

๙๕/๒๕๒๓/๑๖๖

การวิเคราะห์รายงานท่อน้ำโดยวิธีของ ครอฟอร์ด - เซโนเวท



นายชาญชัย ไพโรกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

แผนกวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2520

000664

I 15516192

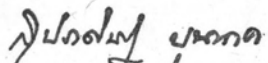
PIPE NETWORK ANALYSIS BY CRAWFORD - CHENOWETH METHOD

Mr. Chanchai Pairohakul

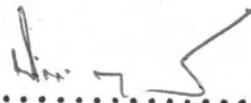
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Civil Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1977

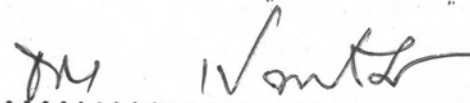
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์รายงานท่อน้ำ โดยวิธีของ ครอฟอร์ด - เซโนเวท
โดย นายชาญชัย ไพโรกุล
แผนกวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ชำรง เปรมปรีดิ์

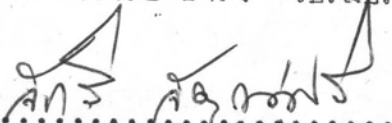
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

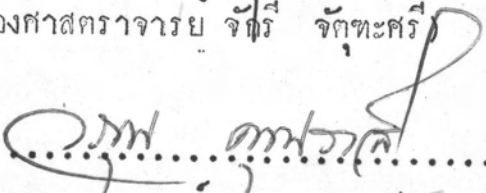

.....รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุประคิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการส วิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. นิเวศน์ คารานันท์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ชำรง เปรมปรีดิ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ จีตรี จิตตะศรี)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วรณ คุนวาสี)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ข่ายงานท่อน้ำ โดยวิธีของ ทรอฟฟอร์ด - เซโนเวท
ชื่อนิสิต	นายชาญชัย ไพโรกุล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ชำรง เปรมปรีดิ์
แผนกวิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2520



บทคัดย่อ

โดยทั่วไปวิธีการที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการวิเคราะห์ระบบข่ายงานท่อน้ำคือวิธีการของฮาร์ดี ทรอส ซึ่งทำได้โดยอาศัยการเคาะค่าอัตราการไหลในแต่ละเส้นท่อขึ้นก่อน จากนั้นจึงคำนวณแก้ค่าอัตราการไหลที่เคาะขึ้นเหล่านี้ โดยอาศัยหลักการที่ว่า ผลรวมทางพีชคณิตของค่าการลกระดับความดันน้ำรอบวงท่อแต่ละวงต้องมีค่าเป็นศูนย์ การคำนวณแก้ค่าอัตราการไหลนี้จะดำเนินไปทั่วทุกเส้นท่อในระบบข่ายงานท่อซ้ำกันเป็นรอบ ๆ จนกว่าจะเชื่อได้ว่าค่าอัตราการไหลที่ได้มานั้นใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องในขอบเขตที่ต้องการสำหรับใช้งานแล้ว ในปี 1974 ทรอฟฟอร์ด - เซโนเวทเสนอว่าสามารถจะวิเคราะห์ระบบข่ายงานท่อน้ำได้เช่นกัน โดยการเคาะค่าระดับความดันน้ำตามจุดตัดในระบบข่ายงานท่อขึ้นก่อน จากนั้นจึงคำนวณแก้ค่าเหล่านี้โดยอาศัยหลักการที่ว่า ถ้าค่าระดับความดันน้ำที่จุดตัดเคาะได้ถูกต้องแล้ว เมื่อคำนวณค่าอัตราการไหลที่จุดตัดนั้น อัตราการไหลเข้าสู่จุดตัดจะต้องเท่ากับอัตราการไหลออกจากจุดตัด จากนั้นจึงคำนวณแก้ค่าระดับความดันน้ำที่จุดตัดทุกจุดทั่วทั้งระบบข่ายงานท่อวนไปที่ละรอบ ๆ จนกว่าค่าแก้ระดับความดันน้ำที่คำนวณได้จากทุกจุดตัดจะอยู่ในขอบเขตที่ต้องการสำหรับการใช้งานในการวิจัยครั้งนี้ได้จัดสร้างข่ายงานท่อจำลองขึ้นเพื่อให้สามารถจัดระบบข่ายงานท่อน้ำที่สภาพการณ์การทำงานต่าง ๆ กัน และสามารถควบคุมการทำงานตลอดจนศึกษารายละเอียดการทำงานของข่ายงานท่อดังกล่าวได้และได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์การวิเคราะห์ข่ายงานท่อน้ำตามวิธีการของทรอฟฟอร์ด - เซโนเวท ขึ้น เพื่อใช้วิเคราะห์ระบบข่ายงานท่อน้ำที่สภาพการณ์การทำงานต่าง ๆ การจัดสร้างข่ายงานท่อจำลองได้จัดแบ่งออกเป็นสองชั้นคอนคัวยกัน ข่ายงานท่อจำลองชั้นต้นได้จัดสร้างขึ้นโดยสามารถตรวจวัดได้เพียงค่าระดับความดันน้ำตามจุดตัดต่าง ๆ เท่านั้น จากนั้นจึงนำผลจากการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์จาก

คอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ยที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์
 ชำยงานท่อจำลองนี้ ในข่ายงานท่อจำลองชั้นที่สอง ได้ใส่มาตรวัดอัตราการไหลเข้าไปด้วยเพื่อ
 ให้สามารถตรวจสอบอัตราการไหลในบางเส้นท่อได้ เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉลี่ย
 ซึ่งได้จากการทดลองข่ายงานท่อจำลองชั้นต้น ผลวิเคราะห์จากคอมพิวเตอร์ก็กล่าวคือค่าระคัม
 ความดันน้ำที่จุดตัดทุกจุด และค่าอัตราการไหลในบางเส้นท่อมักใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง
 จากนั้นจึงนำค่าอัตราการไหลในแต่ละเส้นท่อที่วิเคราะห์ได้นี้ไปเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียด
 ทานใหม่ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเส้นท่อ
 ที่หาได้จากห้องปฏิบัติการ แล้วใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่หาได้ใหม่ของแต่ละเส้นท่อนี้ทำ
 การวิเคราะห์ระบบข่ายงานท่อน้ำอีกครั้งหนึ่ง โดยไม่คิดค่าการสูญเสียความดันย่อยลงไปด้วย ใน
 ชั้นสุดท้ายได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เช่นเดียวกับในชั้นตอนที่สอง และได้รวมค่าการ
 สูญเสียความดันย่อยที่สามทางและสี่ทางลงไปด้วยในรูปของความยาวเสมือน ผลวิเคราะห์จาก
 คอมพิวเตอร์ได้ว่า ค่าระคัมความดันน้ำที่จุดตัดทุกจุดและค่าอัตราการไหลในบางเส้นท่อ มีค่า
 ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองของข่ายงานท่อจำลองชั้นที่สอง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีวิเคราะห์
 ชำยงานท่อน้ำของครอฟฟอร์ด - เซโนเวท สามารถนำมาใช้ได้ดีในการวิเคราะห์ระบบข่ายงาน
 ท่อน้ำ และเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งเพิ่มขึ้นจากวิธีต่าง ๆ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

The pipe network model construction was done in two steps. Initially it was constructed in such a way that only static head at each node could be observed and then compared with the results obtained from the computer. The purposes were to investigate the general performance and limitation of head and flow, and to determine the suitable average friction factor to be used in analyzing the model network. Flow meters were then inserted into the model to observe the flowrate in certain pipes. When the average friction factor as obtained from the first pipe network model was used in the analysis, the results obtained from the computer were observed to be very close to the results from experiments. Flowrate in each pipe obtained from this analysis were then used to determine the friction factor in each pipe base on the relationship between the friction factor and Reynold's number obtained from the experiments of the pipe used. These new friction factors for each pipe were then used in the second analysis but minor losses were excluded. Finally the analysis was done basing on the same friction factors for each pipe but minor losses at tee and cross in term of equivalent lenght were included. Results from computer, i. e. the head at every node and the flowrate in certain pipes, were found to be close to that obtained from the experiments for the second pipe network model. It can then be concluded that the Crawford - Chenoweth's method of pipe network analysis can be effectively used in pipe network analysis, and is an alternative way for solving the pipe network problems in addition to those methods which are already in used at the present time.



กิติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้สำเร็จลงไคกายคี่ เนื่องจากการวิจัยไครับความกรรณคอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึษาวิทยานิพนค รรณศาสตราจารย์ ชำรง เปรมปรึคี่ ที่กรรณคแนะแนวทางปรึบคิตี ไคความกคคเห็นอันเป็นประโยชน์ และกรรณคแกไคชอบกรรณคองค่าง ๆ อย่างคี่ปรึง นับคแต่เริ่มคณจนกรรณคคั้งงานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ และผู้วิจัยขอขอบพระกรรณคต่อ ศาสตราจารย์ กร.นิวัคค คารานันทณ คัวหน้าแผนกวิชาวิศวกรรมโยธา รรณศาสตราจารย์ จักรี จัตุพะศรึ และรรณคศาสตราจารย์ วรณคณควาสี ที่กรรณคไคชอบกคคเห็นอันเป็นประโยชน์ที่ไคไคการวิจัยนี้สมบูรณคั้งเจตนารมยที่คั้งไว้ รวมทั้งรรณคศาสตราจารย์ สุกรึ กัณปนานนค ที่ไคกรรณคอนุญาคไคให้ผู้วิจัยไคไคชอบกรรณคที่จำเป็นในคองปรึบคิตีการวิศวกรรมขนสง ผู้วิจัยรฐคิชาบคั้งในความกรรณคจากอาจารย์ทุกทานที่คคคมาคแล้ว จึงขอกรรณคขอบพระกรรณคเป็นอยางสูงไว้ ณ โคกาศนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระกรรณคต่อ นายสุรพล อริยะเมธี รรณคผู้อำนวยการ และ นายประสิทธิมิตร เจริญถาวร พนคงานโปรแกรมเมอร์ กรรณคประมวลผลข้อมูล การประปานครหลวง ในความกรรณคแนะแนวและช่วยเหลือในการจคคทำโปรแกรมคอมพิวคเตอร์ รวมทั้งเจ้ำหน้าคี่ในคองปรึบคิตีการของแผนกวิชาวิศวกรรมโยธา คณควิศวกรรมศาสตร วุฬลนคกรณมหาวทยาลัยทุกทานที่ไคไคความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกไคเป็นอยางคี่ในระหว่างการไคคองปรึบคิตีการในการทำวิจัย

ผู้วิจัยรฐคิชาบคั้งในความกรรณคอย่างสูงของมคคคินิธิสคคเกา วุฬลนคกรณมหาวทยาลัย และบัณฑิตวิทยาลัย วุฬลนคกรณมหาวทยาลัยที่ไคไคให้ทุนในการคำเนินการวิจัยนี้ คั้งคแต่เริ่มคณจนสำเร็จสมบูรณ

ชาญชัย ไทโรคคค

สารบัญ

หน้า

หน้าหัว เรื่องภาษาไทย	ก
หน้าหัว เรื่องภาษาอังกฤษ	ข
หน้าอนุมัติ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ซ
รายการสัญลักษณ์	ฅ
รายการตารางประกอบ	ฉ
รายการภาพประกอบ	ค
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.1.1 วางท่อแบบอนุกรม (Pipes in series)	2
1.1.2 วางท่อแบบขนาน (Pipes in parallel)	3
1.1.3 วางท่อในลักษณะขายงาน (Pipe Network)	4
1.2 วิธีวิเคราะห์ระบบขายงานท่อเข้าวิธีต่าง ๆ ที่เคยมีมา	5
1.2.1 วิธีการ เคาและทดสอบแก้ไข โดยไม่มีการควบคุม .	5
(Uncontrolled trial and error method)	
1.2.2 วิธีการ แผนภาพของฟรีแมน	7
(Freenan graphical method)	
1.2.3 วิธีการของฮาร์ดีครอส	8
(Hardy Cross method)	
1.2.4 วิธีการวิเคราะห์ที่โดยตรงด้วยขายงานวงจรไฟฟ้า	10
(Electric Network Analyzer)	



1.2.5	วิธีการนำดิจิทัลคอมพิวเตอร์ เข้ามาใช้กับวิธีการของ ฮาร์ดีครอสส์	12
	(Digital Computer in application with the Hardy Cross method)	
1.2.6	วิธีการของมาร์ตินและปีเตอร์	12
	(Martins and Peters method)	
1.3	ความมุ่งหมายในการวิจัย	14
1.4	ขอบข่ายของการวิจัย	15
1.5	วิธีดำเนินการวิจัย	15
2.	ทฤษฎี	17
2.1	สมการของการไหลในท่อ	17
	(Darcy-Weisbach equation)	
2.2	มาตรวัดแบบรูระบาย (Orifice meter)	21
2.3	มาตรวัดแบบเวนจูรี (Venturi meter)	23
2.4	วิธีการของครอฟอร์ด-เชโนเวท ในการวิเคราะห์ระบบข่ายงานท่อ	25
	(Pipe Network Analysis by Crawford-Chenoweth Method)	
3.	โปรแกรมคอมพิวเตอร์	32
3.1	ความจำเป็นในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์	32
3.2	บัตรข้อมูล	32
3.2.1	บัตรบอกสภาพและขอเขตทั่วไปในการคำนวณ	33
3.2.2	บัตรรายละเอียดจุดตัด	33
3.2.3	บัตรรายละเอียดเส้นท่อ	33
4.	รายงานทดลองและเครื่องมือเครื่องใช้ในการทดลอง	34
4.1	ลักษณะโดยทั่วไปของรายงานทดลอง	34

4.2.1	รายละเอียดรายงานทดลองขั้นที่ 1	42
4.2.2	รายละเอียดรายงานทดลองขั้นที่ 2	42
4.3	เครื่องมือเครื่องใช้ในการทดลอง	45
5.	ผลการทดลองการวิเคราะห์ผลการทดลองและวิจารณ์	46
5.1	ผลการทดลองระบบขายงานท่อน้ำขึ้นแรก	46
5.2	ผลการวิเคราะห์ระบบขายงานท่อน้ำขึ้นแรก	56
5.2.1	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 11	57
5.2.2	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 12	61
5.2.3	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 13	65
5.2.4	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 14	69
5.2.5	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 15	73
5.2.6	เปรียบเทียบค่าความแตกต่างในการวิเคราะห์	77
5.3	ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเส้นท่อ	78
5.4	ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (Coefficient of Discharge) และค่าคงที่ของการสูญเสียความดันย่อย (Constant of Minor Losses) ของมาตรวัดแบบรูระบาย	81
5.5	ผลการทดลองระบบขายงานท่อน้ำขึ้นที่สอง	81
5.6	ผลวิเคราะห์ระบบขายงานท่อน้ำขึ้นที่สอง	88
5.6.1	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 21	88
5.6.2	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 22	93
5.6.3	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 23	98
5.6.4	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 24	103
5.6.5	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 25	108
5.7	การวิจารณ์ผลการวิจัย	113
5.7.1	การทดลองขายงานท่อน้ำขึ้นแรก	113
5.7.2	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเส้นท่อที่ใช้ในการทดลอง	115

5.7.3	การทดลองระบบรายงานหน้าชั้นห้อง	117
5.7.4	ความคลาดเคลื่อนระหว่างผลวิเคราะห์จากคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง	124
5.7.5	ขอบเขตการใช้งานและข้อของวิธีการของครอฟท์-เซโนเวท	125
6.	ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ	129
6.1	ข้อสรุป	129
6.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป	131
	เอกสารอ้างอิง	132
	ภาคผนวก	135
	ประวัติการศึกษา	174



รายการสัญลักษณ์

A	คือ	พื้นที่หน้าตัด
β	คือ	ค่าคงที่สำหรับการสูญเสียความดันในการไหลของน้ำผ่านมาตรวัดแบบรูระบาย (Orifice meter) ตามสมการ (2-7)
C	คือ	สัมประสิทธิ์การไหล (Coefficient of Discharge) ของมาตรวัดแบบเวนจูรี ตามสมการ (2-14)
Cd	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของมาตรวัดแบบรูระบายตามสมการ (2-6)
Cc	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดพื้นที่หน้าตัด (Coefficient of Contraction) ในการไหลของน้ำผ่านมาตรวัดแบบรูระบาย
Cv	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็ว (Coefficient of Velocity) ในการไหลของน้ำผ่านมาตรวัดแบบเวนจูรีและมาตรวัดแบบรูระบาย
Ci	คือ	อัตราการนำน้ำออกจากระบบข้างบนที่จุด i ตามสมการ (9)
D	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลาง
E	คือ	ขนาดที่ยื่นออกมาของความหยาบของผิวท่อ
E'	คือ	ระยะระหว่างส่วนที่ยื่นออกมาของความหยาบ (roughness)
Fij	คือ	อัตราการไหลในเส้นท่อ จากจุด i ถึงจุด j ตามสมการ (9)
f	คือ	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเส้นท่อกตามสมการของคาร์ซี ไวส์บาคซ์ (Darcy-Weisbach's friction factor)
g	คือ	อัตราเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก
H	คือ	ระดับความดันน้ำ (Head)
hm	คือ	ค่าจลนระดับความดันน้ำเนื่องจากการไหลของน้ำผ่านมาตรวัดแบบรูระบาย ตามสมการ (2-4)
Δh	คือ	ผลต่างระดับความดันน้ำระหว่างจุด 2 จุด
ΔH	คือ	ค่าความแตกต่างของระดับน้ำที่อ่านได้จากคิฟเฟอเรนเชียลมิเตอร์ ตามสมการ (2-6) , ค่าแก้ระดับความดันน้ำที่จุดคัตตามสมการ (2-24)
$\sum h$	คือ	ผลรวมค่าความลดระดับความดันน้ำรอบวงใด ๆ ตามสมการ (2)

Hf	คือ	ผลต่างระดับความดันน้ำระหว่างจุดที่กำลังพิจารณาปรับระดับความดันน้ำกับจุดอีกปลายหนึ่งของเส้นท่อ ตามสมการ (2-24)
hf	คือ	ค่าการลดระดับความดันน้ำ ตามสมการของคาร์ซีไว้ส์บาคซ์
I	คือ	กระแสไฟฟ้า
K	คือ	ค่าคงที่ของเส้นท่อตามสมการ (3) และสมการ (2-24)
Ke	คือ	ค่าคงที่สำหรับตัวนำไฟฟ้าตามสมการ (8)
l, L	คือ	ความยาวของเส้นท่อในช่วงที่คำนวณค่าการลดระดับความดันน้ำตามสมการ (2-19) และในที่อื่น ๆ
ρ	คือ	ความหนาแน่น (Density)
m	คือ	ค่าคงที่รูปแบบ (Form factor) ของความหยาบของผิวเส้นท่อ
N	คือ	ตัวเลขใด ๆ ตามสมการ (11)
Pi	คือ	ความดันน้ำที่จุด i ตามสมการ (10)
Q	คือ	อัตราการไหลของน้ำ
Qin	คือ	อัตราไหลเข้าสู่จุดกัก
Qout	คือ	อัตราไหลออกจากจุดกัก
Qext	คือ	อัตราไหลเข้าหรือออก จากระบบข่างานท่อน้ำโดยไม่มีการควบคุมความดันตามสมการ (2-24)
Qa	คือ	อัตราไหลในเส้นท่อตามสมการ (3)
ΔQ	คือ	ค่าแก้สำหรับอัตราไหลของทุก ๆ เส้นท่อในวงใด ๆ ตามสมการ (3)
1/q	คือ	ค่าคงที่สำหรับการยกกำลังตามสมการ (10)
R	คือ	เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold's number)
Rij	คือ	ความต้านทานการไหลของน้ำในเส้นท่อของเส้นท่อที่วางจากจุด i ถึงจุด j ในสมการ (10)
R'	คือ	ความแตกต่างของระดับน้ำในดิฟเฟอเรนเชียลแมนอมิเตอร์ (Differential Manometer) ตามสมการ (2-5)

- S0 คือ ความถ่วงจำเพาะของของไหลในคิฟเฟอเรนเชียลแมนอมิเตอร์ ตามรูป 2.2 และ 2.3
- S1 คือ ความถ่วงจำเพาะของของไหลในเส้นท่อตามรูป 2.2 และ 2.3
- μ คือ Dynamic viscosity
- ν คือ Kinematic viscosity
- x คือ ค่าคงที่สำหรับการยกกำลังตามสมการ (3)
- γ คือ น้ำหนักจำเพาะ (Specific Weight)
- V1t คือ ความเร็วของการไหลของน้ำทางทฤษฎีที่จุด 1 ตามรูป 2.2 และ 2.3
- V2t คือ ความเร็วของการไหลของน้ำทางทฤษฎีที่จุด 2 ตามรูป 2.2 และ 2.3

รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
5.1.1	ค่าที่วัดได้จากการทดลองที่ 11	46
5.1.2	ค่าที่วัดได้จากการทดลองที่ 12	48
5.1.3	ค่าที่วัดได้จากการทดลองที่ 13	50
5.1.4	ค่าที่วัดได้จากการทดลองที่ 14	52
5.1.5	ค่าที่วัดได้จากการทดลองที่ 15	54
5.2.1.1	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 11 โดยใช้สัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน 0.038	57
5.2.1.2	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 11 โดยใช้สัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน 0.028	59
5.2.2.1	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 12 โดยใช้สัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน 0.038	61
5.2.2.2	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 12 โดยใช้สัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน 0.028	63
5.2.3.1	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 13 โดยใช้สัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน 0.038	65
5.2.3.2	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 13 โดยใช้สัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน 0.028	67
5.2.4.1	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 14 โดยใช้สัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน 0.038	69
5.2.4.2	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 14 โดยใช้สัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน 0.028	71
5.2.5.1	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 15 โดยใช้สัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน 0.038	73

5.2.5.2	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 15 โดยใช้สัมประสิทธิ์ ความเสี่ยคทาน 0.028	75
---------	---	----

ตารางที่

5.2.6	แสดงการเปรียบเทียบค่าแตกต่างในการวิเคราะห์ระหว่าง การใช้สัมประสิทธิ์ความเสี่ยคทาน 0.038 และ 0.028.....	77
5.5.1	ค่าที่วัดได้จากการทดลองที่ 21	83
5.5.2	ค่าที่วัดได้จากการทดลองที่ 22	84
5.5.3	ค่าที่วัดได้จากการทดลองที่ 23	85
5.5.4	ค่าที่วัดได้จากการทดลองที่ 24	86
5.5.5	ค่าที่วัดได้จากการทดลองที่ 25	87
5.6.1.1	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 21 (ระดับความคั่นน้ำ)	88
5.6.1.2	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 21 (อัตราไหล)	89
5.6.2.1	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 22 (ระดับความคั่นน้ำ)	93
5.6.2.2	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 22 (อัตราไหล)	9
5.6.3.1	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 23 (ระดับความคั่นน้ำ)	98
5.6.3.2	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 23 (อัตราไหล)	99
5.6.4.1	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 24 (ระดับความคั่นน้ำ)	103
5.6.4.2	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 24 (อัตราไหล)	104
5.6.5.1	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 25 (ระดับความคั่นน้ำ)	108
5.6.5.2	ผลวิเคราะห์การทดลองที่ 25 (อัตราไหล)	109
5.7.3.2 (ก)	ความแตกต่างระหว่างผลวิเคราะห์จากคอมพิวเตอร์และผลการ ทดลองสำหรับค่าระดับความคั่นน้ำ (ใช้ $\alpha = 0.032$)	119
5.7.3.2 (ข)	ความแตกต่างระหว่างผลวิเคราะห์จากคอมพิวเตอร์กับผลการ ทดลองสำหรับค่าอัตราการไหล (ใช้ $\alpha = 0.032$)	119
5.7.3.3 (ก)	ความแตกต่างระหว่างผลวิเคราะห์จากคอมพิวเตอร์กับผลการ ทดลองสำหรับค่าระดับความคั่นน้ำ (ใช้ α ตามรูป 5.3 ไม่ รวมค่าการสูญเสียความคั่นย่อย)	121

5.7.3.3 (ข) ความแตกต่างระหว่างผลวิเคราะห์จากคอมพิวเตอร์และผลการทดลองสำหรับค่าอัตราการไหล (ใช้ f ตามรูป 5.3 ไม่รวมค่าการสูญเสียความดันย่อย) 121

5.7.3.4 (ก) ความแตกต่างระหว่างผลวิเคราะห์จากคอมพิวเตอร์และผลการทดลองสำหรับค่าระคายความดันน้ำ (ใช้ f ตามรูป 5.3 รวมค่าการสูญเสียความดันย่อย) 123

5.7.3.4 (ข) ความแตกต่างระหว่างผลวิเคราะห์จากคอมพิวเตอร์และผลการทดลองสำหรับค่าอัตราการไหล (ใช้ f ตามรูป 5.3 รวมค่าการสูญเสียความดันย่อย) 123

ก. 1 ผลการทดลองในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหล (Ca) และค่าคงตัวสำหรับการสูญเสียความดันย่อย (β) ของมาตรวัดแบบรูระบาย AA 138

ก. 2 ผลการทดลองในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การไหล (Ca) และค่าคงตัวสำหรับการสูญเสียความดันย่อย (β) ของมาตรวัดแบบรูระบาย CC 139

ข. 1 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล (C) ของมาตรวัดแบบเวนจูรี 142

ค. 1 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเส้นท่อขนาด 1 นิ้ว ที่ใช้ในการทดลอง 148

ฉ. 1 ค่าเฉลี่ยสำหรับ f สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเส้นท่อ (สำหรับใช้ใ้ในสมการของการไหลในท่อ $hf = \frac{fLV^2}{D \cdot 2g}$) 168

ฉ. 2 ความยาวเส้นท่อเสมือนสำหรับส่วนประกอบต่าง ๆ และหัวประทุน้ำ 169

ฉ. 3 คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ 170

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงการวางท่อแบบอนุกรม	33
1.2	แสดงการวางเส้นท่อแบบขนาน	3
1.3	แสดงการวางท่อแบบขายงาน	4
1.4	แสดงความหมายตามสมการ (1) และ (2) โดยพิจารณาที่จุด 4	6
1.5	เสนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลของน้ำ ในเส้นท่อและค่าความลดระดับความดันน้ำ	7
1.6	แสดงการทาบเทียบกันและผลที่ได้ออกมาของเสนกราฟตามวิธีการ ของฟรีแมน	8
1.7	แสดงการแทนกันไค(Analogies) ระหว่างวงจรถ่อน้ำกับ วงจไฟฟ้า	11
2.1	แสดงความสัมพันธ์ตามสมการ (2-1)	17
2.2	แสดงมาตรวัดแบบรูระบาย	21
2.3	แสดงมาตรวัดแบบเวนจูรี่	23
2.4	แสดงส่วนหนึ่งของระบบขายงานท่อน้ำ	27
	(ขณะพิจารณาปรับระดับความดันน้ำที่จุด 0 ระดับความดันน้ำที่จุด A, B, C และ D จะถือเป็นค่าคงที่)	
4.1	แสดงส่วนหนึ่งของขายงานท่อจำลอง	34
4.2	แสดงหัวประทุน้ำตรงจุดน้ำออกรจากระบบ	35
4.3	แสดงแผงพีไซนิเคอร์ที่ใช้วัดระดับความดันน้ำในระบบขายงานท่อ	36
4.4	แสดงมาตรวัดแบบรูระบายที่ใช้ในการทดลอง	37
4.5	แสดงมาตรวัดแบบเวนจูรี่ที่ใช้ในการทดลอง	37
4.6	แสดงถังสูง 8.0 เมตร นอกของปฏิบัติการ	38
4.7	รูปของเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดลอง	39
4.8	แสดงจุดบรรจบ (A) จากถังสูง 8.0 เมตร กับขายงานท่อจำลอง	39
4.9	แสดงถังสูงรักษาระดับน้ำคงที่ภายในห้องปฏิบัติการ	40

4.10	แสดงสัญลักษณ์ต่าง ๆ	41
4.11	แสดงรายละเอียดขบวนการทอจำลองชั้นคน	43
4.12	แสดงรายละเอียดขบวนการทอจำลองชั้นที่สอง	44
5.1.1	แสดงรายละเอียดระบบขบวนการทอของเครื่องทอจำลองที่ 11 ..	47
5.1.2	แสดงรายละเอียดระบบขบวนการทอของเครื่องทอจำลองที่ 12 ...	49
5.1.3	แสดงรายละเอียดระบบขบวนการทอของเครื่องทอจำลองที่ 13 ...	51
5.1.4	แสดงรายละเอียดระบบขบวนการทอของเครื่องทอจำลองที่ 14 ...	53
5.1.5	แสดงรายละเอียดระบบขบวนการทอของเครื่องทอจำลองที่ 15 ...	55
5.2.1.1	แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ระบบขบวนการทอหน้าตาม การทอจำลองที่ 11 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ค่า $f = 0.038$	58
5.2.1.2	แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ระบบขบวนการทอหน้าตามการ ทอจำลองที่ 11 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.028$	60
5.2.2.1	แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ระบบขบวนการทอหน้าตามการ ทอจำลองที่ 12 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.038$	62
5.2.2.2	แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ระบบขบวนการทอหน้าตามการ ทอจำลองที่ 12 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.028$	64
5.2.3.1	แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ระบบขบวนการทอหน้าตามการ ทอจำลองที่ 13 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.038$	66
5.2.3.2	แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ระบบขบวนการทอหน้าตามการ ทอจำลองที่ 13 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.028$	68
5.2.4.1	แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ระบบขบวนการทอหน้าตามการ ทอจำลองที่ 14 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.038$	70
5.2.4.2	แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ระบบขบวนการทอหน้าตามการ ทอจำลองที่ 14 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.028$	72
5.2.5.1	แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ระบบขบวนการทอหน้าตามการ ทอจำลองที่ 15 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.038$	74

5.2.5.2	แสดงรายละเอียดผลการวิเคราะห์ระบบข่ายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 15 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.028$	76
5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเส้นท่อที่ใช้ในการทดลอง	80
5.6.1.1	แสดงรายละเอียดระบบข่ายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 21 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.032$	90
5.6.1.2	แสดงรายละเอียดระบบข่ายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 21 จากเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้ f ตามรูป 5.3 ไม่รวมการสูญเสียความค้ำยอย	91
5.6.1.3	แสดงรายละเอียดระบบข่ายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 21 จากเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้ f ตามรูป 5.3 รวมการสูญเสียความค้ำยอย	92
5.6.2.1	แสดงรายละเอียดระบบข่ายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 22 จากเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้ $f = 0.032$	95
5.6.2.2	แสดงรายละเอียดระบบข่ายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 22 จากเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้ f จากรูป 5.3 ไม่รวมการสูญเสียความค้ำยอย	96
5.6.2.3	แสดงรายละเอียดระบบข่ายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 22 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ f ตามรูป 5.3 และรวมการสูญเสียความค้ำยอย	97
5.6.3.1	แสดงรายละเอียดระบบข่ายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 23 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.032$	100
5.6.3.2	แสดงรายละเอียดระบบข่ายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 23 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ f ตามรูป 5.3 ไม่รวมการสูญเสียความค้ำยอย	101
5.6.3.3	แสดงรายละเอียดระบบข่ายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 23 จากเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้ f จากรูป 5.3 และรวมการสูญเสียความค้ำยอย	102

5.6.4.1	แสดงรายละเอียดระบบขายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 24 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.032$	105
5.6.4.2	แสดงรายละเอียดระบบขายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 24 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ f จากรูป 5.3 ไม่รวมการสูญเสียความดันย่อย	106
5.6.4.3	แสดงรายละเอียดระบบขายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 24 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ f ตามรูป 5.3 และรวมค่าการสูญเสียความดันย่อยด้วย	107
5.6.5.1	แสดงรายละเอียดระบบขายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 25 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ $f = 0.032$	110
5.6.5.2	แสดงรายละเอียดระบบขายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 25 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ f จากรูป 5.3 ไม่รวมการสูญเสียความดันย่อย	111
5.6.5.3	แสดงรายละเอียดระบบขายงานท่อน้ำตามการทดลองที่ 25 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ f ตามรูป 5.3 รวมค่าการสูญเสียความดันย่อย	112
5.7.2	แสดงเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์คัมเบอร์ที่ได้จากการทดลองเทียบกับจากมูดี้ไดอะแกรม	116
ก. 1	แสดงรายละเอียดของมาตรวัดแบบรูระบาย	137
ข. 1	รูปแสดงเวนจูร์มิเตอร์พร้อมด้วยคิฟเฟอเรนเชียลมิเตอร์	141
ค. 1	เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเส้นท่อ (f) กับค่าเรย์โนลด์คัมเบอร์ที่ใช้ในการทดลอง	145
ข. 1	ความยาวของช่วงเส้นท่อของขายงานท่ोजำลองชั้นที่ 2 เมื่อรวมค่าการสูญเสียความดันขีตามทางและที่ทางลงไปด้วย	173