



การศึกษาการให้สารน้ำด้วยแรงโน้มถ่วงแบบอัตโนมัติในการผ่าตัด ส่องกล้องข้อต่อและต่อมลูกหมาก

A Study of the Automated Fluid Irrigation using a Gravity Pump for Arthroscopy and Cystoscopy

دنุ พรหมมินทร์^{1*}, ออรินท์ สีหะกุลัง¹, ปริญญา จันท์หุณีย์¹, ปฐมภูมิ ศรีกู๊ดเวียน¹,
ดวงกมล วรเกษมศักดิ์¹, วีรภัทร ศิริโสภิตกุล², บัญชา ชื่นชูจิตต์³

¹ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ปทุมธานี 12120

²ฝ่ายการแพทย์ สาขาศัลยกรรมกระดูกและข้อ โรงพยาบาลธรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติ ปทุมธานี 12120

³ภาควิชาออร์โธปิดิกส์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

Danu Prommin^{1*}, Ornin Srihakulung¹, Parinya Junhune¹, Pathompoom Srikudvien¹,
Duangamon Vorakasemsak¹, Veerapat Sirisopikun², Bancha Chernchujit³

¹National Metal and Materials Technology Center 114 Thailand Science Park, Pathum Thani 12120

²Medicine Division, Orthopaedics Section, Thammasat University Hospital, Pathum Thani 12121

³Department of Orthopaedics Faculty of Medicine, Thammasat University, Pathum Thani, 12120

Received 11 November 2021; Received in revised 12 June 2022; Accepted 22 June 2022

บทคัดย่อ

สารน้ำที่ใช้ในระหว่างผ่าตัดแบบส่องกล้องระหว่างข้อต่อและกระเพาะปัสสาวะให้ความดันและความเร็วเพื่อช่วยผลักดันเศษต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างผ่าตัดออกไป ทำให้ภาพที่ถูกแสดงที่หน้าจอมีความชัดเจน วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาการทำงานของเสาให้สารน้ำที่ใช้แรงโน้มถ่วงแบบอัตโนมัติ ข้อดีของระบบนี้คือการให้สารน้ำที่ใช้แรงโน้มถ่วงปลอดภัยกว่าซึ่งช่วยลดความเสี่ยงของการทำงานผิดพลาดจากปั๊มไฟฟ้าซึ่งอาจทำให้เนื้อเยื่อบริเวณใกล้เคียงเสียหายระหว่างการผ่าตัด ข้อดีอีกประการคือการให้สารน้ำที่คงที่ระหว่างการผ่าตัด จากหลักการของสมการของแบร์นูลลี การออกแบบเสาให้สารน้ำที่ใช้แรงโน้มถ่วงแบบอัตโนมัติเพื่อที่ควบคุมระยะผลต่างระหว่างความสูงในขณะผ่าตัดกับระดับความสูงของสารน้ำ (Z_1) ให้คงที่ มวลที่หายไป ($m_{หายไป}$) ที่ 0.194 kg ถูกนำมาคำนวณและใช้ควบคุมมอเตอร์ให้ยกถังบรรจุสารน้ำทั้งด้านซ้ายและด้านขวาแต่ละชั้นที่ 0.011 mH₂O เพื่อชดเชยระดับความสูงของสารน้ำที่สูญเสียไป กระบวนการนี้ดำเนินต่อไปจนกว่าสารน้ำของแต่ละถังจะหมดลงอย่างสมบูรณ์และสลับการทำงานตลอดการผ่าตัด

ในการออกแบบการศึกษาเสถียรภาพความดันของการทำงานของเสาให้สารน้ำอัตโนมัติถูกตั้งค่าไว้ที่ 60 80 และ 100 mmHg Z_1 และแรงดันจากมาตรวัดความดันถูกวัด ผลลัพธ์ข้างต้นถูกเปรียบเทียบระหว่างเสถียรภาพความดันทั้งสองซึ่งถูกแปลง

จาก Z_1 และมาตรวัดความดันที่วัดได้และเฮดความดันซึ่งตั้งค่าตามที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ สุดท้ายบันทึกกระบวนการให้สารน้ำอัตโนมัติจากการสลับระหว่างถังด้านซ้ายและด้านขวาเพื่อให้สารน้ำอัตโนมัติที่เฮดความดัน การทดสอบนี้สิ้นสุดลงเมื่อถังบรรจุสารน้ำที่สองหมดลง ผลลัพธ์ของการให้สารน้ำแบบอัตโนมัติแสดงให้เห็นว่า Z_1 ที่วัดได้นั้นอยู่ในช่วง 0.811 ถึง 0.822 mH_2O โดยมีความแตกต่าง -0.58% ถึง 0.76% เมื่อเทียบกับเฮดความดันที่ตั้งไว้ที่ 60 mmHg; อยู่ในช่วง 1.082 ถึง 1.093 mH_2O โดยมีความแตกต่าง -0.51% ถึง 0.48% เมื่อเทียบกับเฮดความดันที่ตั้งไว้ที่ 80 mmHg; และอยู่ในช่วง 1.082 ถึง 1.093 mH_2O โดยมีความแตกต่าง -0.33% ถึง 0.47% เมื่อเทียบกับเฮดความดันที่ตั้งไว้ที่ 100 mmHg นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าเฮดความดันจากมาตรวัดความดันคือ 0.080 0.105 และ 0.135 bar โดยมีความแตกต่าง 0.00% -1.55% และ 1.26% เมื่อเทียบกับความดันที่ตั้งไว้ 60 80 และ 100 mmHg ตามลำดับ กระบวนการให้สารน้ำอัตโนมัติแสดงให้เห็นว่าหน่วยประมวลผลคำสั่งนี้ทำงานอย่างถูกต้องในการควบคุมมอเตอร์และโซลินอยด์ วาล์วตามที่ออกแบบโดยการยกขึ้นเพื่อให้ได้เฮดความดันที่กำหนดและสลับถังด้านซ้ายไปยังถังด้านขวาเพื่อให้สารน้ำอย่างต่อเนื่อง

สรุปได้ว่ามวลที่สูญเสียไปถูกใช้เพื่อกำหนดสภาพการทำงานของการให้สารน้ำด้วยแรงโน้มถ่วงอัตโนมัติ อุปกรณ์นี้ทำงานอย่างถูกต้องตามที่ออกแบบมาเพื่อควบคุมมอเตอร์และโซลินอยด์วาล์วสำหรับการให้สารน้ำที่เฮดความดันที่ตั้งไว้โดยอัตโนมัติ ดังนั้นอุปกรณ์นี้สามารถให้คุณภาพภาพที่คมชัด ให้สารน้ำอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของแพทย์ ตลอดจนลดความเสี่ยงของแรงดันผิดปกติจากปั๊มอัตโนมัติระหว่างการผ่าตัด

คำสำคัญ: การให้สารน้ำอัตโนมัติ; ผ่าตัดข้อต่อแบบส่องกล้อง; ผ่าตัดกระเพาะปัสสาวะแบบส่องกล้อง; ปั๊มแรงโน้มถ่วง

Abstract

The irrigation fluid given during arthroscopy and cystoscopy provides pressure and flow rate between the joint space and the bladder, thus pushing the debris occurring during surgery. The crisp view of the surgical field is clear. This study aims to investigate the operation of the automated fluid irrigation using a gravity pump. The advantage of this system is the safer use of the gravity pump, which reduces the risk of malfunctions from the electric pump that may cause damage to nearby tissues during surgery. Another advantage is to provide a steady fluid flow. From the principle of Bernoulli's equation, the design of the automated gravity pump was to maintain the difference between operating height and irrigation fluid elevation (Z_1). The 0.194 kg of lost mass, m_{loss} , was calculated and used to control motors in lifting the 0.011 mH_2O steps periodically for both left and right buckets of irrigation fluid to compensate for lost irrigation fluid elevation. This process kept going until the irrigation fluid of each bucket was completely exhausted and alternating operations throughout the surgery.

In the study's design, the pressure heads of the operating automated fluid irrigation were set at 60, 80, and 100 mmHg, the Z_1 and the pressures from the pressure gauge were measured. The above results were compared between both pressure heads, which were converted from the measured Z_1 and pressure gauge, and the pressure heads, which were set as mentioned previously.

Finally, automated fluid irrigation was recorded alternating between left and right buckets to irrigate fluid at the pressure heads. This test ended when the second irrigated bucket was exhausted. The results of automated fluid irrigation showed that measured Z_1 was in the range of 0.811 to 0.822 mH_2O with -0.58% to 0.76% difference compared with set pressure head at 60 mmHg; in the range of 1.082 to 1.093 mH_2O with -0.51% to 0.48% difference compared with set pressure head at 80 mmHg; and in range of 1.082 to 1.093 mH_2O compared with -0.33% to 0.47% difference compared with set pressure head at 100 mmHg. It was also shown that pressures from the pressure gauge were 0.080, 0.105, and 0.135 bar with 0.00%, -1.55%, and 1.26% difference compared with set pressure head at 60, 80, and 100 mmHg, respectively. The process of automated fluid irrigation showed that this command processing unit worked properly to control motors and solenoid valves as designed by lifting to get designated head pressure and alternating the left bucket to right bucket to irrigate fluid continuously.

It was concluded that the lost mass was used to determine the working conditions of this automated fluid irrigation with a gravity pump. It worked properly as designed to automatically control the motors and solenoid valves for fluid irrigation at the set pressure head. Therefore, this equipment could give clear image quality, continuous fluid irrigation according to the doctor's requirements, and reduced risk of abnormal pressure from the electric pump during surgery.

Keywords: Automated fluid Irrigation; Arthroscopy; Cystoscopy; Gravity pump

1. บทนำ

ในการผ่าตัดข้อต่อด้วยวิธีการส่องกล้อง (Arthroscopy) หรือ การผ่าตัดกระเพาะปัสสาวะด้วยวิธีการส่องกล้อง (Cystoscopy) [1] จำเป็นต้องมีการให้สารน้ำเพื่อให้ภาพที่ถูกแสดงผ่านกล้องของเครื่องมือผ่าตัดในขณะผ่าตัดมีความชัดเจนและได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งสารน้ำที่ให้ในระหว่างผ่าตัดจะทำให้หน้าที่ยืดความดันระหว่างข้อต่อและช่องท้องที่จะทำให้เกิดช่องว่างและสารน้ำมีความเร็วที่เพียงพอจะช่วยผลักดันเศษต่างๆ ไม่ว่าจะเป็ เลือด เนื้อเยื่อ และกระดูก ที่เกิดขึ้นในระหว่างผ่าตัดออกไป ทำให้ภาพที่ถูกแสดงในการส่องกล้อง มีความชัดเจน ส่วนค่าความดันของสารน้ำที่ใช้ในแต่ละตำแหน่งของการผ่าตัดจะมีความแตกต่างกันขึ้นกับประเภทในการผ่าตัดนั้นๆ [2] ซึ่ง Hsiao และทีมได้แสดงเขตความดัน

ในการให้สารน้ำในการผ่าตัดส่องกล้องที่ตำแหน่งข้อไหล่ อยู่ในช่วง 50-60 mmHg ขณะที่ตำแหน่งข้อเข่าจะอยู่ที่ 65 mmHg เป็นต้น เพื่อให้ได้ภาพในระหว่างการผ่าตัดที่ชัดเจนที่สุด โดยวิธีการให้สารน้ำระหว่างผ่าตัดจะแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ การให้สารน้ำแบบด้วยแรงคน และและการให้สารน้ำแบบอัตโนมัติ [3] โดยการให้สารน้ำด้วยแรงคนก็จะมีทั้งการใช้มือบีบถุงสารน้ำและการเขวนสารน้ำบนเสาน้ำเกลือแล้วใช้แรงโน้มถ่วงในการให้สารน้ำ [3,4] ระบบที่สองเป็นระบบอัตโนมัติจะใช้ปั๊มด้วยวิธีการรีดท่อทั้งสองระบบจะเพิ่มความดันของสารน้ำในระหว่างการผ่าตัด [3] จากการศึกษาของ Aharram [5] พบว่า การให้สารน้ำด้วยด้วยแรงคน จะมีความปลอดภัย มีประสิทธิภาพ และเป็นทางเลือกที่ทำได้ในทางปฏิบัติ ที่ให้ผลในเรื่องการมองเห็นในระหว่างการผ่าตัดข้อต่อ

ไหลด้วยกล้องในกรณีการฉีกขาดของ Rotator cuff ที่ระดับเล็กถึงขนาดกลาง (น้อยกว่า 3 เซนติเมตร) โดยยกระดับของสารน้ำที่ 1.5 เมตร ตลอดช่วงการผ่าตัดที่ปริมาตรของสารน้ำที่ 3 liters ซึ่งทำการเปรียบเทียบกับ การให้สารน้ำด้วยระบบอัตโนมัติด้วยการทำงานของปั๊ม อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ Hsiao [2] ระบุว่าข้อเสียที่ให้การด้วยแรงคน บุคลากรทางการแพทย์มีความยากลำบากในการปรับระดับความสูงของระดับสารน้ำตลอดช่วงการผ่าตัดเพื่อให้ได้คุณภาพภาพที่ดี สอดคล้องกับการศึกษาของ Chang และทีม [4] พบว่าการให้สารน้ำด้วยแรงคนทำให้อัตราการไหลที่ลดลง เนื่องจากการลดระดับความสูงของสารน้ำจากสารน้ำที่ไหลออกที่ลดลงตามระยะเวลา ซึ่งเป็นข้อเสียที่หากบุคลากรทางการแพทย์ลืมนำเกลือปรับระดับความสูงของระดับสารน้ำอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งลืมนำเกลือปรับระดับความสูงของระดับสารน้ำใหม่เมื่อสารน้ำหมด ทำให้เกิดความล่าช้าในการติดตั้งเพื่อเพิ่มความดันสารน้ำให้กลับมาใหม่ การผ่าตัดขาดความต่อเนื่อง และทำให้แพทย์ไม่สามารถตัดสินใจในการผ่าตัดในช่วงที่สารน้ำขาดจากสาเหตุดังกล่าว สุดท้ายระยะเวลาการผ่าตัดต้องใช้เวลาในการผ่าตัดที่ยาวนานขึ้น ในขณะที่จากการศึกษาของ Chang และทีม [4] พบว่าการใช้ปั๊มแบบอัตโนมัติด้วยรีดท์ของสารน้ำในระหว่างการผ่าตัดสามารถสร้างควบคุมและความดันและความเร็วของการให้สารน้ำที่พอเพียงคงที่ ซึ่งทำให้การผ่าตัดต่อเนื่อง แต่การศึกษาของ Hsiao [2] ข้อเสียที่การ

ใช้ปั๊มแบบอัตโนมัติมีโอกาสที่เพิ่มความดันภายในข้อต่อเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนอาจเกิดจากเซนเซอร์วัดความดันทำงานผิดพลาดแต่ปั๊มยังคงทำงานต่อ ทำให้ความดันระหว่างข้อต่อสูงมากเกินไป ซึ่งมีผลเสียที่ส่งผลให้เกิดการรั่วไหลของของเหลวในข้อต่อ ภาวะความดันในข้อต่อสูงขึ้น และเกิดการบวมและฉีกขาดของของเหลวในข้อต่อ เมื่อความดันของการให้สารน้ำอยู่ในช่วง 120-150 mmHg [6,7]

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาการให้สารน้ำจากเสาให้สารน้ำที่ใช้แรงโน้มถ่วงแบบอัตโนมัติในการผ่าตัดข้อต่อและต่อมลูกหมาก ซึ่งนำข้อดีของการใช้แรงโน้มถ่วงที่มีความปลอดภัยที่ลดความเสี่ยงจากความผิดปกติของความดันที่ได้จากปั๊มที่อาจจะมีมากเกินไปจากความผิดปกติของระบบร่วมกับข้อดีการที่เป็นการทำงานแบบอัตโนมัติที่ให้สารน้ำที่คงที่ในระหว่างการผ่าตัดซึ่งแก้ปัญหาข้อเสียของการให้สารน้ำด้วยวิธีใช้แรงโน้มถ่วง

2. วัสดุและวิธีการ

การให้สารน้ำจากเสาให้สารน้ำที่ใช้แรงโน้มถ่วงนั้น ความเร็วที่เกิดที่ปลายท่อที่ใช้ระหว่างการผ่าตัดข้อต่อแบบส่องกล้องเกิดจากความแตกต่างระหว่างระดับของสารน้ำกับระดับตำแหน่งที่ผ่าตัด ซึ่งสามารถแสดงในสมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's equation) ในสมการที่ 1 ดังนี้

$$Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} \tag{1}$$

โดยสมการนี้ Z เป็นระดับความสูงที่แตกต่างต่างจากระดับอ้างอิง (mH₂O) v เป็นความเร็วของของไหล (m/s) P เป็นความดันที่ให้กับของไหล (N/m²) ρ เป็นความหนาแน่นของของไหล (kg/m³) ซึ่งให้สมมติฐานว่าสารน้ำมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1,000 kg/m³ g เป็นค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง มีค่าคงที่เท่ากับ 9.81 m/s²

อย่างไรก็ตาม สมการที่ 1 สมมติฐานของการให้สารน้ำไม่พิจารณาความเสียดทานหรือความดันตกคร่อมในสายส่งของสารน้ำ ดังนั้น เมื่อของไหลปล่อยออกมาด้วยแรงโน้มถ่วงที่ระดับของสารน้ำ (Figure 1) เป็นตำแหน่งที่ 1 ในขณะที่ระดับในการผ่าตัดเป็นตำแหน่งที่ 2 พบว่า หากไม่มีความดันใดๆ มากกระทำเพิ่มกับของไหลที่ตำแหน่งระดับสารน้ำและระดับในการผ่าตัด ดังนั้น P₁ และ P₂ จะมีค่า

เป็นศูนย์ ตามลำดับ ส่วนความต่างของระดับ Z_1 จะเป็นระยะผลต่างระหว่างความสูงในขณะผ่าตัดกับระดับความสูงของสารน้ำ กับ Z_2 จะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่ออยู่ระดับ

เดียวกับความสูงในขณะผ่าตัด ส่วนความเร็วที่ระดับผิวของสารน้ำ v_1 จะเป็นศูนย์ ดังนั้น สมการที่ 1 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Z_1 = \frac{v_2^2}{2g} \tag{2}$$

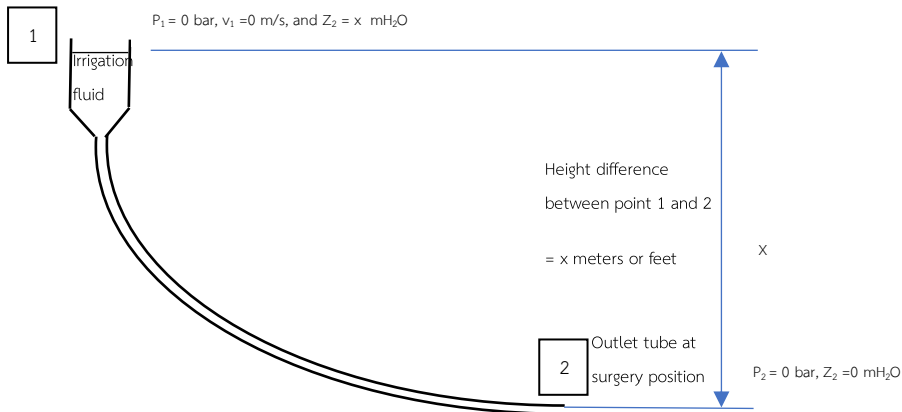


Figure 1 Irrigation fluid in a bucket at point 1 is naturally released through outlet tube at point 2 by Bernoulli's principle.

สมการที่ 2 นั้น Z_1 ถูกเรียกว่าเฮดความเร็ว ซึ่งเมื่อแทนค่าผลระยะความแตกต่างกันลดลง 1 cm ($Z_1 = 0.01 \text{ m}$) ในสมการที่ 2 จะพบว่าความเร็วที่ทางออกของปลายท่อ v_2 ลดลง 0.44 m/s ในขณะที่ระยะความแตกต่างกันลดลง 10 cm (Z_1 คือ 0.1 m) จะพบว่าความเร็วที่ทางออกของปลายท่อ v_2 ลดลง 1.40 m/s จะเห็นได้ว่า ความเร็วยกกำลังสองของสารน้ำที่ตำแหน่งผ่าตัดจะแปรผันตรงกับระยะความต่างของระดับความสูงของ

สารน้ำกับระดับในขณะผ่าตัด (Z_1) อย่างไรก็ตามระยะความต่าง Z_1 สามารถนำไปเปรียบเทียบกับ Z_1 ที่เป็นเฮดความดัน (Pressure Head) ซึ่งเป็นความดันที่ได้จากระยะความต่างของของเหลว ซึ่งสามารถแสดงในสมการที่ 3 เมื่อแทนค่าผลระยะความแตกต่างกัน 1 mH₂O เทียบเท่ากับ 9,801 N/m² หรือเท่ากับ 0.098 bar หรือเท่ากับ 73.56 mmHg ขึ้นกับหน่วยเครื่องมือวัดหรืออุปกรณ์ที่ใช้งาน

$$Z = \frac{P}{\rho g} \tag{3}$$

ดังนั้นการปรับระยะความต่าง Z_1 นี้นำมาใช้ในการให้สารน้ำแบบแรงโน้มถ่วงในการปรับความเร็วของสารน้ำระหว่างการผ่าตัดตามที่ต้องการ โดยเมื่อยกสารน้ำให้สูงขึ้น ระยะความต่างของระดับความสูงของ

สารน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วของสารน้ำเพิ่มขึ้น หากลดระดับสารน้ำให้ลดลง ระยะความต่างของระดับความสูงของสารน้ำลดลง ทำให้ความเร็วของสารน้ำลดลง ในการศึกษาการให้สารน้ำจากเสาให้สารน้ำที่ใช้แรงโน้มถ่วง

แบบอัตโนมัติในการผ่าตัดนั้น การควบคุมระยะความต่างระหว่างความสูงในขณะผ่าตัดกับระดับความสูงของสารน้ำ (Z_1) ให้คงที่ แทนการวัดความเร็วในจุดที่ 2 จากหลักการของสมการของแบร์นูลลี

2.1 การประมวลผลคำสั่งของระบบควบคุมของเสาให้สารน้ำ

ระบบควบคุมการให้สารน้ำเป็นสิ่งจำเป็นที่ไปตามที่ได้ออกแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์นี้จะต้องถูกนำไปใช้ทางการแพทย์ โดยผลที่ได้ต้องได้รับความมั่นใจในการทำงานที่เชื่อถือได้และสามารถทำซ้ำได้ โดยใน

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{4}$$

จากสมการที่ 4 สารน้ำมีความหนาแน่นเท่ากับ $1,000 \text{ kg/m}^3$ เมื่อวัดมวลได้จะได้ค่าปริมาตรภายในถังบรรจุสารน้ำหน่วย m^3 ด้วยรูปทรงของถังบรรจุสารน้ำ

$$V = Ah \tag{5}$$

ดังนั้นจาก Figure 2 คำสั่ง “อ้างอิง” (Z_2) ซึ่งเป็นตำแหน่งผ่าตัด และ “เฮดความดันที่ต้องการ” เป็นระยะความแตกต่าง Z_1 ในสมการที่ 3 ส่งไปที่หน่วยประมวลผลคำสั่งที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อยกถังสารน้ำให้อยู่ในช่วง $Z_1 \pm 0.0055 \text{ mH}_2\text{O}$ โดยช่วงใช้คำนวณผลต่างของความสูงที่หายไปอยู่ในช่วงจากสมการที่ 4 และ 5 ได้มวลสารน้ำที่หายไป ($m_{\text{หายไป}}$) มีค่า $1,000 \times 1.767 \times 10^{-2} \times (0.011) = 0.194 \text{ kg}$ อุปกรณ์ไหลตเซลล์ที่ถูกติดตั้งเพื่อใช้ในการ

Figure 2 แสดงถึงหน่วยประมวลผลคำสั่งของระบบควบคุมของเสาให้สารน้ำที่รับคำสั่งจากการสั่งงานในเงื่อนไขต่างๆ โดยหลักการระบบควบคุมที่ต้องควบคุมเฮดความดันในระหว่างผ่าตัดให้คงที่ซึ่งได้จากการควบคุมระยะผลต่างระหว่างความสูงในขณะผ่าตัดกับระดับความสูงของสารน้ำ

ดังนั้นปัจจัยแรกในการออกแบบได้ใช้การวัดมวล (m) ของสารน้ำในหน่วย kg เพื่อนำค่าดังกล่าวมาคำนวณย้อนกลับด้วยสมการที่ 4

คงที่ ถูกคำนวณเพื่อหาค่าความสูงของสารน้ำที่คงเหลือ (h) ในหน่วย m จากสมการที่ 5

วัดน้ำหนักของสารน้ำระหว่างการใช้งานแต่ละถังได้ค่าดังกล่าวถูกส่งสัญญาณให้ระบบควบคุมของเสาให้สารน้ำ ใช้ประมวลในการยกถังบรรจุสารน้ำ เมื่อสารน้ำที่มีเฮดความดันที่ลดลงจากการให้สารน้ำที่หายไปมีค่าเพิ่มขึ้น โดยยกให้มากกว่าผลต่างของความสูงที่ต้องการด้วยระยะ $0.011 \text{ mH}_2\text{O}$ จะสามารถทำให้ผลต่างของความสูงอยู่ในช่วง $\pm 0.0055 \text{ mH}_2\text{O}$ ตลอดการผ่าตัดเพื่อความควบคุมความดันของสารน้ำให้คงที่

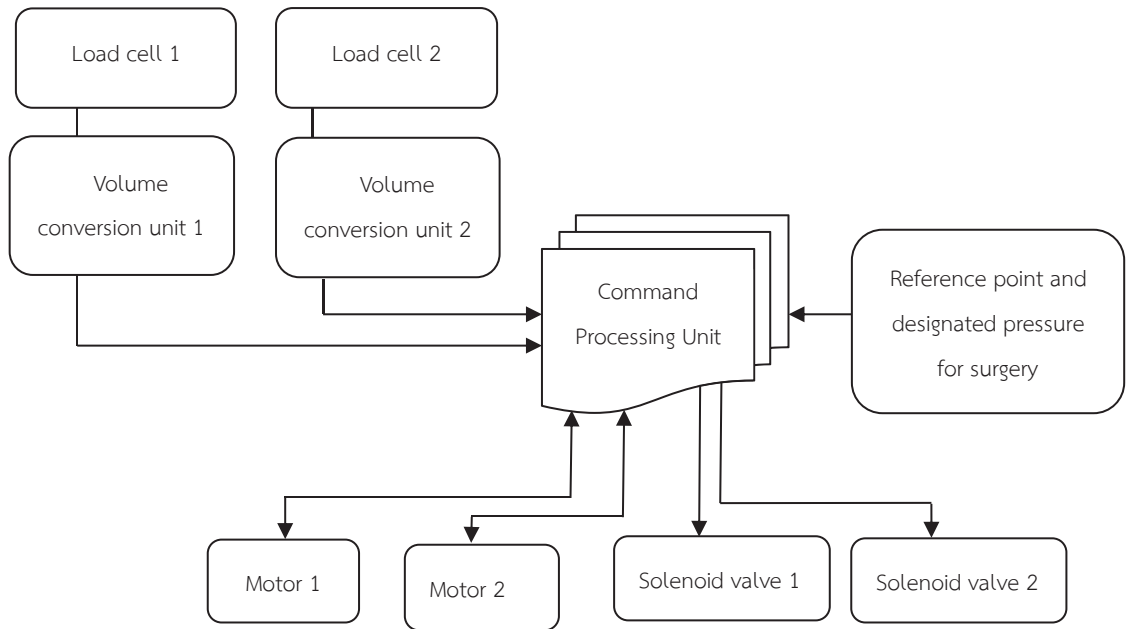


Figure 2 Command processing unit to operate the automated irrigation system with gravity pump.

ปัจจัยที่สองในการออกแบบคือ การใช้ปริมาณสารน้ำจำเป็นต้องมีความต่อเนื่องตลอดการผ่าตัด ซึ่งในการผ่าตัดโดยทั่วไปแต่ละครั้งจะมีการใช้สารน้ำมากกว่า 5 liters ซึ่งในปกติใช้สารละลาย 24 liters ในช่วงเวลาผ่าตัด 2 ชั่วโมง [2,7] ซึ่งส่งผลให้การใช้ถุงสารน้ำ 2 liters จำนวนหลายถุงที่ใช้กับเสาให้สารน้ำด้วยแรงโน้มถ่วงแบบด้วยแรงคนด้วยการยก ซึ่งมีความไม่ต่อเนื่องในการผ่าตัดโดยเกิดขึ้น ส่งผลให้เวลาในการผ่าตัดจะเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ต้องหยุดและใช้เวลาในเติมสารน้ำเข้าในระบบใหม่และใช้เวลาในการพัดพาเลือดและเศษเนื้อเยื่อออกไปใหม่เพื่อให้การผ่าตัดกลับมาเห็นภาพในการส่องกล้องชัดเจน นอกจากนี้กรณีที่ใช้ การรัดเพื่อห้ามเลือดมีเงื่อนไขในระหว่างการผ่าตัดที่ต้องคลายการรัดออกทุก 2 ชั่วโมง การใช้วิธี Tourniquet ซึ่งเป็นวิธีการห้ามเลือดเข้าไปในบริเวณที่ผ่าตัด ซึ่งจะใช้เวลาในการผ่าตัดเฉลี่ยที่ 94 นาทีซึ่งส่วนหนึ่งเป็นเวลาในการทำ Tourniquet 32 นาทีที่ทำให้ใช้เวลามากกว่าการให้สารน้ำแบบปกติ [8] แต่เมื่อใช้เวลาในการผ่าตัดเกิน 2 ชั่วโมง ทำให้ต้องคลาย

การทำ Tourniquet เพื่อให้เลือดกลับมาไหลเวียนใหม่และต้องเริ่มการทำ Tourniquet อีกครั้ง เนื่องจากการเติมสารน้ำด้วยบุคลากรการแพทย์มีโอกาสสูงที่ทำให้ไม่ได้รับสารน้ำอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจนทำให้เวลาการผ่าตัดนั้นเกินเวลา 2 ชั่วโมง ส่งผลให้ผู้ป่วยต้องอยู่ในห้องผ่าตัดยาวขึ้นและรับยาสลบนานขึ้น ทำให้การฟื้นตัวหลังการผ่าตัดไม่ได้ผลดีภายหลัง และอีกหนึ่งปัจจัยของเวลาในการผ่าตัดที่นานขึ้นจนส่งผลให้เกิด “Hypothermia” [9] ดังนั้นหลักการทำงานสลับกันให้สารน้ำนี้ที่ทำให้แก้ปัญหาล่าช้า จากทั้งสองปัจจัยที่ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบที่กล่าวมาข้างต้น การควบคุมความสูงของสารน้ำที่คงเหลืออยู่ในถังและการให้สารน้ำมีความต่อเนื่องตลอดการผ่าตัดด้วยหน่วยประมวลผลคำสั่งของแท่นเสาให้สารน้ำ โดยบอร์ดหน่วยประมวลผลคำสั่งต้องไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากับโซลินอยด์วาล์ว ทำให้เครื่องทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ควบคุมความต่อเนื่องของการให้สารน้ำ เป็นการตัดปัญหาจากความผิดพลาดที่เกิดจากคน (Human error) ที่ลืม

เปลี่ยนอุทกศาสตร์น้ำในระบบให้สารน้ำที่ใช้แรงโน้มถ่วงแบบแรงคนด้วยการยกเสาที่แขวนสารน้ำ โดย (Figure 4) เป็นหลักการควบคุมความต่อเนื่องของเสาให้สารน้ำให้มีการสลับการทำงาน โดยผ่านหน่วยประมวลผลคำสั่ง (Figure 2) ซึ่งมีเงื่อนไขในการทำงานของเสาให้สารน้ำคือ เมื่อสารน้ำในถัง “ที่ถูกยก” มีปริมาตรน้อยจนถึงระดับที่กำหนดเท่ากับ 2% หรือ 0.1 liter ถึง “พร้อมใช้งาน” เคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งที่สร้างความดันสารน้ำเท่ากับความดันที่ตั้งไว้ แล้วโซลินอยด์วาล์วเปิดเพื่อให้สารน้ำ ขณะเดียวกันโซลินอยด์วาล์วถังที่ถูกยกที่ผ่านมาจะปิด มอเตอร์เคลื่อนถึงลดลงมา ถึงที่หมดจะถูกเติมสารน้ำทดแทนเตรียมพร้อมใช้งานเพื่อนำไปใช้ในครั้งถัดไป

3. ขั้นตอนการทดสอบ

เสาให้สารน้ำที่ใช้แรงโน้มถ่วงแบบอัตโนมัติที่ถูกพัฒนาขึ้น (Figure 5) ถูกทำการทดสอบการทำงานด้วยการตั้งค่าเฮดความดันใช้งานให้สารน้ำที่ 60 80 และ 100 mmHg ของเสาให้สารน้ำนี้ด้วยมอเตอร์ที่เลื่อนถึงให้เคลื่อนที่ขึ้น เติมสารน้ำทั้งสองถังที่ถังละ 5 liters เพื่อให้ทุกถังอยู่ในสถานะ “พร้อมใช้งาน” ซึ่งถูกควบคุมการให้สารน้ำโดยโซลินอยด์วาล์วเปิด-ปิดเพื่อปล่อย-เก็บกักสารน้ำในแต่ละถัง ส่วนปลายท่อที่มีขนาดคงที่ที่ 2 mm ที่ถูก

ยึดไว้คงที่เพื่อให้ระยะความแตกต่างของสารน้ำคงที่ โดยมีสมมติฐานความหนาแน่นของสารน้ำเท่ากับน้ำ 1,000 kg/m³ ในการทดสอบทำการวัดระยะผลต่างระหว่างความสูงที่ระดับอ้างอิงกับระดับความสูงของสารน้ำ (Z_1) ด้วยตลับเมตรยี่ห้อ STANLEY, Thailand ช่วงการใช้งาน 0 - 5 m โดยมีค่าความละเอียด (Resolution) ที่ +/- 1 mm เปรียบเทียบเฮดความดันที่เกิดขึ้นจากค่าที่บันทึกได้จาก Z_1 กับความดันที่ตั้งไว้ในการใช้งานที่ 60 80 และ 100 mmHg ตามลำดับ และวัดค่าเฮดความดันด้วยมาตรวัดความดัน (Pressure gauge) ของยี่ห้อ Festo, China (Figure 6) ช่วงการใช้งานวัดค่าได้ 0.00 – 0.25 bar ซึ่งมีความละเอียด (Resolution) ที่ +/- 0.005 bar ซึ่งเมื่อเทียบในหน่วยของมิลลิเมตรปรอท (mm of Mercury) ได้เท่ากับ 0.00 – 187.52 mmHg ความละเอียดที่ +/- 3.75 mmHg และเปรียบเทียบเฮดความดันที่เกิดขึ้นจากค่าที่บันทึกได้จากมาตรวัดความดัน สุดท้ายพิจารณาการสลับกันระหว่างถังบรรจุสารน้ำซ้ายและถังบรรจุสารน้ำขวาสลับกันทำงานและให้สารน้ำตามที่ตั้งค่าเฮดความดันไว้ของเสาให้สารน้ำ บันทึกกระบวนการทำงาน โดยการทดสอบนี้สิ้นสุดเมื่อถังที่สองหมด



Figure 3 The command processing unit of the automated irrigation system with gravity pump.

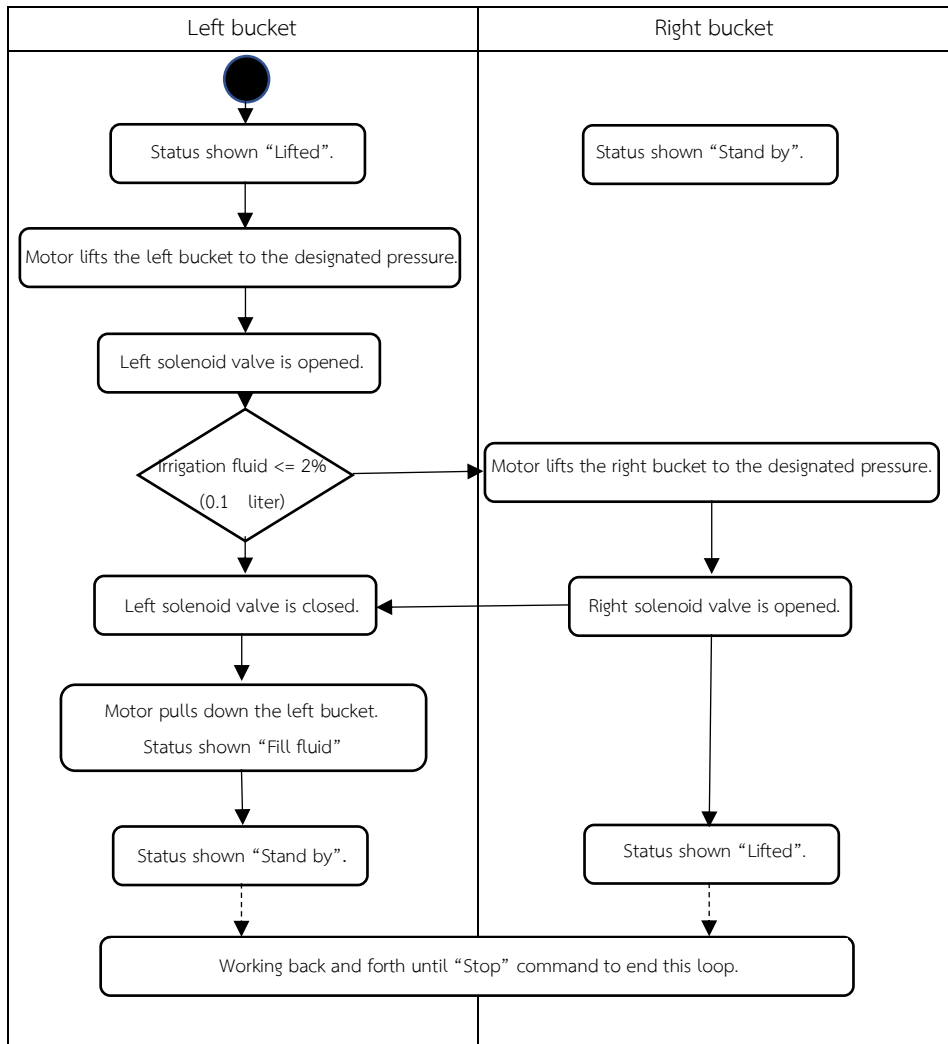


Figure 4 Workflow diagram of the automated irrigation system with gravity pump to alternate lifting left and right buckets of irrigation tower for designated pressure and continuity of the irrigation fluid during surgery.

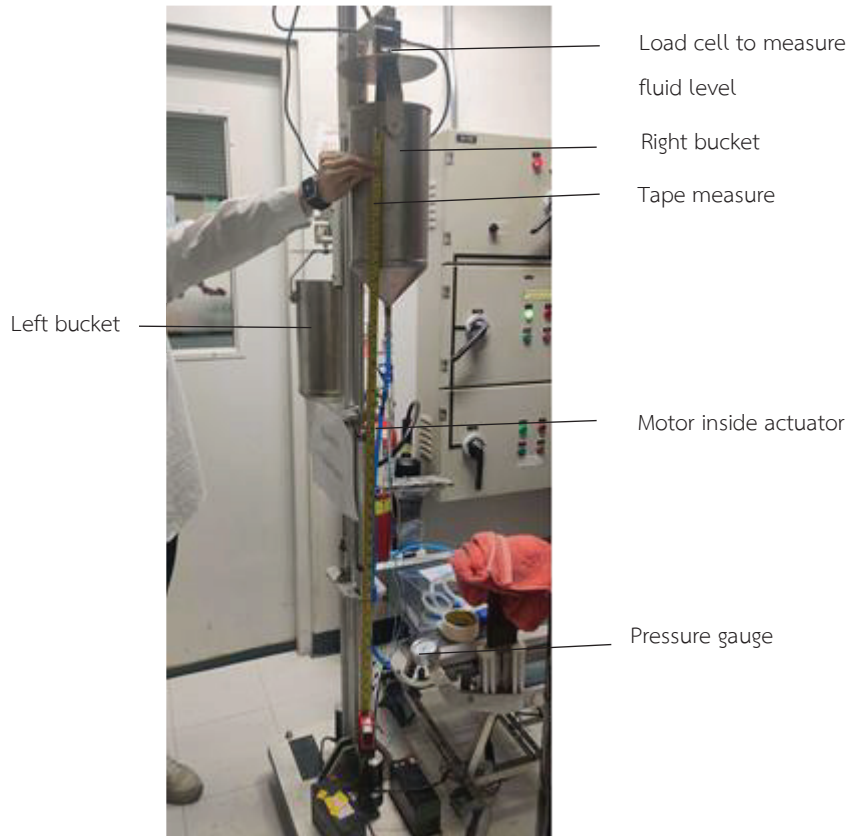


Figure 5 The prototype of automated irrigation system with gravity pump.



Figure 6 Pressure gauge (Festo) with resolution of +/- 0.005 bar.

4. ผลการทดสอบ

เสาให้สารน้ำที่ใช้แรงโน้มถ่วงแบบอัตโนมัติที่ทั้งสองถึงบรรจุสารน้ำซึ่งถูกตั้งเฮดความดันลงในคำสั่งเครื่องที่ 60 80 และ 100 mmHg บันทึกผลการวัดค่าได้ (Table 1) แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างความดันที่ถูกตั้งไว้กับค่าที่อ่านได้จากการวัดระยะผลต่างระหว่างความสูงที่ระดับอ้างอิง(ตำแหน่งผ่าตัด)กับระดับความสูงของสารน้ำ (Z_1) ในหน่วย mH_2O รวมทั้งแปลงให้เป็นค่าเฮดความดัน เพื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับค่าที่ตั้งไว้ นอกจากนี้ในตารางนี้แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างความดันที่ถูกตั้งไว้กับค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดความดันในหน่วย bar รวมทั้งแปลงให้เป็นค่าเฮดความดัน เพื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับค่าที่ตั้งไว้เช่นกัน

ในส่วนของการทำงานของเสาให้สารน้ำที่ใช้แรงโน้มถ่วงแบบอัตโนมัติ ในกรณีของการตั้งค่าความดันไว้ที่ 80 mmHg เริ่มการทำงานงาน (Figure 7a) ยกถังซ้ายเป็นถังแรกที่สารน้ำขึ้นไปก่อน (Figure 7b) โดยค่าที่อ่านได้บนมาตรวัดระดับความสูงที่ $1.093 mH_2O$ ของถังด้านซ้าย เมื่อให้สารน้ำไปจนสารน้ำลดลงที่ $1.082 mH_2O$ ถังนี้จะถูกยกถังขึ้นไปใหม่ที่ $1.093 mH_2O$ จนสารน้ำลดลงที่ $1.082 mH_2O$ อีกครั้ง ซึ่งทำการยกถังซ้ายขึ้นเป็นขั้นๆ ชั้นละ $0.011 mH_2O$ และแสดงในรูปส่วนขยายของ Figure 8 ในกรณีที่ตั้งค่า 80 mmHg จนเมื่อสารน้ำถังซ้ายมีปริมาตรเหลือ 0.1 liter ถังขวาที่พร้อมใช้งานขึ้นมาแทนที่ถังด้านซ้ายที่กำลังหมด (Figure 7c) หลังจากนั้น อ่านได้บนมาตรวัดระดับความสูงที่ $1.093 mH_2O$

ของถังด้านขวา เสาให้สารน้ำเริ่มให้สารน้ำจากถังขวานี้ เมื่อให้สารน้ำไปจนสารน้ำลดลงที่ $1.082 mH_2O$ ถังนี้จะถูกยกถังขึ้นไปใหม่ที่ $1.093 mH_2O$ ซึ่งถังขวานี้ทำการยกถังขึ้นเป็นขั้นๆ ชั้นละ $0.011 mH_2O$ เช่นเดียวกัน ซึ่งหยุดเมื่อสารน้ำของถังขวาหมดในการทดสอบนี้ (Figure 7d) ส่วนที่แสดงบนมาตรวัดความดันจากที่อ่านค่าได้ 0.105 bar ซึ่งแปลงค่ามีค่าเฮดความดันเฉลี่ยเท่ากับ 78.76 mmHg ตั้งแต่เริ่มให้สารน้ำของถังด้านซ้ายต่อเนื่องมา ให้สารน้ำด้วยถังด้านขวา (Figure 8)

จากผลการทำงานใน (Figure 6) และกราฟ (Figure 7) แสดงให้เห็นว่า ในตำแหน่งที่ 1 เสาให้สารน้ำอัตโนมัติเริ่มการทำงาน ถังซ้ายเลื่อนไปสู่ตำแหน่งที่ 2 ที่เฮดความดัน 80 mmHg ที่ตั้งไว้ อ่านค่า Z_1 บนตลับเมตรที่ $1.093 mH_2O$ โซลินอยด์วาล์วของถังซ้ายเปิดเพื่อให้สารน้ำ หลังจากนั้นถังซ้ายขึ้นไปอย่างต่อเนื่องทีละชั้น ชั้นละ $0.011 mH_2O$ เพื่อรักษาเฮดความดันที่ช่วง 80 mmHg ที่ตั้งไว้ จนถึงตำแหน่งที่ 3 สารน้ำในถังซ้ายมีปริมาตรที่ 0.1 liter ถังขวาเลื่อนขึ้นจนระดับความสูงของสารน้ำในถังขวาที่มาตรวัดระดับความสูงที่ $1.093 mH_2O$ ที่ตำแหน่งที่ 4 ถังซ้ายหมดก็จะเลื่อนลงมา ขณะที่โซลินอยด์วาล์วถังขวาเปิดเพื่อให้สารน้ำต่อ หลังจากนั้นถังขวาก็ยังคงขึ้นไปอย่างต่อเนื่องทีละชั้น ชั้นละ $0.011 mH_2O$ เพื่อรักษาเฮดความดันที่ช่วง 80 mmHg ที่ตั้งไว้ จนถึงตำแหน่งที่ 5 เมื่อถังขวาหมดก็จะเลื่อนลงมาตำแหน่งที่ 6 จบกระบวนการทดสอบที่ให้สารน้ำอย่างต่อเนื่อง

Table 1 Comparing between the set pressure at 60, 80, and, 100 mmHg and pressure conversion from measuring the differences in height, Z_1 and pressure conversion from pressure gauge on the automated irrigation system using a gravity pump.

The set pressure on the automated irrigation system using a gravity pump in mmHg unit.	The differences in height, Z_1 , in mH_2O (mmHg) unit (% difference to the set pressure)		The read pressure from pressure gauge in bar (mmHg) unit (% difference to the set pressure)
	Minimum elevation	Maximum elevation	
60	0.811 (59.65) (-0.58%)	0.822 (60.46) (0.76%)	0.080 (60.00) (0.00%)
80	1.082 (79.59) (-0.51%)	1.093 (80.39) (0.48%)	0.105 (78.76) (-1.55%)
100	1.355 (99.67) (-0.33%)	1.366 (100.47) (0.47%)	0.135 (101.26) (1.26%)

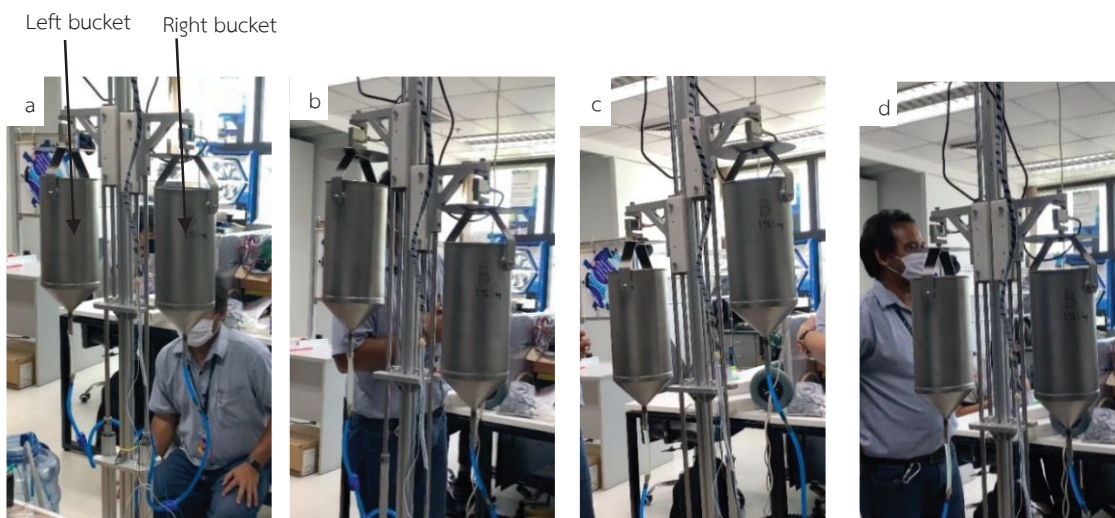


Figure 7 Alternative lifting test between left and right buckets of the automated irrigation system with gravity pump. a). Start process. b). Lifted left bucket. c). Lifted right bucket but pulled down left bucket because of running out of fluid, then waiting for adding new irrigation fluid. d.) End process.

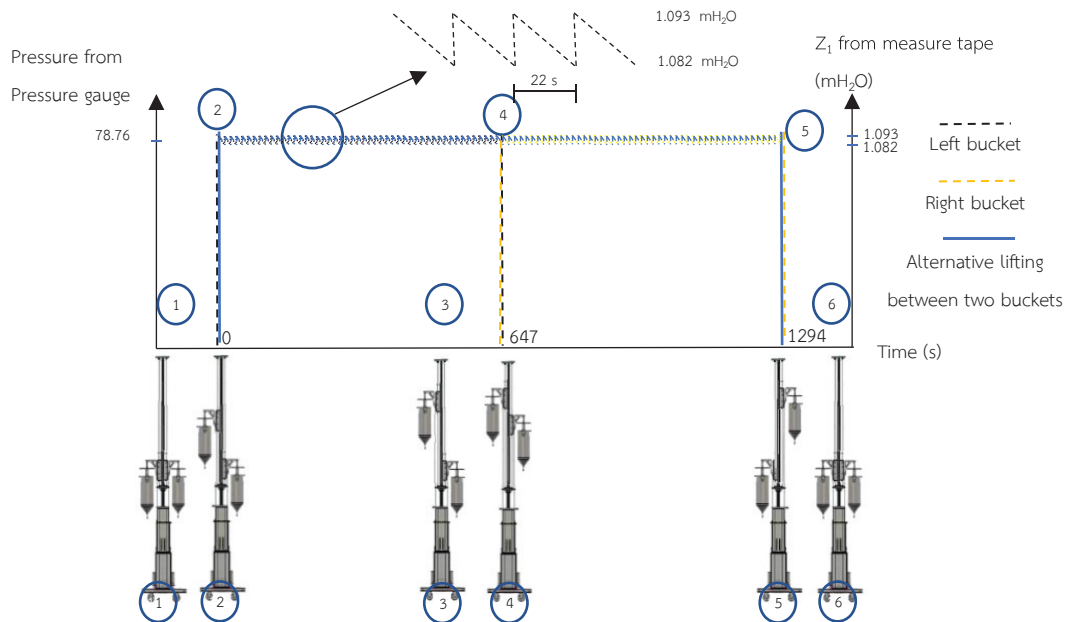


Figure 8 An example of the automated fluid irrigation using a gravity pump was set at pressure at 80 mmHg. The differences in height, Z_1 , were measured in range of 1.082 to 1.093 mH_2O of left and right buckets and alternative lifting between those two. The relationship pressure and time the whole process of irrigation by alternative lifting between those two buckets from 1 to 6.

5. สรุป

จากผลการทดสอบการออกแบบเงื่อนไขการทำงานของเสาให้สารน้ำระบบอัตโนมัติที่เป็นแบบแรงโน้มถ่วง โดยกำหนดค่าในการทดสอบที่เฮดความดันที่ 60 80 และ 100 mmHg และควบคุมให้การสลบถึงที่เฮดความดันดังกล่าวเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องของการให้สารน้ำระหว่างการผ่าตัด จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาต่างระหว่างความสูงของสารน้ำที่คงเหลือในถังกับระยะเวลาสูงอ้างอิง (Z_1) จากทั้งสองถังด้านซ้ายและด้านขวา ซึ่งค่าที่บันทึกได้ถูกแปลงเป็นเฮดความดันได้อยู่ในช่วง 59.65 - 60.46 79.59 - 80.39 และ 99.67 - 100.47 mmHg ของเฮดความดันที่ตั้งไว้ ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงเฮดความดันที่ต้องการของการให้สารน้ำที่ได้จากเครื่องนี้ ซึ่งช่วงการทำงานนี้ เฮดความดันอยู่ในช่วงไม่เกิน 1% ซึ่งต่างจากการอ่านค่าด้วยมาตรวัดความดันที่ถูกแปลงเป็นเฮดความดันได้ 60.00 78.76 และ 101.26

mmHg ของเฮดความดันที่ตั้งไว้ พบว่าเฮดความดันอยู่ในช่วงมากกว่า 1% ซึ่งเกิดจากมาตรวัดความดันเข็มของมาตรวัดความดันแก้วไม่เกินช่องความละเอียดของมาตรวัดความดันที่ 3.75 mmHg จากผลการทดสอบข้างต้นการให้สารน้ำแบบแรงโน้มถ่วงที่เป็นระบบอัตโนมัติได้ผลตามหลักการที่ออกแบบไว้ในการควบคุมระยะความต่าง Z_1 ให้คงที่ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับเฮดความดันที่ตั้งไว้ โดยเมื่อสารน้ำลดลงในปริมาณหนึ่ง หน่วยประมวลผลคำสั่งจะสั่งการให้ยกถังบรรจุสารน้ำขาดเซดความดันในช่วงระยะที่ยกแต่ละขั้นเท่ากับ 0.011 mH_2O ซึ่งแต่ละขั้นถูกคำนวณจากมวลที่หายไปที่วัดได้ 0.194 kg จากโพลดเซลล์ ดังนั้นการใช้ค่ามวลที่หายไปสามารถนำมากำหนดช่วงการทำงานของเสาให้สารน้ำเฮดความดันให้สารน้ำที่ต้องการได้ ในส่วนของการให้สารน้ำอัตโนมัติเพื่อรักษาเฮดความดันอย่างต่อเนื่อง พบว่า ระบบควบคุมนี้ทำงานอย่างถูกต้องในการควบคุมมอเตอร์และโซลินอยด์

วาล์วตามที่ออกแบบ ซึ่งยกขึ้นแต่ละถังที่บรรจุสารน้ำเพื่อให้ได้ไฮดรอสแตติกที่กำหนดและเพื่อให้สารน้ำทั้งหมดไปจากถังด้วยซ้ำถูกทดแทนด้วยสารน้ำในถังด้านขวาด้วยไฮดรอสแตติกเดียวกันตามที่ตั้งไว้ในระหว่างการผ่าตัด ดังนั้นการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า การให้สารน้ำด้วยแรงโน้มถ่วงแบบอย่างต่อเนื่องด้วยวิธีการนี้ จะสามารถทดแทนการพึ่งพาคาลกรในการยกสารน้ำระหว่างการผ่าตัดที่ทำให้การให้สารน้ำมีไฮดรอสแตติกที่ตลอด สร้างความต่อเนื่องของการให้สารน้ำ เหมาะสมและเพียงพอในการผลึกเศษต่างๆ ทำให้สามารถมองเห็นภาพที่ชัดเจนทำงานตามเงื่อนไขความต้องการของแพทย์ในระหว่างผ่าตัด และวิธีการนี้ลดความเสี่ยงจากความผิดปกติของความดันที่ได้จากปั๊มความดันอัตโนมัติที่อาจจะมากเกินไปที่ไม่สามารถหยุดได้ โดยการเพิ่มขึ้นมากเกินไปนั้นทำให้น้ำเยื่อข้างเคียงที่ทำการผ่าตัดเสียหายได้ สุดท้ายเสาสารน้ำระบบอัตโนมัติจะถูกนำไปต่อยอดระบบควบคุมการทำงานในส่วนอื่น การแสดงผล และกลไกในการยกให้มั่นคงและนำไปใช้งาน ก่อนนำไปทดสอบระบบควบคุมด้วย Software validation ทดสอบอุปกรณ์ความปลอดภัยต่างๆในทุกสถานการณ์

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากคณะกรรมการพิจารณาโครงการวิจัยและส่งเสริมการวิจัยทุกท่านที่กรุณาให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำ และคำชี้แนะที่เป็นประโยชน์แก่วิจัย

ขอขอบพระคุณโรงพยาบาลธรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติ และเจ้าหน้าที่ของโรงพยาบาลธรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บข้อมูลในการศึกษานี้

ขอขอบพระคุณผู้เข้าร่วมวิจัยทุกท่านที่เสียสละเวลาให้ความอนุเคราะห์ในการทำวิจัยจนเสร็จสิ้น

การศึกษานี้ได้รับทุนสนับสนุนโครงการจากโรงพยาบาลธรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติ ประจำ

ปีงบประมาณ 2563 ให้นักวิจัยได้ผลิตนวัตกรรมเสาสารน้ำการผ่าตัดข้อไหล เพื่อนำไปใช้กับผู้ป่วยได้ในอนาคต

7. References

- [1] Rutherford, C.J., 2016, Surgical Equipment and Supplies, 2nd Ed., FA Davis Company, Philadelphia, PA, 272 p.
- [2] Hsiao, M.S., Kusnezov, N., Sieg, R.N., Owens, B.D., and Herzog, J.P., 2016, Use of an irrigation pump system in arthroscopic procedures, Orthopedics, 39(3): pp. 474-478.
- [3] Chang, D., Manecksha, R.P., Syrrakos, K., and Lawrentschuk, N., 2012, An investigation of basic physics of irrigation in urology and the role of automated pump irrigation in cystoscopy. Sci. World J., Vol. 2012, 6 p.
- [4] Saejung, J. and Chanchayanon, T., 2008, Satisfaction with irrigation fluid containers having a visible fluid level tube for TURP (Transurethral resection of prostate gland), PSU Med. J., 26(1): pp. 37-42 (in Thai).
- [5] Aharram, S., Mounir, Y., Jawad, A., Agoumi, O., and Daoudi, A., 2020, Comparative evaluation of manual and automated intra-articular irrigation systems in the arthroscopic repair of small and medium-sized rotator cuff tears, Ann. Orthop. Surg. Res. Vol: 3(1), 5 p.
- [6] Burggaard, P., Blyme, P.J. H., Olsen, P.M.A., and Kristensen, G., 1988, Rupture of the knee capsule from articular hyperpressure: Experiments in cadaver knees, Acta Orthop. Scand. 59(6): pp. 692-694.

- [7] Sperber A, Wredmart T., 1993, Multicompartamental pressures in the knee joint during arthroscopy, *Arthroscopy*. 9(5): pp. 566-569.
- [8] Olszewski, A.D., Jones, R., Farrell, R., and Kaylor, K., 1999, The effects of dilute epinephrine saline irrigation on the need for tourniquet use in routine arthroscopic knee surgery, *Am. J. Sports Med.* 27(3): pp. 354-356.
- [9] Prachannuan, C., Sathitkarnmanee, T., Tribuddharat, S., Teerapongpakdee, S., Nonlhaopol, D., and Thinchelong, V., 2013, Risk factors of peri-operative hypothermia in adult patients managed with standard prophylaxis: Case-control, *Thai J. Anesthesiol.* 39: pp. 183-191. (in Thai)