

โครงการวิศวกรรมชลประทาน

(02207499)

ที่ 5/2560

เรื่อง การศึกษาแรงดันน้ำภายในท่อด้วยแบบจำลองกายภาพอุโมงค์ผันน้ำ

A study of pressure in water diversion tunnel using the physical model

ดำเนินงานโดย

นางสาวดารารัตน์ วัฒนศิริ

นางสาวสินิทธา สมบูรณ์

เสนอ

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา-ชลประทาน)

พุทธศักราช 2560

ใบรับรองโครงการวิศวกรรมชลประทาน

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรื่อง การศึกษาแรงดันน้ำภายในท่อด้วยแบบจำลองกายภาพอุโมงค์ผันน้ำ

Title: A study of pressure in water diversion tunnel using the physical model

นามผู้จัดทำ นางสาวดารารัตน์ วัฒนศิริ

นางสาวสินิทธา สมบูรณ์

ได้พิจารณาเห็นชอบ

ประธานกรรมการ

.....

(ผศ.ดร. สมชาย ดอนเจดีย์)

...../...../.....

กรรมการ

.....

(อ.ดร. ทรงศักดิ์ ภัทรารุณชัย)

...../...../.....

กรรมการ

.....

(อ.ดร. จุติเทพ วงษ์เพชร)

...../...../.....

หัวหน้าภาควิชา

.....

(ผศ. นิมิตร เจริญทรัพย์พัฒน์)

...../...../.....

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การศึกษาแรงดันน้ำภายในท่อด้วยแบบจำลองกายภาพอุโมงค์ผันน้ำ

โดย : นางสาวดารารัตน์ วัฒนศิริ

นางสาวสินิทธา สมบูรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

(ผศ.ดร. สมชาย คอนเจดีย์)

...../...../.....

การศึกษาสภาพการไหลของน้ำที่เกิดขึ้นภายในท่อผ่านแบบจำลองทางกายภาพนั้นเพื่อศึกษาการทดลองชลศาสตร์การไหลตามโครงสร้างของแนวผันน้ำที่มีชลศาสตร์การไหลที่เหมาะสม ให้ได้ชลศาสตร์การไหลที่ดีที่สุดและมีประสิทธิภาพ เพื่อนำไปปรับใช้ในการก่อสร้างจริง โดยกำหนดจัดทำแบบจำลองที่มีมาตราส่วนเท่ากันทั้งแนวราบ และแนวตั้ง คือมาตราส่วน 1:58.14 ในการทดสอบทางชลศาสตร์ด้วยแบบจำลองกายภาพอุโมงค์ผันน้ำ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อประเมินศักยภาพในการผันน้ำผ่านอุโมงค์ รวมทั้งเพื่อศึกษา ตรวจสอบลักษณะสภาพการไหลในอุโมงค์ในรูปแบบต่างๆ ทั้งในกรณีที่สภาพการไหลเป็นแบบน้ำเต็มท่อ (Pressured flow) กรณีการไหลไม่เต็มท่อ (Free-surface flow) และกรณีช่วงระหว่างการเปลี่ยนการไหลจากน้ำเต็มท่อเป็นไหลแบบไม่เต็มท่อ (Transition flow) งานวิจัยนี้ได้ทดลองศึกษาสภาพการไหลเมื่อมีการส่งน้ำผ่านท่อไปยังพื้นที่ที่หนึ่ง ทำการศึกษาการสูญเสียพลังงานภายในท่อเนื่องจากแรงเสียดทานแรงดันน้ำในท่อ พบว่า กรณีทดลอง 1 และ 5 จะมีลักษณะการไหลในช่วงแรกเป็นแบบเต็มท่อและจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นแบบไม่เต็มท่อ และเมื่ออัตราการไหลมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ระยะทางต่างกัน ความดันในการส่งน้ำจะมากขึ้นตามระยะทางของอุโมงค์และลดลงเมื่อน้ำไหลไปในระยะทางที่เพิ่มขึ้น จะค่อยๆ เปลี่ยนลักษณะการไหลเมื่อใกล้กับจุดออกของน้ำ ส่วนค่าระดับน้ำในช่วงเปลี่ยนลักษณะการไหลจากการทดลองและจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมากจนเกือบจะเท่ากัน ในกรณี 2 จะมีลักษณะการไหลในช่วงแรกเป็นแบบเต็มท่อและจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นแบบไม่เต็มท่อ แต่เมื่ออัตราการไหลลดลง ความดันในการส่งน้ำก็จะลดลงด้วยเช่นกัน และตำแหน่งที่เปลี่ยนลักษณะจากแบบเต็มท่อเป็นแบบไม่เต็มท่อจะใกล้กับต้นอุโมงค์มากขึ้น ส่วนในกรณี 3 และ 4 จะมีลักษณะการไหลส่วนใหญ่เป็นแบบไม่เต็มท่อ ซึ่งเมื่ออัตราการไหลลดลง ความดันในการส่งน้ำจะลดลงตามอัตราการไหล ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานมีผลต่อความดัน และเมื่ออัตราการไหลมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ระยะทางของท่ออุโมงค์ไม่เท่ากัน กรณีที่ระยะทางอุโมงค์ผันน้ำมากจะมี

ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานน้อยกว่ากรณีที่มีระยะทางอุโมงค์ผันน้ำสั้นกว่า เนื่องจากขณะที่ทำการทดลองที่อุโมงค์ผันน้ำมีระยะทางที่สั้นนั้น ภายในอุโมงค์ผันน้ำอาจมีเศษตะกอนปะปนอยู่ภายในมากกว่า ขณะที่ทำการทดลองที่อุโมงค์มีระยะทางมากกว่า เมื่อน้ำไหลผ่านจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังท่ออุโมงค์ผันน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานมากขึ้น

ABSTRACT

Title : A study of pressure in water diversion tunnel using the physical model

By : Dararat Wattanasiri

Sinittha Somboon

The objective of the research was carried out to study the hydraulics of the flow, in accordance with the structure of the water diversion, with the appropriate hydraulic flow to obtain the best and most efficient flow hydraulics for using in real construction. The model is to be designed for both vertical and horizontal scales of 1: 58.14 scale. The main purpose is to assess the potential of water diversion tunnels. This investigated study the characteristics water flow of the tunnels in various ways; pressured flow, Free-surface flow and transition flow .In addition this also studied the flow conditions when water is passed through a pipe to the area, and internal energy loss due to friction. Results indicate that water pressure in the pipe in case 1 and case 5 would have the first characteristics flow as a full pipe and would gradually change to free surface flow. When the flow rate is similar, the distance is different. Water delivery pressure increases with the distance of the tunnel and decreases with increasing water flow. the characteristics flow gradually changes when approaching the outlet. The water level during the change of the pattern flow from the experiment and the calculation is almost the same. In case 2 that the flow in the first stage is full pipe and will gradually change to free surface flow but when the flow rate drops. The pressure for delivering water will also decrease as well. In case of 3 and 4, most of the flow characteristics are free surface flow. When the flow rate decreases, the pressure in the water is reduced by the flow rate. Therefore, the coefficient of friction affects the pressure and when the flow rate is similar, the distance of the tunnel pipe is not equal. In cases where the distance of the tunnel is longer, the coefficient of friction is less than that of the shorter tunnel, because of the short distance between the

tunnels. In the water tunnel, there may be more sediment deposited inside the tunnel while the tunnel is over. As the water flow, it causes friction between the fluid and the wall of the tunnel pipe resulting in higher friction coefficients.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการวิศวกรรมชลประทานฉบับนี้สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์ ทางคณะผู้จัดทำโครงการต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สมชาย ดอนเจดีย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาโครงการวิจัยในครั้งนี้ อ.ดร.ทรงศักดิ์ ภัทราวุธมิชัย และ อ.ดร.จตุเทพ วงศ์เพชร ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนการดำเนินงานในการจัดทำโครงการ จนกระทั่งโครงการวิศวกรรมนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

โครงการเล่มนี้จะดำเนินการไม่ได้ หากไม่ได้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและแบบจำลองทางกายภาพ อุโมงค์ผันน้ำที่ใช้ในการดำเนินการจากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology : AIT)

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณบิดา มารดา และขอบคุณเพื่อนๆ ที่ได้คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำโครงการนี้ด้วยดีเสมอมาและคณะผู้จัดทำโครงการหวังว่าโครงการฉบับนี้จะเป็นประโยชน์กับผู้สนใจไม่มากนัก

คณะผู้จัดทำ
ดาร์รัตน์ วัฒนศิริ
สินิทธา สมบูรณ์

สารบัญ

| เรื่อง | หน้า |
|------------------------|------|
| บทคัดย่อ | |
| ABSTRACT | |
| กิตติกรรมประกาศ | |
| สารบัญ | ก |
| สารบัญภาพ | ข |
| สารบัญตาราง | ค |
| บทนำ | 1 |
| ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 2 |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 10 |
| อุปกรณ์และวิธีการทดลอง | 11 |
| ผลการศึกษา | 18 |
| สรุปผลการศึกษา | 48 |
| เอกสารอ้างอิง | 49 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1. เส้น EGL และ HGL | 4 |
| 2. การวิเคราะห์เส้นแนวผิวน้ำด้วยวิธีขั้นตอนมาตรฐาน | 5 |
| 3. องค์ประกอบและโครงสร้างของอุโมงค์ผันน้ำ | 12 |
| 4. วิธีการทดลอง | 15 |
| 5. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับระดับต่างๆของอุโมงค์ผันน้ำที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ กรณี 1 | 26 |
| 6. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับระดับต่างๆของอุโมงค์ผันน้ำที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ กรณี 2 | 31 |
| 7. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับระดับต่างๆของอุโมงค์ผันน้ำที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ กรณี 3 | 36 |
| 8. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับระดับต่างๆของอุโมงค์ผันน้ำที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ กรณี 4 | 42 |
| 9. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับระดับต่างๆของอุโมงค์ผันน้ำที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ กรณี 5 | 47 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 ผลการศึกษาความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ผันน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ผันน้ำ กรณีที่ 1 | 19 |
| 1.2 ตารางข้อมูลที่ใช้คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 1 | |
| - 1.2.1 ตารางคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 1 | 21 |
| - 1.2.2 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลไม่เต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 1 | 25 |
| - 1.2.3 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลเต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการพลังงานของ Bernoulli กรณีที่ 2 | 25 |
| 2.1 ผลการศึกษาความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ผันน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ผันน้ำ กรณีที่ 2 | 27 |
| 2.2 ตารางข้อมูลที่ใช้คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 2 | |
| - 2.2.1 ตารางคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 2 | 28 |
| - 2.2.2 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลไม่เต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 2 | 30 |
| - 2.2.3 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลเต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการพลังงานของ Bernoulli กรณีที่ 2 | 30 |
| 3.1 ผลการศึกษาความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ผันน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ผันน้ำ กรณีที่ 3 | 32 |
| 3.2 ตารางข้อมูลที่ใช้คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 3 | |
| - 3.2.1 ตารางคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 3 | 33 |
| - 3.2.2 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลไม่เต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 3 | 35 |
| - 3.2.3 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลเต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการพลังงานของ Bernoulli กรณีที่ 3 | 35 |

หน้า

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 ผลการศึกษาความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายใน อุโมงค์ผันน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ผันน้ำ กรณีที่ 4 | 37 |
| 4.2 ตารางข้อมูลที่ใช้คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 4 | |
| - 4.2.1 ตารางคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 4 | 39 |
| - 4.2.2 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลไม่เต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 4 | 41 |
| - 4.2.3 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลเต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการพลังงาน ของ Bernoulli กรณีที่ 4 | 41 |
| 5.1 ผลการศึกษาความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายใน อุโมงค์ผันน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ผันน้ำ กรณีที่ 5 | 43 |
| 5.2 ตารางข้อมูลที่ใช้คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 5 | |
| - 5.2.1 ตารางคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 5 | 44 |
| - 5.2.2 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลไม่เต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 5 | 46 |
| - 5.2.3 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลเต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการพลังงานของ Bernoulli กรณีที่ 5 | 46 |

บทนำ

ปัญหาหลักของการขาดแคลนน้ำเป็นปัญหาหลักของพื้นที่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ หลายพื้นที่พบว่ามีปัญหาเรื่องการขาดแคลนน้ำในขณะที่บางพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำมากเกินความต้องการ หน่วยงานของภาครัฐได้เข้ามาแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้โดยสร้างอุโมงค์ผันน้ำเพื่อผันน้ำจากพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำมากส่งน้ำไปยังพื้นที่ที่ขาดแคลนน้ำ โดยต้องการนำน้ำจากแม่น้ำโขงส่งผ่านแม่น้ำเลย เพื่อบรรเทาปัญหาภัยแล้ง การขาดแคลนน้ำ และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งน้ำ จึงได้จัดทำแบบจำลองกายภาพอุโมงค์ผันน้ำขึ้นมา โดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทานร่วมมือกับหน่วยงานภาครัฐร่วมกันศึกษาวิจัยสภาพการไหลชลศาสตร์ของอุโมงค์ผันน้ำนี้ โดยแบบจำลองนี้ตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน บริเวณบ่อ 1 ซึ่งแบบจำลองทางกายภาพนี้จะนำไปใช้จริงโดยจะชักน้ำจากแม่น้ำโขงบริเวณปากน้ำเลยส่งน้ำไปยังพื้นที่ที่ขาดแคลนน้ำทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในการก่อสร้างแบบจำลองทางกายภาพได้พิจารณาครอบคลุมช่วงปลายคลองชักน้ำ อาคารทางเข้าอุโมงค์ อุโมงค์ผันน้ำซี-มูล 1 อุโมงค์ (ความยาว 85.363 กม.) อาคารทางออกอุโมงค์พร้อมอาคารประกอบต่างๆ ในอุโมงค์ที่สำคัญต่อชลศาสตร์การไหล โดยกำหนดจัดทำที่มาตราส่วนเท่ากันทั้งแนวราบ และแนวตั้ง คือมาตราส่วน 1:58.14 และเลือกใช้วัสดุตามมาตราส่วนที่เหมาะสมโดยใช้ท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.18 เมตร หนา 4 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 1.47 กิโลเมตร มีความลาดชันของอุโมงค์ที่ได้ทำการออกแบบไว้คือ 1:10,000 มาใช้ในการจำลองเป็นอุโมงค์ดังกล่าว บริเวณทางด้านหัวงานของท่ออุโมงค์จะเชื่อมกับบ่อคัดตะกอนที่มีความยาว 8.60 เมตร และอาคารทางเข้าอุโมงค์ที่มีประตูควบคุมการปิด-เปิดรวมความยาว 4.40 เมตร ส่วนในด้านท้ายน้ำจะเชื่อมกับอาคารรับน้ำออกด้านท้ายน้ำมีความยาว 4.82 เมตร และเหตุผลที่นำท่ออะคริลิกใสมาใช้ในการจำลองเป็นอุโมงค์ผันน้ำ เพื่อให้สามารถมองเห็นลักษณะสภาพการไหลที่เกิดขึ้นภายในอุโมงค์ผันน้ำได้ จากผลการวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้ทำการศึกษาแรงดันน้ำ การสูญเสียพลังงานในท่อ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในท่อ พบว่าภายในท่อเมื่อมีการส่งน้ำจะเกิดการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น โดยการสูญเสียพลังงานหลักจะแปรผันกับค่าอัตราการไหล ความเร็วในการไหล สัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทาน และความยาวของท่อ หากอัตราการไหลสูง ความเร็วการไหลสูง และมีความยาวของท่อมาก สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมาก ก็จะทำให้มีการสูญเสียพลังงานหลักภายในท่อมากเช่นกัน ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้นี้สามารถนำไปออกแบบชลศาสตร์การไหลเพื่อนำไปประยุกต์ใช้จริงในการก่อสร้างแนวอุโมงค์ผันน้ำเพื่อให้ได้ชลศาสตร์การไหลที่ดีที่สุด เหมาะสม และมีประสิทธิภาพในการส่งน้ำ หากการส่งน้ำมีประสิทธิภาพก็จะส่งผลดีต่อเศรษฐกิจ การดำรงชีวิต รวมถึงการประกอบอาชีพ และคุณภาพชีวิตของประชาชนก็จะดีขึ้นด้วย

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วิธีเทียบมาตราส่วน

มาตราส่วนหมายถึง สิ่งแสดงให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในแผนที่กับระยะทางที่ปรากฏจริงบนผิวโลก เนื่องจากแผนที่เป็นภาพย่อส่วนของพื้นโลก จึงจำเป็นต้องมีมาตราส่วนกำกับไว้ในแผนที่ด้วย เพื่อให้ผู้ใช้แผนที่ทราบว่ามาตราส่วนในแผนที่นั้นใช้แทนระยะทางบนพื้นผิวโลกมากน้อยเพียงใด มาตราส่วนที่นิยมใช้มีอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ มาตราส่วนคำพูด (verbal scale) , มาตราส่วนเส้น (graphic scale), มาตราส่วนแบบเศษส่วน (representative fraction) ส่วนในแบบจำลองทางกายภาพนี้จะใช้มาตราส่วนแบบเศษส่วน ในการก่อสร้างตามมาตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้กำหนดขึ้นนั้น จะเป็นการก่อสร้างโดยการย่อส่วนจากขนาดของจริง (prototype) ตามสัดส่วนของระยะแนวราบและแนวตั้ง ซึ่งเท่ากับ 1:58.14 หมายความว่า ระยะทางในจำลอง 1 เมตร จะเท่ากับระยะทางจริงของแนวอุโมงค์ผันน้ำ 58.14 เมตร ซึ่งแนวอุโมงค์ผันน้ำมีระยะทางจริงทั้งหมด 85.364 กิโลเมตร หรือเมื่ออุโมงค์จริงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เมตร (กว้าง 10 เมตร ลึก 10 เมตร) ก็จะทำให้การก่อสร้างในแบบจำลองด้วยท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $10/58.14 = 0.172$ เมตรนั่นเอง ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองทางกายภาพจึงจำเป็นต้องย่อส่วนจากระยะทางจริงเนื่องแนวอุโมงค์มีความยาวมาก ประมาณ 85.364 กิโลเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนาด 10 เมตร และในการทำแบบจำลองตามมาตราส่วนที่เหมาะสมโดยใช้ท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.18 เมตร หนา 4 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 1.47 กิโลเมตร มีความลาดชันของอุโมงค์ที่ได้ทำการออกแบบไว้คือ 1:10,000 มาใช้ในการจำลองเป็นอุโมงค์ดังกล่าว

สมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's equation)

การเคลื่อนที่ของของไหลอุดมคติในกรณีทั่วไป เช่น ของไหลเคลื่อนที่ผ่านท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากันหรือปลายทั้งสองของท่ออยู่ที่ระดับความสูงต่างกันสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการแบร์นูลลี(Bernoulli's equation)

สมการแบร์นูลลี (Bernoulli's equation) คือ สมการผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ภายในท่อที่มีของไหลผ่าน มีค่าคงตัวเสมอ จากสมการของแบร์นูลลี ถ้าระดับคงตัวเมื่อของไหลมีอัตราเร็วเพิ่ม ความดันของของไหลจะลด และ

เมื่อของไหลมีอัตราเร็วลดลง ความดันของของไหลจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังนั้นที่มาของสมการแบร์นูลีจะเขียนได้ดังนี้

ทฤษฎีของแบร์นูลี แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเสดความดัน เสดความเร็ว และเสดเนื่องจากระดับของของไหลประเภทไม่มีความหนืด (Non-viscid flow) ยึดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) และสถานการณ์ไหลเป็นแบบคงที่ (Steady flow)

1. เสดความดัน (Pressure head; H_p) โดยทั่วไปแล้วค่าความดันมีหน่วยเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เช่น นิวตันต่อตารางเมตร (N/m) หรือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) หรือกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) แต่ถ้าเป็นความดันของของเหลวก็นิยมบอกเป็นแท่งความสูงของของไหลที่จะก่อให้เกิดความดันที่กำหนดบนผิวหน้าซึ่งรองรับแท่งของไหลนั้น ความดันซึ่งบอกเป็นแท่งความสูงของของไหลนี้ เรียกว่า เสดความดัน

ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P และเสดความดัน H_p คือ

$$H_p = \frac{P}{\gamma} = \frac{P}{\rho g} \quad (1)$$

เมื่อ γ คือ น้ำหนักจำเพาะของของไหล

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 m/s^2

2. เสดความเร็ว (Velocity head; H_v) ของของไหลในท่อ หรือ ทางน้ำเปิดด้วยความเร็วใดๆนั้นจะมีพลังจลน์อยู่ พลังงานส่วนนี้สามารถแสดงในรูปของเสด ได้ดังนี้

$$H_v = \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล

3. เสดระดับ (Elevation head; H_c) ของของไหล ณ จุดใดๆ เมื่ออยู่ในระดับที่สูงกว่าจะมีแนวโน้มที่จะไหลลงสู่ระดับที่ต่ำกว่าด้วยพลังงานชนิดที่หนึ่งเรียกว่าพลังงานศักย์ โดยพลังงานนี้เมื่อวัดเป็นรูปเสดจะเรียกว่า เสดระดับ

$$H_c = z \quad (3)$$

เมื่อ z คือระดับหรือความสูง ณ จุดใดๆ ที่พิจารณาเหนือระดับอ้างอิง

ตามทฤษฎีของเบอร์นูลีแสดงให้เห็นว่า ณ ตำแหน่งใดๆ ตลอดแนวเส้นสายธาร (Stream line) ผลรวมของเสดความดัน เสดความเร็ว และเสดระดับ จะมีค่าคงที่ตลอดแนวเส้นสายธาร หรือเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{ค่าคงที่} \quad (4)$$

หรือ

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 = \frac{P_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} + z_3 \quad (5)$$

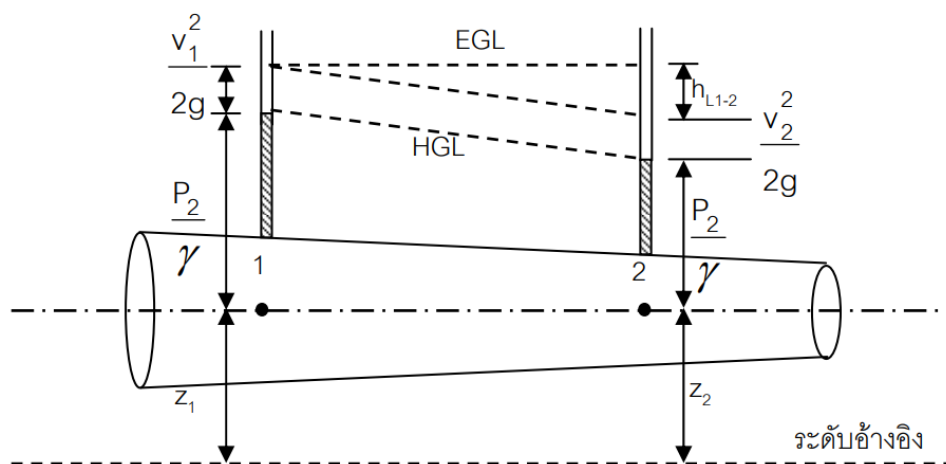
เมื่อ $\frac{P}{\gamma}$ คือ เสดความดัน (Pressure Head)

$\frac{v^2}{2g}$ คือ เสดความเร็ว (Velocity Head)

z คือ เสดระดับ (Elevation Head)

4. ผลรวมของเสดทั้งสาม เรียกว่า เสดรวม (Total head; H_T) หรือ Piezometric head ในขณะที่ผลรวมของเสดความดันกับเสดระดับ เรียกเสดสถิต (Static head) เมื่อลากเส้นต่อเชื่อมแต่ละจุดของค่าเสดสถิต ไปตามระยะทางของการไหล เรียกว่าเส้นระดับชลศาสตร์ (Hydraulic grade line; HGL หรือ Piezometric head) ในขณะที่เส้นที่ลากต่อเชื่อมแต่ละจุดของเสดรวมไปตามระยะทางของการไหลเรียกว่า เส้นระดับพลังงาน (Energy grade line; EGL) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าเส้นระดับชลศาสตร์กับเส้นระดับพลังงานจะแตกต่างกันเท่ากับค่าเสดความเร็ว

$\frac{v^2}{2g}$ ดังรูป



รูปที่ 1 เส้น EGL และ HGL

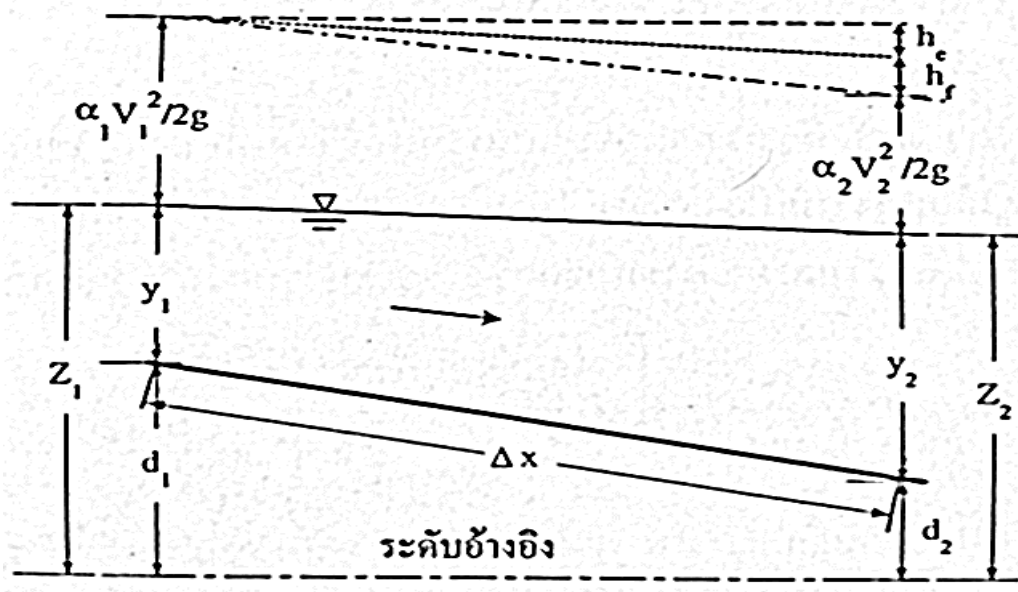
อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงของไหลทุกชนิดจะเป็นของไหลประเภทมีความหนืดแทบทั้งสิ้น (มากหรือน้อยแตกต่างกันตามแต่ละชนิดของของไหล) จึงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานขึ้นในขณะที่เกิดการไหล ดังนั้น สมการของเบอร์นูลลีเมื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์การไหลของของไหลจะต้องรวมค่าการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างจุด 2 จุด ในการไหลเข้าไปด้วย ดังสมการ

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{L1-2} \quad (6)$$

เมื่อ h_{L1-2} คือ ค่าการสูญเสียพลังงานระหว่างจุดที่ 1 และ 2

การคำนวณหาระดับผิวน้ำ (water surface profile) โดยวิธี Standard Step Method

ในการคำนวณหาระดับผิวน้ำในทางน้ำเปิดไม่คงรูปวิธีการคำนวณ Standard Step Method เป็นวิธีขั้นตอนมาตรฐานเป็นวิธีการคำนวณเส้นแนวผิวน้ำได้ทั้งทางน้ำเปิดคงรูปและทางน้ำเปิดไม่คงรูป โดยทางน้ำเปิดไม่คงรูปจะมีทั้งสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (resistance coefficient) และรูปร่างของทางน้ำเปิดเปลี่ยนแปลงตามระยะทางคงรูป



รูปที่ 2 รูปการวิเคราะห์เส้นแนวผิวน้ำด้วยวิธีขั้นตอนมาตรฐาน ที่มา : (กิริติ , 2546)

สมการพลังงานระหว่างหน้าตัดที่ 1 และหน้าตัดที่ 2

$$Z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_f + h_e \quad (7)$$

โดยที่ Z_1 และ Z_2 คือ ระยะในแนวตั้งจากระดับอ้างอิงถึงผิวน้ำที่หน้าตัดที่ 1 และหน้าตัดที่ 2 ตามลำดับ ($Z_1 = d_1 + y_1$ และ $Z_2 = d_2 + y_2$)

d_1 และ d_2 คือ ระยะในแนวตั้งจากระดับอ้างอิงถึงท้องน้ำที่หน้าตัดที่ 1 และหน้าตัดที่ 2 ตามลำดับ

y_1 และ y_2 คือ ความลึกน้ำในท่อถึงท้องน้ำที่หน้าตัดที่ 1 และหน้าตัดที่ 2 ตามลำดับ

α_1 และ α_2 คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้พลังงานจลน์

v_1 และ v_2 คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหลผ่านหน้าตัดที่ 1 และหน้าตัดที่ 2 ตามลำดับ

h_f คือ การสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างน้ำกับทางน้ำเปิด

ตัวแปรและสมการอื่นที่เกี่ยวข้องที่ใช้คำนวณหาระดับผิวน้ำ (water surface profile) โดยวิธี Standard Step Method แสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงตัวแปรและสมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาระดับน้ำโดยวิธี Standard Step Method

| ตัวแปร | ความหมาย | สมการที่ใช้คำนวณ | หมายเหตุ |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Y | ระดับน้ำภายในโมเดลท่ออุโมงค์ผันน้ำ โดยค่าเริ่มต้นจะเป็นความลึกน้ำการไหลวิกฤต | ทำการ Trail & Error ไปจนถึงความลึกของน้ำที่เต็มท่อใน โมเดลท่ออุโมงค์ผันน้ำ (m.) | - |
| θ | มุมความลาดท้องน้ำ (rad หรือ degree) | $\theta = \cos^{-1}(1 - \frac{y}{r})$ | y = ระดับน้ำภายใน โมเดลท่ออุโมงค์ผันน้ำ (m.) r = รัศมีวงกลมของท่อแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำ(m.) |
| A | พื้นที่หน้าการไหล (m ²) | $A = r^2 [\theta - (\cos\theta \sin\theta)]$ | r = รัศมีวงกลมของท่อแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำ(m.) θ = มุมความลาดท้องน้ำ(rad หรือ degree) |
| P | ความยาวเส้นขอบเปียก (m.) | $P = 2r\theta$ | r = รัศมีวงกลมของท่ออุโมงค์ผันน้ำ |

| | | | |
|--------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | θ = มุมความลาดท้องน้ำ (rad หรือ degree) |
| T | ความกว้างผิวน้ำ (m.) | $T = 2r\sin\theta$ | r = รัศมีวงกลมของท่ออุโมงค์ผิวน้ำ θ = มุมความลาดท้องน้ำ (rad หรือ degree) |
| R | รัศมีชลศาสตร์ (m.) | $R = \frac{A}{P}$ | A = พื้นที่หน้าการไหล (m ²) P = ความยาวเส้นขอบเปียก (m.) |
| V | ความเร็วในการไหล (m/s) | $V = \frac{Q}{A}$ | Q = อัตราการไหลในอุโมงค์ผิวน้ำ (m ³ /s) A = พื้นที่หน้าการไหล (m ²) |
| Fr | ค่า Froude Number | $Fr = \frac{Q^2 T}{gA^3}$ | Q = อัตราการไหลในอุโมงค์ผิวน้ำ (m ³ /s) A = พื้นที่หน้าการไหล (m ²) T = ความกว้างผิวน้ำ (m.) g = แรงโน้มถ่วงของโลก มีค่า 9.81 m/s ² |
| S _f | ความลาดชันพลังงาน | $S_f = \frac{n^2 V^2}{R^3}$ | n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของท่ออุโมงค์ผิวน้ำ V = ความเร็วในการไหล (m/s) R = รัศมีชลศาสตร์ (m.) |
| S ₀ | ความลาดชันท้องน้ำ | ได้กำหนดตามมาตรฐานที่ เหมาะสม = 1:10000 | - |
| S _{favg} | ความลาดชันพลังงานเฉลี่ย | $S_{favg} = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2}$ | S _f = ความลาดชันพลังงานระหว่างจุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ |
| Fr _{2avg} | ค่า Froude Number เฉลี่ย | $Fr_{2avg} = \frac{Fr_1 + Fr_2}{2}$ | Fr = ค่า Froude Number ระหว่างจุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ |
| d _y | ผลต่างระดับน้ำภายในโมเดล ท่ออุโมงค์ผิวน้ำ | $d_y = y_1 - y_2$ | y = ระดับน้ำภายในโมเดลท่ออุโมงค์ผิวน้ำระหว่าง จุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ |
| d _x | ผลต่างระยะทางภายใน โมเดลอุโมงค์ผิวน้ำ | $d_x = \left[\frac{d_y}{\frac{(S_f - S_0)}{(1 - Fr_{2avg})}} \right]$ | d _y = ผลต่างระดับน้ำภายใน โมเดลท่ออุโมงค์ผิวน้ำ S ₀ = ความลาดชันท้องน้ำ S _f = ความลาดชันพลังงาน Fr _{2avg} = ค่า Froude Number เฉลี่ย |
| $\frac{d_y}{d_x}$ | ระดับน้ำที่เปลี่ยนไปตาม ระยะทาง | $\frac{d_y}{d_x} = \frac{(S_{favg} - S_0)}{(1 - Fr_{2avg})}$ | S _{favg} = ความลาดชันพลังงานเฉลี่ย S ₀ = ความลาดชันท้องน้ำ Fr _{2avg} = ค่า Froude Number เฉลี่ย |

ตารางที่ 2 แสดงคำจำกัดความและวิธีการคำนวณในการหาระดับและระยะทางต่างๆของอุโมงค์ผันน้ำ

| คำจำกัดความ | การคำนวณ | หมายเหตุ |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ระดับน้ำในท่อของโมเดลต่ออุโมงค์ผันน้ำ(m.) | ทำการ Trail & Error ไปจนถึงความลึกของน้ำที่เต็มท่อในโมเดลต่ออุโมงค์ผันน้ำ (m.) | - |
| ระดับน้ำในท่ออุโมงค์ผันน้ำของจริง(m.) | ระดับน้ำในท่อของโมเดลต่ออุโมงค์ผันน้ำ×58.14 | 58.14 = มาตรฐานที่เหมาะสมในการก่อสร้างแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำ |
| ระยะทางในโมเดลต่ออุโมงค์ผันน้ำ(m.) | ผลต่างระยะทางภายในโมเดลอุโมงค์ผันน้ำ (d_x) | - |
| ระยะทางสะสมในโมเดลต่ออุโมงค์ผันน้ำ(m.) | ระยะทางในโมเดลต่ออุโมงค์ผันน้ำ ₁ + ระยะทางในโมเดลต่ออุโมงค์ผันน้ำ ₂ | - |
| ระยะทางสะสมในท่ออุโมงค์ผันน้ำของจริง(km.) | (ระยะทางสะสมในท่ออุโมงค์ผันน้ำของจริง x 58.14)/1000 | 58.14 = มาตรฐานที่เหมาะสมในการก่อสร้างแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำ 1000 = แปลงหน่วยให้เป็นกิโลเมตร |
| กม.(km.) | กิโลเมตรสุดท้าย – ระยะทางสะสมในท่ออุโมงค์ผันน้ำของจริง | - |
| ระดับท้องท่อ(m.msl.) | ระดับท้องท่อที่ทำการติดตั้ง – (กม.x1000)/10000 | 1000 = แปลงหน่วยจากกิโลเมตรเป็นเมตร 10000 = ความลาดชันท้องน้ำ |
| ระดับหลังท่อ(m.msl.) | ระดับท้องท่อ + 10 | 10 = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออุโมงค์ผันน้ำ |
| ระดับน้ำ(m.msl.) | ระดับท้องท่อ + ระดับน้ำในท่ออุโมงค์ผันน้ำของจริง | - |

การสูญเสียพลังงานในท่อด้วยสมการของ Darcy -Weisbach

ในพลศาสตร์ของไหล สมการ Darcy-Weisbach เป็นสมการซึ่งเกี่ยวข้องกับการสูญเสียหัวความดัน หรือ การสูญเสียความดัน การสูญเสียหลักมีสาเหตุมาจากแรงเสียดทาน เนื่องจากความหนืดของของไหลและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างของไหลกับผนังท่อ ซึ่งถ้าของไหลไหลผ่านผิวขรุขระ ความยาวของท่อมากและ ความเร็วในการไหลสูง การสูญเสียพลังงานจะสูงตามไปด้วย แต่การสูญเสียพลังงานจะลดลงเมื่อท่อมีขนาดใหญ่ขึ้น การสูญเสียหลักไม่ว่าการไหลนั้นจะเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนก็สามารใช้สมการของ Darcy-Weisbach ได้ แสดงสมการดังนี้

$$h_f = f_D \frac{L V^2}{D 2g} \quad (8)$$

เมื่อ h_f = การสูญเสียความดันเนื่องจากความฝืดในระบบท่อ (หน่วย SI = m.)

L = ความยาวของท่อ (หน่วย SI = m.)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไฮดรอลิก (หน่วย SI = m.)

V = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (หน่วย SI = m/s)

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (หน่วย SI = m/s²)

f_D = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดาร์ซี

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การวิเคราะห์การผันน้ำจากเขื่อนลำปายมาสู่เขื่อนลำแะและมูลบน

โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาลำปายมาอยู่ในสวนลุ่มน้ำลำปายมาศตำบลโนนสมบูรณ์อำเภอเสิงสางจังหวัดนครราชสีมา ลักษณะโครงการประกอบด้วยอ่างเก็บน้ำความจุ 98 ล้าน ลบ.ม. มีปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย 115 ล้าน ลบ.ม./ปี (ค.ศ. 1952 – 1991) พื้นที่ชลประทานรับน้ำจากอ่างเก็บน้ำจำนวน 20,000 ไร่และรับน้ำจากฝายด้านท้ายน้ำ 40,000 ไร่รวม 60,000 ไร่ พื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้งสูงสุดประมาณ 36,000 ไร่ ในขณะที่อ่างเก็บน้ำลำแะมีปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย 218 ล้าน ลบ.ม./ปี แต่ความจุของอ่างเก็บน้ำที่ระดับเก็บกัก 268 ล้าน ลบ.ม. และอ่างเก็บน้ำมูลบนมีปริมาณน้ำไหลลงอ่างเฉลี่ย 89 ล้าน ลบ.ม./ปี แต่ความจุอ่างเก็บน้ำที่ระดับเก็บกักเท่ากับ 134 ล้าน ลบ.ม. จากลักษณะดังกล่าว จะเห็นได้ว่าความจุอ่างเก็บน้ำลำแะและมูลบนมากกว่าปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยรายปี ส่วนความจุอ่างเก็บน้ำลำปายมาศ น้อยกว่าปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการผันน้ำส่วนเกินจากอ่างเก็บน้ำลำปายมาศมาเก็บกักไว้ที่อ่างเก็บน้ำลำแะและลำมูลบน และจากผลการศึกษาแผนที่มาตราส่วน 1:50,000 พบว่า ณ ตำแหน่งจุดผันน้ำบนลุ่มน้ำลำปายมาศมีพื้นที่รับน้ำ 95 ตารางกิโลเมตร ระดับกันอุโมงค์เหนือน้ำที่ลำปายมาศ +515 ม.รทก. ระดับกันอุโมงค์ท้ายน้ำที่ลำแะ +500 ม.รทก. รวมความยาวอุโมงค์ 3,500 เมตร ซึ่งสามารถผันน้ำโดย Gravity และหลังจากการได้ศึกษาทางเลือกต่างๆ โดยศึกษาการใช้น้ำในลุ่มน้ำลำปายมาศและลุ่มน้ำลำแะด้วยวิธี Effective Rainfall Model, Irrigation Demand Model และ System Simulation Model โดยผันน้ำที่สัน Spillway อ่างเก็บน้ำลำปายมาศและเกินความต้องการน้ำด้านท้ายน้ำไปยังอ่างเก็บน้ำลำแะ สามารถสรุปได้ว่าทางเลือกที่เหมาะสมคือ กรณีที่ PC2 (มีฝายด้านท้ายน้ำลำปายมาศ 2 แห่ง) ก่อสร้างอุโมงค์ผันน้ำเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ 1.5 เมตร head loss ของน้ำไหลผ่านอุโมงค์เท่ากับ 17 เมตร ความเร็วของน้ำเมื่อไหลเต็มอุโมงค์เท่ากับ 2.73 เมตรต่อวินาทีผันน้ำได้เฉลี่ย 8.757 ล้าน ลบ.ม./ปี (สูงสุด 31.819 ล้าน ลบ.ม./ปี และต่ำสุด 0 ล้าน ลบ.ม./ปี) ซึ่งสามารถเพิ่มพื้นที่พืชไร่ฤดูแล้ง โครงการลำแะโดยเกณฑ์เฉลี่ย 4,466 ไร่โดยมีอัตราส่วน Benefit/Cost = 2.063 ที่ $i = 2\%$, EIRR = 22.5% และจากการวิเคราะห์อ่างเก็บน้ำลำแะหลังจากการผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำลำปายมาศแล้วจะพบว่า มีน้ำเหลือพอที่จะผันต่อไปยังอ่างเก็บน้ำมูลบนน้อยมาก จึงศึกษาถึงการผันน้ำจากลำเชียงสาไปลงเขื่อนมูลบนโดย Gravity แทน โดยไม่ให้กระทบกระเทือนการใช้น้ำด้านท้ายน้ำ สามารถเพิ่มพื้นที่เพาะปลูกฤดูแล้งเขื่อนมูลบนโดยเกณฑ์เฉลี่ยได้ 1,404 ไร่ โดยมีอัตราส่วน Benefit/Cost = 1.160 ที่ $i = 12\%$, EIRR = 13.9 %

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาเรื่องแรงดันน้ำและการสูญเสียพลังงานในท่อด้วยแบบจำลองกายภาพอุโมงค์ผันน้ำ เพื่อให้ได้ผลศาสตร์การไหลที่ดีที่สุดเมื่อมีการนำไปใช้จริง ในการออกแบบโครงสร้างของแบบจำลองกายภาพก็มีความสำคัญอย่างมาก รวมถึงวัสดุที่นำมาใช้ต้องแข็งแรงและสะดวกต่อการศึกษาทดลองสภาพการไหลทางชลศาสตร์ด้วย ดังนั้นวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างของแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำจึงต้องมีการกำหนดมาตราส่วนที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับการก่อสร้างจริง ดังนี้

- 1) ท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร
- 2) เหล็กฉาก
- 3) เสาค้ำยัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ยาว 0.8 เมตร
- 4) ตอม่อ ขนาด 0.2เมตร x 0.2เมตร x 0.2เมตร
- 5) เข็มกลวง ยาว 2 เมตร
- 6) มานอมิเตอร์

สำหรับการประกอบโครงสร้างของแบบจำลองนั้นเริ่มจากติดตั้งท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.18 เมตร หนา 4 มิลลิเมตร ความยาวท่อนละ 4 เมตร เชื่อมประสานกันให้ได้ความยาวรวม 1468.2 เมตร โดยที่ท่อจะวางอยู่บนเหล็กฉากซึ่งทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของท่ออะคริลิกใส และสามารถปรับระดับความสูงต่ำตามความลาดชันของอุโมงค์ที่ได้ทำการออกแบบไว้คือ 1:10,000 วางบนเสาค้ำยันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 เซนติเมตร ยาว 0.8 เมตร ซึ่งเสาค้ำยันจะถ่ายน้ำหนักลงตอม่อที่มีขนาด 0.2x0.2x0.2 เมตร และเข็มกลวงยาว 2 เมตรที่ถูกฝังลงในดิน จากนั้นทำการติดตั้งมานอมิเตอร์เพื่อวัดความดันของน้ำ (ติดตั้งตามระยะที่ทำการพิจารณาทำการทดลองได้แก่ที่กม. 0+0.00, 0+0.50, 2+0.00, 4+0.00, 6+0.00, 8+0.00, 15+0.00, 20+0.00, 25+0.00, 30+0.00, 35+0.00, 40+0.00 ประกอบเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3(a)-3(f) โดยบริเวณทางด้านหัวงานของท่ออุโมงค์จะเชื่อมกับบ่อดักตะกอนที่มีความยาว 8.60 เมตร และอาคารทางเข้าอุโมงค์ที่มีประตูควบคุมการปิด-เปิดรวมความยาว 4.40 เมตร ส่วนในด้านท้ายน้ำจะเชื่อมกับอาคารรับน้ำออกด้านท้ายน้ำมีความยาว 4.82 เมตร



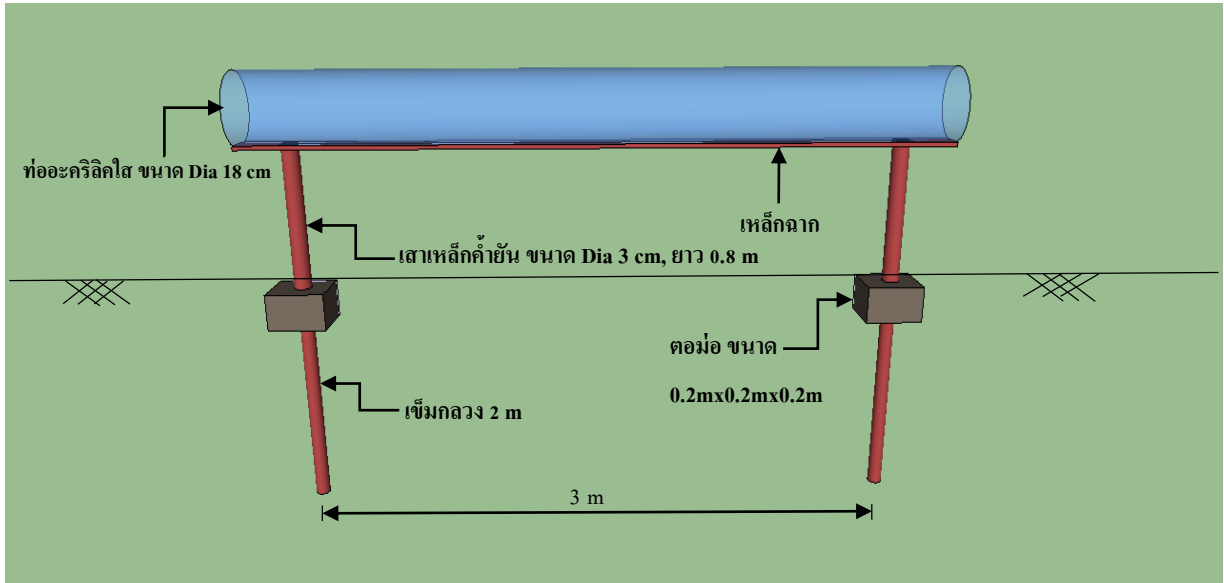
รูปที่ 3(a) บริเวณทางด้านหัวงานของท่ออุโมงค์จะเชื่อมกับบ่อดักตะกอนที่มีความยาว 8.60 เมตร



รูปที่ 3(b) อาคารทางเข้าอุโมงค์ที่มีประตูควบคุมการปิด-เปิด รวมความยาว 4.40 เมตร



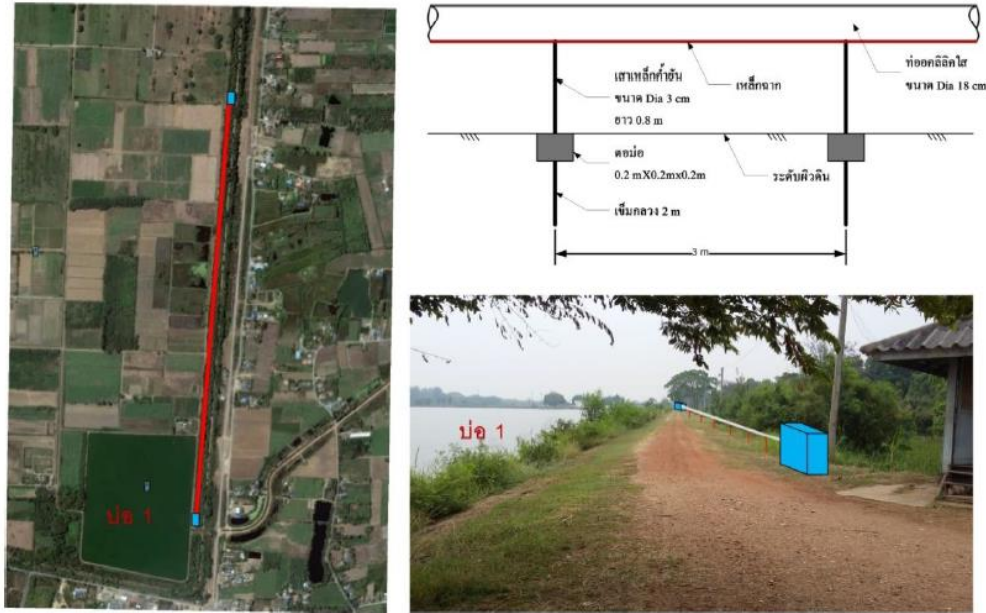
รูปที่ 3(c) แสดงโครงสร้างของแบบจำลองอุโมงค์ผิวน้ำ



รูปที่ 3(d) แสดงโครงสร้างของแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำ



รูปที่ 3(e) อาคารรับน้ำออกด้านท้ายน้ำมีความยาว 4.82 เมตร จากรายงานสรุปผลการจัดทำแบบจำลองกายภาพอุโมงค์ผันน้ำ, โดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology).



รูปที่ 3(a) แนวการสร้างแบบจำลองกายภาพอุโมงค์ จากรายงานสรุปผลการจัดทำแบบจำลองกายภาพอุโมงค์ผันน้ำ, โดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology).

เมื่อทำการติดตั้ง โครงสร้างของอุโมงค์ผันน้ำแล้วจะได้เป็นแบบจำลองทางกายภาพที่มีมาตราส่วนที่เหมาะสม จากนั้นเริ่มทำการทดลองโดยการสูบน้ำจากบ่อเก็บน้ำ (บ่อ 1) เข้าสู่บ่อตกตะกอนบริเวณก่อนทางเข้าท่ออุโมงค์ผันน้ำเพื่อให้ตะกอนตกลงสู่ด้านล่างของบ่อตกตะกอนก่อนที่น้ำจะเข้าไปยังท่อดังรูปที่ 4(a) จากนั้นน้ำจะไหลเข้าสู่อาคารรับน้ำทางเข้าอุโมงค์ที่มีประตูควบคุมการปิด-เปิดดังรูปที่ 4(b) ซึ่งจะมีเกววัดระดับน้ำติดอยู่ที่บริเวณด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ น้ำจะไหลเข้าสู่ท่ออะคริลิกใสไปยังทางออกอุโมงค์ผันน้ำที่มีอาคารรับน้ำอยู่ดังรูปที่ 4(c) จากนั้นรอให้ระดับน้ำคงที่โดยอ่านค่าระดับน้ำจากเกววัดระดับที่ติดตั้งไว้ทางด้านเหนือน้ำ 4(d) เมื่อระดับน้ำคงที่แล้ว ทำการอ่านค่าระดับน้ำที่มานอมิเตอร์ทุกๆ 1 เมตรที่ทำการศึกษาทำการทดลอง (ได้แก่ กม. 0+0.00, 0+0.50, 2+0.00, 4+0.00, 6+0.00, 8+0.00, 15+0.00, 20+0.00, 25+0.00, 30+0.00, 35+0.00, 40+0.00) ดังรูปที่ 4(e) เพื่อศึกษาแรงดันน้ำและการสูญเสียพลังงานภายในท่อ และทำการวัดระยะทางที่น้ำเริ่มเปลี่ยนสภาพการไหลจากน้ำเต็มท่อ (Pressure flow) เป็นสภาพการไหลแบบไม่เต็มท่อ (Free surface flow)



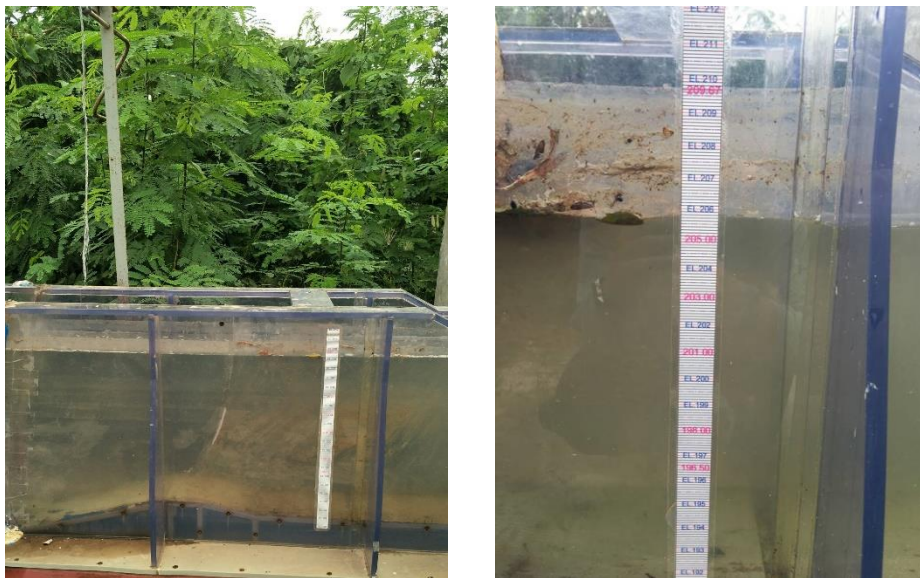
รูปที่ 4(a) สุ่มน้ำเข้าบ่อเพื่อให้เกิดการตกตะกอนก่อนที่น้ำจะไหลเข้าสู่อาคารรับน้ำ



รูปที่ 4(b) น้ำจะไหลเข้าสู่อาคารรับน้ำทางเข้าอุโมงค์ที่มีประตูควบคุมการปิด-เปิด ซึ่งจะมีगेจวัดระดับน้ำติดตั้งอยู่ที่ บริเวณด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ



รูปที่ 4(c) น้ำจะไหลเข้าสู่ท่ออะคริลิกไปยังทางออกอุโมงค์ผิวน้ำที่มีอาคารรับน้ำอยู่



รูปที่ 4(d) รอยให้ระดับน้ำคงที่โดยอ่านค่าระดับน้ำจากเกจวัดระดับที่ติดตั้งไว้ทางด้านเหนือน้ำ



รูปที่ 4(c) เมื่อระดับน้ำคงที่ ให้ทำการอ่านค่าระดับน้ำที่மானอมิเตอร์ทุกๆกิโลเมตรที่ทำการพิจารณา ได้แก่ กม. 0+0.00, 0+0.50, 2+0.00, 4+0.00, 6+0.00, 8+0.00, 15+0.00, 20+0.00, 25+0.00, 30+0.00, 35+0.00, 40+0.00

ผลการศึกษา

ผลการศึกษาได้ดำเนินการแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ใช้ผลการศึกษาแบบจำลองทางกายภาพ (อุโมงค์ฝนนํ้า) โดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology : AIT) นำมาวิเคราะห์ลักษณะสภาพการไหลของน้ำที่ไหลผ่านแบบจำลองอุโมงค์ฝนนํ้าและใช้ผลการศึกษาโดยทำการทดลองที่อุโมงค์มีความยาว 690 เมตร มีอัตราการการไหลเท่ากับ 0.0046 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งได้สมมติฐานว่า ถ้าอุโมงค์ฝนนํ้ามีความยาวที่สั้นลงจากเดิมแต่อัตราการไหลเท่าเดิม ระยะการเปลี่ยนลักษณะการไหลจากแบบเต็มท่อเป็นแบบไม่เต็มท่อจะมีระยะสั้นลงด้วยเช่นกัน

ส่วนที่ 1 จากผลการศึกษาแบบจำลองทางกายภาพ (อุโมงค์ฝนนํ้า) โดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology : AIT) มีดังนี้

กรณีที่ 1

- อัตราการไหล เท่ากับ 0.00406 ลูกบาศก์เมตร/วินาที
- ความเร็วในการไหล เท่ากับ 0.17473 เมตร/วินาที
- ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ฝนนํ้า เท่ากับ 209.67 ม.รทก.
- เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ฝนนํ้า เท่ากับ 0.172 เมตร
- พื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ฝนนํ้า เท่ากับ 0.02324 ตารางเมตร
- ความยาวของอุโมงค์ฝนนํ้า 1470 เมตร

ผลการศึกษาค้นข้อมูลดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ผลการศึกษาความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ผันน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ผันน้ำ กรณีที่ 1

| ระยะทาง | | ระดับท้องท่อ | ระดับหลังท่อ | ความดันน้ำ/ระดับน้ำ (ม.รทก.) | | | ความลึกน้ำในอุโมงค์ | h_f | h_f/L | $V^2/2g$ | f |
|---------|------|--------------|--------------|------------------------------|--------|--------|---------------------|-------|----------|----------|----------|
| ม. | กม. | ม.รทก. | ม.รทก. | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | (ม.) | (ม.) | | | |
| 0 | 0 | 190.54 | | 209.67 | 209.67 | 209.67 | 10 | 0 | 0 | | |
| 50 | 0.05 | 190.54 | 200.54 | 209.5 | 209.7 | 209.6 | 10 | 0.07 | 0.001400 | 0.001556 | |
| 2000 | 2 | 190.34 | 200.34 | 208.9 | 209.15 | 209.03 | 10 | 0.57 | 0.000292 | 0.001556 | 0.032308 |
| 4000 | 4 | 190.14 | 200.14 | 208.45 | 208.7 | 208.58 | 10 | 0.45 | 0.000225 | 0.001556 | 0.024869 |
| 6000 | 6 | 189.94 | 199.94 | 208 | 208.1 | 208.05 | 10 | 0.53 | 0.000265 | 0.001556 | 0.029290 |
| 8000 | 8 | 189.74 | 199.74 | 207.7 | 207.75 | 207.73 | 10 | 0.32 | 0.000160 | 0.001556 | 0.017684 |
| 10000 | 10 | 189.54 | 199.54 | 207.1 | 207.2 | 207.15 | 10 | 0.58 | 0.000290 | 0.001556 | 0.032053 |
| 15000 | 15 | 189.04 | 199.04 | 205.5 | 205.6 | 205.55 | 10 | 1.6 | 0.000320 | 0.001556 | 0.035369 |
| 20000 | 20 | 188.54 | 198.54 | 204.1 | 204.2 | 204.15 | 10 | 1.4 | 0.000280 | 0.001556 | 0.030948 |
| 25000 | 25 | 188.04 | 198.04 | 202.8 | 202.9 | 202.85 | 10 | 1.3 | 0.000260 | 0.001556 | 0.028737 |
| 30000 | 30 | 187.54 | 197.54 | 201.6 | 201.65 | 201.63 | 10 | 1.22 | 0.000244 | 0.001556 | 0.026969 |
| 35000 | 35 | 187.04 | 197.04 | 200.1 | 200.15 | 200.13 | 10 | 1.5 | 0.000300 | 0.001556 | 0.033158 |
| 40000 | 40 | 186.54 | 196.54 | 198.9 | 198.95 | 198.93 | 10 | 1.2 | 0.000240 | 0.001556 | 0.026527 |
| 45000 | 45 | 186.04 | 196.04 | 197.85 | 197.9 | 197.88 | 10 | 1.05 | 0.000210 | 0.001556 | 0.023211 |
| 50000 | 50 | 185.54 | 195.54 | 196.4 | 196.42 | 196.41 | 10 | 1.47 | 0.000294 | 0.001556 | 0.032495 |
| 55000 | 55 | 185.04 | 195.04 | 195.32 | 195.4 | 195.36 | 10 | 1.05 | 0.000210 | 0.001556 | 0.023211 |
| 60000 | 60 | 184.54 | 194.54 | 194.3 | 194.32 | 194.31 | 9.77 | 1.05 | 0.000210 | 0.001556 | 0.023211 |
| 65000 | 65 | 184.04 | 194.04 | 193.25 | 193.3 | 193.28 | 9.24 | 1.03 | 0.000206 | 0.001556 | 0.022769 |
| 70000 | 70 | 183.54 | 193.54 | 192 | 192.03 | 192.02 | 8.47 | 1.26 | 0.000252 | 0.001556 | 0.027853 |
| 75000 | 75 | 183.04 | 193.04 | 190.9 | 190.95 | 190.93 | 7.89 | 1.09 | 0.000218 | 0.001556 | 0.024095 |
| 80000 | 80 | 182.54 | 192.54 | 189.4 | 189.45 | 189.43 | 6.89 | 1.5 | 0.000300 | 0.001556 | 0.033158 |
| 85000 | 85 | 182.04 | 192.04 | 187.28 | 187.3 | 187.29 | 5.25 | 2.14 | 0.000428 | 0.001556 | 0.047306 |
| Average | | | | | | | | | | | 0.028761 |

จากตารางที่ 1.1 แสดงผลการศึกษาความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ผันน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ พบว่า กรณีที่ 1 อัตราการไหล เท่ากับ 0.00406 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ เท่ากับ 209.67 ม.รทก. เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นความดันน้ำจะค่อยๆ ลดลง ความลึกของน้ำภายในอุโมงค์ผันน้ำจะค่อยๆ ลดลงตามระยะทางจนถึงปลายอุโมงค์และมีค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานเฉลี่ยเท่ากับ 0.028761 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาเส้นแนวผิวน้ำต่อไป

ในการศึกษาเพื่อคำนวณหาระดับผิวน้ำ สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธี Standard step ใช้ในการหาระดับผิวน้ำที่มีลักษณะการไหลแบบไม่เต็มท่อ (Free surface flow) และวิธีสมการพลังงานของ Bernoulli ใช้ในการหาระดับผิวน้ำที่มีลักษณะการไหลแบบเต็มท่อ (Pressure flow)

วิธี Standard step กรณีที่น้ำมีลักษณะการไหลแบบไม่เต็มท่อ (Free surface flow)

ขั้นตอนการคำนวณ

- ข้อมูลที่ใช้ในประกอบการคำนวณ ได้แก่ ความลาดท้องน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ ค่าอัตราการไหล สภาพการไหลด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ โดยจะกำหนดให้บริเวณท้ายน้ำมีสภาพการไหลแบบวิกฤติ
- หาค่าความลึกวิกฤติ (y_c) โดยการ Trail & Error เพื่อให้ได้ค่าความลึกที่มีค่า Froude number เท่ากับ 1 เพื่อบอกประเภทของความลาดและร่างเส้นแนวผิว
- หาค่ามุมลาดท้องน้ำ พื้นที่หน้าตัดการไหล ความยาวเส้นขอบเปียก รัศมีชลศาสตร์ ความกว้างผิวน้ำ ความเร็วในการไหล ค่า Froude number ความลาดของเส้นระดับพลังงาน และค่าความลาดของเส้นแนวผิวน้ำเทียบกับท้องน้ำ
- จากนั้นทำการสมมติค่าความลึกของน้ำ (y) โดย $y_c < y <$ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่ออุโมงค์ผิวน้ำ แล้วคำนวณหาค่ามุมลาดท้องน้ำ พื้นที่หน้าตัดการไหล ความยาวเส้นขอบเปียก รัศมีชลศาสตร์ ความกว้างผิวน้ำ ความเร็วในการไหล ค่า Froude number ความลาดของเส้นระดับพลังงาน ความลาดของเส้นพลังงานเฉลี่ย ค่า Froude number เฉลี่ย ค่าความลึกน้ำที่เปลี่ยนไปตามระยะทาง ค่าระยะทางการไหล และค่าความลาดของเส้นแนวผิวน้ำเทียบกับท้องน้ำ
- คำนวณหาค่าระดับน้ำในท่อของแบบจำลองอุโมงค์ผิวน้ำและอุโมงค์ผิวน้ำของจริง ระยะทางสะสมในแบบจำลองท่ออุโมงค์ผิวน้ำและอุโมงค์ผิวน้ำของจริง ตำแหน่งการเกิดแต่ละความลึกและค่าระดับน้ำ เพื่อใช้ในการเขียนเส้นแนวผิวน้ำ

ตารางที่ 1.2 ตารางข้อมูลที่ใช้คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 1

| | | |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| ความยาวท่ออุโมงค์ฝึนนํ้านับจาก มาโนมิเตอร์ตัวแรก | 1467.37 | เมตร |
| ระดับน้ำในโมเดลที่วัดได้ใน มาโนมิเตอร์ตัวแรก (Z_1) | 0.327830 | เมตร |
| ระดับน้ำในโมเดลบริเวณท้ายน้ำ (Z_2) | -0.089000 | เมตร |
| ความเร็วในการไหล (V_2) | 0.184378 | เมตร/วินาที |
| พื้นที่หน้าตัดท่ออุโมงค์ฝึนนํ้า (A_p) | 0.024329 | ตารางเมตร |
| อัตราการไหล (Q_p) | 0.004486 | ลบ.ม./วินาที |
| สัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทาน (f) | 0.029 | - |
| สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (n) | 0.01 | - |
| เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออุโมงค์ฝึนนํ้า (D) | 0.172 | เมตร |
| รัศมีของท่ออุโมงค์ฝึนนํ้า (r) | 0.088 | เมตร |
| ความกว้างคิวนํ้า (T) | 0.165395 | เมตร |
| ความลาดท้องนํ้า | 0.0001 | - |
| ความลาดชันพลังงาน | 0.004000 | - |
| Froude number | 1 | - |
| ความลึกการไหลวิกฤต (y_c) | 0.057914 | เมตร |
| ระดับน้ำในท่ออุโมงค์ ($y = y_c$) | 0.057914 | - |
| มุมความลาดท้องนํ้า (θ) | 1.221873 หรือ 70.008136 | Rad หรือ Degree |
| พื้นที่หน้าตัดการไหล (A) | 0.006974 | ตารางเมตร |
| ความยาวเส้นขอบเปียก (P) | 0.215050 | เมตร |
| รัศมีชลศาสตร์ (R) | 0.032430 | เมตร |

ตารางที่ 1.2.1 ตารางคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 1

| Standard Step Method | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|--------------|--------|------------|---------|
| Y | θ | A | P | T | R | V | Fr^2 | S_f | S_0 | S_{favg} | Fr_{avg}^2 | dy | dx | dy/dx |
| 0.057915 | 1.2219 | 0.0070 | 0.2151 | 0.1654 | 0.0324 | 0.6432 | 1.0000 | 0.0040 | 0.0001 | | | | | -0.0001 |
| 0.06 | 1.2470 | 0.0073 | 0.2195 | 0.1669 | 0.0334 | 0.6127 | 0.8723 | 0.0035 | 0.0001 | 0.0037 | 0.9361 | 0.0021 | 0.0365 | 0.0571 |
| 0.07 | 1.3648 | 0.0090 | 0.2402 | 0.1723 | 0.0375 | 0.4974 | 0.4817 | 0.0020 | 0.0001 | 0.0027 | 0.6770 | 0.0100 | 1.2271 | 0.0081 |
| 0.077 | 1.4420 | 0.0102 | 0.2538 | 0.1745 | 0.0401 | 0.4406 | 0.3392 | 0.0014 | 0.0001 | 0.0017 | 0.4105 | 0.0067 | 2.4830 | 0.0027 |
| 0.090 | 1.5935 | 0.0125 | 0.2805 | 0.1760 | 0.0446 | 0.3584 | 0.1841 | 0.0008 | 0.0001 | 0.0011 | 0.2617 | 0.0133 | 9.6986 | 0.0014 |
| 0.100 | 1.7076 | 0.0143 | 0.3005 | 0.1744 | 0.0475 | 0.3143 | 0.1231 | 0.0006 | 0.0001 | 0.0007 | 0.1536 | 0.0100 | 14.2724 | 0.0007 |
| 0.110 | 1.8235 | 0.0160 | 0.3209 | 0.1704 | 0.0498 | 0.2804 | 0.0854 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0005 | 0.1042 | 0.0100 | 22.2973 | 0.0004 |
| 0.120 | 1.9430 | 0.0177 | 0.3420 | 0.1640 | 0.0517 | 0.2539 | 0.0610 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0004 | 0.0732 | 0.0100 | 32.8888 | 0.0003 |
| 0.130 | 2.0683 | 0.0193 | 0.3640 | 0.1547 | 0.0529 | 0.2328 | 0.0444 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0003 | 0.0527 | 0.0100 | 46.4715 | 0.0002 |
| 0.140 | 2.2030 | 0.0208 | 0.3877 | 0.1420 | 0.0535 | 0.2162 | 0.0326 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0003 | 0.0385 | 0.0100 | 63.1536 | 0.0002 |
| 0.150 | 2.3526 | 0.0221 | 0.4141 | 0.1249 | 0.0534 | 0.2031 | 0.0238 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0282 | 0.0100 | 82.0263 | 0.0001 |
| 0.160 | 2.5290 | 0.0232 | 0.4451 | 0.1012 | 0.0522 | 0.1931 | 0.0166 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0202 | 0.0100 | 99.7105 | 0.0001 |
| 0.172 | 2.8389 | 0.0242 | 0.4997 | 0.0525 | 0.0484 | 0.1854 | 0.0076 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0121 | 0.0120 | 127.3602 | 0.0001 |
| Sum | | | | | | | | | | | | | 501.625771 | |

| ระดับน้ำในท่อ | | ระยะทาง | ระยะทางสะสม | ระยะทางสะสม | กม. | ระดับท้องท่อ | ระดับหลังท่อ | ระดับน้ำ |
|---------------|-----------|------------|-------------|-------------|-----------|--------------|--------------|----------|
| Model | Prototype | Model | Model | Prototype | | (ม.รทก.) | (ม.รทก.) | (ม.รทก.) |
| 0.057915 | 3.4 | 0 | 0 | 0 | 85 | 182.04 | 192.04 | 185.41 |
| 0.060 | 3.5 | 0.036504 | 0.036504 | 0.002122 | 84.997878 | 182.04 | 192.04 | 185.53 |
| 0.070 | 4.1 | 1.227126 | 1.263630 | 0.073467 | 84.926533 | 182.05 | 192.05 | 186.12 |
| 0.077 | 4.5 | 2.482989 | 3.746619 | 0.217828 | 84.782172 | 182.06 | 192.06 | 186.52 |
| 0.090 | 5.2 | 9.698634 | 13.445252 | 0.781707 | 84.218293 | 182.12 | 192.12 | 187.35 |
| 0.100 | 5.8 | 14.272360 | 27.717612 | 1.611502 | 83.388498 | 182.20 | 192.20 | 188.02 |
| 0.110 | 6.4 | 22.297317 | 50.014930 | 2.907868 | 82.092132 | 182.33 | 192.33 | 188.73 |
| 0.120 | 7.0 | 32.888816 | 82.903746 | 4.820024 | 80.179976 | 182.52 | 192.52 | 189.50 |
| 0.130 | 7.6 | 46.471462 | 129.375208 | 7.521875 | 77.478125 | 182.79 | 192.79 | 190.35 |
| 0.140 | 8.1 | 63.153621 | 192.528829 | 11.193626 | 73.806374 | 183.16 | 193.16 | 191.30 |
| 0.150 | 8.7 | 82.026309 | 274.555138 | 15.962636 | 69.037364 | 183.64 | 193.64 | 192.36 |
| 0.160 | 9.3 | 99.710494 | 374.265632 | 21.759804 | 63.240196 | 184.22 | 194.22 | 193.52 |
| 0.172 | 10.0 | 127.360282 | 501.625914 | 29.164531 | 55.835469 | 184.96 | 194.96 | 194.96 |

**หมายเหตุ : ตัวอย่างการคำนวณตารางที่ 1.2.1 ตารางคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 1 ทั้งสองตารางอยู่ในภาคผนวกท้ายเล่ม

****หมายเหตุ :** ตัวแปรดังต่อไปนี้แสดงสมการการคำนวณได้ดัง ตารางที่ 1 แสดงตัวแปรและสมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาระดับน้ำโดยวิธี Standard Step Method

Y คือ ระดับน้ำภายในแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำโดยค่าเริ่มต้นจะเป็นความลึกน้ำการไหลวิกฤต หลังจากนั้นทำการ Trail & Error ไปจนถึงความลึกของน้ำที่เต็มท่อในแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำ (m.)

θ คือ มุมความลาด (slope angle) ท่อน้ำ (rad หรือ degree)

A คือ พื้นที่หน้าการไหล (m^2)

P คือ ความยาวเส้นขอบเปียก (m.)

T คือ ความกว้างผิวน้ำ (m.)

R คือ รัศมีชลศาสตร์ (m.)

V คือ ความเร็วในการไหล (m.)

Fr^2 คือ ค่า Froude Number

S_f คือ ความลาดชันพลังงาน

S_0 คือ ความลาดชันท่อน้ำ = 1:10000

$S_{f_{avg}}$ คือ ความลาดชันพลังงานเฉลี่ย

Fr^2_{avg} คือ ค่า Froude Number เฉลี่ย

d_y คือ ระดับน้ำภายในแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำ (m.)

d_x คือ ระยะทางภายในแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำ (m.)

d_y/d_x คือ ระดับน้ำภายในแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง

ค่าจำกัดความดังต่อไปนี้แสดงได้ดัง ตารางที่ 2 แสดงค่าจำกัดความและวิธีการคำนวณในการหาระดับและระยะทางต่างๆของอุโมงค์ผันน้ำ

ระดับน้ำในท่อของแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำ (Model) คือ ระดับน้ำภายในแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำ โดยค่าเริ่มต้นจะเป็นความลึกน้ำการไหลวิกฤต หลังจากนั้น ทำการ Trail & Error ไปจนถึงความลึกของน้ำที่เต็มท่อในโมเดลท่ออุโมงค์ผันน้ำ (m.)

ระดับน้ำในอุโมงค์ผันน้ำของจริง (Prototype) คือ ระดับน้ำในท่อของโมเดลท่ออุโมงค์ผันน้ำ $\times 58.14$ (m.)

ระยะทางในแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำ (Model) คือ ระยะทางภายในแบบจำลองอุโมงค์ผันน้ำ (m.)

ระยะทางสะสมในแบบจำลองท่ออุโมงค์ผันน้ำ (Model) คือ ระยะทางในโมเดลท่ออุโมงค์ผันน้ำ $_1 +$ ระยะทางในโมเดลท่ออุโมงค์ผันน้ำ $_2$ (m.)

ระยะทางสะสมในอุโมงค์ผันน้ำของจริง (Prototype) คือ (ระยะทางสะสมในโมเดลต่ออุโมงค์ผันน้ำ
×58.14) /1000 (km.)

กม. คือ กม.สุดท้าย – ระยะทางสะสมในต่ออุโมงค์ผันน้ำของจริง (km.)

ระดับท้องท่อ คือ ระดับท้องท่อที่ทำการติดตั้ง-[(กม.×1000)/10000] (m.msl.)

ระดับหลังท่อ คือ ระดับท้องท่อ + 10 (m.msl.)

ระดับน้ำ คือ ระดับท้องท่อ + ระดับน้ำในต่ออุโมงค์ผันน้ำของจริง (m.msl.)

ตารางที่ 1.2.2 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลไม่เต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 1

| กม. | ระดับน้ำ (ม.รทก.) |
|--------|----------------------|
| 55.835 | 194.96 |
| 63.240 | 193.52 |
| 69.037 | 192.36 |
| 73.806 | 191.30 |
| 77.478 | 190.35 |
| 80.180 | 189.50 |
| 82.092 | 188.73 |
| 83.388 | 188.02 |
| 84.218 | 187.35 |
| 84.782 | 186.52 |
| 84.927 | 186.12 |
| 84.998 | 185.53 |
| 85 | 185.41 |

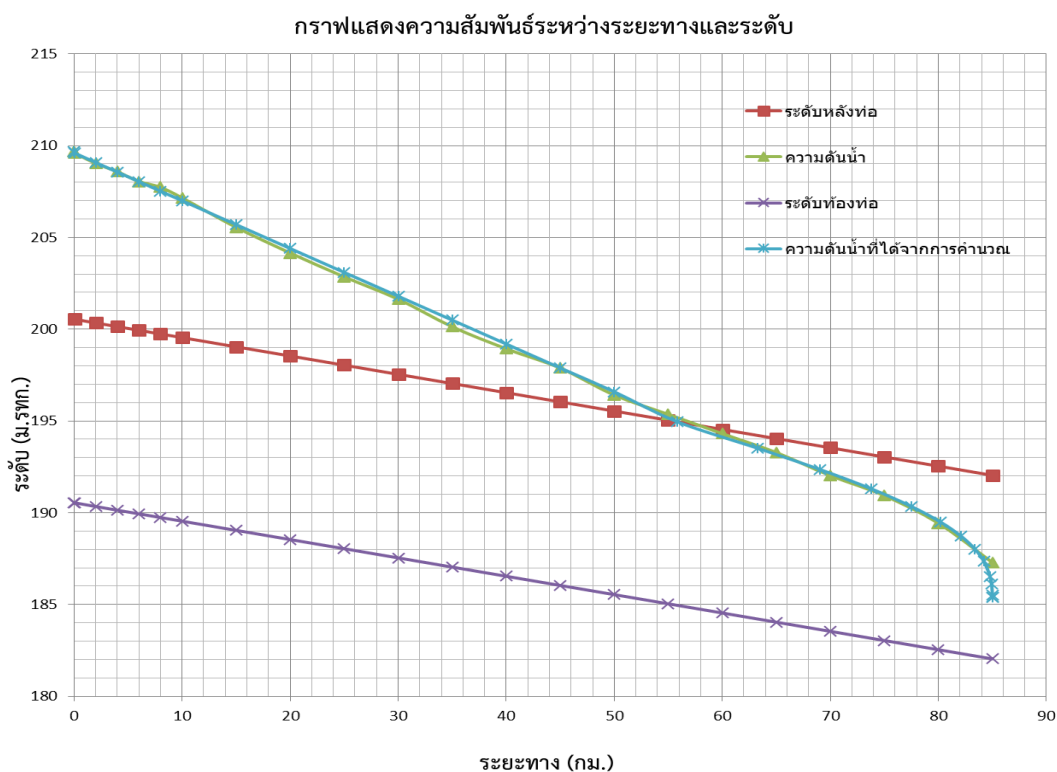
***หมายเหตุ** ระยะ คือ กม. ที่ได้จากตาราง 1.2.1 ที่คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 1
ระดับน้ำ คือ ระดับน้ำที่ได้จากตาราง 1.2.1 ที่คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 1

ตารางที่ 2.2.3 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลเต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการพลังงานของ Bernoulli
กรณี 1

| กม. | ระดับน้ำ (ม.รทก.) |
|------|----------------------|
| 0 | 209.67 |
| 0.05 | 209.60 |
| 2 | 209.08 |
| 4 | 208.56 |
| 6 | 208.04 |
| 8 | 207.52 |
| 10 | 207.00 |
| 15 | 205.70 |
| 20 | 204.40 |
| 25 | 203.09 |
| 30 | 201.79 |
| 35 | 200.49 |
| 40 | 199.19 |
| 45 | 197.89 |
| 50 | 196.59 |

***หมายเหตุ** ระดับน้ำ คือ ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ผันน้ำ - h_f

h_f คือ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ผันน้ำ มาจาก $h_f = f\left(\frac{L}{D}\right) \times \left(\frac{v^2}{2g}\right)$



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับระดับต่างๆของอุโมงค์ผิวน้ำที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ กรณี 1

จากผลการทดลองกรณีที่ 1 ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ เท่ากับ 209.67 ม.รทก. มีอัตราการการไหล เท่ากับ 0.00406 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จากกราฟรูปที่ 5 พบว่าเราสามารถคำนวณหาระดับผิวน้ำจะได้เส้นแนวผิวน้ำดังเส้นความดันน้ำที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะมีลักษณะการไหลแบบเต็มท่อ (Pressure flow) จนถึง กม.55 หลังจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นลักษณะไหลแบบไม่เต็มท่อ (Free surface flow) ไปจนถึงปลายอุโมงค์ที่มีความยาว 1470 เมตร ซึ่งเมื่อนำค่าระดับน้ำบริเวณที่มีลักษณะการไหลจากแบบเต็มท่อจากการเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีสมการพลังงานของ Bernoulli และค่าระดับน้ำบริเวณที่เปลี่ยนเป็นลักษณะการไหลแบบไม่เต็มท่อที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ถือได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากและผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ

กรณีที่ 2

- อัตราการไหล เท่ากับ 0.00344 ลูกบาศก์เมตร/วินาที
- ความเร็วในการไหล เท่ากับ 0.14805 เมตร/วินาที
- ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 205.00 ม.รทก.
- เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 0.172 เมตร
- พื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 0.02324 ตารางเมตร
- ความยาวของอุโมงค์ผันน้ำ 1470 เมตร

ตารางที่ 2.1 ผลการศึกษาความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ผันน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ผันน้ำ กรณีที่ 2

| ระยะทาง | | ระดับท้องท่อ | ระดับหลังท่อ | ความดันน้ำ/ระดับน้ำ (ม.รทก.) | | | ความลึกน้ำในอุโมงค์ | h_f | h_f/L | $V^2/2g$ | f |
|---------|------|--------------|--------------|------------------------------|--------|--------|---------------------|-------|-----------|-----------|-----------|
| ม. | กม. | ม.รทก. | ม.รทก. | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | (ม.) | (ม.) | | | |
| 0 | 0 | 190.54 | | 205 | 205 | 205 | | 0 | 0 | | |
| 50 | 0.05 | 190.54 | 200.54 | 204.98 | 204.98 | 204.98 | 10 | 0.02 | 0.0004000 | 0.0011172 | |
| 2000 | 2 | 190.34 | 200.34 | 204.65 | 204.65 | 204.65 | 10 | 0.33 | 0.0001692 | 0.0011172 | 0.0260545 |
| 4000 | 4 | 190.14 | 200.14 | 204.2 | 204.2 | 204.2 | 10 | 0.45 | 0.0002250 | 0.0011172 | 0.0346407 |
| 6000 | 6 | 189.94 | 199.94 | 203.8 | 203.85 | 203.83 | 10 | 0.37 | 0.0001850 | 0.0011172 | 0.0284824 |
| 8000 | 8 | 189.74 | 199.74 | 203.5 | 203.5 | 203.5 | 10 | 0.33 | 0.0001650 | 0.0011172 | 0.0254032 |
| 10000 | 10 | 189.54 | 199.54 | 203 | 203.1 | 203.05 | 10 | 0.45 | 0.0002250 | 0.0011172 | 0.0346407 |
| 15000 | 15 | 189.04 | 199.04 | 201.7 | 201.7 | 201.7 | 10 | 1.35 | 0.0002700 | 0.0011172 | 0.0415688 |
| 20000 | 20 | 188.54 | 198.54 | 200.5 | 200.5 | 200.5 | 10 | 1.2 | 0.0002400 | 0.0011172 | 0.0369501 |
| 25000 | 25 | 188.04 | 198.04 | 199.6 | 199.6 | 199.6 | 10 | 0.9 | 0.0001800 | 0.0011172 | 0.0277126 |
| 30000 | 30 | 187.54 | 197.54 | 198.8 | 198.8 | 198.8 | 10 | 0.8 | 0.0001600 | 0.0011172 | 0.0246334 |
| 35000 | 35 | 187.04 | 197.04 | 197.6 | 197.6 | 197.6 | 10 | 1.2 | 0.0002400 | 0.0011172 | 0.0369501 |
| 40000 | 40 | 186.54 | 196.54 | 196.65 | 196.65 | 196.65 | 10 | 0.95 | 0.0001900 | 0.0011172 | 0.0292521 |
| 45000 | 45 | 186.04 | 196.04 | 195.85 | 195.85 | 195.85 | 9.81 | 0.8 | 0.0001600 | 0.0011172 | 0.0246334 |
| 50000 | 50 | 185.54 | 195.54 | 194.5 | 194.5 | 194.5 | 8.96 | 1.35 | 0.0002700 | 0.0011172 | 0.0415688 |
| 55000 | 55 | 185.04 | 195.04 | 193.6 | 193.6 | 193.6 | 8.56 | 0.9 | 0.0001800 | 0.0011172 | 0.0277126 |
| 60000 | 60 | 184.54 | 194.54 | 192.9 | 192.9 | 192.9 | 8.36 | 0.7 | 0.0001400 | 0.0011172 | 0.0215542 |
| 65000 | 65 | 184.04 | 194.04 | 192.15 | 192.15 | 192.15 | 8.11 | 0.75 | 0.0001500 | 0.0011172 | 0.0230938 |
| 70000 | 70 | 183.54 | 193.54 | 191.1 | 191.1 | 191.1 | 7.56 | 1.05 | 0.0002100 | 0.0011172 | 0.0323313 |
| 75000 | 75 | 183.04 | 193.04 | 190.2 | 190.2 | 190.2 | 7.16 | 0.9 | 0.0001800 | 0.0011172 | 0.0277126 |
| 80000 | 80 | 182.54 | 192.54 | 188.7 | 188.7 | 188.7 | 6.16 | 1.5 | 0.0003000 | 0.0011172 | 0.0461876 |
| 85000 | 85 | 182.04 | 192.04 | 187.1 | 187.1 | 187.1 | 5.06 | 1.6 | 0.0003200 | 0.0011172 | 0.0492668 |
| Average | | | | | | | | | | | 0.032017 |

จากตารางที่ 2.1 แสดงผลการวัดความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ พบว่า กรณีที่ 2 อัตราการไหล เท่ากับ 0.00344 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 205.00 ม.รทก. เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ความดันน้ำจะค่อยๆ

ลดลง โดยความลึกของน้ำภายในอุโมงค์จะค่อยๆลดลงตามระยะทางจนถึงปลายอุโมงค์และมีค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานเฉลี่ยเท่ากับ 0.032017 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาเส้นแนวผิวน้ำต่อไป

ในการศึกษาเพื่อคำนวณหาระดับผิวน้ำ สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธี Standard step ใช้ในการหาระดับผิวน้ำที่มีลักษณะการไหลแบบไม่เต็มท่อ (Free surface flow) และวิธีสมการพลังงานของ Bernoulli ใช้ในการหาระดับผิวน้ำที่มีลักษณะการไหลแบบเต็มท่อ (Pressure flow)

ตารางที่ 2.2 ตารางข้อมูลที่ใช้คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 2

| | | |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| ความยาวท่ออุโมงค์ผิวน้ำนับจาก มาโนมิเตอร์ตัวแรก | 1467.37 | เมตร |
| ระดับน้ำในโมเดลที่วัดได้ใน มาโนมิเตอร์ตัวแรก (Z_1) | 0.248366 | เมตร |
| ระดับน้ำในโมเดลบริเวณท้ายน้ำ (Z_2) | -0.093415 | เมตร |
| ความเร็วในการไหล (V_2) | 0.158147 | เมตร/วินาที |
| พื้นที่หน้าตัดท่ออุโมงค์ผิวน้ำ (A_p) | 0.024329 | ตารางเมตร |
| อัตราการไหล (Q_p) | 0.003848 | ลบ.ม./วินาที |
| สัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทาน (f) | 0.032 | - |
| สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (n) | 0.01 | - |
| เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออุโมงค์ผิวน้ำ (D) | 0.172 | เมตร |
| รัศมีของท่ออุโมงค์ผิวน้ำ (r) | 0.088 | เมตร |
| ความกว้างผิวน้ำ (T) | 0.161910 | เมตร |
| ความลาดท้องน้ำ | 0.0001 | - |
| ความลาดชันพลังงาน | 0.004811 | - |
| Froude number | 1 | - |
| ความลึกการไหลวิกฤต (y_c) | 0.053500 | เมตร |
| ระดับน้ำในท่ออุโมงค์ ($y = y_c$) | 0.053500 | - |
| มุมความลาดท้องน้ำ (θ) | 1.167935 หรือ 66.917763 | Rad หรือ Degree |
| พื้นที่หน้าตัดการไหล (A) | 0.006252 | ตารางเมตร |
| ความยาวเส้นขอบเปียก (P) | 0.205557 | เมตร |
| รัศมีชลศาสตร์ (R) | 0.030413 | เมตร |

ตารางที่ 2.2.1 ตารางคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 2

| Standard Step Method | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|--------------|--------|------------|---------|
| Y | θ | A | P | T | R | V | Fr^2 | S_f | S_0 | S_{fAVG} | Fr_{avg}^2 | dy | dx | dy/dx |
| 0.053499 | 1.1679 | 0.0063 | 0.2056 | 0.1619 | 0.0304 | 0.6154 | 1.0000 | 0.0048 | 0.0001 | | | | | -0.0001 |
| 0.06 | 1.2470 | 0.0073 | 0.2195 | 0.1669 | 0.0334 | 0.5256 | 0.6417 | 0.0031 | 0.0001 | 0.0040 | 0.8209 | 0.0065 | 0.3020 | 0.0215 |
| 0.07 | 1.3648 | 0.0090 | 0.2402 | 0.1723 | 0.0375 | 0.4266 | 0.3544 | 0.0017 | 0.0001 | 0.0024 | 0.4981 | 0.0100 | 2.1603 | 0.0046 |
| 0.077 | 1.4420 | 0.0102 | 0.2538 | 0.1745 | 0.0401 | 0.3779 | 0.2496 | 0.0013 | 0.0001 | 0.0015 | 0.3020 | 0.0067 | 3.3413 | 0.0020 |
| 0.090 | 1.5935 | 0.0125 | 0.2805 | 0.1760 | 0.0446 | 0.3074 | 0.1354 | 0.0007 | 0.0001 | 0.0010 | 0.1925 | 0.0133 | 12.1110 | 0.0011 |
| 0.100 | 1.7076 | 0.0143 | 0.3005 | 0.1744 | 0.0475 | 0.2696 | 0.0905 | 0.0005 | 0.0001 | 0.0006 | 0.1130 | 0.0100 | 17.2328 | 0.0006 |
| 0.110 | 1.8235 | 0.0160 | 0.3209 | 0.1704 | 0.0498 | 0.2405 | 0.0628 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0004 | 0.0767 | 0.0100 | 26.7605 | 0.0004 |
| 0.120 | 1.9430 | 0.0177 | 0.3420 | 0.1640 | 0.0517 | 0.2177 | 0.0448 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0003 | 0.0538 | 0.0100 | 39.6461 | 0.0003 |
| 0.130 | 2.0683 | 0.0193 | 0.3640 | 0.1547 | 0.0529 | 0.1997 | 0.0326 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0003 | 0.0387 | 0.0100 | 56.7074 | 0.0002 |
| 0.140 | 2.2030 | 0.0208 | 0.3877 | 0.1420 | 0.0535 | 0.1854 | 0.0240 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0283 | 0.0100 | 78.5261 | 0.0001 |
| 0.150 | 2.3526 | 0.0221 | 0.4141 | 0.1249 | 0.0534 | 0.1742 | 0.0175 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0207 | 0.0100 | 104.4174 | 0.0001 |
| 0.160 | 2.5290 | 0.0232 | 0.4451 | 0.1012 | 0.0522 | 0.1656 | 0.0122 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0148 | 0.0100 | 129.8673 | 0.0001 |
| 0.172 | 2.8389 | 0.0242 | 0.4997 | 0.0525 | 0.0484 | 0.1591 | 0.0056 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0089 | 0.0120 | 166.9009 | 0.0001 |
| Sum | | | | | | | | | | | | | 637.973177 | |

| ระดับน้ำในท่อ | | ระยะทาง | ระยะทางสะสม | ระยะทางสะสม | กม. | ระดับท้องท่อ | ระดับหลังท่อ | ระดับน้ำ |
|---------------|-----------|------------|-------------|-------------|-----------|--------------|--------------|----------|
| Model | Prototype | Model | Model | Prototype | | (ม.รทก.) | (ม.รทก.) | (ม.รทก.) |
| 0.053499 | 3.1 | 0 | 0 | 0 | 85 | 182.04 | 192.04 | 185.15 |
| 0.060 | 3.5 | 0.301980 | 0.301980 | 0.017557 | 84.982443 | 182.04 | 192.04 | 185.53 |
| 0.070 | 4.1 | 2.160334 | 2.462314 | 0.143159 | 84.856841 | 182.05 | 192.05 | 186.12 |
| 0.077 | 4.5 | 3.341321 | 5.803635 | 0.337423 | 84.662577 | 182.07 | 192.07 | 186.53 |
| 0.090 | 5.2 | 12.110987 | 17.914622 | 1.041556 | 83.958444 | 182.14 | 192.14 | 187.38 |
| 0.100 | 5.8 | 17.232820 | 35.147442 | 2.043472 | 82.956528 | 182.24 | 192.24 | 188.06 |
| 0.110 | 6.4 | 26.760475 | 61.907917 | 3.599326 | 81.400674 | 182.40 | 192.40 | 188.80 |
| 0.120 | 7.0 | 39.646100 | 101.554017 | 5.904351 | 79.095649 | 182.63 | 192.63 | 189.61 |
| 0.130 | 7.6 | 56.707400 | 158.261417 | 9.201319 | 75.798681 | 182.96 | 192.96 | 190.52 |
| 0.140 | 8.1 | 78.526027 | 236.787444 | 13.766822 | 71.233178 | 183.42 | 193.42 | 191.56 |
| 0.150 | 8.7 | 104.417350 | 341.204794 | 19.837647 | 65.162353 | 184.02 | 194.02 | 192.74 |
| 0.160 | 9.3 | 129.867255 | 471.072049 | 27.388129 | 57.611871 | 184.78 | 194.78 | 194.08 |
| 0.172 | 10.0 | 166.900866 | 637.972915 | 37.091745 | 47.908255 | 185.75 | 195.75 | 195.75 |

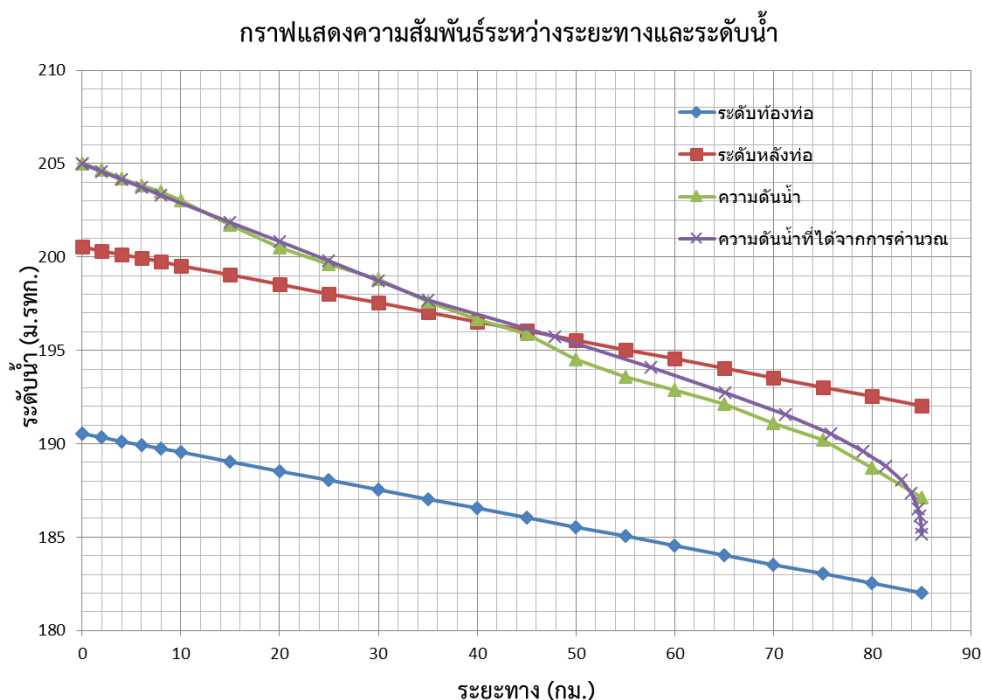
ตารางที่ 2.2.2 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลไม่เต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 2

| กม. | ระดับน้ำ (ม.รทก.) |
|--------|----------------------|
| 47.908 | 195.75 |
| 57.612 | 194.08 |
| 65.162 | 192.74 |
| 71.233 | 191.56 |
| 75.799 | 190.52 |
| 79.096 | 189.61 |
| 81.401 | 188.80 |
| 82.957 | 188.06 |
| 83.958 | 187.38 |
| 84.663 | 186.53 |
| 84.857 | 186.12 |
| 84.982 | 185.53 |
| 85 | 185.15 |

***หมายเหตุ** ระยะ คือ กม. ที่ได้จกตาราง 2.2.1 ที่คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 2
ระดับน้ำ คือ ระดับน้ำที่ได้จกตาราง 2.2.1 ที่คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 2

ตารางที่ 2.2.3 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลเต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการพลังงานของ Bernoulli
กรณีที่ 2

| กม. | ระดับน้ำ (ม.รทก.) |
|------|----------------------|
| 0 | 205 |
| 0.05 | 204.98 |
| 2 | 204.56 |
| 4 | 204.15 |
| 6 | 203.73 |
| 8 | 203.32 |
| 15 | 201.86 |
| 20 | 200.82 |
| 25 | 199.78 |
| 30 | 198.74 |
| 35 | 197.70 |



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับระดับต่างๆของอุโมงค์ผิวน้ำที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ กรณีที่ 2

จากผลการทดลองกรณีที่ 2 อัตราการไหล เท่ากับ 0.00344 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ เท่ากับ 205.00 ม.รทก. จากกราฟรูปที่ 6 พบว่าเราสามารถคำนวณหาระดับผิวน้ำจะได้เส้นแนวผิวน้ำดังเส้นความดันน้ำที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะมีลักษณะการไหลแบบเต็มท่อ (Pressure flow) จนถึง กม.47 หลังจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นลักษณะไหลแบบไม่เต็มท่อ (Free surface flow) ไปจนถึงปลายอุโมงค์ที่มีความยาว 1470 เมตร ซึ่งเมื่อนำค่าระดับน้ำบริเวณที่มีลักษณะการไหลจากแบบเต็มท่อจากการเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีสมการพลังงานของ Bernoulli และค่าระดับน้ำบริเวณที่เปลี่ยนเป็นลักษณะการไหลแบบไม่เต็มท่อที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ถือได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากและผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ

กรณีที่ 3

- อัตราการไหล เท่ากับ 0.00310 ลูกบาศก์เมตร/วินาที
- ความเร็วในการไหล เท่ากับ 0.13342 เมตร/วินาที
- ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 203.00 ม.รทก.
- เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 0.172 เมตร
- พื้นที่หน้าตัดของท่ออุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 0.02324 ตารางเมตร
- ความยาวท่ออุโมงค์ผันน้ำ 1470 เมตร

ผลการศึกษาได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการวัดความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ผันน้ำ

| ระยะทาง | | ระดับท้องท่อ | ระดับหลังท่อ | ความดันน้ำ/ระดับน้ำ (ม.รทก.) | | | ความลึกน้ำในอุโมงค์ | h_f | h_f/L | $V^2/2g$ | f |
|---------|------|--------------|--------------|------------------------------|--------|--------|---------------------|-------|----------|----------|----------|
| ม. | กม. | ม.รทก. | ม.รทก. | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | (ม.) | (ม.) | | | |
| 0 | 0 | 190.54 | | 203 | 203 | 203 | | 0 | 0 | | |
| 50 | 0.05 | 190.54 | 200.54 | 202.98 | 202.98 | 202.98 | 10 | 0.02 | 0.000400 | 0.000907 | |
| 2000 | 2 | 190.34 | 200.34 | 202.55 | 202.55 | 202.55 | 10 | 0.43 | 0.000221 | 0.000907 | 0.041805 |
| 4000 | 4 | 190.14 | 200.14 | 202.05 | 202.05 | 202.05 | 10 | 0.5 | 0.000250 | 0.000907 | 0.047396 |
| 6000 | 6 | 189.94 | 199.94 | 201.7 | 201.7 | 201.7 | 10 | 0.35 | 0.000175 | 0.000907 | 0.033177 |
| 8000 | 8 | 189.74 | 199.74 | 201.4 | 201.4 | 201.4 | 10 | 0.3 | 0.000150 | 0.000907 | 0.028437 |
| 10000 | 10 | 189.54 | 199.54 | 200.9 | 200.9 | 200.9 | 10 | 0.5 | 0.000250 | 0.000907 | 0.047396 |
| 15000 | 15 | 189.04 | 199.04 | 199.6 | 199.6 | 199.6 | 10 | 1.3 | 0.000260 | 0.000907 | 0.049291 |
| 20000 | 20 | 188.54 | 198.54 | 198.4 | 198.4 | 198.4 | 9.86 | 1.2 | 0.000240 | 0.000907 | 0.045500 |
| 25000 | 25 | 188.04 | 198.04 | 197.75 | 197.75 | 197.75 | 9.71 | 0.65 | 0.000130 | 0.000907 | 0.024646 |
| 30000 | 30 | 187.54 | 197.54 | 197 | 197 | 197 | 9.46 | 0.75 | 0.000150 | 0.000907 | 0.028437 |
| 35000 | 35 | 187.04 | 197.04 | 196.25 | 196.25 | 196.25 | 9.21 | 0.75 | 0.000150 | 0.000907 | 0.028437 |
| 40000 | 40 | 186.54 | 196.54 | 195.5 | 195.5 | 195.5 | 8.96 | 0.75 | 0.000150 | 0.000907 | 0.028437 |
| 45000 | 45 | 186.04 | 196.04 | 194.8 | 194.8 | 194.8 | 8.76 | 0.7 | 0.000140 | 0.000907 | 0.026542 |
| 50000 | 50 | 185.54 | 195.54 | 193.7 | 193.7 | 193.7 | 8.16 | 1.1 | 0.000220 | 0.000907 | 0.041708 |
| 55000 | 55 | 185.04 | 195.04 | 193 | 193 | 193 | 7.96 | 0.7 | 0.000140 | 0.000907 | 0.026542 |
| 60000 | 60 | 184.54 | 194.54 | 192.3 | 192.3 | 192.3 | 7.76 | 0.7 | 0.000140 | 0.000907 | 0.026542 |
| 65000 | 65 | 184.04 | 194.04 | 191.6 | 191.6 | 191.6 | 7.56 | 0.7 | 0.000140 | 0.000907 | 0.026542 |
| 70000 | 70 | 183.54 | 193.54 | 190.6 | 190.6 | 190.6 | 7.06 | 1 | 0.000200 | 0.000907 | 0.037916 |
| 75000 | 75 | 183.04 | 193.04 | 189.8 | 189.8 | 189.8 | 6.76 | 0.8 | 0.000160 | 0.000907 | 0.030333 |
| 80000 | 80 | 182.54 | 192.54 | 188.45 | 188.45 | 188.45 | 5.91 | 1.35 | 0.000270 | 0.000907 | 0.051187 |
| 85000 | 85 | 182.04 | 192.04 | 186.85 | 186.85 | 186.85 | 4.81 | 1.6 | 0.000320 | 0.000907 | 0.060666 |
| Average | | | | | | | | | | | 0.036547 |

จากตารางที่ 3.1 แสดงผลการวัดความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ พบว่า กรณีที่ 3 อัตราการไหล เท่ากับ 0.00310 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ เท่ากับ 203.00 ม.รทก. เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ความดันน้ำจะค่อยๆ

ลดลง โดยความลึกของน้ำภายในอุโมงค์จะค่อยๆลดลงตามระยะทางจนถึงปลายอุโมงค์และมีค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานเฉลี่ยเท่ากับ 0.036547 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาเส้นแนวผิวน้ำต่อไป

ในการศึกษาเพื่อคำนวณหาระดับผิวน้ำ สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธี Standard step ใช้ในการหาระดับผิวน้ำที่มีลักษณะการไหลแบบไม่เต็มท่อ (Free surface flow) และวิธีสมการพลังงานของ Bernoulli ใช้ในการหาระดับผิวน้ำที่มีลักษณะการไหลแบบเต็มท่อ (Pressure flow)

ตารางที่ 3.2 ตารางข้อมูลที่ใช้คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 3

| | | |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| ความยาวท่ออุโมงค์ผิวน้ำนับจาก มาโนมิเตอร์ตัวแรก | 1467.37 | เมตร |
| ระดับน้ำในโมเดลที่วัดได้ใน มาโนมิเตอร์ตัวแรก (Z_1) | 0.213966 | เมตร |
| ระดับน้ำในโมเดลบริเวณท้ายน้ำ (Z_2) | -0.096494 | เมตร |
| ความเร็วในการไหล (V_2) | 0.140970 | เมตร/วินาที |
| พื้นที่หน้าตัดท่ออุโมงค์ผิวน้ำ (A_p) | 0.024329 | ตารางเมตร |
| อัตราการไหล (Q_p) | 0.003430 | ลบ.ม./วินาที |
| สัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทาน (f) | 0.036 | - |
| สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (n) | 0.01 | - |
| เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออุโมงค์ผิวน้ำ (D) | 0.172 | เมตร |
| รัศมีของท่ออุโมงค์ผิวน้ำ (r) | 0.088 | เมตร |
| ความกว้างผิวน้ำ (T) | 0.159144 | เมตร |
| ความลาดท้องน้ำ | 0.0001 | - |
| ความลาดชันพลังงาน | 0.003991 | - |
| Froude number | 1 | - |
| ความลึกการไหลวิกฤต (y_c) | 0.050420 | เมตร |
| ระดับน้ำในท่ออุโมงค์ผิวน้ำ ($y = y_c$) | 0.050420 | - |
| มุมความลาดท้องน้ำ (θ) | 1.129572 หรือ 64.719724 | Rad หรือ Degree |
| พื้นที่หน้าตัดการไหล (A) | 0.005757 | ตารางเมตร |
| ความยาวเส้นขอบเปียก (P) | 0.198805 | เมตร |
| รัศมีชลศาสตร์ (R) | 0.028959 | เมตร |

ตารางที่ 3.2.1 ตารางคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 3

| Standard Step Method | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|--------------|--------|-------------|---------|
| Y | θ | A | P | T | R | V | Fr^2 | S_f | S_0 | S_{FAVG} | Fr_{avg}^2 | dy | dx | dy/dx |
| 0.050420 | 1.1296 | 0.0058 | 0.1988 | 0.1591 | 0.0290 | 0.5957 | 1.0000 | 0.0040 | 0.0001 | | | | | -0.0001 |
| 0.06 | 1.2470 | 0.0073 | 0.2195 | 0.1669 | 0.0334 | 0.4685 | 0.5099 | 0.0020 | 0.0001 | 0.0030 | 0.7550 | 0.0096 | 0.8047 | 0.0119 |
| 0.07 | 1.3648 | 0.0090 | 0.2402 | 0.1723 | 0.0375 | 0.3803 | 0.2816 | 0.0012 | 0.0001 | 0.0016 | 0.3958 | 0.0100 | 4.0360 | 0.0025 |
| 0.077 | 1.4420 | 0.0102 | 0.2538 | 0.1745 | 0.0401 | 0.3369 | 0.1983 | 0.0008 | 0.0001 | 0.0010 | 0.2400 | 0.0067 | 5.7323 | 0.0012 |
| 0.090 | 1.5935 | 0.0125 | 0.2805 | 0.1760 | 0.0446 | 0.2740 | 0.1076 | 0.0005 | 0.0001 | 0.0007 | 0.1530 | 0.0133 | 20.4702 | 0.0006 |
| 0.100 | 1.7076 | 0.0143 | 0.3005 | 0.1744 | 0.0475 | 0.2403 | 0.0719 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0004 | 0.0898 | 0.0100 | 29.8296 | 0.0003 |
| 0.110 | 1.8235 | 0.0160 | 0.3209 | 0.1704 | 0.0498 | 0.2144 | 0.0499 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0003 | 0.0609 | 0.0100 | 48.5804 | 0.0002 |
| 0.120 | 1.9430 | 0.0177 | 0.3420 | 0.1640 | 0.0517 | 0.1941 | 0.0356 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0428 | 0.0100 | 77.7012 | 0.0001 |
| 0.130 | 2.0683 | 0.0193 | 0.3640 | 0.1547 | 0.0529 | 0.1780 | 0.0259 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0308 | 0.0100 | 124.8586 | 0.0001 |
| 0.140 | 2.2030 | 0.0208 | 0.3877 | 0.1420 | 0.0535 | 0.1653 | 0.0191 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0225 | 0.0100 | 205.9663 | 0.0000 |
| 0.150 | 2.3526 | 0.0221 | 0.4141 | 0.1249 | 0.0534 | 0.1553 | 0.0139 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0165 | 0.0100 | 354.8605 | 0.0000 |
| 0.160 | 2.5290 | 0.0232 | 0.4451 | 0.1012 | 0.0522 | 0.1477 | 0.0097 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0118 | 0.0100 | 621.4250 | 0.0000 |
| 0.172 | 2.8389 | 0.0242 | 0.4997 | 0.0525 | 0.0484 | 0.1418 | 0.0044 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0071 | 0.0120 | 925.7469 | 0.0000 |
| Sum | | | | | | | | | | | | | 2420.011595 | |

| ระดับน้ำในท่อ | | ระยะทาง | ระยะทางสะสม | ระยะทางสะสม | กม. | ระดับท้องท่อ | ระดับหลังท่อ | ระดับน้ำ |
|---------------|-----------|------------|-------------|-------------|------------|--------------|--------------|----------|
| Model | Prototype | Model | Model | Prototype | | (ม.รทก.) | (ม.รทก.) | (ม.รทก.) |
| 0.050420 | 2.9 | 0 | 0 | 0 | 85 | 182.04 | 192.04 | 184.97 |
| 0.060 | 3.5 | 0.804695 | 0.804695 | 0.046785 | 84.953215 | 182.04 | 192.04 | 185.53 |
| 0.070 | 4.1 | 4.035981 | 4.840677 | 0.281437 | 84.718563 | 182.07 | 192.07 | 186.14 |
| 0.077 | 4.5 | 5.732305 | 10.572981 | 0.614713 | 84.385287 | 182.10 | 192.10 | 186.56 |
| 0.090 | 5.2 | 20.470158 | 31.043139 | 1.804848 | 83.195152 | 182.22 | 192.22 | 187.45 |
| 0.100 | 5.8 | 29.829559 | 60.872698 | 3.539139 | 81.460861 | 182.39 | 192.39 | 188.21 |
| 0.110 | 6.4 | 48.580439 | 109.453137 | 6.363605 | 78.636395 | 182.68 | 192.68 | 189.07 |
| 0.120 | 7.0 | 77.701158 | 187.154296 | 10.881151 | 74.118849 | 183.13 | 193.13 | 190.10 |
| 0.130 | 7.6 | 124.858566 | 312.012862 | 18.140428 | 66.859572 | 183.85 | 193.85 | 191.41 |
| 0.140 | 8.1 | 205.966266 | 517.979128 | 30.115306 | 54.884694 | 185.05 | 195.05 | 193.19 |
| 0.150 | 8.7 | 354.860406 | 872.839533 | 50.746890 | 34.253110 | 187.11 | 197.11 | 195.84 |
| 0.160 | 9.3 | 621.424723 | 1494.264256 | 86.876524 | -1.876524 | 190.73 | 200.73 | 200.03 |
| 0.172 | 10.0 | 925.746323 | 2420.010579 | 140.699415 | -55.699415 | 196.11 | 206.11 | 206.11 |

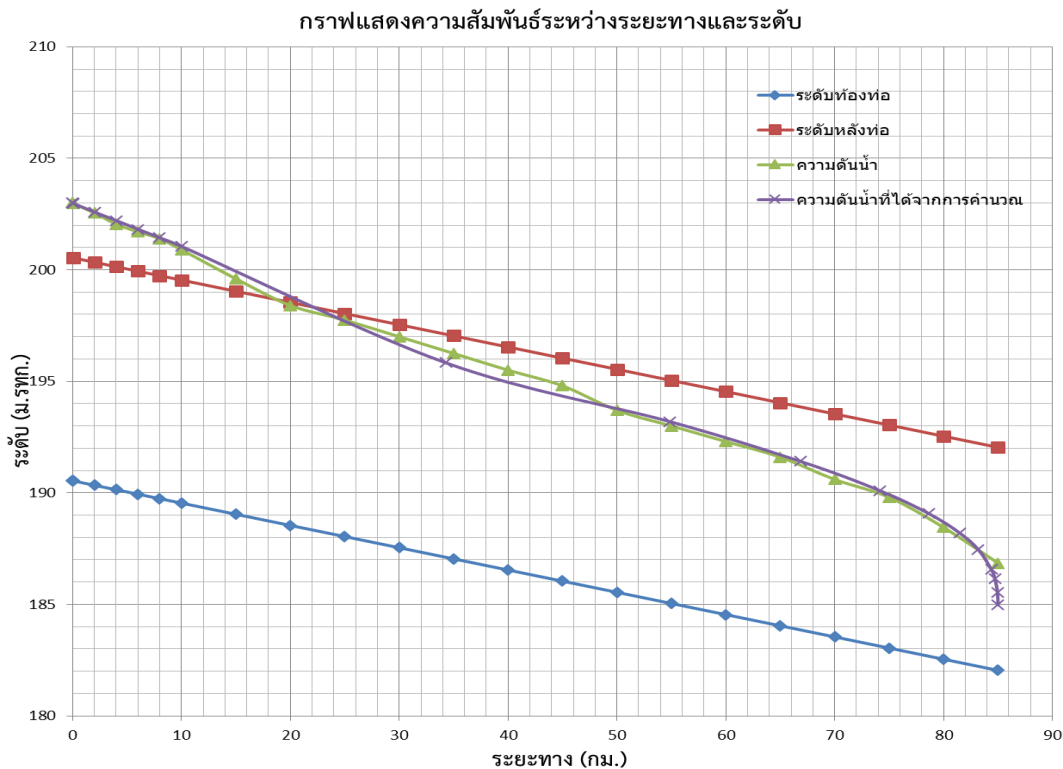
ตารางที่ 3.2.2 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลไม่เต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณี 3

| กม. | ระดับน้ำ (ม.รทก.) |
|--------|----------------------|
| 34.253 | 195.836 |
| 54.885 | 193.191 |
| 66.860 | 191.412 |
| 74.119 | 190.105 |
| 78.636 | 189.072 |
| 81.461 | 188.208 |
| 83.195 | 187.453 |
| 84.385 | 186.561 |
| 84.719 | 186.138 |
| 84.953 | 185.533 |
| 85 | 184.971 |

***หมายเหตุ** ระยะ คือ กม. ที่ได้จากตาราง 3.2.1 ที่คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 2
ระดับน้ำ คือ ระดับน้ำที่ได้จากตาราง 3.2.1 ที่คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 2

ตารางที่ 3.2.3 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลเต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการพลังงานของ Bernoulli
กรณีทดลอง 3

| กม. | ระดับน้ำ (ม.รทก.) |
|------|----------------------|
| 0 | 203 |
| 0.05 | 202.980 |
| 2 | 202.594 |
| 4 | 202.209 |
| 6 | 201.823 |
| 8 | 201.438 |
| 10 | 201.052 |



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับระดับต่างๆของอุโมงค์ผิวน้ำที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ กรณี 3

จากผลการทดลองกรณีที่ 3 อัตราการไหล เท่ากับ 0.00310 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ เท่ากับ 203.00 ม.รทก. จากกราฟรูปที่ 7 พบว่าเราสามารถคำนวณหาระดับผิวน้ำจะได้เส้นแนวผิวน้ำดังเส้นความดันน้ำที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะมีลักษณะการไหลแบบเต็มทอ (Pressure flow) จนถึง กม.23 หลังจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นลักษณะไหลแบบไม่เต็มทอ (Free surface flow) ไปจนถึงปลายอุโมงค์ที่มีความยาว 1470 เมตร ซึ่งเมื่อนำค่าระดับน้ำบริเวณที่มีลักษณะการไหลจากแบบเต็มทอจากการเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีสมการพลังงานของ Bernoulli และค่าระดับน้ำบริเวณที่เปลี่ยนเป็นลักษณะการไหลแบบไม่เต็มทอที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ถือได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากและผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ

กรณีที่ 4

- อัตราการไหล เท่ากับ 0.00287 ลูกบาศก์เมตร/วินาที
- ความเร็วในการไหล เท่ากับ 0.12352 เมตร/วินาที
- ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 201 ม.รทก.
- เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 0.172 เมตร
- พื้นที่หน้าตัดของท่ออุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 0.02324 ตารางเมตร
- ความยาวของท่ออุโมงค์ผันน้ำ 1470 เมตร

ผลการศึกษาได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ผันน้ำ

| ระยะทาง | | ระดับท้องท่อ | ระดับหลังท่อ | ความดันน้ำ/ระดับน้ำ (ม.รทก.) | | | ความลึกน้ำในอุโมงค์ | h_f | h_f/L | $V^2/2g$ | f |
|---------|------|--------------|--------------|------------------------------|--------|--------|---------------------|-------|----------|----------|----------|
| ม. | กม. | ม.รทก. | ม.รทก. | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | (ม.) | (ม.) | | | |
| 0 | 0 | 190.54 | | 200.95 | 200.98 | 200.97 | | 0 | 0 | | |
| 50 | 0.05 | 190.54 | 200.54 | 200.92 | 201 | 200.96 | 10 | 0.01 | 0.000200 | 0.000778 | |
| 2000 | 2 | 190.34 | 200.34 | 200.4 | 200.5 | 200.45 | 10 | 0.51 | 0.000262 | 0.000778 | 0.057849 |
| 4000 | 4 | 190.14 | 200.14 | 200 | 200.05 | 200.03 | 9.89 | 0.42 | 0.000210 | 0.000778 | 0.046449 |
| 6000 | 6 | 189.94 | 199.94 | 199.5 | 199.55 | 199.53 | 9.59 | 0.5 | 0.000250 | 0.000778 | 0.055296 |
| 8000 | 8 | 189.74 | 199.74 | 199.2 | 199.25 | 199.23 | 9.49 | 0.3 | 0.000150 | 0.000778 | 0.033178 |
| 10000 | 10 | 189.54 | 199.54 | 198.9 | 198.95 | 198.93 | 9.39 | 0.3 | 0.000150 | 0.000778 | 0.033178 |
| 15000 | 15 | 189.04 | 199.04 | 198 | 198.05 | 198.03 | 8.99 | 0.9 | 0.000180 | 0.000778 | 0.039813 |
| 20000 | 20 | 188.54 | 198.54 | 197.3 | 197.3 | 197.3 | 8.76 | 0.73 | 0.000146 | 0.000778 | 0.032293 |
| 25000 | 25 | 188.04 | 198.04 | 196.5 | 196.5 | 196.5 | 8.46 | 0.8 | 0.000160 | 0.000778 | 0.035390 |
| 30000 | 30 | 187.54 | 197.54 | 195.95 | 195.95 | 195.95 | 8.41 | 0.55 | 0.000110 | 0.000778 | 0.024330 |
| 35000 | 35 | 187.04 | 197.04 | 195 | 195 | 195 | 7.96 | 0.95 | 0.000190 | 0.000778 | 0.042025 |
| 40000 | 40 | 186.54 | 196.54 | 194.3 | 194.3 | 194.3 | 7.76 | 0.7 | 0.000140 | 0.000778 | 0.030966 |
| 45000 | 45 | 186.04 | 196.04 | 193.85 | 193.85 | 193.85 | 7.81 | 0.45 | 0.000090 | 0.000778 | 0.019907 |
| 50000 | 50 | 185.54 | 195.54 | 192.75 | 192.75 | 192.75 | 7.21 | 1.1 | 0.000220 | 0.000778 | 0.048661 |
| 55000 | 55 | 185.04 | 195.04 | 192.15 | 192.15 | 192.15 | 7.11 | 0.6 | 0.000120 | 0.000778 | 0.026542 |
| 60000 | 60 | 184.54 | 194.54 | 191.58 | 191.58 | 191.58 | 7.04 | 0.57 | 0.000114 | 0.000778 | 0.025215 |
| 65000 | 65 | 184.04 | 194.04 | 191 | 191 | 191 | 6.96 | 0.58 | 0.000116 | 0.000778 | 0.025658 |
| 70000 | 70 | 183.54 | 193.54 | 190.1 | 190.1 | 190.1 | 6.56 | 0.9 | 0.000180 | 0.000778 | 0.039813 |
| 75000 | 75 | 183.04 | 193.04 | 189.3 | 189.3 | 189.3 | 6.26 | 0.8 | 0.000160 | 0.000778 | 0.035390 |
| 80000 | 80 | 182.54 | 192.54 | 188.1 | 188.1 | 188.1 | 5.56 | 1.2 | 0.000240 | 0.000778 | 0.053085 |
| 85000 | 85 | 182.04 | 192.04 | 186.55 | 186.55 | 186.55 | 4.51 | 1.55 | 0.000310 | 0.000778 | 0.068568 |
| Average | | | | | | | | | | | 0.038680 |

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ พบว่า กรณีที่ 4 อัตราการไหล เท่ากับ 0.00287 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ เท่ากับ 203.00 ม.รทก. เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ความดันน้ำจะค่อยๆ

ลดลง โดยความลึกของน้ำภายในอุโมงค์จะค่อยๆลดลงตามระยะทางจนถึงปลายอุโมงค์และมีค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานเฉลี่ยเท่ากับ 0.03868 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาเส้นแนวผิวน้ำต่อไป

ในการศึกษาเพื่อคำนวณหาระดับผิวน้ำ สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธี Standard step ใช้ในการหาระดับผิวน้ำที่มีลักษณะการไหลแบบไม่เต็มท่อ (Free surface flow) และวิธีสมการพลังงานของ Bernoulli ใช้ในการหาระดับผิวน้ำที่มีลักษณะการไหลแบบเต็มท่อ (Pressure flow)

ตารางที่ 4.2 ตารางข้อมูลที่ใช้คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 4

| | | |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| ความยาวท่ออุโมงค์ฝึนนํ้านับจาก มาโนมิเตอร์ตัวแรก | 1467.37 | เมตร |
| ระดับน้ำในโมเดลที่วัดได้ใน มาโนมิเตอร์ตัวแรก (Z_1) | 0.213966 | เมตร |
| ระดับน้ำในโมเดลบริเวณท้ายน้ำ (Z_2) | -0.097183 | เมตร |
| ความเร็วในการไหล (V_2) | 0.137256 | เมตร/วินาที |
| พื้นที่หน้าตัดท่ออุโมงค์ฝึนนํ้า (A_p) | 0.024329 | ตารางเมตร |
| อัตราการไหล (Q_p) | 0.003339 | ลบ.ม./วินาที |
| สัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทาน (f) | 0.0387 | - |
| สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (n) | 0.01 | - |
| เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออุโมงค์ฝึนนํ้า (D) | 0.172 | เมตร |
| รัศมีของท่ออุโมงค์ฝึนนํ้า (r) | 0.088 | เมตร |
| ความกว้างผิวนํ้า (T) | 0.158487 | เมตร |
| ความลาดท้องนํ้า | 0.0001 | - |
| ความลาดชันพลังงาน | 0.003992 | - |
| Froude number | 1 | - |
| ความลึกการไหลวิกฤต (y_c) | 0.049731 | เมตร |
| ระดับน้ำในท่ออุโมงค์ฝึนนํ้า ($y = y_c$) | 0.049731 | - |
| มุมความลาดท้องนํ้า (θ) | 1.120901 หรือ 64.222869 | Rad หรือ Degree |
| พื้นที่หน้าตัดการไหล (A) | 0.005648 | ตารางเมตร |
| ความยาวเส้นขอบเปียก (P) | 0.197279 | เมตร |
| รัศมีชลศาสตร์ (R) | 0.028628 | เมตร |

ตารางที่ 4.2.1 ตารางคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 4

| Standard Step Method | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|--------------|--------|-------------|---------|
| Y | θ | A | P | T | R | V | Fr^2 | S_f | S_0 | S_{fAVG} | Fr_{avg}^2 | dy | dx | dy/dx |
| 0.049731 | 1.1209 | 0.0056 | 0.1973 | 0.1585 | 0.0286 | 0.5913 | 1.0000 | 0.0040 | 0.0001 | | | | | -0.0001 |
| 0.06 | 1.2470 | 0.0073 | 0.2195 | 0.1669 | 0.0334 | 0.4561 | 0.4834 | 0.0019 | 0.0001 | 0.0030 | 0.7417 | 0.0103 | 0.9259 | 0.0111 |
| 0.07 | 1.3648 | 0.0090 | 0.2402 | 0.1723 | 0.0375 | 0.3703 | 0.2670 | 0.0011 | 0.0001 | 0.0015 | 0.3752 | 0.0100 | 4.4185 | 0.0023 |
| 0.077 | 1.4420 | 0.0102 | 0.2538 | 0.1745 | 0.0401 | 0.3280 | 0.1880 | 0.0008 | 0.0001 | 0.0009 | 0.2275 | 0.0067 | 6.1842 | 0.0011 |
| 0.090 | 1.5935 | 0.0125 | 0.2805 | 0.1760 | 0.0446 | 0.2668 | 0.1020 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0006 | 0.1450 | 0.0133 | 22.0151 | 0.0006 |
| 0.100 | 1.7076 | 0.0143 | 0.3005 | 0.1744 | 0.0475 | 0.2340 | 0.0682 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0004 | 0.0851 | 0.0100 | 32.2060 | 0.0003 |
| 0.110 | 1.8235 | 0.0160 | 0.3209 | 0.1704 | 0.0498 | 0.2088 | 0.0473 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0003 | 0.0578 | 0.0100 | 52.9196 | 0.0002 |
| 0.120 | 1.9430 | 0.0177 | 0.3420 | 0.1640 | 0.0517 | 0.1890 | 0.0338 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0406 | 0.0100 | 85.9818 | 0.0001 |
| 0.130 | 2.0683 | 0.0193 | 0.3640 | 0.1547 | 0.0529 | 0.1733 | 0.0246 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0292 | 0.0100 | 141.9552 | 0.0001 |
| 0.140 | 2.2030 | 0.0208 | 0.3877 | 0.1420 | 0.0535 | 0.1609 | 0.0181 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0213 | 0.0100 | 245.9483 | 0.0000 |
| 0.150 | 2.3526 | 0.0221 | 0.4141 | 0.1249 | 0.0534 | 0.1512 | 0.0132 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0156 | 0.0100 | 467.0878 | 0.0000 |
| 0.160 | 2.5290 | 0.0232 | 0.4451 | 0.1012 | 0.0522 | 0.1438 | 0.0092 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0112 | 0.0100 | 1001.2741 | 0.0000 |
| 0.172 | 2.8389 | 0.0242 | 0.4997 | 0.0525 | 0.0484 | 0.1381 | 0.0042 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0067 | 0.0120 | 1702.3484 | 0.0000 |
| Sum | | | | | | | | | | | | | 3763.264939 | |

| ระดับน้ำในท่อ | | ระยะทาง | ระยะทางสะสม | ระยะทางสะสม | กม. | ระดับท้องท่อ | ระดับหลังท่อ | ระดับน้ำ |
|---------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|----------|
| Model | Prototype | Model | Model | Prototype | | (ม.รทก.) | (ม.รทก.) | (ม.รทก.) |
| 0.049731 | 2.9 | 0 | 0 | 0 | 85 | 182.04 | 192.04 | 184.93 |
| 0.060 | 3.5 | 0.925910 | 0.925910 | 0.053832 | 84.946168 | 182.05 | 192.05 | 185.53 |
| 0.070 | 4.1 | 4.418537 | 5.344447 | 0.310726 | 84.689274 | 182.07 | 192.07 | 186.14 |
| 0.077 | 4.5 | 6.184176 | 11.528623 | 0.670274 | 84.329726 | 182.11 | 192.11 | 186.57 |
| 0.090 | 5.2 | 22.015112 | 33.543735 | 1.950233 | 83.049767 | 182.24 | 192.24 | 187.47 |
| 0.100 | 5.8 | 32.205992 | 65.749727 | 3.822689 | 81.177311 | 182.42 | 192.42 | 188.24 |
| 0.110 | 6.4 | 52.919617 | 118.669344 | 6.899436 | 78.100564 | 182.73 | 192.73 | 189.13 |
| 0.120 | 7.0 | 85.981798 | 204.651142 | 11.898417 | 73.101583 | 183.23 | 193.23 | 190.21 |
| 0.130 | 7.6 | 141.955207 | 346.606350 | 20.151693 | 64.848307 | 184.06 | 194.06 | 191.61 |
| 0.140 | 8.1 | 245.948351 | 592.554700 | 34.451130 | 50.548870 | 185.49 | 195.49 | 193.62 |
| 0.150 | 8.7 | 467.087843 | 1059.642544 | 61.607617 | 23.392383 | 188.20 | 198.20 | 196.92 |
| 0.160 | 9.3 | 1001.274143 | 2060.916687 | 119.821696 | -34.821696 | 194.02 | 204.02 | 203.32 |
| 0.172 | 10.0 | 1702.348585 | 3763.265272 | 218.796243 | -133.796243 | 203.92 | 213.92 | 213.92 |

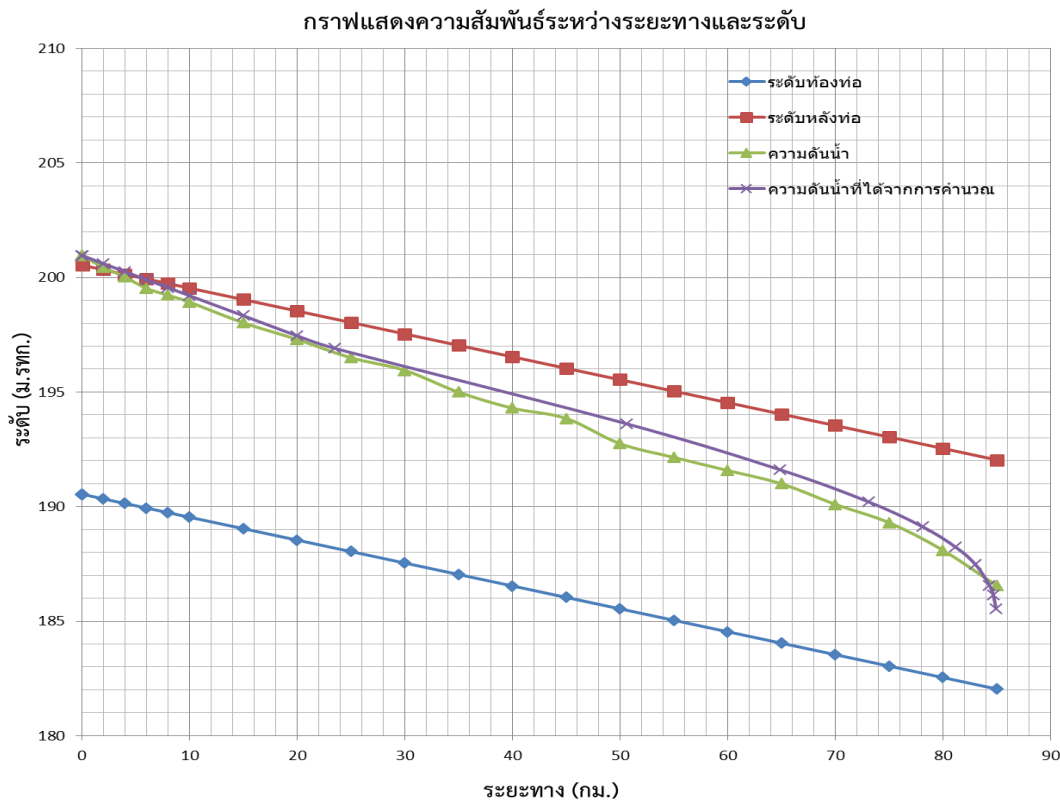
ตารางที่ 4.2.2 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลไม่เต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 4

| กม. | ระดับน้ำ (ม.รทก.) |
|--------|----------------------|
| 23.392 | 196.922 |
| 50.549 | 193.625 |
| 64.848 | 191.613 |
| 73.102 | 190.207 |
| 78.101 | 189.125 |
| 81.177 | 188.236 |
| 83.050 | 187.468 |
| 84.330 | 186.566 |
| 84.689 | 186.141 |
| 84.946 | 185.534 |
| 85 | 184.931 |

***หมายเหตุ** ระยะ คือ กม. ที่ได้จากตาราง 4.2.1 ที่คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 4
ระดับน้ำ คือ ระดับน้ำที่ได้จากตาราง 4.2.1 ที่คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 4

ตารางที่ 4.2.3 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลเต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการพลังงานของ Bernoulli
กรณีที่ 4

| กม. | ระดับน้ำ (ม.รทก.) |
|------|----------------------|
| 0 | 200.970 |
| 0.05 | 200.960 |
| 2 | 200.610 |
| 4 | 200.260 |
| 6 | 199.911 |
| 8 | 199.561 |
| 10 | 199.211 |
| 15 | 198.337 |
| 20 | 197.462 |



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับระดับต่างๆของอุโมงค์ผิวน้ำที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ กรณีที่ 4

จากผลการทดลองกรณีที่ 4 อัตราการไหล เท่ากับ 0.00287 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ เท่ากับ 203.00 ม.รทก. จากกราฟรูปที่ 8 พบว่าเราสามารถคำนวณหาระดับผิวน้ำจะได้เส้นแนวผิวน้ำดังเส้นความดันน้ำที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะมีลักษณะการไหลแบบเต็มท่อ (Pressure flow) จนถึง กม.4 หลังจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นลักษณะไหลแบบไม่เต็มท่อ (Free surface flow) ไปจนถึงปลายอุโมงค์ที่มีความยาว 1470 เมตร ซึ่งเมื่อนำค่าระดับน้ำบริเวณที่มีลักษณะการไหลจากแบบเต็มท่อจากการเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีสมการพลังงานของ Bernoulli และค่าระดับน้ำบริเวณที่เปลี่ยนเป็นลักษณะการไหลแบบไม่เต็มท่อที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ถือได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากและผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ

ส่วนที่ 2 ผลการศึกษาโดยทำการทดลองที่อุโมงค์ผันน้ำมีความยาว 690 เมตร มีอัตราการไหลเท่ากับ 0.0046 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

กรณี 5

- อัตราการไหล เท่ากับ 0.0046 ลูกบาศก์เมตร/วินาที
- ความเร็วในการไหล เท่ากับ 0.19798 เมตร/วินาที
- ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 209.1 ม.รทก.
- เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 0.172 เมตร
- พื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 0.02324 ตารางเมตร
- ความยาวอุโมงค์ผันน้ำ 690 เมตร

ผลการศึกษาได้ข้อมูลดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในท่อ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของท่อ กรณีที่ 5

| ระยะทาง | | ระดับท้องท่อ | ระดับหลังท่อ | ความดันน้ำ/ระดับน้ำ (ม.รทก.) | | | ความลึกน้ำในอุโมงค์ | h_f | h_f/L | $V^2/2g$ | f |
|---------|------|--------------|--------------|------------------------------|--------|--------|---------------------|-------|----------|----------|----------|
| ม. | กม. | ม.รทก. | ม.รทก. | ต่ำสุด | สูงสุด | เฉลี่ย | (ม.) | (ม.) | | | |
| 0 | 0 | 190.54 | | | | | | | | | |
| 50 | 0.05 | 190.54 | 200.54 | 208.8 | 208.8 | 208.9 | 10 | 0 | 0.000000 | 0.001998 | |
| 2000 | 2 | 190.34 | 200.34 | 207.6 | 207.5 | 207.5 | 10 | 1.4 | 0.000718 | 0.001998 | 0.061816 |
| 4000 | 4 | 190.14 | 200.14 | 206.6 | 206.6 | 206.5 | 10 | 1 | 0.000500 | 0.001998 | 0.043050 |
| 6000 | 6 | 189.94 | 199.94 | 205.9 | 205.9 | 205.9 | 10 | 0.6 | 0.000300 | 0.001998 | 0.025830 |
| 8000 | 8 | 189.74 | 199.74 | 204.9 | 205.5 | 205.5 | 10 | 0.4 | 0.000200 | 0.001998 | 0.017220 |
| 15000 | 15 | 189.04 | 199.04 | 201.7 | 201.8 | 201.8 | 10 | 3.7 | 0.000529 | 0.001998 | 0.045510 |
| 20000 | 20 | 188.54 | 198.54 | 199.6 | 199.7 | 199.7 | 10 | 2.1 | 0.000420 | 0.001998 | 0.036162 |
| 25000 | 25 | 188.04 | 198.04 | 198 | 198 | 198.1 | 10 | 1.6 | 0.000320 | 0.001998 | 0.027552 |
| 30000 | 30 | 187.54 | 197.54 | 197.1 | 197.1 | 197.1 | 9.56 | 1 | 0.000200 | 0.001998 | 0.017220 |
| 35000 | 35 | 187.04 | 197.04 | 195.1 | 195 | 195 | 7.96 | 2.1 | 0.000420 | 0.001998 | 0.036162 |
| 40000 | 40 | 186.54 | 196.54 | 191.1 | 191.1 | 191.2 | 4.66 | 3.8 | 0.000760 | 0.001998 | 0.065436 |
| Average | | | | | | | | | | | 0.037596 |

จากตารางที่ 5.1 แสดงผลการวัดความดันน้ำ/ระดับน้ำ ความลึกของน้ำ การสูญเสียพลังงานหลักภายในอุโมงค์ และค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานของอุโมงค์ พบว่า กรณีที่ 5 อัตราการไหล เท่ากับ 0.0046 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ผันน้ำ เท่ากับ 209.1 ม.รทก. เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ความดันน้ำจะค่อยๆ ลดลง โดยความลึกของน้ำภายในอุโมงค์จะค่อยๆ ลดลงตามระยะทางจนถึงปลายอุโมงค์และมีค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานเฉลี่ยเท่ากับ 0.037596 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาเส้นแนวผิวน้ำต่อไป

ในการศึกษาเพื่อคำนวณหาระดับผิวน้ำ สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธี Standard step ใช้ในการหา ระดับผิวน้ำที่มีลักษณะการไหลแบบไม่เต็มท่อ (Free surface flow) และวิธีสมการพลังงานของ Bernoulli ใช้ในการหาระดับผิวน้ำที่มีลักษณะการไหลแบบเต็มท่อ (Pressure flow)

ตารางที่ 5.2 ตารางข้อมูลที่ใช้คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 5

| | | |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| ความยาวท่ออุโมงค์ผิวน้ำนับจาก มาโนมิเตอร์ตัวแรก | 689.14 | เมตร |
| ระดับน้ำในโมเดลที่วัดได้ใน มาโนมิเตอร์ตัวแรก (Z_1) | 0.315790 | เมตร |
| ระดับน้ำในโมเดลบริเวณท้ายน้ำ (Z_2) | -0.007448 | เมตร |
| ความเร็วในการไหล (V_2) | 0.206847 | เมตร/วินาที |
| พื้นที่หน้าตัดท่ออุโมงค์ผิวน้ำ (A_p) | 0.315789 | ตารางเมตร |
| อัตราการไหล (Q_p) | 0.005032 | ลบ.ม./วินาที |
| สัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทาน (f) | 0.038 | - |
| สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (n) | 0.01 | - |
| เส้นผ่าศูนย์กลางท่ออุโมงค์ผิวน้ำ (D) | 0.172 | เมตร |
| รัศมีของท่ออุโมงค์ผิวน้ำ (r) | 0.088 | เมตร |
| ความกว้างผิวน้ำ (T) | 0.16771 | เมตร |
| ความลาดท้องน้ำ | 0.0001 | - |
| ความลาดชันพลังงาน | 0.004858 | - |
| Froude number | 1 | - |
| ความลึกการไหลวิกฤต (y_c) | 0.061310 | เมตร |
| ระดับน้ำในท่ออุโมงค์ ($y = y_c$) | 0.061310 | - |
| มุมความลาดท้องน้ำ (θ) | 1.262653 หรือ 72.344672 | Rad หรือ Degree |
| พื้นที่หน้าตัดการไหล (A) | 0.007540 | ตารางเมตร |
| ความยาวเส้นขอบเปียก (P) | 0.222227 | เมตร |
| รัศมีชลศาสตร์ (R) | 0.033929 | เมตร |

ตารางที่ 5.2.1 ตารางคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 5

| Standard Step Method | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|--------------|---------|------------|---------|
| Y | θ | A | P | T | R | V | Fr^2 | S_f | S_0 | S_{fAVG} | Fr_{avg}^2 | dy | dx | dy/dx |
| 0.061468 | 1.2645 | 0.0076 | 0.2226 | 0.1678 | 0.0340 | 0.6651 | 1.0001 | 0.0049 | 0.0001 | | | | | -0.0001 |
| 0.06 | 1.2470 | 0.0073 | 0.2195 | 0.1669 | 0.0334 | 0.6874 | 1.0978 | 0.0053 | 0.0001 | 0.0051 | 1.0489 | -0.0015 | 0.0144 | -0.1020 |
| 0.07 | 1.3648 | 0.0090 | 0.2402 | 0.1723 | 0.0375 | 0.5580 | 0.6063 | 0.0030 | 0.0001 | 0.0042 | 0.8521 | 0.0100 | 0.3643 | 0.0274 |
| 0.077 | 1.4420 | 0.0102 | 0.2538 | 0.1745 | 0.0401 | 0.4943 | 0.4270 | 0.0022 | 0.0001 | 0.0026 | 0.5166 | 0.0067 | 1.3086 | 0.0051 |
| 0.090 | 1.5935 | 0.0125 | 0.2805 | 0.1760 | 0.0446 | 0.4021 | 0.2317 | 0.0012 | 0.0001 | 0.0017 | 0.3293 | 0.0133 | 5.5953 | 0.0024 |
| 0.100 | 1.7076 | 0.0143 | 0.3005 | 0.1744 | 0.0475 | 0.3527 | 0.1549 | 0.0009 | 0.0001 | 0.0011 | 0.1933 | 0.0100 | 8.4434 | 0.0012 |
| 0.110 | 1.8235 | 0.0160 | 0.3209 | 0.1704 | 0.0498 | 0.3146 | 0.1075 | 0.0007 | 0.0001 | 0.0008 | 0.1312 | 0.0100 | 13.0828 | 0.0008 |
| 0.120 | 1.9430 | 0.0177 | 0.3420 | 0.1640 | 0.0517 | 0.2848 | 0.0767 | 0.0005 | 0.0001 | 0.0006 | 0.0921 | 0.0100 | 18.8578 | 0.0005 |
| 0.130 | 2.0683 | 0.0193 | 0.3640 | 0.1547 | 0.0529 | 0.2612 | 0.0558 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0005 | 0.0663 | 0.0100 | 25.7412 | 0.0004 |
| 0.140 | 2.2030 | 0.0208 | 0.3877 | 0.1420 | 0.0535 | 0.2425 | 0.0410 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0004 | 0.0484 | 0.0100 | 33.4885 | 0.0003 |
| 0.150 | 2.3526 | 0.0221 | 0.4141 | 0.1249 | 0.0534 | 0.2278 | 0.0299 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0003 | 0.0355 | 0.0100 | 41.4471 | 0.0002 |
| 0.160 | 2.5290 | 0.0232 | 0.4451 | 0.1012 | 0.0522 | 0.2166 | 0.0208 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0003 | 0.0254 | 0.0100 | 48.2632 | 0.0002 |
| 0.172 | 2.8389 | 0.0242 | 0.4997 | 0.0525 | 0.0484 | 0.2080 | 0.0096 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0003 | 0.0152 | 0.0120 | 60.9018 | 0.0002 |
| Sum | | | | | | | | | | | | | 257.508540 | |

| ระดับน้ำในท่อ | | ระยะทาง | ระยะทางสะสม | ระยะทางสะสม | กม. | ระดับท้องท่อ | ระดับหลังท่อ | ระดับน้ำ |
|---------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|--------------|--------------|----------|
| Model | Prototype | Model | Model | Prototype | | (ม.รทก.) | (ม.รทก.) | (ม.รทก.) |
| 0.061310 | 3.6 | 0 | 0 | 0 | 40 | 182.04 | 192.04 | 185.60 |
| 0.060 | 3.5 | 0.011453 | 0.011453 | 0.000666 | 39.999334 | 186.54 | 196.54 | 190.03 |
| 0.070 | 4.1 | 0.389221 | 0.400674 | 0.023295 | 39.976705 | 186.54 | 196.54 | 190.61 |
| 0.077 | 4.5 | 1.336456 | 1.737130 | 0.100997 | 39.899003 | 186.55 | 196.55 | 191.01 |
| 0.090 | 5.2 | 5.682928 | 7.420058 | 0.431402 | 39.568598 | 186.58 | 196.58 | 191.82 |
| 0.100 | 5.8 | 8.557916 | 15.977973 | 0.928959 | 39.071041 | 186.63 | 196.63 | 192.45 |
| 0.110 | 6.4 | 13.254637 | 29.232610 | 1.699584 | 38.300416 | 186.71 | 196.71 | 193.11 |
| 0.120 | 7.0 | 19.107125 | 48.339735 | 2.810472 | 37.189528 | 186.82 | 196.82 | 193.80 |
| 0.130 | 7.6 | 26.091508 | 74.431243 | 4.327432 | 35.672568 | 186.97 | 196.97 | 194.53 |
| 0.140 | 8.1 | 33.963549 | 108.394792 | 6.302073 | 33.697927 | 187.17 | 197.17 | 195.31 |
| 0.150 | 8.7 | 42.062276 | 150.457068 | 8.747574 | 31.252426 | 187.41 | 197.41 | 196.14 |
| 0.160 | 9.3 | 49.006701 | 199.463769 | 11.596824 | 28.403176 | 187.70 | 197.70 | 197.00 |
| 0.172 | 10.0 | 61.846167 | 261.309936 | 15.192560 | 24.807440 | 188.06 | 198.06 | 198.06 |

ตารางที่ 5.2.2 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลไม่เต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 5

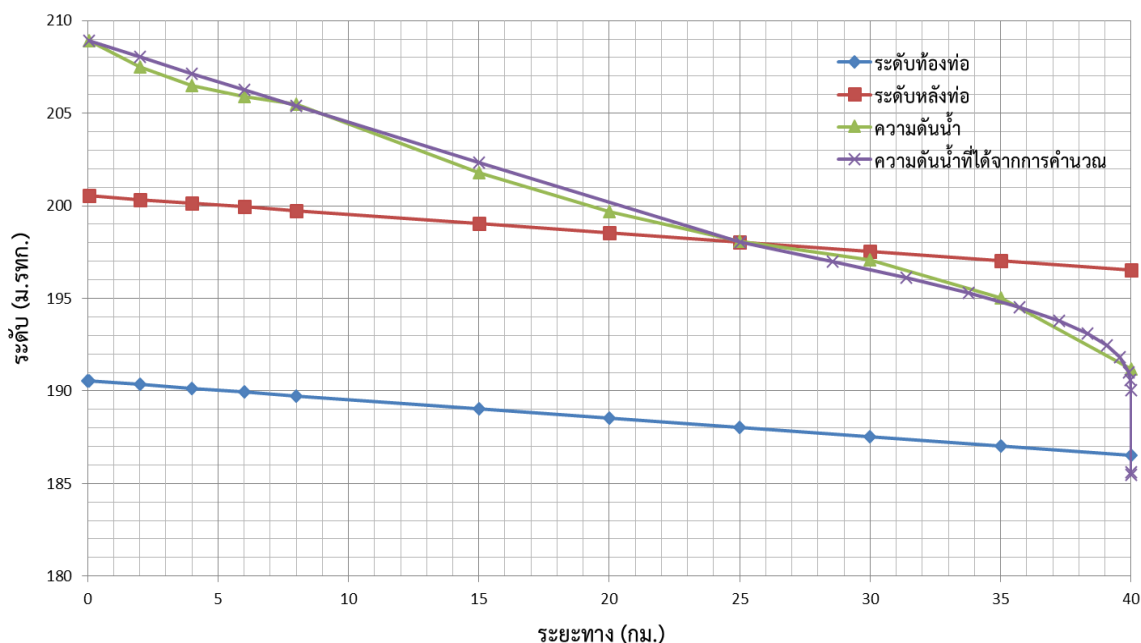
| กม. | ระดับน้ำ (ม.รทก.) |
|--------|----------------------|
| 24.807 | 198.06 |
| 28.403 | 197.00 |
| 31.252 | 196.14 |
| 33.698 | 195.31 |
| 35.673 | 194.53 |
| 37.190 | 193.80 |
| 38.300 | 193.11 |
| 39.071 | 192.45 |
| 39.569 | 191.82 |
| 39.899 | 191.01 |
| 39.977 | 190.61 |
| 39.999 | 190.03 |
| 40 | 185.60 |

***หมายเหตุ** ระยะ คือ กม. ที่ได้จกตาราง 5.2.1 ที่คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 5
ระดับน้ำ คือ ระดับน้ำที่ได้จกตาราง 5.2.1 ที่คำนวณด้วยวิธี Standard step กรณีที่ 5

ตารางที่ 5.2.3 ค่าระดับน้ำช่วงการไหลเต็มท่อที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการพลังงานของ Bernoulli
กรณีที่ 5

| กม. | ระดับน้ำ (ม.รทก.) |
|------|----------------------|
| 0 | 208.900 |
| 0.05 | 208.900 |
| 2 | 208.027 |
| 4 | 207.153 |
| 6 | 206.280 |
| 8 | 205.407 |
| 15 | 202.350 |
| 20 | 200.167 |

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและระดับ



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับระดับต่างๆของอุโมงค์ผันน้ำที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ กรณีที่ 5

จากผลการทดลองกรณีที่ 5 อัตราการไหล เท่ากับ 0.0046 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ระดับน้ำหน้าอุโมงค์ เท่ากับ 209.1 ม.รทท. จากกราฟ พบว่าเราสามารถคำนวณหาระดับผิวน้ำจะได้เส้นแนวผิวน้ำดังเส้นความดันน้ำที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะมีลักษณะการไหลแบบเต็มท่อ (Pressure flow) จนถึง กม.25 หลังจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นลักษณะการไหลแบบไม่เต็มท่อ (Free surface flow) ไปจนถึงปลายอุโมงค์ที่มีความยาว 690 เมตร ซึ่งเมื่อนำค่าระดับน้ำบริเวณที่มีลักษณะการไหลจากแบบเต็มท่อจากการเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีสมการพลังงานของ Bernoulli และค่าระดับน้ำบริเวณที่เปลี่ยนเป็นลักษณะการไหลแบบไม่เต็มท่อที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Standard step พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ถือได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากและผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ

เมื่อนำผลการศึกษาโดยทำการทดลองที่อุโมงค์ผันน้ำมีความยาว 690 เมตร มีอัตราการการไหลเท่ากับ 0.0046 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีเปรียบเทียบกับผลการศึกษาโดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology : AIT) กรณีที่ 1 อุโมงค์ผันน้ำมีความยาว 1470 เมตร มีอัตราการการไหลเท่ากับ 0.00406 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที พบว่า เมื่อความยาวอุโมงค์ผันน้ำลดลง อัตราการไหลลดลงเพียงเล็กน้อย ระยะทางที่เปลี่ยนลักษณะการไหลจากแบบเต็มท่อเป็นแบบไม่เต็มท่อจะเกิดที่ระยะทางสั้นกว่าเดิมตามความยาวอุโมงค์ผันน้ำ แต่จะเกิดบริเวณที่ใกล้กับจุดออกของน้ำเหมือนกัน

สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาแรงดันน้ำภายในอุโมงค์ผันน้ำด้วยแบบจำลองทางกายภาพนั้น ได้ประเมินศักยภาพในการผันน้ำผ่านอุโมงค์ และได้ตรวจสอบลักษณะสภาพการไหลในอุโมงค์ในรูปแบบต่างๆ ทั้งกรณีที่สภาพการไหลเป็นแบบน้ำเต็มท่อ กรณีการไหลไม่เต็มท่อ และกรณีช่วงระหว่างการเปลี่ยนแปลงการไหลจากน้ำเต็มท่อเป็นไม่เต็มท่อ พบว่า

- กรณีทดลอง 1 และ 5 จะมีลักษณะการไหลในช่วงแรกเป็นแบบเต็มท่อและจะค่อยๆเปลี่ยนเป็นแบบไม่เต็มท่อ และเมื่ออัตราการไหลมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความยาวต่างกัน ความดันในการส่งน้ำจะมากขึ้นตามความยาวของอุโมงค์และลดลงเมื่อน้ำไหลไปในระยะทางที่เพิ่มขึ้น จะค่อยๆเปลี่ยนลักษณะการไหลเมื่อใกล้กับจุดออกของน้ำ ส่วนค่าระดับน้ำในช่วงเปลี่ยนลักษณะการไหลจากการทดลองและจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมากจนเกือบจะเท่ากัน

- กรณี 2 จะมีลักษณะการไหลในช่วงแรกเป็นแบบเต็มท่อและจะค่อยๆเปลี่ยนเป็นแบบไม่เต็มท่อ แต่เมื่ออัตราการไหลลดลง ความดันในการส่งน้ำก็จะลดลงด้วยเช่นกัน และตำแหน่งที่เปลี่ยนลักษณะจากแบบเต็มท่อเป็นแบบไม่เต็มท่อจะใกล้กับต้นอุโมงค์มากขึ้น

- กรณี 3 และ 4 จะมีลักษณะการไหลส่วนใหญ่เป็นแบบไม่เต็มท่อ ซึ่งเมื่ออัตราการไหลลดลง ความดันในการส่งน้ำจะลดลงตามอัตราการไหล

- ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานมีผลต่อความดัน และเมื่ออัตราการไหลมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ระยะทางของท่ออุโมงค์ไม่เท่ากัน กรณีที่ระยะทางอุโมงค์ผันน้ำมากจะมีค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานน้อยกว่ากรณีที่ระยะทางอุโมงค์ผันน้ำสั้นกว่า เนื่องจากขณะที่ทำการทดลองที่อุโมงค์ผันน้ำมีระยะทางที่สั้นนั้น ภายในอุโมงค์ผันน้ำอาจมีเศษตะกอนปะปนอยู่มากกว่าขณะที่ทำการทดลองที่อุโมงค์มีระยะทางมากกว่า เมื่อน้ำไหลผ่านจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังท่ออุโมงค์ผันน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากแรงเสียดทานมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กิริติ ลีวัจนกุล. 2541. การไหลในทางน้ำเปิด (Open Channel Flow). (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: หจก.สยาม

สเตชันเนอรีซ์พลาซัส. หน้า 7-31 - 7-33.

เทอดศักดิ์ ยุทธเสรี. 2556. การสูญเสียจากความฝืดในระบบท่อ (Pipe friction losses). สืบค้นเมื่อวันที่

18 พฤษภาคม 2561, จากเว็บไซต์ <http://industrialpumps-tsy.blogspot.com/2013/09/pipe-friction-losses.html>

นฤมล สุวรรณจันทร์. 2555. สื่อการสอนวิชาฟิสิกส์ ประเภท บทเรียน เรื่อง สมการแบร์นูลลี.

สืบค้นเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม 2561, จากเว็บไซต์ <http://www.phukhieo.ac.th/obec-media/2555>

สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา. ม.ป.ป. การสูญเสียหลัก, วิธีการแก้ปัญหาการไหลในเส้นท่อ. สืบค้น

เมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม 2561, จากเว็บไซต์

http://www.pattayatech.ac.th/files/150511088485246_15110614142100.pdf

สุระ เกษมมงคลชัย. 2541. การวิเคราะห์การผันน้ำจากเขื่อนลำปลายมาศสู่เขื่อนลำแซะและมูลบน (The

Analysis of Water Diversion from Lam Plai Mas to Lamsae and Moon Bon Dams). ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ), สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณด้วยวิธี Standard step จากตาราง 1.2.1 หน้าที่ 22

ตารางที่ 1

แถวที่ 1

Y_1 = ทำการ Trail & Error ไปจนถึงความลึกของน้ำที่เต็มท่อในโมเดลท่ออุโมงค์ฝึนน้ (m.) โดยค่าเริ่มต้นจะเป็นความลึกน้ำการไหลวิกฤต = 0.057914 m.

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(1 - \frac{y}{r}\right) = \cos^{-1}\left(1 - \frac{0.057914}{0.088}\right) = 1.22187 \text{ rad}$$

$$A_1 = r^2[\theta - (\cos\theta \sin\theta)] = 0.088^2 [1.22187 - (\cos(1.22187) \sin(1.22187))] = 0.006974 \text{ m}^2$$

$$P_1 = 2r\theta = 2(0.088)(1.22187) = 0.215049 \text{ m.}$$

$$T_1 = 2r\sin\theta = 2(0.088)\sin(1.22187) = 0.165394 \text{ m.}$$

$$R_1 = \frac{A}{P} = \frac{0.006974}{0.215049} = 0.032430 \text{ m.}$$

$$V_1 = \frac{0.004486}{0.006974} = 0.643173 \text{ m/s}$$

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2 T}{gA^3} = \frac{(0.004486)^2(0.165394)}{(9.81)(0.006974)^3} = 1.000300$$

$$S_{f1} = \frac{n^2 v^2}{R^{\frac{4}{3}}} = \frac{(0.01)^2(0.643173)^2}{(0.032430)^{\frac{4}{3}}} = 0.00400$$

$$S_{o1} = \frac{1}{10000} = 0.0001$$

$$\frac{dy}{dx} = S_0 = -0.0001$$

แถวที่ 2

Y_2 = ทำการ Trail & Error ไปจนถึงความลึกของน้ำที่เต็มท่อในโมเดลท่ออุโมงค์ฝึนน้ (m.) = 0.06 m.

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(1 - \frac{y}{r}\right) = \cos^{-1}\left(1 - \frac{0.06}{0.088}\right) = 1.246985 \text{ rad}$$

$$A_2 = r^2[\theta - (\cos\theta \sin\theta)] = 0.088^2 [1.246985 - (\cos(1.246985)\sin(1.246985))] = 0.007321 \text{ m}^2$$

$$P_2 = 2r\theta = 2(0.088)(1.246985) = 0.219469 \text{ m.}$$

$$T_2 = 2r\sin\theta = 2(0.088)\sin(1.246985) = 0.166853 \text{ m.}$$

$$R_2 = \frac{A}{P} = \frac{0.007321}{0.219469} = 0.032430 \text{ m.}$$

$$V_2 = \frac{Q}{A} = \frac{0.004486}{0.007321} = 0.612731 \text{ m/s}$$

$$Fr_2^2 = \frac{Q^2 T}{gA^3} = \frac{(0.004486)^2 (0.166853)}{(9.81)(0.007321)^3} = 0.872272$$

$$S_{r2} = \frac{\frac{n^2 v^2}{4}}{R^3} = \frac{(0.01)^2 (0.612731)^2}{(0.032430)^{\frac{4}{3}}} = 0.003497$$

$$S_{02} = \frac{1}{10000} = 0.0001$$

$$S_{fav2} = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} = \frac{0.00400 + 0.003497}{2} = 0.003748$$

$$Fr_{avg2}^2 = \frac{Fr_1 + Fr_2}{2} = \frac{1.000025 + 0.872272}{2} = 0.936146$$

$$dy_2 = Y_2 - Y_1 = 0.06 - 0.057914 = 0.002086 \text{ m.}$$

$$dx_2 = \left[\frac{dy}{\frac{(S_{fav} - S_0)}{(1 - Fr_{2avg})}} \right] = \left[\frac{0.002086}{\frac{(0.003748 - 0.0001)}{(1 - 0.936146)}} \right] = 0.036503 \text{ m.}$$

$$\frac{dy_2}{dx_2} = \frac{(S_{fav} - S_0)}{(1 - Fr_{2avg})} = \frac{(0.003748 - 0.0001)}{(1 - 0.936146)} = 0.057129$$

แถวที่ 3

$Y_3 =$ ทำการ Trail & Error ไปจนถึงความลึกของน้ำที่เต็มท่อในโมเดลท่ออุโมงค์ฝันท้ำ (m.) = 0.07 m.

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(1 - \frac{y}{r} \right) = \cos^{-1} \left(1 - \frac{0.07}{0.088} \right) = 1.364797 \text{ rad}$$

$$A_3 = r^2 [\theta - (\cos\theta \cdot \sin\theta)] = 0.088^2 [1.36479 - (\cos(1.36479) \cdot \sin(1.36479))] = 0.009018 \text{ m}^2$$

$$P_3 = 2r\theta = 2(0.088)(1.364797) = 0.240204 \text{ m.}$$

$$T_3 = 2r\sin\theta = 2(0.088)\sin(1.364797) = 0.172279 \text{ m.}$$

$$R_3 = \frac{A}{P} = \frac{0.009018}{0.240204} = 0.037545 \text{ m.}$$

$$V_3 = \frac{Q}{A} = \frac{0.004486}{0.009018} = 0.497381 \text{ m/s}$$

$$Fr_3^2 = \frac{Q^2 T}{g A^3} = \frac{(0.004486)^2 (0.172279)}{(9.81)(0.009018)^3} = 0.481736$$

$$S_{f3} = \frac{\frac{n^2 v^2}{4}}{R^{\frac{4}{3}}} = \frac{(0.01)^2 (0.497381)^2}{(0.037545)^{\frac{4}{3}}} = 0.001968$$

$$S_{03} = \frac{1}{10000} = 0.0001$$

$$S_{f_{avg3}} = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} = \frac{0.003497 + 0.001968}{2} = 0.002732$$

$$Fr_{avg3}^2 = \frac{Fr_1 + Fr_2}{2} = \frac{0.872272 + 0.481736}{2} = 0.677004$$

$$dy_3 = Y_3 - Y_2 = 0.06 - 0.07 = 0.010000 \text{ m.}$$

$$dx_3 = \left[\frac{dy}{\frac{(S_{f_{avg}} - S_0)}{(1 - Fr_{2avg})}} \right] = \left[\frac{0.00100}{\frac{(0.002732 - 0.0001)}{(1 - 0.677004)}} \right] = 1.227124$$

$$\frac{dy_2}{dx_2} = \frac{(S_{f_{avg}} - S_0)}{(1 - Fr_{2avg})} = \frac{(0.002732 - 0.0001)}{(1 - 0.677004)} = 0.008149$$

ตารางที่ 2

แถวที่ 1

ระดับน้ำในท่อของแบบจำลองอุโมงค์ฝน้ำ = $Y_1 = 0.057914 \text{ m.}$

ระดับน้ำในอุโมงค์ฝน้ำของจริง = $Y_1 \times 58.14 = (0.057914)(58.14) = 3.4 \text{ m.}$

กม. = กม.สุดท้าย - ระยะทางสะสมในท่ออุโมงค์ฝน้ำของจริง = $85 - 0 = 85 \text{ km.}$

ระดับท้องท่อ = ระดับท้องท่อที่ทำการติดตั้ง - $\left[\frac{(85)(1000)}{10000} \right] = 190.54 - \left[\frac{(85)(1000)}{10000} \right] = 182.04 \text{ m.msl.}$

ระดับหลังท่อ = ระดับท้องท่อ + 10 = $182.04 + 10 = 190.04 \text{ m.msl.}$

ระดับน้ำ = ระดับท้องท่อ + ระดับน้ำในท่ออุโมงค์ฝน้ำของจริง = $182.04 + 3.4 = 185.41 \text{ m.msl.}$

แถวที่ 2

ระดับน้ำในท่อของแบบจำลองอุโมงค์ฝน้ำ = $Y_2 = 0.06 \text{ m.}$

ระดับน้ำในอุโมงค์ฝน้ำของจริง = $Y_2 \times 58.14 = (0.06)(58.14) = 3.5 \text{ m.}$

ระยะทางในแบบจำลองอุโมงค์ผิวน้ำ = $dx_2 = 0.036503$ m.

ระยะทางสะสมในแบบจำลองท่ออุโมงค์ผิวน้ำ = ระยะทางในแบบจำลองอุโมงค์ผิวน้ำ₁ + ระยะทางในแบบจำลองอุโมงค์ผิวน้ำ₂ = $0 + 0.036503 = 0.036503$ m.

ระยะทางสะสมในอุโมงค์ผิวน้ำของจริง = (ระยะทางสะสมในแบบจำลองอุโมงค์ผิวน้ำ $\times 58.14$) / 1000

$$= \left[\frac{(0.036503)(58.14)}{1000} \right] = 0.002122$$
 km.

กม. = กม.สุดท้าย - ระยะทางสะสมในท่ออุโมงค์ผิวน้ำของจริง = $85 - 0.002122 = 84.997878$ km.

ระดับท้องท่อ = ระดับท้องท่อที่ทำการติดตั้ง - [(กม. $\times 1000$) / 10000]

$$= 190.54 - \left[\frac{(84.997878)(1000)}{10000} \right] = 182.04$$
 m.msl.

ระดับหลังท่อ = ระดับท้องท่อ + 10 = $182.04 + 10 = 190.04$ m.msl.

ระดับน้ำ = ระดับท้องท่อ + ระดับน้ำในท่ออุโมงค์ผิวน้ำของจริง = $182.04 + 3.5 = 185.53$ m.msl.

แถวที่ 3

ระดับน้ำในท่อของแบบจำลองอุโมงค์ผิวน้ำ = $Y_3 = 0.07$ m.

ระดับน้ำในอุโมงค์ผิวน้ำของจริง = $Y_3 \times 58.14 = (0.07)(58.14) = 4.1$ m.

ระยะทางในแบบจำลองอุโมงค์ผิวน้ำ = $dx_3 = 1.227125$ m.

ระยะทางสะสมในแบบจำลองอุโมงค์ผิวน้ำ = ระยะทางในแบบจำลองอุโมงค์ผิวน้ำ₁ + ระยะทางในแบบจำลองอุโมงค์ผิวน้ำ₂ = $0 + 0.036503 + 1.227125 = 1.263628$ m.

ระยะทางสะสมในอุโมงค์ผิวน้ำของจริง = (ระยะทางสะสมในแบบจำลองอุโมงค์ผิวน้ำ $\times 58.14$) / 1000

$$= \left[\frac{(1.263628)(58.14)}{1000} \right] = 0.073467$$
 km.

กม. = กม.สุดท้าย - ระยะทางสะสมในท่ออุโมงค์ผิวน้ำของจริง = $85 - 0.073467 = 84.926533$ km.

ระดับท้องท่อ = ระดับท้องท่อที่ทำการติดตั้ง - [(กม. $\times 1000$) / 10000]

$$= 190.54 - \left[\frac{(84.926533)(1000)}{10000} \right] = 182.05$$
 m.msl.

ระดับหลังท่อ = ระดับท้องท่อ + 10 = $182.05 + 10 = 192.05$ m.msl.

ระดับน้ำ = ระดับท้องท่อ + ระดับน้ำในท่ออุโมงค์ผิวน้ำของจริง = $182.05 + 4.1 = 186.12$ m.msl.