

การลดผลกระทบจากค้อนน้ำด้วยถังลดความดัน

Reduction of Water Hammer Impact with Surge Tank

ประยงค์ กีร์ติอุไร, วศ.ด. (Prayong Keeratiurai, D.Eng.)^{1*}

ชีวินทร์ ลิ้มศิริ, ปร.ด. (Cheevin Limsiri, Ph.D.)²

ปฏิกาน พรมดี, วศ.บ. (Patiparn Promdee, B.Eng.)³

กฤษิพัฒน์ วิจิตรปัทมวงศ์, วศ.บ. (Puripapat Wijitprattamawong, B.Eng.)⁴

Received : April 8, 2022

Revised : May 6, 2022

Accepted : May 23, 2022

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์: เพื่อประเมินความแตกต่างของการลดผลกระทบจากค้อนน้ำ ด้วยการประยุกต์ใช้ถังลดความดันแบบที่มีและไม่มีแผ่นไดอะแฟรมยืดหยุ่น

วิธีการวิจัย: จำลองการเกิดค้อนน้ำด้วยปั้มน้ำขนาด 0.5 แรงม้า เฮดสูงสุด 20 เมตรและวาล์วควบคุมเพื่อปรับอัตราการไหล โดยส่งน้ำผ่านท่อเมนพีวีซี ขนาด 1/2 นิ้ว, 3/4 นิ้ว, และ 1 นิ้ว ซึ่งมีความยาวท่อ 4 เมตร และเก็บผลการศึกษาโดยการวัดค่าความดันที่ถังลดความดันที่สร้างขึ้นเองด้วยท่อพีวีซี และเปรียบเทียบค่าความดันที่เกิดขึ้น ทั้งแบบที่มีและไม่มีแผ่นไดอะแฟรมยืดหยุ่น โดยถังลดความดันที่ทำการศึกษานี้ มีขนาด 1/2 นิ้ว, 3/4 นิ้ว, 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว, และ 2 นิ้ว และความยาวของแต่ละขนาดคือ 50, 75, 100 เซนติเมตร

ผลการศึกษา: ประสิทธิภาพการลดความดันจากการเกิดค้อนน้ำเมื่อใช้ถังลดความดันอยู่ที่ 2%-5%, 7%-15%, และ 20%-40% สำหรับขนาดท่อ 1/2 นิ้ว, 3/4 นิ้ว, และ 1 นิ้ว ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพจะแปรผันตรงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของถังลดความดันทั้งสองแบบ ซึ่งแผ่นไดอะแฟรมยืดหยุ่นสามารถลดความดันโดยมีประสิทธิภาพสูงกว่าไม่มีแผ่นไดอะแฟรมยืดหยุ่น 2%-7% และเนื่องจากขนาดของท่อส่งน้ำจะแปรผกผันกับค่าความดันที่เกิดขึ้นในระบบท่อ ดังนั้นขนาดของท่อเมนส่งน้ำหลักจึงมีผลต่อประสิทธิภาพการลดความดัน โดยท่อจ่ายน้ำหลักขนาด 1 นิ้ว, 3/4 นิ้ว, และ 1/2 นิ้ว มีประสิทธิภาพการลดความดันน้ำอยู่ที่ 20%-55%, 7%-29% และ 2%-10% ตามลำดับ นอกจากนี้การออกแบบความยาวของถังลดความดัน โดยสนใจการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ จะทำให้ได้ค่าความยาวสูงสุดของถังลดความดันน้อยกว่ากรณีที่ไม่นับการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ

คำสำคัญ: ค้อนน้ำ, ถังลดความดัน

¹อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จังหวัดนครราชสีมา

(Lecturer, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University, Nakhon Ratchasima Province)

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จังหวัดนครราชสีมา

(Assistant Professor, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University, Nakhon Ratchasima Province)

³หมวดทางหลวงสีดา แขวงทางหลวงนครราชสีมาที่ 1 จังหวัดนครราชสีมา

(Sida Highway Depot, Nakhon Ratchasima 1 Highway District, Nakhon Ratchasima Province)

⁴สำนักชลประทานที่ 8 กรมชลประทาน อำเภอบูรี จังหวัดนครราชสีมา

(Regional Irrigation Office 8, Royal Irrigation Department, Khon Buri District, Nakhon Ratchasima Province)

*ผู้เขียนหลัก (Corresponding author)

E-mail: prayong_kee@vu.ac.th

Abstract

Objective: To evaluate the difference in reducing the impact of water hammer with the surge tank application with and without a flexible diaphragm.

Methods: The water hammer were simulated from 0.5 HP water pump, head maximum to 20 meters and control valve to adjust the flow rate. The water flowed through the PVC main pipes with ½ inch, ¾ inch, and 1 inch pipe sizes. The length of the PVC main pipe was 4 meters each. The study results were collected from pressure values at the surge tanks. The surge tanks were made out of PVC pipes. The pressure reduction values were compared in with and without the flexible diaphragm. The surge tanks studied were available in ½-inch, ¾-inch, 1-inch, 1.5-inch, and 2-inch sizes. The lengths of the surge tanks were 50, 75, 100 centimeters and were tested at each size of the surge tanks.

Results: The water hammer pressure reduction efficiencies were 2%-5%, 7%-15%, and 20%-40% for ½ inch, ¾ inch, and 1 inch pipe sizes, respectively. These efficiencies were directly proportional to the diameters and lengths of the surge tanks, both without and with flexible diaphragm. The flexible diaphragm could reduce the pressure with the higher efficiency of 2%-7% than the without flexible diaphragm. Because of the water supply pipe sizes were inversely proportional to the pressure generated in the pipe system. Therefore, the sizes of the main water supply pipes affect the efficiency of reducing pressure. The water pressure reduction efficiencies were 20%-55%, 7%-29%, and 2%-10% for 1 inch, ¾ inch, and ½ inch of the main water supply pipe sizes, respectively. In addition, the design of the surge tanks length that took into account the energy loss due to friction in the pipelines could achieves the less maximum length of the surge tank than to ignore the loss of energy due to friction in the pipe.

Keywords: water hammer, surge tank

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ของปัญหา

ค้อนน้ำ (water hammer) เป็นปรากฏการณ์ที่ความดันในท่อกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงและฉับพลัน โดยมีความดันเพิ่มขึ้นและลดลงจากความดันเดิมในลักษณะเป็นคลื่นขึ้นลงที่สลับกันไปเป็นอนุกรมสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ค้อนน้ำ ก็คือมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลหรืออัตราการไหลในท่ออย่างกะทันหัน เช่น การปิดประตูน้ำอย่างกะทันหัน เป็นต้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในลักษณะดังกล่าวโมเมนตัมของของเหลวจะถูกเปลี่ยนไปกลายเป็นแรงกระแทกบนประตุน้ำและบนผนังของท่อ แรงกระแทกที่เกิดขึ้นถ้าหากมีมากเกินไปความสามารถในการรับแรงของผนังท่อจะรับไว้ได้ก็จะทำให้ท่อระเบิดหรือทำให้ระบบท่อและอุปกรณ์เสียหายอย่างรุนแรงขึ้นได้ ระดับความเสียหายเนื่องจากปรากฏการณ์การเกิดค้อนน้ำนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความยืดหยุ่น (elasticity) ของท่อ (ชมรมวิศวกรออกแบบระบบสุขาภิบาล, 2559) หรือทำให้พวกข้อต่อต่างๆ รวมทั้งเส้นท่อที่แฉ่งสะบัดจากแรงกระแทกของค้อนน้ำเกิดการแตกร้าวและรั่วซึมจากการกระแทกที่สะสมซ้ำๆ เป็นเวลานาน และก่อความเสียหายให้กับชิ้นส่วนพวกวาล์วปิด-เปิดของตัวก๊อก หรือวาล์วน้ำต่างๆ ทำให้ปิดน้ำไม่อยู่ (SCG Brand, 2559) นอกจากปัญหาดังกล่าว นิพนธ์ ลักษณะอดิศร (2555) ยังได้กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วของของเหลวในเส้นท่ออย่างรวดเร็วนั้นจากการปิดวาล์วอย่างฉับพลันทันที หากเกิดปรากฏการณ์ค้อนน้ำอย่างรุนแรงจะทำให้อุปกรณ์ต่างๆ เช่น วาล์ว ปั๊มน้ำเสียหายได้ หรือหากรุนแรง

มากอาจจะทำให้ท่อแตก หรือระเบิดได้ ซึ่งการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดค้อนน้ำมีสิ่งที่จะต้องพิจารณา 2 ปัจจัยคือคลื่นความดัน (pressure wave) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ผ่านน้ำด้วยความเร็วเสียง (speed of sound) หรือความเร็วโซนิก (sonic velocity) และการเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดขึ้นที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของปรากฏการณ์การเกิดค้อนน้ำ (กิริติ สิวัจกุล, 2545)

1.2 ทบทวนวรรณกรรม หลักการและ

ทฤษฎี

กิริติ สิวัจกุล (2545) ได้กล่าวไว้ถึงการใช้อุปกรณ์ปรับความดัน ติดตั้งในท่อขนาดเล็กด้วยประตุน้ำและวาล์วซึ่งราคาสูง มีขายอยู่ในท้องตลาดและบางชนิดยอมให้เกิดการสูญเสียปริมาณน้ำส่วนหนึ่งระบายออกทิ้งเมื่อเกิดปรากฏการณ์ค้อนน้ำภายในท่อ เช่น ประตุน้ำลดความดัน (pressure-relief valves) เมื่อความดันในท่อกมากขึ้นจะมีแรงดันน้ำดันประตุน้ำที่ต่อเชื่อมโยงกับสปริงให้มีการเปิดขึ้นโดยอัตโนมัติ, ประตุน้ำอากาศเข้า (air-inlet valves) เป็นประตุน้ำที่มีการเปิดได้อย่างอัตโนมัติ เมื่อความดันในท่อกลดลงต่ำกว่าค่าที่ยอมให้ได้ ประตุน้ำนี้จะยอมให้อากาศจากภายนอกไหลเข้าไปในท่อได้ ซึ่งเป็นการป้องกันท่อกแตกเมื่อความดันภายในท่อกต่ำกว่าความดันบรรยากาศ, และประตุน้ำควบคุมความดัน (pressure regulating valves) จะติดตั้งอยู่ระหว่างระบบท่อกที่มีความดันสูงกับความดันต่ำโดยยอมให้น้ำมีการไหลผ่านจากระบบท่อกที่มีความดันสูงไปสู่ระบบท่อกที่มีความดันต่ำกว่าเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีถังลดความดัน (surge tanks) ซึ่งเป็นถังที่ติดตั้งในท่อกขนาดใหญ่เพื่อลดความดันในท่อกลงจากเกิดค้อนน้ำ ประโยชน์เพิ่มเติมของถังลดความดันนี้คือเป็น

ถึงจ่ายน้ำสำรองและช่วยลดความดันติดลบ (negative pressure) ในท่อถ้ามีการเปิดประตูน้ำทันทีทันใดได้ด้วย

การเปลี่ยนแปลงความดันภายในท่ออย่างทันทีทันใดเนื่องจากการเกิดค้อนน้ำภายในท่อจะทำให้เกิดแรงดันภายในท่อ ซึ่งตามกฎการ

เคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันจะพิจารณามวลน้ำทั้งหมดภายในท่อ (m) ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว V ในอัตรา dv/dt สามารถหาขนาดแรงดันภายในท่อ (F) ได้โดยถ้าความเร็วของน้ำในท่อลดลงทันทีทันใดจนเป็น 0 ในช่วงเวลา dt เข้าใกล้ 0 หรือ V เข้าสู่อ 0 จะพบว่า

$$F = \frac{m(V_0 - 0)}{0} = \alpha \quad (1)$$

เมื่อ V_0 คือ ความเร็วของน้ำในท่อภายใต้การไหลปกติ

จะเห็นว่ากรณีที่ $V \rightarrow 0$ ในช่วง $dt \rightarrow 0$ จะเกิดแรงลัพธ์ (resulting force) ในท่อจำนวนมากมายมหาศาล หรือ $F = \alpha$ ดังสมการ (1)

1.2.1 การวิเคราะห์เพื่อออกแบบความยาวของถังลดความดัน กรณีสนใจการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ ($h_f \neq 0$)

เมื่อมีการปิดประตูน้ำ (valve) อย่างทันทีทันใด ระดับน้ำในถังลดความ

ดันจะสูงขึ้น ($y+y_1$) จากนั้นก็จะมีระดับลดลง ($y-y_1$) และสูงขึ้นสลับกันไปจนกระทั่งถูกสลายพลังงานด้วยแรงเสียดทานของการไหลจนหยุดนิ่ง ดังนั้นเมื่อใช้สมการการเคลื่อนที่ตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตันกับสภาพการไหลไม่คงที่ในเส้นท่อและในถังลดความดัน (unsteady flow) และ $F = PA$ โดยที่ $P = \gamma h$ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของน้ำในท่อ V กับความสูงชลศาสตร์ในถังลดความดัน y ดังสมการ (2)

$$V^2 = \frac{2gAD^2}{LA_s f^2} \left[1 - \frac{fA_s}{AD} y \right] - Ce^{-(fA_s/AD)y} \quad (2)$$

เมื่อให้ L คือ ความยาวท่อจากถังเก็บน้ำถึงที่ติดตั้งถังลดความดัน

f คือ แฟคเตอร์ความเสียดทานของท่อ

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ

A คือ พื้นที่หน้าตัดท่อ

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของถังลดความดัน

C คือ ค่าคงที่

y คือ ความสูงชลศาสตร์ในถังลดความดันในขณะที่มีน้ำไหลปกติตามแนวเส้นระดับชลศาสตร์

y_{max} คือ ความสูงน้ำสูงสุดในถังลดความดัน ขณะเกิดปรากฏการณ์ค้อนน้ำ

ดังนั้น y_{max} จะเกิดขึ้นเมื่อประตูน้ำปิดทันทีทันใดในตอนแรก ทำให้ $V = 0$ ดังนั้น เมื่อแทนค่า $V = 0$ และ $y = y_{max}$ ในสมการ (2) จะสามารถคำนวณหา y_{max} ได้

1.2.2 การวิเคราะห์เพื่อออกแบบความยาวของถังลดความดัน กรณีไม่สนใจการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ ($h_f = 0$)

น้ำไหลออกจากถังเก็บน้ำผ่านท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดท่อ A โดยที่ปลายทางออกติดตั้งถังลดความดันเป็นท่อดิ่งที่มีพื้นที่หน้าตัด A_s ถ้าไม่มีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ

เมื่อปิดประตูน้ำทันที V เข้าสู่ 0 และ $y = y_{\max}$ จะได้สมการวิเคราะห์เพื่อออกแบบความยาวของถังลดความดัน ดังสมการ (3)

$$y_{\max} = V_0 \sqrt{\left(\frac{A}{A_s}\right) \left(\frac{L}{g}\right)} \quad (3)$$

1.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรีวัธน์ เอื้อนสะอาด วรารุช วุฒิวนิชย์ และจิระกานต์ ศิริวิชัยไมตรี (2555) ทำงานวิจัยเรื่องไฮดรอลิกแรม โดยเริ่มจากน้ำจากแหล่งน้ำไหลเข้าสู่ท่อรับน้ำไปยังเครื่อง ผ่านวาล์วทั้งน้ำจนความเร็วของการไหลเพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดแรงยกวาล์วทั้งน้ำให้ปิด ซึ่งการปิดวาล์วทั้งน้ำทำให้เกิดความดันจำนวนมากในตัวเครื่อง เรียกว่าปรากฏการณ์ Water Hammer ทำให้วาล์วทั้งน้ำกลับถูกยกขึ้น น้ำส่วนหนึ่งจะถูกอัดเข้าไปเก็บในถังแรงดันและเข้าสู่ท่อจ่ายน้ำขึ้นไปยังถังพักน้ำ มีข้อจำกัดหลายประการเช่น ต้องมีศักย์น้ำเหมาะสม อัตราการสูบน้ำจำกัด มีการสูญเสียโดยเปล่าประโยชน์สูง

ศิริเชษฐ์ กองแก้ว (2558) ทำงานวิจัยเรื่อง ปัมสูบน้ำอัตโนมัติโดยใช้พลังงานธรรมชาติจากน้ำ โดยอาศัยหลักการของค้อนน้ำ (water hammer) ในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเปิดปิดของวาล์วน้ำแบบกะทันหัน ทำให้เกิดแรงดันมาขับน้ำ ให้ไหลไปตามท่อได้ซึ่งพบว่ามีความสามารถสูบน้ำขึ้นที่สูงระยะ 6 เมตร ได้ 4.4 ลิตร/นาที่

มัชฌิมะ สิทธิโห (2557) จัดทำเอกสารจัดการความรู้ เพื่อให้สามารถทำปัมกระแทกน้ำขึ้นใช้ได้เอง โดยมีรายละเอียดของการ

ออกแบบปัมกระแทกน้ำคือ ท่อขับน้ำใช้ท่อประปา กัลวาไนซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 1 ¼ นิ้ว ยาว 16.8 เมตร, ท่อจ่ายน้ำใช้ท่อ PVC หรือสายยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = ½ นิ้ว ยาว 168 เมตร, หม้ออัดอากาศทำจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ยาว 11 นิ้ว, ปัมกระแทกน้ำสามารถสูบน้ำขึ้นที่สูงวัดจากระดับที่ติดตั้งตัวปัมถึงถังเก็บได้ 15 เมตร, ตำแหน่งที่ติดตั้งปัมอยู่ต่ำกว่าระดับของแหล่งจ่ายน้ำลงมา 2.5 เมตร, อัตราการสูบน้ำของปัมอยู่ที่ 2,180 ลิตรต่อวัน

สุนทร วงศ์เสน (2559) ศึกษาการทำงานของเครื่องบ้นน้ำเปรียบเทียบกับถังแรงดันอากาศ 3 ขนาดคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว, เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว, เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว และความสูงของถังแหล่งจ่ายน้ำ 3 ระดับ คือ 0.5 เมตร, 1 เมตร, และ 1.5 เมตร ซึ่งผลการทดลองที่ความสูงของถังจ่ายน้ำ เข้าระบบ 0.5 เมตร ของขนาดถังอัดอากาศ เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว สามารถส่งมวลน้ำขึ้นไปได้สูง 7 เมตร, ที่ของขนาดถังอัดอากาศ เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สามารถส่งมวลน้ำขึ้นไปได้สูง 8.6 เมตร และที่ขนาดถังอัดอากาศ เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สามารถส่งมวลน้ำ ขึ้นไปได้สูง 12 เมตร แต่ได้ปริมาณน้ำลดลงตามลำดับ ในขณะที่ผลการทดลองที่ความสูงของถังจ่ายน้ำ เข้าระบบ 1 และ 1.5 เมตร ขนาดของ

ถึงอัดอากาศไม่มีผลต่อความสูงของการส่งน้ำ โดยสามารถส่งน้ำขึ้นไปได้สูงเท่ากับ 12 เมตร

พนิดา สีมารูธ (2564) ศึกษาผลของการเลือกใช้วาล์วน้ำล้นและวาล์วส่งน้ำต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องตะบันน้ำ ที่ถูกจัดสร้างตามแบบของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติในโครงการการผลิตและการใช้งานระบบสูบน้ำเชิงกลสำหรับชุมชน เพื่อใช้เป็นชุดสาธิตให้เกษตรกรโดยเลือกใช้ใช้ควาล์วสวิงใช้ควาล์วสปริงและวาล์วหัวกะโหลก เนื่องจากเป็นวาล์วที่เกษตรกรหาซื้อได้ง่ายมีขายตามท้องตลาดทั่วไปและราคาไม่แพง พบว่าการใช้ใช้ควาล์วสวิงเป็นทั้งวาล์วน้ำล้นและวาล์วส่งน้ำตามแบบของสวทช. ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 53% สามารถส่งน้ำได้สูง 12.3 เมตร โดยสูบน้ำส่งได้ 6.66 ลิตรต่อนาทีที่มีอัตราของน้ำที่ล้นออก 14.56 ลิตรต่อนาทีแสดงว่าสามารถส่งน้ำได้ 31.38% ของน้ำที่ไหลเข้าเครื่องตะบัน ส่วนการใช้ใช้ควาล์วสวิงเป็นวาล์วน้ำล้นและวาล์วสปริงเป็นวาล์วส่งน้ำ ให้ค่าประสิทธิภาพการทำงานรองลงมาเท่ากับ 31% สามารถส่งน้ำได้สูง 9.5 เมตร โดยสูบน้ำส่งได้ 6.2 ลิตรต่อนาทีที่มีอัตราของน้ำที่ล้นออก 23 ลิตรต่อนาทีที่สามารถส่งน้ำได้ 21.23 % ของน้ำที่ไหล ส่วนการใช้วาล์วหัวกะโหลกเป็นวาล์วน้ำล้นพร้อมกับใช้ใช้ควาล์วสปริงเป็นวาล์วส่งน้ำจะได้ประสิทธิภาพเท่ากับต่ำที่สุดเพียง 17.95 %

จากประเด็นปัญหา หลักการเหตุผล การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังที่กล่าว จึงเกิดเป็นที่มาของการทำงานวิจัยเรื่องนี้ เพื่อลดผลกระทบของการเกิดค้อนน้ำในระบบท่ออาคาร ด้วยการประยุกต์ใช้ถังลดความดัน แบบที่มีและไม่มีแผ่นไดอะแฟรมยืดหยุ่น ช่วยลดต้นทุน

ในการก่อสร้างและไม่เกิดการสูญเสียมวลน้ำระบายออกทิ้งเมื่อเกิดปรากฏการณ์ค้อนน้ำขึ้นภายในระบบท่อของอาคาร

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อประเมินความแตกต่างของการลดผลกระทบจากการเกิดค้อนน้ำ ด้วยการประยุกต์ใช้ถังลดความดันแบบที่มีและไม่มีแผ่นไดอะแฟรมแบบยืดหยุ่น (flexible diaphragm)

3. กรอบแนวคิดการวิจัย

3.1 แผ่นไดอะแฟรมแบบยืดหยุ่น (flexible diaphragm) ที่ใช้ในการศึกษานี้เพื่อแยกส่วนระหว่างน้ำกับอากาศโดยไม่ให้อากาศละลายลงไปในน้ำ ซึ่งจะทำได้จากยางลูกโป่ง และใส่ในถังลดความดัน เฉพาะแบบที่มี Flexible diaphragm โดยติดตั้งที่ตำแหน่ง $\frac{L}{3}$ จากปลายสุดของความยาวถังลดความดัน (วรวิทย์ อึ้งภากรณ์, 2541)

3.2 ขนาดของถังลดความดัน ที่ใช้ในการศึกษานี้จะมีขนาดอย่างน้อยเท่ากับขนาดของท่อเมน PVC ที่ใช้ในการส่งน้ำ ที่ถังลดความดันนี้ต่อเชื่อมอยู่ (Prayong Keeratiurai, 2013)

3.3 ประเมินการสูญเสียพลังงานทั้งหมดจากการคำนวณการสูญเสียหลัก (major loss) รวมกับการสูญเสียรอง (minor loss) ด้วยวิธี Darcy-Weisbach (Darcy, 1857; Weisbach, 1845; Glenn, 2002)

3.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการลดความดันของถังลดความดันที่สร้างขึ้นจะพิจารณابนสมมติฐานที่ว่าน้ำไหลในท่อภายใต้ความดันหรือเต็มหน้าตัดการไหล โดยเป็นการไหลแบบคงที่

(steady flow) และมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (turbulent flow) โดยมีค่า Reynolds Number มากกว่า 4000

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการลดผลกระทบจากค้อนน้ำ ด้วยถังลดความดัน โดยมีระเบียบวิธีของการศึกษาคือ

4.1.1 ศึกษาวิจัยโดยการจำลองปรากฏการณ์การเกิดค้อนน้ำโดยใช้ปั๊มน้ำขนาด 0.5 แรงม้า และเฮดสูงสุด 20 เมตร และวาล์วควบคุมเพื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหลหรือความเร็วของการไหล โดยส่งน้ำผ่านท่อเมน PVC ที่มีขนาดท่อ ½ นิ้ว, ¾ นิ้ว, และ 1 นิ้ว ซึ่งมีความยาวท่อนำส่งน้ำ 4 เมตร และตรวจสอบลักษณะการไหลในเส้นท่อน้ำใต้ความดันซึ่งมีการไหลเต็มหน้าตัดการไหล และมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (turbulent flow) โดยมีค่า Reynolds Number มากกว่า 4000

4.1.2 ศึกษาวิจัยจากการเก็บข้อมูลผลทดสอบการวัดค่าความดันที่ถังลดความดัน (surge tanks) ที่สร้างขึ้นเองโดยใช้ท่อ PVC ขึ้น

คุณภาพ 13.5 และประเมินผลกระทบจากความดันต่อถังลดความดัน ทั้งแบบที่มีและไม่มี Flexible diaphragm โดยถังลดความดันที่ทำการศึกษานี้ มีขนาด ½ นิ้ว, ¾ นิ้ว, 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว, และ 2 นิ้ว และความยาวของแต่ละขนาดของถังลดความดัน จะทำการศึกษาลดความดันที่ 3 ความยาวคือ 50, 75, 100 เซนติเมตร

4.1.3 เก็บข้อมูลผลกระทบจากค้อนน้ำ ที่ถังอัดความดันขนาดและความยาวต่างๆ ทั้งแบบที่มี Flexible diaphragm และไม่มี Flexible diaphragm

4.1.4 ประเมินความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของท่อเมนส่งน้ำหลักกับขนาดและความยาวต่างๆ ของถังลดความดันที่สร้างขึ้น

4.1.5 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละที่สามารถลดความดันในระบบท่อส่งน้ำจากการเกิดค้อนน้ำกับขนาดและความยาวต่างๆ ของถังลดความดันที่สร้างขึ้น

4.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิธีการลดผลกระทบของการเกิดค้อนน้ำ จากถังลดความดันที่สร้างขึ้น ด้วยชุดทดสอบดังรูปที่ 1 โดยมีรายละเอียดของการดำเนินงานวิจัยดังนี้



รูปที่ 1 แบบจำลองชุดทดสอบผลกระทบจากการเกิดค้อนน้ำ ด้วยถังลดความดัน

4.2.1 เตรียมเครื่องสูบน้ำให้พร้อมใช้งานทั้งระบบไฟฟ้าและการกรอกน้ำไล่อากาศ พร้อมกับการเตรียมน้ำในถังเก็บน้ำสำรองให้เต็ม

4.2.2 เปิดปั๊มน้ำให้น้ำไหลเต็มระบบท่อ โดยที่ยังไม่ได้ติดตั้งถังลดความดัน

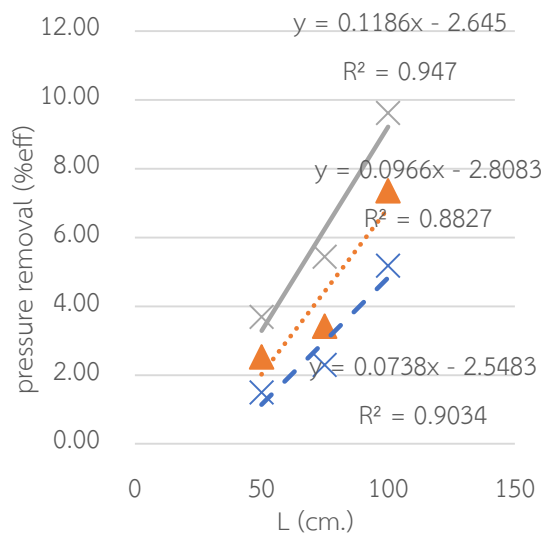
4.2.3 ปิดวาล์วตัวสุดท้ายอย่างกะทันหัน แล้วบันทึกค่า ความดันที่गेจวัดความดัน ซึ่งเกิดปรากฏการณ์ค้อนน้ำ

4.2.4 ติดตั้งโดยการเปลี่ยนสลับชุดทดสอบถังลดความดัน ทั้งแบบที่มีและไม่มี Flexible diaphragm ที่สร้างขึ้น ในระบบท่อก่อนถึงวาล์วตัวสุดท้าย ที่มีขนาดและความยาวตามที่กำหนด แล้วทำการทดลอง ตามข้อ 4.2.1-4.2.3 แล้วบันทึกค่าความดันที่วัดได้ โดยจำนวนค่าความดันที่บันทึกจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน (Coefficient of Variation: CV) ไม่เกินร้อยละ 5

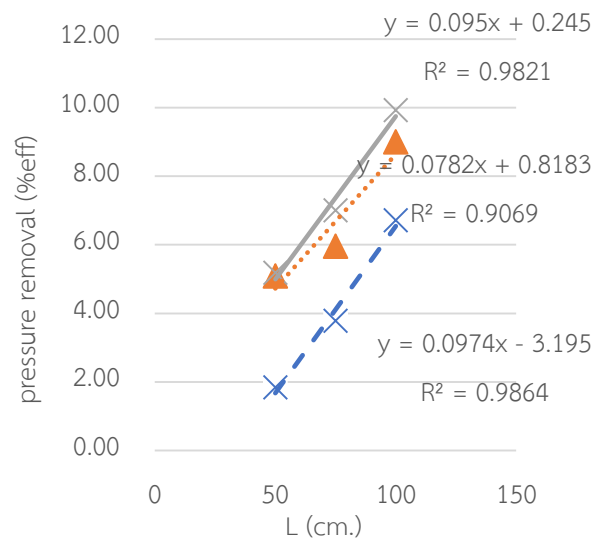
5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 ประสิทธิภาพการลดผลกระทบจากการเกิดค้อนน้ำ ด้วยถังลดความดัน

ผลการศึกษาการเกิดค้อนน้ำด้วยชุดทดสอบกรณียังไม่ได้ติดตั้งถังลดความดัน เมื่อปิดวาล์วตัวสุดท้ายอย่างกะทันหันสามารถอ่านค่าความดันจากगेจวัดความดันได้เท่ากับ 45 psi นั้นคือในระบบท่อก่อนจะมีความดันสูงขึ้นจากการเกิดสภาวะค้อนน้ำ 45 psi และเมื่อติดตั้งถังลดความดันที่สร้างขึ้นทั้งแบบที่มีและไม่มี flexible diaphragm โดยการเปลี่ยนสลับชุดทดสอบถังลดความดัน ในระบบท่อก่อนถึงวาล์วตัวสุดท้าย เมื่อทำการศึกษาโดยปิดวาล์วตัวสุดท้ายอย่างกะทันหันและอ่านค่าความดันจากगेจวัดความดัน จะทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของการลดความดันด้วยถังลดความดันที่สร้างขึ้นได้ดังรูปที่ 2-4

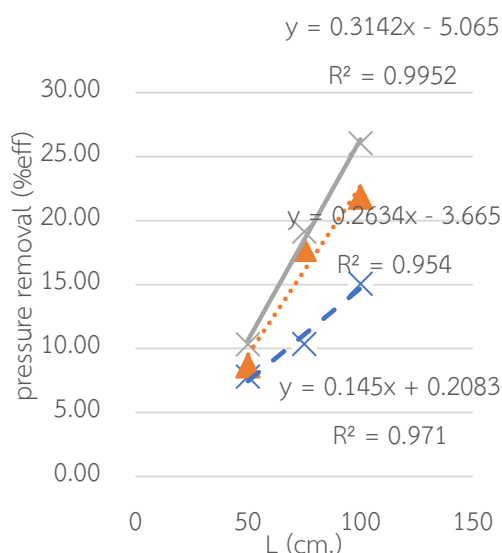


(a) แบบไม่มี Flexible diaphragm

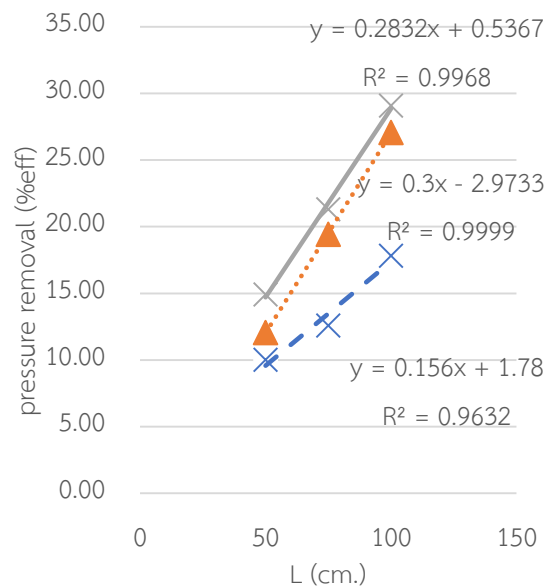


(b) แบบมี Flexible diaphragm

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละค่าความดันที่ลดได้กับความยาวของถังลดความดันที่มีขนาด 1/2, 3/4 และ 1 นิ้ว
แบบไม่มีและมี Flexible diaphragm กรณีที่ท่อนำส่งน้ำหลักขนาด 1/2 นิ้ว

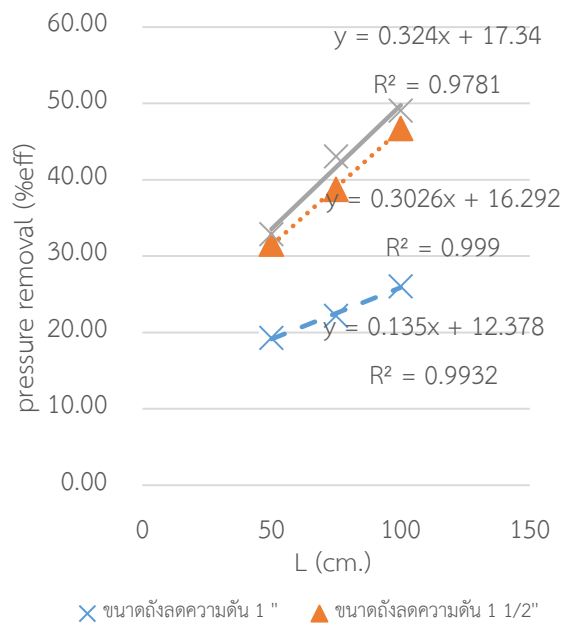


(a) แบบไม่มี Flexible diaphragm

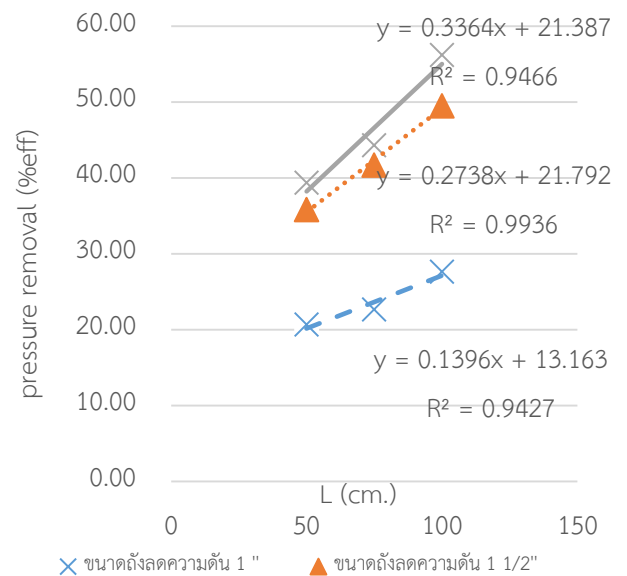


(b) แบบมี Flexible diaphragm

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละค่าความดันที่ลดได้กับความยาวของถังลดความดันที่มีขนาด 3/4, 1 และ 1.5 นิ้ว
แบบไม่มีและมี Flexible diaphragm กรณีใช้ท่อหลักขนาด 3/4 นิ้ว



(a) แบบไม่มี Flexible diaphragm



(b) แบบมี Flexible diaphragm

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความดันที่ลดได้กับความยาวของถังลดความดันที่มีขนาด 1, 1.5 และ 2 นิ้ว แบบไม่มีและมี Flexible diaphragm กรณีใช้ท่อหลักขนาด 1 นิ้ว

จากรูปที่ 2-4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละที่สามารถลดความดันในระบบท่อส่งน้ำจากการเกิดค้อนน้ำกับขนาดและความยาวต่างๆ ของถังลดความดันที่สร้างขึ้นกรณีใช้ท่อหลักขนาด 1/2 นิ้ว, 3/4 นิ้ว และ 1 นิ้ว ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพในการลดความดันจากการเกิดค้อนน้ำจะแปรผันตรงกับขนาดของถังลดความดันทั้งแบบไม่มีและ มี Flexible diaphragm ซึ่งเส้นกราฟในรูปมีค่าความชันเป็นบวก นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวของถังลดความดันนี้ก็แปรผันตรงกับประสิทธิภาพในการลดความดันจากการเกิดค้อนน้ำด้วยเช่นกัน และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างรูป (a) กับรูป (b) จากรูปที่ 2-4 ที่ถังลดความดันขนาดเดียวกัน

จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการลดความดันของถังลดความดันแบบที่มี Flexible diaphragm จะสูงกว่าแบบที่ไม่มี Flexible diaphragm และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างรูป จากรูปที่ 2-4 สามารถประเมินความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของท่อเมนส่งน้ำหลักกับขนาดและความยาวต่างๆ ของถังลดความดันที่สร้างขึ้นได้ว่า ขนาดของท่อเมนส่งน้ำหลักมีผลต่อประสิทธิภาพในการลดความดัน โดยการพิจารณาถังลดความดันที่มีขนาด 1 นิ้ว จะเห็นว่าขนาดของท่อเมนส่งน้ำหลักแปรผันตรงกับประสิทธิภาพในการลดความดัน โดยที่ท่อส่งน้ำหลักที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจากการเกิดค้อนน้ำหรือประสิทธิภาพในการลดความดันของถังลดความดันที่ขนาดเดียวกันทั้งแบบที่ไม่มีและ มี Flexible diaphragm ดีขึ้นกว่าท่อส่งน้ำหลักที่มีขนาดเล็กกว่า

5.2 การเปรียบเทียบค่าความยาวสูงสุดของถังลดความดัน จากผลกระทบของการเกิดค้อนน้ำ กรณีที่คิดและไม่คิดแรงเสียดทานของระบบท่อ

การวิเคราะห์เพื่อออกแบบความยาวของถังลดความดัน กรณีสนใจการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ ($h_f \neq 0$) โดยประเมินการสูญเสียพลังงานทั้งหมดจากการคำนวณการสูญเสียหลัก (major loss) รวมกับการสูญเสียรอง (minor loss) ด้วยวิธี Darcy-

Weisbach จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของน้ำในท่อ V กับความสูงชลศาสตร์ในถังลดความดัน y จากสมการ (2) ในขณะที่การวิเคราะห์เพื่อออกแบบความยาวของถังลดความดัน กรณีไม่สนใจการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ ($h_f = 0$) จะได้ความยาวของถังลดความดัน จากสมการ (3) ซึ่งผลการวิเคราะห์เพื่อออกแบบความยาวของถังลดความดัน ทั้ง 2 กรณีจะได้ผลการคำนวณค่าความยาวสูงสุดของถังลดความดัน (y_{max}) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณค่าความยาวสูงสุดของถังลดความดันจากการเกิดค้อนน้ำ กรณีไม่คิดแรงเสียดทานของระบบท่อ และกรณีคิดแรงเสียดทานของระบบท่อ*

ขนาดท่อหลัก (นิ้ว)	ขนาดถังลดความดัน (นิ้ว)	y_{max} (cm)	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน (y) กับความยาวของถังลดความดัน (x)			
			สมการแบบ ไม่มี Flexible diaphragm	ความดัน (psi)	สมการแบบ มี Flexible diaphragm	ความดัน (psi)
1/2	1/2	225	$y = -0.0332x + 46.147$	38.677	$y = -0.0438x + 46.435$	36.58
		87*		43.259*		42.624*
	3/4	150	$y = -0.0434x + 46.258$	39.748	$y = -0.0352x + 44.633$	39.353
		37.7*		44.622*		43.306*
	1	113	$y = -0.0534x + 46.192$	40.158	$y = -0.0428x + 44.893$	40.057
		21*		45.071*		43.994*
3/4	3/4	108	$y = -0.0652x + 44.903$	37.861	$y = -0.0702x + 44.198$	36.616
		79.5*		39.720*		38.617*
	1	81	$y = -0.1186x + 46.655$	37.048	$y = -0.135x + 46.338$	35.403
		53*		40.369*		39.183*
	1.5	54	$y = -0.1414x + 47.278$	39.642	$y = -0.1274x + 44.755$	37.875
		23*		44.026*		41.825*
1	1	60	$y = -0.0608x + 39.433$	35.785	$y = -0.0628x + 39.073$	35.305
		54*		36.150*		35.682*
	1.5	40	$y = -0.1362x + 37.672$	32.224	$y = -0.1232x + 35.193$	30.265
		33*		33.177*		31.127*
	2	30	$y = -0.1458x + 37.195$	32.821	$y = -0.1514x + 35.378$	30.836
		24*		33.696*		31.744*

หมายเหตุ: *กรณีคิดแรงเสียดทานของระบบท่อ

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อพิจารณาที่ค่าความยาวสูงสุดของถังลดความดัน (y_{max}) เดียวกัน จะพบว่า Flexible diaphragm มีผลในการช่วยลดความดัน หรือจากผลการศึกษาก็สามารถกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าการออกแบบความยาวของถังลดความดัน โดยสนใจการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ ($h_f \neq 0$) จะทำให้ได้ค่าความยาวสูงสุดของถังลดความดัน (y_{max}) น้อยกว่ากรณีที่ไม่สนใจการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ ($h_f = 0$) และเมื่อพิจารณาที่ขนาดของถังลดความดันเดียวกัน จะพบว่าขนาดของท่อส่งน้ำหลักมีผลในการช่วยลดความดัน โดยขนาดท่อส่งน้ำหลักแปรผกผันกับค่าความดันที่เกิดขึ้นในระบบท่อ

5.3 อภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำให้เกิดนวัตกรรมในลักษณะถังลดความดัน เพื่อใช้สำหรับลดผลกระทบจากการเกิดคือน้ำ โดยการประยุกต์ใช้ถังลดความดันที่สร้างเอง พบว่ามีความสามารถในการทำงานไม่แตกต่างในการลดความดันจากการเกิดคือน้ำด้วยอุปกรณ์ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดแต่ราคาถูกกว่า ช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้าง และไม่เกิดการสูญเสียมวลน้ำระบายออกทิ้งเมื่อเกิดปรากฏการณ์คือน้ำขึ้นภายในระบบท่อของอาคาร ในขณะที่การใช้ประตูลดความดัน (pressure-relief valves) นอกจากจะมีราคาที่สูงกว่าแล้ว ยังต้องยอมเสียน้ำส่วนหนึ่งระบายออกทิ้งเมื่อเกิดปรากฏการณ์คือน้ำภายในท่อ (กิริติ ลีวัจนกุล, 2545) ซึ่งการก่อสร้างอาคาร บ้านเรือนต่างๆ สามารถนำนวัตกรรมการประยุกต์ใช้ถังลดความดันที่ศึกษานี้ไปใช้งานได้โดยสอดคล้องกับแนวทางในการออกแบบระบบท่อภายในอาคาร (วรวิทย์ อึ้งภากรณ์, 2541; Prayong Keeratiurai, 2013)

นอกจากนี้การศึกษายังได้แสดงถึงขนาดและความยาวของถังลดความดันนี้ กรณีคิดแรงเสียดทานในระบบท่อ เพื่อลดผลกระทบจากคือน้ำ สอดคล้องกับ Prayong Keeratiurai (2013) ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า ถังลดความดัน (surge tanks) ของระบบท่อน้ำภายในอาคารที่ต่อเชื่อมกันกับระบบจ่ายน้ำประปาของชุมชนในท้องถิ่นหรือแหล่งที่ใช้ น้ำ เพื่อลดผลกระทบจากการเกิดคือน้ำควรมีขนาดของท่อไม่น้อยกว่าหรือเท่ากับขนาดของท่อประปาที่ถังลดความดันต่อเชื่อมอยู่ โดยปกติในการก่อสร้างวางระบบท่อจริง จะเหลือพื้นที่ความสูงระหว่างฝ้าเพดานกับท้องพื้นชั้นบนที่ฝ้าเพดานปิดอยู่ไม่มากนัก ซึ่งการติดตั้งถังลดความดันนี้จำเป็นต้องติดตั้งโดยให้ถังลดความดันตั้งอยู่ในแนวตั้ง ดังนั้นขนาดของถังลดความดันที่ต่อเชื่อมกับท่อน้ำประปาจึงไม่ควรมีขนาดเล็กกว่า 1 นิ้ว และไม่ยาวจนเกินไป เพื่อให้มีปริมาตรอากาศในถังลดความดันเพียงพอสำหรับการลดผลกระทบจากคือน้ำ

6. สรุปผลการวิจัย

นวัตกรรมการลดผลกระทบจากคือน้ำด้วยถังลดความดัน มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการลดผลกระทบจากการเกิดคือน้ำ ด้วยการประยุกต์ใช้ถังลดความดัน แบบที่มีและไม่มี Flexible diaphragm ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษได้ว่า ประสิทธิภาพในการลดความดันจากการเกิดคือน้ำจะแปรผันตรงกับขนาดของถังลดความดันทั้งแบบไม่มีและ มี Flexible diaphragm และความยาวของถังลดความดันนี้ก็แปรผันตรงกับประสิทธิภาพในการลดความดันจากการเกิดคือน้ำด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังสามารถสรุปผลการศึกษได้อีกว่า Flexible diaphragm มีผล

ในการช่วยลดความดัน โดยประสิทธิภาพในการลดความดันของถังลดความดันแบบที่มี Flexible diaphragm จะสูงกว่าแบบที่ไม่มี Flexible diaphragm ในขณะที่ขนาดของท่อส่งน้ำหลักมีผลในการช่วยลดความดัน โดยขนาดท่อส่งน้ำหลักจะแปรผกผันกับค่าความดันที่เกิดขึ้นในระบบท่อ ดังนั้นขนาดของท่อเมนส่งน้ำหลักจึงมีผลต่อประสิทธิภาพในการลดความดัน โดยสรุปได้ว่าขนาดของท่อเมนส่งน้ำหลักแปรผันตรงกับประสิทธิภาพในการลดความดัน นอกจากนี้ผลการศึกษายังสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบความยาวของถังลดความดัน โดยสนใจการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ จะทำให้ได้ค่าความยาวสูงสุดของถังลดความดัน (y_{max}) น้อยกว่ากรณีที่ไม่นับการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ

ดังนั้นวัฏกรรมการลดผลกระทบจากค้อนน้ำ ด้วยถังลดความดันที่สร้างขึ้นเองของการศึกษาวิจัยนี้ จึงมีประสิทธิภาพในการช่วยลดความดันที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การเกิดค้อนน้ำในระบบท่อจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลของน้ำอย่างทันทีทันใด ซึ่งนอกจากจะไม่ทำให้เกิดการสูญเสียแล้ว ยังสามารถใช้ถังลดความดันนี้เป็นที่สำรองน้ำในระบบท่อ เพื่อเก็บน้ำไว้ใช้งานได้ส่วนหนึ่งอีกด้วย ซึ่งการก่อสร้างอาคาร บ้านเรือนต่างๆ สามารถนำวัฏกรรมการประยุกต์ใช้ถังลดความดันที่ศึกษาไปใช้งานได้

7. ข้อเสนอแนะ

ข้อแนะนำในการนำผลการศึกษานี้ไปใช้ในการออกแบบระบบท่อคือ ถ้าท่อประปาที่ถังลดความดันต่อเชื่อมอยู่มีขนาดตั้งแต่ 1 นิ้วขึ้นไปขนาดของถังลดความดันที่ต่อเชื่อมควรมีขนาดไม่น้อยกว่าหรือเท่ากับขนาดของท่อประปาที่ถังลดความดันต่อเชื่อมอยู่ โดยควรมีความยาวอย่างน้อย 50 เซนติเมตรขึ้นไป ในขณะที่ถ้าท่อประปาที่จ่ายน้ำไปยังเครื่องสุขภัณฑ์ต่างๆในห้องน้ำหรือแหล่งที่ต้องการใช้น้ำมีขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว และ $\frac{3}{4}$ นิ้ว การออกแบบระบบท่อแนะนำให้รวบระบบท่อลดความดันเพื่อลดผลกระทบจากค้อนน้ำ มาเป็นชุดเดียวกันโดยขนาดของถังลดความดันที่ต่อเชื่อมไม่ควรมีขนาดเล็กกว่า 1 นิ้ว และควรมีความยาวอย่างน้อย 30-50 เซนติเมตรขึ้นไป

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องวัฏกรรมการลดผลกระทบจากการเกิดค้อนน้ำ ด้วยถังลดความดัน ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล และได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจสอบการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล และคณะวิศวกรรมศาสตร์เป็นอย่างสูง ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัย อุปกรณ์ และสถานที่ ในการทำวิจัยนี้

9. เอกสารอ้างอิง

1. กิรติ สิวจินกุล. (2545). *วิศวกรรมชลศาสตร์* (พิมพ์ครั้งที่ 3). ปทุมธานี: สำนักพิมพ์ SPEC.
2. ชมรมวิศวกรออกแบบระบบสุขาภิบาล. (2559). *Water Hammer คืออะไร*. สืบค้นเมื่อวันที่ 27 ธันวาคม 2562, จาก <https://www.facebook.com/1223496287678630/posts/1228820440479548>.
3. นิพนธ์ ลักษณะอดิสร. (2555). Water Hammer. *วารสาร TPA News*, (191), 52-53. สืบค้นเมื่อวันที่ 27 ธันวาคม 2562, จาก http://www.tpa.or.th/tpanews/upload/mag_content/62/ContentFile1154.pdf
4. พนิดา สีมารุช. (2564). ศึกษาผลของการเลือกใช้อัลลวาล์วและวาล์วส่งน้ำต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องตะบันน้ำ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26*. INF-07-(1-6). การประชุมรูปแบบออนไลน์: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.).
5. มัชฌิมะ สิทธิโท. (2557). *การประยุกต์ใช้ปั๊มกระแทกน้ำเพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน*. สืบค้นเมื่อวันที่ 4 ธันวาคม 2563, จาก http://kmlo.crma.ac.th/kmnew/wp-content/uploads/2018/05/km57_15.pdf
6. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์. (2541). *การออกแบบระบบท่อภายในอาคาร*. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
7. ปรีวิสัย เอื้อนสะอาด, วราวุธ วุฒินิษฐ์ และ จิระกานต์ ศิริวิญญูไมตรี. (2555). *การวิจัยและพัฒนาเครื่องตะบันน้ำแบบประหยัด* (ปริญญานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. นครปฐม.
8. ศิริเชษฐ์ กองแก้ว. (2558). *ปั๊มสูบน้ำอัตโนมัติโดยใช้พลังงานธรรมชาติจากน้ำ* (รายงานผลการวิจัย). พระนครศรีอยุธยา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.
9. สุนทร วงศ์เสน. (2559). *การศึกษาประสิทธิภาพเครื่องตะบันน้ำ* (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพฯ: สถาบันรัชต์ภาคย์.
10. Darcy, H. (1857). *Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux*. Paris: Mallet-Bachelier. 268 pages and atlas (in French).
11. Glenn, O. Brown. (2002). The History of the Darcy-Weisbach Equation for Pipe Flow Resistance. *Environmental and Water Resources History, Sessions at ASCE Civil Engineering Conference and Exposition 2002*, pp 34-43, DOI:10.1061/40650(2003)4

12. Prayong Keeratiurai. (2013). The Quality Management in the Building Sanitation. *European Journal of Scientific Research*, 112(3), 375-386.
13. SCG Brand. (2559). แก้ปัญหาเสียงดังในท่อประปาจากแรงดันน้ำ. สืบค้นเมื่อวันที่ 28 ธันวาคม 2562, จาก <https://th-th.facebook.com/SCGBrand/posts/916678408463491>
14. Weisbach, J. (1845). *Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik*, Vol. 1. Braunschweig: Theoretische Mechanik, Vieweg und Sohn. 535 pages (in German).