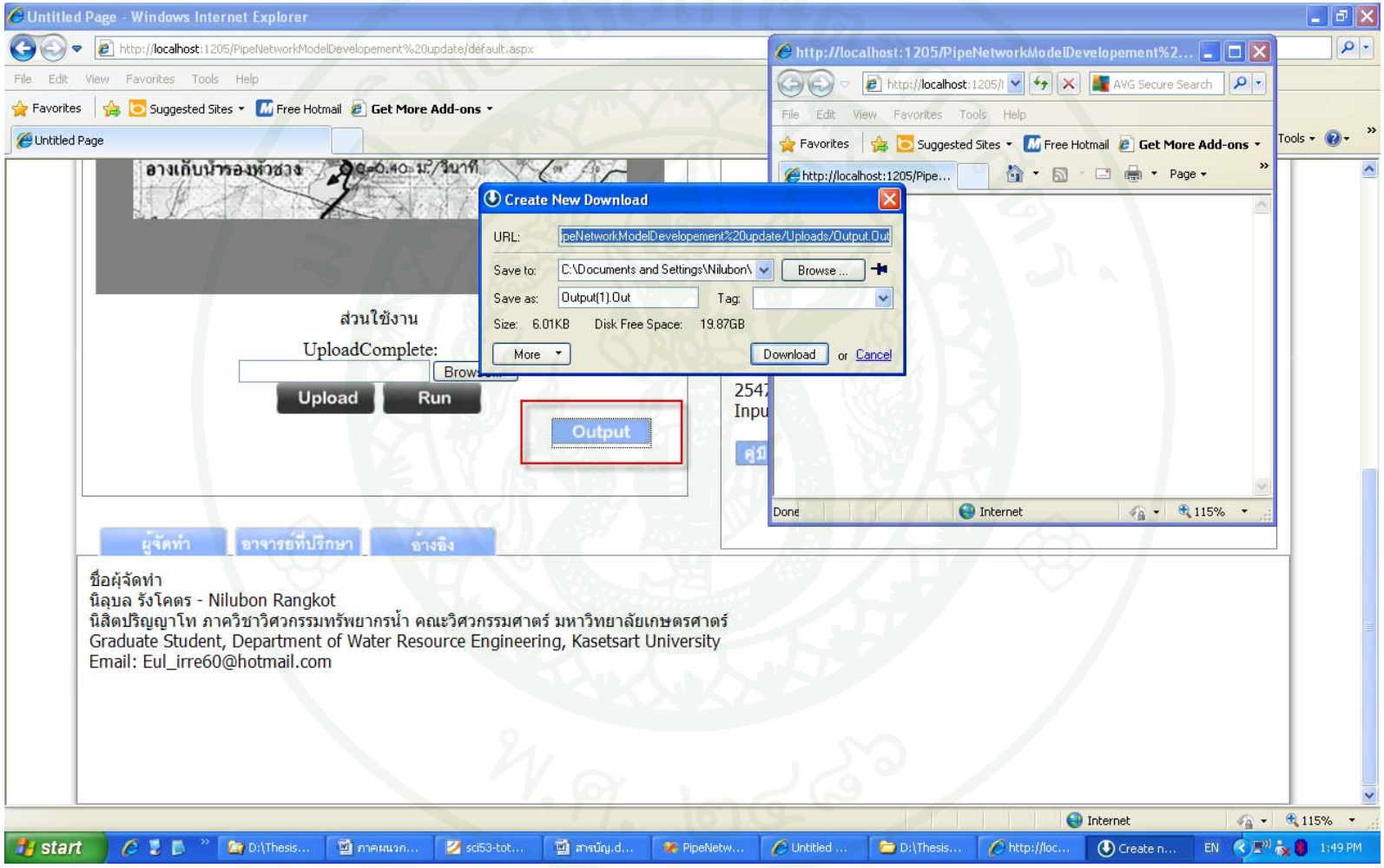


ภาพผนวกที่ ข4 ทำการ Browse file เพื่อ Upload file .inp สำหรับเข้าสู่ระบบการวิเคราะห์ แล้วคลิก Upload จากนั้น คลิก Run จะแสดงหน้าจอดังภาพภาคผนวกที่ ข5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ข5 หากจัดเรียงไฟล์ตรงตามแบบฟอร์มสำหรับ Run ในคู่มือภาคผนวก ก จะแสดงหน้าจอดังภาพ



ภาพผนวกที่ ข6 เมื่อคลิกที่ปุ่ม Download จะสามารถทำการ Download Output.Out ไปเก็บไว้ในเครื่องของ User เพื่อดูผลการวิเคราะห์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวนิลุบล รังโคตร
เกิดวันที่	15 กรกฎาคม 2528
สถานที่เกิด	อำเภอบ้านแพง จังหวัดนครพนม
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (โยธา – ชลประทาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรชลประทาน
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัทโปรเกรส เทคโนโลยี คอนซัลแท็นส์ จำกัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์