



# วิทยานิพนธ์

การพัฒนาระบบคลองอัตโนมัติต้นทุนต่ำ

DEVELOPMENT OF LOW-COST CANAL  
AUTOMATION SYSTEM

นายวิษณุ ศรีวงษา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. ๒๕๕๑



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน)

ปริญญา

วิศวกรรมชลประทาน

วิศวกรรมชลประทาน

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาระบบคลองอัตโนมัติต้นทุนต่ำ

Development of Low-Cost Canal Automation System

นามผู้วิจัย นายวิษณุ ศรีวงษา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

( รองศาสตราจารย์วราวุธ วุฒิวณิชย์, Ph.D. )

กรรมการ

( รองศาสตราจารย์เจษฎา แก้วกัลยา, Ph.D. )

กรรมการ

( รองศาสตราจารย์กอบเกียรติ ผ่องบุผิ, Ph.D. )

กรรมการ

( รองศาสตราจารย์บัญชา ขวัญยืน, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์บัญชา ขวัญยืน, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาระบบคลองอัตโนมัติต้นทุนต่ำ

Development of Low-Cost Canal Automation System

โดย

นายวิษณุ ศรีวงษา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน)

พ.ศ. 2551

วิษณุ ศรีวงษา 2551: การพัฒนาระบบคลองอัตโนมัติต้นทุนต่ำ ปรินญาวิศวกรรม  
ศาสตรุษบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน) สาขาวิศวกรรมชลประทาน ภาควิชา  
วิศวกรรมชลประทาน ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์วราวุธ วุฒินิชย์,  
Ph.D. 169 หน้า

การพัฒนาระบบคลองอัตโนมัติต้นทุนต่ำมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ควบคุมระดับน้ำในคลอง  
ส่งน้ำให้อยู่ที่ระดับเป้าหมาย ขั้นแรกพัฒนาแบบจำลองคลองอัตโนมัติเพื่อทดลองในห้องปฏิบัติการ  
ใช้ประตูยนต์ที่ใช้ระบบฝังตัวช่วยควบคุมระดับน้ำในคลองร่วมกับคอมพิวเตอร์ ผลการทดลอง  
ได้ค่าความคลาดเคลื่อน 1.22-2.83 % จากระดับเป้าหมาย ขั้นที่ 2 คือการพัฒนาและทดสอบระบบ  
คลองอัตโนมัติสำหรับระบบส่งน้ำของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และ  
ระบบคลองอัตโนมัติสำหรับโครงส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้อง จ.สุพรรณบุรี กรณีของระบบ  
คลองอัตโนมัติกำแพงแสนประกอบด้วยคลองส่งน้ำสายใหญ่ (MC) 1 สายและสายซอย 1 สาย  
(1L-MC) ติดตั้งประตูยนต์เพื่อควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดที่หน้าประตูระบายน้ำกลางคลอง MC  
กม.0+725 1L-MC กม. 1+200 และสถานีโทรมาตรวัดระดับน้ำที่คลอง MC กม.2+175 และคลอง  
1L-MC กม. 2+500 การควบคุมปริมาณน้ำในคลองจากคอมพิวเตอร์ส่วนกลางเพื่อปรับอัตราการ  
ไหลของน้ำผ่านบานประตูปากคลองMC กม.0+000 และประตูปากคลอง L-MC กม.0+000 โดย  
ได้ทดสอบการทำงานด้วยมือ ระหว่างวันที่ 10 ตุลาคม 2549 – 3 มกราคม 2551 และการทำงาน  
แบบอัตโนมัติ ระหว่างวันที่ 4 มกราคม - 1 มิถุนายน 2551 ผลการทำงานแบบอัตโนมัติสามารถ  
ควบคุมระดับน้ำในคลองได้ใกล้เคียงกับระดับเป้าหมายมีค่า RMSE ระหว่าง 0.013-0.029 ม.ซึ่งต่ำ  
กว่าการควบคุมด้วยมือที่มีค่า RMSE ระหว่าง 0.118-0.295 ม. และการส่งข้อมูลด้วยระบบวิทยุ  
สื่อสารมีความน่าเชื่อถือได้ 89 % กรณีของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง ติดตั้งประตูยนต์เพื่อ  
ควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดที่หน้าประตูระบายน้ำกลางคลอง 5L-2L กม.3+650 กม.9+813 และ กม.  
20+300 การควบคุมปริมาณน้ำในคลองจากคอมพิวเตอร์ส่วนกลางเพื่อปรับอัตราการไหลของ  
น้ำผ่านบานประตูปากคลอง 5L-2L กม.0+000 โดยได้ทดสอบการทำงานด้วยมือ ระหว่างวันที่ 10  
ตุลาคม 2549 – 3 มกราคม 2551 และการทำงานแบบอัตโนมัติ ระหว่างวันที่ 4 มกราคม - 1 มิถุนายน  
2551 ผลการทำงานแบบอัตโนมัติสามารถควบคุมระดับน้ำในคลองได้ใกล้เคียงกับระดับเป้าหมาย  
มีค่า RMSE ระหว่าง 0.178-0.319 ม.ซึ่งต่ำกว่าการควบคุมด้วยมือที่มีค่า RMSE ระหว่าง 0.427-  
0.551 ม. และการส่งข้อมูลด้วยระบบวิทยุสื่อสาร VHF มีความน่าเชื่อถือได้ 87 %

Vich Sriwongsa 2008: Development of Low-Cost Canal Automation System.  
Doctor of Engineering (Irrigation Engineering) Major Field: Irrigation Engineering,  
Department of Irrigation Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor  
Varawoot Vudhivanich, Ph.D. 169 pages.

Development of low – cost canal automation system aims to control water level in canal at target level. The development is divided in 2 steps. Firstly, canal automation model development, the model was constructed and tested in laboratory by combined automatic centralized and localized control by using embedded system, call robogate. It controls upstream water level of the regulator. The result shows that error water levels are in the range 1.22-2.83 %. The second step was the developing of Kamphaengsaen and the Songpeenong canal automation systems. The case of Kamphaengsaen canal automation system used irrigation canal in Kasetsart University Kamphaengsaen campus. The canal system comprises of a main canal (MC) and lateral (1L-MC). The robogates were installed at MC km.0+725 and L-MC km.1+200 to control the upstream target level. Telemetering stations were installed at MC km.2+175 and 1L-MC km.2+500 to monitor water level at the tail of canal. The automatic centralized control was used for gate opening at MC km.0+000 and 1L-MC km.0+000 and the water level in the canal was controlled at the target level with RMSE ranging between 0.013-0.029 m. which are lower than that of the manual controlled of 0.118-0.295 m. The reliability of the measured and transmitted data to the master station 88.67 % by radio wave. The case of Songpeenong canal automation system was tested at Songpeenong Irrigation project, Suphanburi. The robogate were installed at cross regulators of 5L-2L canal km.3+650, 9+813 and 20+300 to localized the upstream at target water level. The master station was automatically centralized control the discharge at head gate of 5L-2L km.0+000. The automatic mode showed the better result with a lower RMSE of 0.178-0.319 m. comparing to the RMSE of 0.427-0.551 for the manual control. The reliability of the measured and transmitted data to the master station 86.66 % by VHF radio wave.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

/ /

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณท่าน รศ.ดร.วราวุธ วุฒินิชย์ ประธานกรรมการอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เจษฎา แก้วกัลยา รศ.ดร.กอบเกียรติ ผ่องพุฒิ รศ.ดร.บัญชา ขวัญยืน อาจารย์ที่ปรึกษาและ ศ.ดร.สุนทรี ยิ่งชัชวาล ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่ดีและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ กรมชลประทาน ผู้อำนวยการโครงการ ฯ หัวหน้าวิศวกรรมบริหารฯ เจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้อง โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้อง จ.สุพรรณบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่อำนวยความสะดวก สนับสนุนในการทำวิจัยนี้มาโดยตลอดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณผู้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยประกอบด้วย ทุนทำวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี 2549 ทุนช่วยทำวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม ปี 2549 ทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปี 2549 – 2551 ทุนสนับสนุนค่าลงทะเบียนจากสมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์ ปี 2547 – 2550 ช่วยทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณเทพเจ้าผู้บังเกิดเกล้า คุณพ่อพินิจ คุณแม่บุญชู และคุณทวิศรีวงษา (พี่ชาย) ผู้มีพระคุณยิ่ง ที่ให้ทุกสิ่งทุกอย่างที่ทำให้ผู้วิจัยมีโอกาสดำเนินการเพิ่มพูนความรู้ ก่อเกิดพลัง กำลังใจมุ่งทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

วิษณุ ศรีวงษา

ตุลาคม 2551

## สารบัญ

### หน้า

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| สารบัญ                                                    | (1) |
| สารบัญตาราง                                               | (2) |
| สารบัญภาพ                                                 | (4) |
| คำนำ                                                      | 1   |
| วัตถุประสงค์                                              | 3   |
| การตรวจเอกสาร                                             | 4   |
| อุปกรณ์และวิธีการ                                         | 60  |
| ผลและวิจารณ์                                              | 78  |
| สรุปและข้อเสนอแนะ                                         | 126 |
| สรุป                                                      | 126 |
| ข้อเสนอแนะ                                                | 129 |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง                                      | 130 |
| ภาคผนวก                                                   | 137 |
| ภาคผนวก ก อุปกรณ์แบบจำลองคลองอัตโนมัติ                    | 138 |
| ภาคผนวก ข อุปกรณ์คลองอัตโนมัติกำแพงแสน                    | 148 |
| ภาคผนวก ค อุปกรณ์คลองอัตโนมัติสองพี่น้อง                  | 154 |
| ภาคผนวก ง ผลการทดสอบแบบจำลองคลองอัตโนมัติในห้องปฏิบัติการ | 158 |
| ประวัติการศึกษา และการทำงาน                               | 169 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                   | หน้า |
|----------|-------------------------------------------------------------------|------|
| 1        | การเปรียบเทียบชนิดเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำเบื้องต้น                   | 25   |
| 2        | ข้อดี-ข้อเสียของอุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบต่าง ๆ                       | 26   |
| 3        | สภาพการนำและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพื้นดิน                        | 35   |
| 4        | การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของระบบสื่อสารสำหรับระบบคลองอัตโนมัติ | 40   |
| 5        | องค์ประกอบและการทำงานของอุปกรณ์แบบจำลองคลองอัตโนมัติ              | 61   |
| 6        | ลักษณะคลองส่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน      | 64   |
| 7        | ค่าธรณีบานประตูระบายน้ำ ค่า $C_1$ และ $C_2$                       | 65   |
| 8        | องค์ประกอบและการทำงานของอุปกรณ์คลองอัตโนมัติกำแพงแสน              | 65   |
| 9        | ลักษณะทั่วไปของคลองส่งน้ำ 5L-2L                                   | 72   |
| 10       | องค์ประกอบและการทำงานของอุปกรณ์คลองอัตโนมัติสองพี่น้อง            | 73   |
| 11       | ผลการทดสอบ algorithm เพื่อควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดด้านเหนือ         | 84   |
| 12       | สรุปค่าความคาดเคลื่อนในการควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติ   | 91   |
| 13       | ผลการตรวจนับจำนวนข้อมูลที่ได้รับได้ที่คอมพิวเตอร์ส่วนกลาง         | 93   |
| 14       | ผลการทดสอบการเปิด – ปิดประตูระบายน้ำระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุ         | 99   |
| 15       | สรุปการทำงานระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสนในระบบโทรมาตร                | 106  |
| 16       | การทำงานแบบอัตโนมัติของระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน                  | 107  |
| 17       | เปรียบเทียบ RMSE ของระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน                     | 108  |
| 18       | ผลการตรวจนับจำนวนข้อมูลที่ได้รับได้ที่คอมพิวเตอร์ส่วนกลาง         | 109  |
| 19       | สอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำประตูระบาย กม. 3+650 5L-2L             | 110  |
| 20       | สอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำประตูระบาย กม. 9+813 5L-2L             | 112  |
| 21       | สอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำประตูระบาย กม. 20+300 5L-2L            | 114  |
| 22       | สรุปการทำงานด้วยมือของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง                 | 120  |
| 23       | ผลการทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง      | 121  |



### สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ |                                                        | หน้า |
|----------|--------------------------------------------------------|------|
| 24       | เปรียบเทียบ RMSE ของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง        | 122  |
| 25       | การประมาณราคาลงทุนต่อ 1 สถานีตรวจวัดและควบคุมน้ำในสนาม | 123  |

### ตารางผนวกที่

|     |                                                                    |     |
|-----|--------------------------------------------------------------------|-----|
| ข1  | แสดงค่ารหัสที่ถอดได้จาก IC 8870 และไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่สอง      | 150 |
| ง1  | ระดับน้ำเป้าหมายแบบจำลองคลองอัตโนมัติ                              | 159 |
| ง2  | การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2548 | 160 |
| ง3  | การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 5 ธันวาคม 2548      | 161 |
| ง4  | การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 7 ธันวาคม 2548      | 162 |
| ง5  | การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 25 เมษายน 2549      | 163 |
| ง6  | การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 26 เมษายน 2549      | 164 |
| ง7  | การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 27 เมษายน 2549      | 165 |
| ง8  | การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 28 เมษายน 2549      | 166 |
| ง9  | การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 29 เมษายน 2549      | 167 |
| ง10 | การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 30 เมษายน 2549      | 168 |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |                                                                     | หน้า |
|--------|---------------------------------------------------------------------|------|
| 1      | วิธีการควบคุมระดับน้ำในคลองชลประทาน                                 | 5    |
| 2      | AMIL ประตูควบคุมระดับน้ำด้านเหนือ                                   | 11   |
| 3      | AVIO ประตูควบคุมระดับน้ำด้านท้ายน้ำ                                 | 12   |
| 4      | คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น                                           | 20   |
| 5      | การตรวจวัดระดับน้ำโดยใช้ลูกลอย                                      | 23   |
| 6      | คลื่นแบบต่าง ๆ                                                      | 34   |
| 7      | บริเวณหุบเขาใช้การสื่อสารผ่านสถานีทวนสัญญาณ                         | 38   |
| 8      | กระบวนการควบคุมของคลองอัตโนมัติ                                     | 53   |
| 9      | ความเข้มข้นการปรับระดับอัตโนมัติ                                    | 53   |
| 10     | ส่วนแสดงผลการควบคุมคลองอัตโนมัติ                                    | 54   |
| 11     | เกียร์มอเตอร์เปิด-ปิดประตูระบายน้ำ                                  | 55   |
| 12     | อุปกรณ์วัดระยะเปิดประตูระบายน้ำ                                     | 55   |
| 13     | การควบคุมคลองอัตโนมัติโดยใช้ PLC                                    | 56   |
| 14     | การควบคุมระดับน้ำอัตโนมัติแบบเหนือและท้ายน้ำ                        | 56   |
| 15     | The Kerian Irrigation Scheme ในประเทศมาเลเซีย                       | 57   |
| 16     | การตรวจวัดระยะเปิดประตูระบายน้ำ                                     | 58   |
| 17     | ผังการทำงานของอาคารบังคับน้ำในคลองแบบอัตโนมัติ                      | 59   |
| 18     | การใช้ DC เกียร์มอเตอร์สำหรับยกบานประตูระบายน้ำ                     | 59   |
| 19     | หลักการทำงานของแบบจำลองคลองอัตโนมัติ                                | 62   |
| 20     | ลักษณะของคลองส่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต<br>กำแพงแสน | 63   |
| 21     | ปตร. ปากคลองส่งน้ำ MC กม. 0 + 000                                   | 67   |
| 22     | ปตร.กลางคลอง MC กม. 0+725 และ ปตร.ปากคลอง 1L-MC กม. 0+000           | 67   |
| 23     | ปตร.กลางคลอง 1L-MC กม. 2+500                                        | 68   |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                         | หน้า |
|--------|---------------------------------------------------------|------|
| 24     | โทรมาตรวัดระดับน้ำปลายคลอง MC กม. 2+175                 | 68   |
| 25     | โทรมาตรวัดระดับน้ำปลายคลอง 1L-MC กม. 2+500              | 69   |
| 26     | สถานีตรวจวัดอากาศที่คลอง MC กม.0+725                    | 69   |
| 27     | สถานีแม่ข่าย (base station)                             | 70   |
| 28     | หลักการทำงานของระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน                | 70   |
| 29     | องค์ประกอบของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง                | 74   |
| 30     | DC gear motor ติดตั้งร่วมกับเครื่องกว้านของประจวบประจวบ | 75   |
| 31     | การติดตั้ง PC starter ร่วมกับ PC แม่ข่าย                | 75   |
| 32     | หลักการทำงานของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง              | 76   |
| 33     | กรณีค่าระดับน้ำ WL มีค่าต่ำกว่าระดับน้ำเป้าหมาย         | 78   |
| 34     | กรณีค่าระดับน้ำ WL มีค่าสูงกว่าระดับน้ำเป้าหมาย         | 79   |
| 35     | algorithm ของประจวบเพื่อควบคุมระดับน้ำหน้าประตู         | 80   |
| 36     | ทดสอบการทำงานของ algorithm ประจวบที่สถานี 9021          | 81   |
| 37     | ตัวอย่างผลการทดสอบกรณี U/S ต่ำกว่า TL                   | 82   |
| 38     | ตัวอย่างผลการทดสอบกรณี U/S มากกว่า TL                   | 83   |
| 39     | คาดการณ์ระดับน้ำล่วงหน้าโดยสมการ regression             | 85   |
| 40     | ผังการทำงานควบคุมปริมาณน้ำในคลองอัตโนมัติกำแพงแสน       | 86   |
| 41     | ผังการทำงานควบคุมปริมาณน้ำในคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง     | 88   |
| 42     | ตัวอย่างผลการควบคุมระดับน้ำที่ระดับเป้าหมาย             | 92   |
| 43     | ปริมาณฝนตก km. 1+500 MC ระหว่าง 10 ต.ค.49-1 มี.ย.51     | 94   |
| 44     | ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ km. 1+500 MC ในรอบ 1 วัน    | 94   |
| 45     | การสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำเหนือ-ท้ายน้ำสถานี 901    | 95   |
| 46     | การสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำเหนือ-ท้ายน้ำ สถานี 902   | 96   |
| 47     | การสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำเหนือ-ท้ายน้ำสถานี 903    | 97   |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------|------|
| 48     | การสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำสถานี 904 และสถานี 905                           | 98   |
| 49     | ผลการทดสอบเปิด – ปิดประตูระบายขยะไหลผ่านคลื่นวิทยุ                             | 100  |
| 50     | เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 901 ระหว่าง 10 ต.ค.49 - 1มิ.ย.51  | 101  |
| 51     | Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 901 ระหว่าง 10 ต.ค.49- 1มิ.ย.51            | 101  |
| 52     | เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 9021 ระหว่าง 10 ต.ค.49 - 1มิ.ย.51 | 102  |
| 53     | Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 9021ระหว่าง 10 ต.ค.49- 1มิ.ย.51            | 102  |
| 54     | เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 9022 ระหว่าง 10 ต.ค.49 - 1มิ.ย.51 | 103  |
| 55     | Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 9022 ระหว่าง 10 ต.ค.49- 1มิ.ย.51           | 103  |
| 56     | เปรียบเทียบ ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 903 ระหว่าง 10 ต.ค.49 - 1มิ.ย.51 | 104  |
| 57     | Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 903 ระหว่าง 10 ต.ค.49- 1มิ.ย.51            | 104  |
| 58     | เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 904ระหว่าง 10 ต.ค.49 - 1มิ.ย.51   | 105  |
| 59     | เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 905 ระหว่าง 10 ต.ค.49 - 1มิ.ย.51  | 105  |
| 60     | สอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำ กม. 3+650 5L-2L                                    | 111  |
| 61     | สอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำ กม. 9+813 5L-2L                                    | 113  |
| 62     | สอบเทียบอ่านค่าวัดระดับน้ำ กม. 20+300 5L-2L                                    | 115  |
| 63     | การทดสอบการเปิด – ปิดประตูระบายไหลของคลองอัตโนมัติสองฟิโน้ง                    | 116  |
| 64     | U/S, D/S และ G <sub>0</sub> กม. 0+000 5L-2L ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51       | 117  |
| 65     | เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่ กม.3+650 ระหว่าง 4 ธ.ค.49 - 24 มิ.ย.51 | 117  |
| 66     | Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่ กม..3+650 ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51          | 118  |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่     |                                                                                | หน้า |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------|------|
| 67         | เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่ กม..9+813ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51  | 118  |
| 68         | Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่ กม..9+813ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51           | 119  |
| 69         | เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่ กม..20+300ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51 | 119  |
| 70         | Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่ กม..20+300ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51          | 120  |
| <br>       |                                                                                |      |
| ภาพผนวกที่ |                                                                                | หน้า |
| ก1         | คลองส่งน้ำจำลอง อ่างเก็บน้ำและเครื่องสูบน้ำ                                    | 139  |
| ก2         | อุปกรณ์ลดคลื่นน้ำ                                                              | 140  |
| ก3         | ผังรายละเอียด Canal Automation Interface                                       | 140  |
| ก4         | DC เกียร์มอเตอร์สำหรับเปิด – ปิด ประตูระบายน้ำ                                 | 141  |
| ก5         | ประตูนั้ยนต้งรู่่นที่ 4                                                        | 142  |
| ก6         | ภายในประตูนั้ยนต้งรู่่นที่ 4                                                   | 143  |
| ก7         | ประตูนั้ยนต้งรู่่น 4.0 ขณะทดลอง                                                | 143  |
| ก8         | รายละเอียดผังระบบควบคุมประตูนั้ยนต้งรู่่น 3.0                                  | 144  |
| ก9         | รายละเอียดภายในประตูนั้ยนต้งรู่่น 3.0                                          | 144  |
| ก10        | รายละเอียดผังระบบโทรมาตร 3.0                                                   | 145  |
| ก11        | ระบบเฟืองและโซ่ซึ่งเชื่อมต้งล่อกล่อยกับ Potentiometer                          | 146  |
| ก12        | วิทยุสื่อสาร ย่าน CB(Citizen Band) 245 MHz                                     | 146  |
| ง1         | ระดับน้ำหน้าประตูนั้ยนต้งจากผลการทดสอบแบบจำลองวันที่ 4 ธันวาคม 2548            | 159  |
| ง2         | ระดับน้ำหน้าประตูนั้ยนต้งจากผลการทดสอบแบบจำลองวันที่ 5 ธันวาคม 2548            | 160  |
| ง3         | ระดับน้ำหน้าประตูนั้ยนต้งจากผลการทดสอบแบบจำลองวันที่ 7 ธันวาคม 2548            | 161  |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ |                                                                  | หน้า |
|------------|------------------------------------------------------------------|------|
| ง4         | ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากการทดสอบแบบจำลองวันที่ 25 เมษายน<br>2549 | 162  |
| ง5         | ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากการทดสอบแบบจำลองวันที่ 26 เมษายน<br>2549 | 163  |
| ง6         | ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากการทดสอบแบบจำลองวันที่ 27 เมษายน<br>2549 | 164  |
| ง7         | ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากการทดสอบแบบจำลองวันที่ 28 เมษายน<br>2549 | 165  |
| ง8         | ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากการทดสอบแบบจำลองวันที่ 29 เมษายน<br>2549 | 166  |
| ง9         | ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากการทดสอบแบบจำลองวันที่ 30 เมษายน<br>2549 | 167  |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

|             |   |                                                  |
|-------------|---|--------------------------------------------------|
| ปตร.        | = | ประจักษ์พยาน                                     |
| VHF         | = | Very high frequency                              |
| A/D         | = | Analog – to – Digital Converter                  |
| ADC         | = | Analog to Digital Converter                      |
| AFC         | = | Analog to Frequency Converter                    |
| AFSK        | = | Audio Frequency Shift Keying                     |
| API         | = | Application Programming Interface                |
| BASIC       | = | Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code |
| BBS         | = | Bulletin - Board - System                        |
| BRI         | = | Basic Rate Interface                             |
| CARDD       | = | Canal Automation for Rapid Demand Deliveries     |
| CAS         | = | Canal Automation System                          |
| CB          | = | Citizen Band                                     |
| CSDSS       | = | Collaborative Spatial Decision Support System    |
| CTS         | = | Clear To Send                                    |
| CTSS        | = | Continuous Tone Coded Squelch System             |
| D/A         | = | Converter Digital to Analog Converter            |
| DCD         | = | Data Carrier Detect                              |
| DCT         | = | Data Circuit Terminating                         |
| DDE         | = | Dynamic Data Exchange                            |
| DHCP Server | = | Dynamic Host Configuration Protocol Server       |
| DLL         | = | Dynamic-link library                             |
| DM          | = | Data Management                                  |
| DTE         | = | Data Terminal Equipment                          |
| DTMF        | = | Dual-tone multi-frequency                        |
| EIS         | = | Execution information system                     |
| ESS         | = | Executive Support System                         |
| FIFO        | = | First In First Out                               |

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

|         |   |                                       |
|---------|---|---------------------------------------|
| FSL     | = | Full Supply Level                     |
| FTO     | = | Farm Turn Out                         |
| G       | = | Gate Positioning Sensor               |
| GDSS    | = | Group Decision Support Systems        |
| Go      | = | Gate Opening                          |
| GPRS    | = | General Packet Radio Service          |
| HF      | = | High frequency                        |
| HY-FLO  | = | Hydraulic Filter Offset Method        |
| I/O     | = | Input Output                          |
| IFPS    | = | Interactive Financial Planning System |
| IS      | = | Intelligent Systems                   |
| ISDN    | = | Integrated Service Digital Network    |
| KPS CAS | = | Kamphaengsaen canal automation system |
| M       | = | Motor,                                |
| MCC     | = | Motor Control Circuit                 |
| MMI     | = | Man Machine Interface                 |
| MPU     | = | Micro-processing Unit                 |
| NSE     | = | Nash-Sutcliffe efficiency coefficient |
| ODBC    | = | Open Data Base Connectivity           |
| OLAP    | = | On-Line Analytical Processing         |
| OLEDB   | = | Linking and Embedding Data Base       |
| OS      | = | Operating System                      |
| OR      | = | operations research                   |
| P       | = | Pressure Type Water Level Sensor      |
| PC      | = | Personal Computer                     |
| PLC     | = | Programmable Logic Controller         |
| PnP     | = | Plug and Play                         |
| PPP     | = | Point-to-Point Protocol               |



### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

|         |   |                                                 |
|---------|---|-------------------------------------------------|
| RMSE    | = | Root Mean Square Error                          |
| SCADA   | = | Supervisory Control And Data Acquisition        |
| SHF     | = | Super high frequency                            |
| SLIP    | = | Serial Line Protocol                            |
| SOC     | = | System-On-Chip                                  |
| SPN CAS | = | Songpheenong Canal Automation System            |
| TCP/IP  | = | Transmission Control Protocol/Internet Protocol |
| TL      | = | Target level                                    |
| TTL     | = | Transistor-transistor logic                     |
| UART    | = | Universal Asynchronous Receiver/Transmitter     |
| UHF     | = | Ultra High Frequency                            |
| UML     | = | Unified Modeling Language                       |
| U/D     | = | Upstream                                        |
| U/S     | = | Downstream                                      |
| VHF     | = | Very High Frequency                             |
| WL      | = | Water level                                     |

## การพัฒนาระบบคลองอัตโนมัติต้นทุนต่ำ

### Development of Low-Cost Canal Automation System

#### คำนำ

การใช้เทคโนโลยีทันสมัยช่วยงานส่งน้ำชลประทานมีความสำคัญและช่วยแก้ปัญหาหลายประการ เช่น ใช้เป็นเครื่องมือแก้ปัญหาการขาดแคลนแรงงานฝีมือเพื่องานส่งน้ำ ควบคุมอุปกรณ์และอาคารบังคับน้ำต่างๆ ในระบบส่งน้ำชลประทานอย่างต่อเนื่อง ลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายสำหรับงานบริหารจัดการน้ำ ใช้ตรวจวัดระดับน้ำในคลอง สั่งเปิด-ปิดบานประตูระบายน้ำระยะไกลได้ทันทีเพื่อป้องกันหรือบรรเทาปัญหาเกี่ยวกับน้ำท่วม ข้อมูลที่ตรวจวัดและบันทึกไว้อย่างต่อเนื่องใช้งานชี้แจงกับผู้ใช้น้ำ ลดการขัดแย้งเรื่องการแบ่งปันน้ำ ระหว่างเกษตรกรหรือกลุ่มบุคคลต่างๆ ระบบคลองอัตโนมัติมีส่วนประกอบพื้นฐานฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ SCADA (supervisory control and data acquisition) สำหรับควบคุมการส่งน้ำในคลองชลประทาน โดยพัฒนาซอฟต์แวร์ขั้นสูงสามารถตัดสินใจการทำงานแบบอัตโนมัติ ควบคุมการจัดสรรน้ำในคลองชลประทานผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์แม้ขาย ซอฟต์แวร์และอุปกรณ์ระบบ SCADA ในปัจจุบันถูกพัฒนาให้มีความชาญฉลาดใช้งานสะดวก เพราะมีการแข่งขันกันระหว่างผู้ผลิตซอฟต์แวร์ มีฟังก์ชันพิเศษน่าสนใจมากขึ้น SCADA จัดเป็นเทคโนโลยีขั้นสูงเหมาะสำหรับการตรวจสอบ และเก็บรวบรวมข้อมูลและการบริหารระบบควบคุมของกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ครอบคลุมพื้นที่กว้าง ใช้ในระบบสาธารณูปโภคต่างๆ เช่น ระบบจ่ายไฟฟ้าและน้ำประปา ระบบท่อส่งก๊าซและน้ำมัน

ในปัจจุบันกรมชลประทานได้นำระบบ SCADA มาใช้ในงานชลประทานหลายแห่ง แต่การใช้งานจริงในประเทศไทยไม่เหมาะสำหรับการควบคุมกระบวนการชนิดสัญญาณต่อเนื่อง การควบคุมกระบวนการแบบติด-ดับของอุปกรณ์ระบบย่อยที่อยู่ห่างไกลเพราะอาจเกิดปัญหาในการสื่อสาร จากการศึกษาพบว่าส่วนประกอบที่สำคัญของคลองอัตโนมัติจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ ที่พบเห็นมากคือใช้หลักการลูกลอยที่มีเสถียรภาพดีกว่าการตรวจวัดระดับน้ำแบบอื่น อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของระบบที่อยู่ห่างไกลจะใช้ PLC (programmable logic control) หรือระบบฝังตัว (embedded system) อย่างไรก็ดีอย่างหนึ่งหรืออาจมีทั้งสองแบบซึ่งภายในจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถโปรแกรมชิพได้เป็นส่วนประกอบสำคัญ นอกจากนั้นแล้วยังต้องมี data logger คอยเก็บข้อมูลควบคุมกันด้วย ระบบการสื่อสารระหว่างสถานีลูกข่ายกับแม่ข่ายจะมีส่วน

สำคัญมากต่อราคาค่าใช้จ่ายของคลองอัตโนมัติ การลดค่าใช้จ่ายของระบบสื่อสารด้วยวิธีใช้เครือข่ายโทรศัพท์มือถือได้ผลดีพอควรแต่เครือข่ายโทรศัพท์จะเน้นให้บริการในเมืองหรือเส้นทางสัญจรทางหลวงต่างๆ ซึ่งพิจารณาได้จากสถานีให้บริการซึ่งในบริเวณที่อยู่ห่างไกลทุรกันดารหรืออยู่ในหุบเขา เครือข่ายโทรศัพท์มือถือยังเข้าไม่ถึงการใช้วิทยุสื่อสารในย่าน VHF UHF ในแบบ packet radio ยังคงใช้กันมาก เช่น โครงการส่งน้ำ Sevier ประเทศสหรัฐอเมริกา นอกจากนั้นแล้วสำหรับบางประเทศที่มีเงินทุนมาก เช่น สหรัฐอเมริกา มาเลเซีย ได้ใช้ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม ซึ่งได้รับผลดีมาก และสำหรับอุปกรณ์ส่วนของสถานีแม่ข่ายส่วนใหญ่จะประกอบด้วยคอมพิวเตอร์แบบ PC อุปกรณ์เชื่อมต่อและซอฟต์แวร์

การซื้ออุปกรณ์ระบบคลองอัตโนมัติทั้งหมดซึ่งเป็นเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อใช้ควบคุมการส่งน้ำในคลองชลประทานต้องใช้เงินมาก หากต้องการประหยัดเงินต้องคิดพัฒนาขึ้นใช้เองโดยให้อุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมีคุณสมบัติตามต้องการและเทียบเคียงกับของต่างประเทศ การเลือกพัฒนาเฉพาะฟังก์ชันที่จำเป็นก่อน จะช่วยลดค่าใช้จ่ายลงได้มาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาอุปกรณ์และการเขียนซอฟต์แวร์ที่มีฟังก์ชันการใช้งานเพียงพอเท่าที่จำเป็นเพื่อให้มีต้นทุนสร้างต่ำโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดระดับน้ำหน้าท้ายประตู ระบายเปิดบานประตู การเปิด-ปิดบานประตูระบายน้ำระยะไกล การควบคุมระดับน้ำหน้าประตูระบายน้ำให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายตลอดระยะเวลาส่งน้ำสำหรับการใช้งานสามารถติดตั้งได้กับประตูระบายน้ำในคลองชลประทานที่ก่อสร้างแล้ว ปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบใช้งานจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเพื่อใช้ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

## วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์รวมงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาอุปกรณ์เพื่อการตรวจวัดระดับน้ำและควบคุมการเปิด-ปิดประตูระบายน้ำโดยติดตั้งเพิ่มที่ประตูระบายน้ำในคลองชลประทานให้ทำงานควบคุมระดับน้ำหน้าประตูระบายน้ำให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายได้แบบอัตโนมัติ มีต้นทุนการสร้างต่ำโดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ภายในประเทศ อุปกรณ์ที่พัฒนานี้มีประโยชน์ใช้เป็นเครื่องมือช่วยให้การจัดการน้ำชลประทานมีประสิทธิภาพมากขึ้น

วัตถุประสงค์หลักงานวิจัยนี้มีขอบเขตการวิจัยประกอบด้วย

1. พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ ระยะการเปิดบานประตูระบายน้ำและการควบคุมการเปิด-ปิดประตูระบายน้ำระยะไกลมีลักษณะการทำงานแบบ real – time
2. พัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมระดับน้ำหน้าประตูระบายน้ำและหน้าสถานีตรวจวัดระดับน้ำปลายคลองส่งน้ำให้อยู่ที่ระดับน้ำเป้าหมายแบบอัตโนมัติ
3. คัดเลือกโครงการชลประทานเพื่อทดสอบการทำงานของอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น
4. ออกแบบอุปกรณ์ ติดตั้งและทดสอบใช้งานของระบบคลองอัตโนมัติต้นทุนต่ำ
5. วิเคราะห์ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือได้ของระบบคลองอัตโนมัติต้นทุนต่ำที่พัฒนาขึ้น
6. วิเคราะห์การลงทุนและปัญหาการใช้งานในสนามของระบบคลองอัตโนมัติต้นทุนต่ำ

## การตรวจเอกสาร

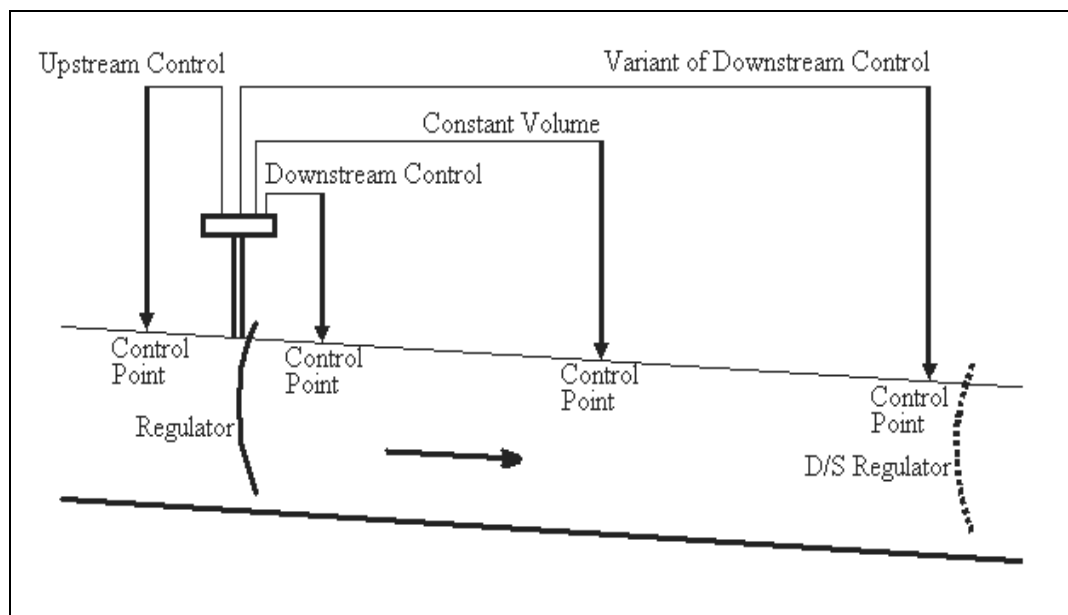
การศึกษาจากหนังสือ เอกสาร งานวิจัย และอุปกรณ์ที่มีใช้งานเป็นแนวทางสำคัญสำหรับพัฒนาอุปกรณ์ระบบคลองอัตโนมัติต้นทุนต่ำ แนวทางการศึกษาจัดแบ่งหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

### 1. การควบคุมบังคับน้ำ (Flow Control)

เครื่องมือที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงสำหรับงานควบคุมระดับน้ำหน้าประตูระบายน้ำชลประทาน ซึ่งช่วยให้ผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานดีขึ้นโดยอาศัยข้อมูลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วแบบ real time เช่น โทรมาตร (telemetry) ใช้ตรวจวัดในระยะไกลให้ข้อมูล real time แต่การควบคุมการเปิด-ปิดประตูระบายน้ำชลประทานยังใช้พนักงาน แต่ถ้าเครื่องมือนั้นสามารถควบคุมการเปิด-ปิดประตูระบายน้ำหรืออุปกรณ์อื่นได้โดยอาศัยคนควบคุมที่ไม่ใช่ผู้เชี่ยวชาญและยังไม่มีระบบตัดสินใจอัตโนมัติเรียกว่า tele-control เทคโนโลยีที่ก้าวหน้ากว่าคือ SCADA (supervisory control and data acquisition) เป็นเครื่องมือตรวจวัดระดับน้ำและควบคุมการเปิด – ปิด ประตูระบายน้ำระยะไกล มีองค์ประกอบสำคัญคือ ระบบตรวจวัด ระบบสื่อสาร ระบบตัดสินใจ และระบบควบคุมระยะไกล โดยผู้เชี่ยวชาญ ปัจจุบันกรมชลประทานได้นำระบบ SCADA มาใช้ในโครงการชลประทานมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการส่งน้ำชลประทานให้ทันต่อสถานการณ์ ลดปัญหาการขาดแคลนแรงงานฝีมือในการเก็บ บันทึกรายการ วิเคราะห์ข้อมูล และการเปิด-ปิดประตูระบายน้ำ

การควบคุมน้ำในคลองชลประทานมีวัตถุประสงค์เพื่อส่งน้ำในปริมาณที่เหมาะสม ให้กับเกษตรกรหรือพื้นที่ในเวลาที่เหมาะสม ให้การส่งน้ำที่มีประสิทธิภาพ (efficiency) และมีความน่าเชื่อถือได้ (reliability) สูง ใช้งานง่าย (simplicity) ราคาถูก (low cost operation) และสามารถปรับตัวเองให้เข้ากับสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ (flexibility) (Plusquellec, 1988) หลักการพื้นฐานในการควบคุมน้ำในคลองชลประทานได้แก่ การควบคุมปริมาณการไหล (Flow Control) และการควบคุมระดับน้ำ (water level control) ปริมาณการไหลของน้ำผ่าน ประตู มีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับน้ำในคลอง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องควบคุมทั้งระดับน้ำและปริมาณการไหลควบคู่กันไป จึงจะสามารถส่งน้ำได้ตามต้องการ การควบคุมระดับน้ำในคลองจะเริ่มจากการควบคุมระดับน้ำในคลองสายใหญ่ให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายก่อน แล้วจึงปรับ ประตู ปากคลองซอยให้น้ำไหลเข้าคลองตามที่ต้องการ ถ้าใช้คนควบคุมจะต้องใช้คนจำนวนมาก และจะทำให้เฉพาะระบบคลองที่มีการใช้น้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วนัก

ได้มีการพัฒนาวิธีการควบคุมระดับน้ำในคลองชลประทานเพื่อเพิ่มความคล่องตัว (Flexibility) ในการส่งน้ำได้แก่ การควบคุมระดับน้ำด้านเหนือน้ำ ปตร. (upstream control) การควบคุมระดับน้ำด้านท้ายน้ำ ปตร. (downstream control) การควบคุมปริมาตรน้ำในช่วงคลองคงที่ (constant volume) และการควบคุมแบบยอมให้ระดับน้ำท้ายน้ำเปลี่ยนแปลงได้ (variant of downstream control) วิธีการควบคุมระดับน้ำดังกล่าวขึ้นอยู่กับจุดที่ต้องการควบคุมระดับน้ำ (control point) เป็นสำคัญ วิธีการควบคุมเหนือน้ำจะกำหนดจุดควบคุมที่ด้านเหนือน้ำใกล้ ปตร. โดยออกแบบคันคลองขนานกับคันคลองที่อัตราการไหลสูงสุด ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่ปฏิบัติกันโดยทั่วไป วิธีการควบคุมท้ายน้ำจะกำหนดจุดควบคุมระดับน้ำท้ายน้ำใกล้ ปตร. จึงต้องออกแบบคันคลองให้อยู่ในแนวราบที่อัตราการไหลเป็นศูนย์ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างคลองมากขึ้น จึงยังไม่มีกรนำมาใช้ในประเทศไทย วิธีการควบคุมปริมาตรคงที่ จะกำหนดจุดควบคุมระดับน้ำอยู่ด้านท้าย ปตร. บริเวณกึ่งกลางช่วงคลองซึ่งจะช่วยประหยัดค่าก่อสร้างเมื่อเทียบกับแบบควบคุมท้ายน้ำ และวิธีสุดท้ายคือวิธีการควบคุมแบบยอมให้ระดับน้ำท้ายน้ำเปลี่ยนแปลง จะกำหนดจุดควบคุมท้ายน้ำอยู่ปลายสุดของช่วงคลอง หรือใกล้ ปตร. ท้ายน้ำถัดไป วิธีนี้ทำให้ไม่ต้องเสียค่าก่อสร้างคลองเพิ่มเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีควบคุมท้ายน้ำ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วิธีการควบคุมระดับน้ำในคลองชลประทาน

วิธีการควบคุมระดับน้ำ นอกจากจะแบ่งตามจุดที่ต้องการควบคุม (control points) แล้ว ยังอาจแบ่งตามลักษณะของการควบคุมออกได้เป็น 3 วิธีคือ การควบคุมเฉพาะจุด (local control) การควบคุมเฉพาะจุดระยะไกล (remote localized control) และการควบคุมจากศูนย์กลางระยะไกล (remote centralized control) วิธีการควบคุมเฉพาะจุด เป้าหมายของการควบคุมจะอยู่ใกล้ ประตู. วิธีการควบคุมเฉพาะจุดระยะไกลเป้าหมายของการควบคุมจะอยู่ห่างไกลจาก ประตู. แต่ทั้งสองวิธีจะควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดโดยอาจควบคุมโดยคนหรือใช้อุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติก็ได้ และวิธีสุดท้ายคือวิธีการควบคุมจากศูนย์กลางระยะไกลซึ่งจะต้องมีการส่งข้อมูลความต้องการน้ำ ระดับน้ำ ขนาดการเปิดบานของ ประตู. ต่างๆ และปริมาตรน้ำในอ่างเก็บน้ำเข้าสู่ศูนย์ควบคุม ซึ่งศูนย์ประมวลผลข้อมูล แล้วส่งคำสั่งการควบคุม ประตู. ต่างๆ ทั้งคลองพร้อมกัน

การควบคุมในลักษณะดังกล่าวแล้วจะประสบความสำเร็จ ก็ต่อเมื่อเป็นระบบคลองอัตโนมัติ(CAS) หรือระบบ SCADA โดยควบคุมเฉพาะจุดด้วยวิธีควบคุมระดับน้ำเหนือน้ำ และวิธีการควบคุมระดับน้ำท้ายน้ำ ซึ่งวิธีแรกมีข้อเสียที่ตอบสนองต่อความต้องการได้ช้า และมีการสูญเสียจากการปฏิบัติงาน (operation losses) เนื่องจากต้องมีการวางแผนการส่งน้ำล่วงหน้า ดังนั้นถ้ามีฝนตกหรือเกษตรกรไม่ต้องการใช้น้ำจะมีน้ำเหลือทิ้ง ขณะที่วิธีการควบคุมระดับน้ำท้ายน้ำมีข้อดีคือตอบสนองต่อความต้องการได้รวดเร็ว และแม่นยำ ลดการสูญเสียจากการปฏิบัติงาน และลดความต้องการเจ้าหน้าที่สนาม แต่ต้องใช้ ประตู. ที่ทำงานอัตโนมัติตามการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและมีการออกแบบคลองเป็นพิเศษคือคันในแต่ละช่วงคลองอยู่ในแนวระดับเพื่อให้สามารถเก็บกักน้ำส่วนเกินไว้ในคลองได้ แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือถ้าน้ำไม่พอ น้ำจะถูกระบายจากเหนือน้ำสู่ท้ายน้ำ และเพื่อแก้ปัญหาข้อเสียของวิธีควบคุมเหนือน้ำและวิธีการควบคุมท้ายน้ำ ได้มีการพัฒนา ประตู. แบบพิเศษ ซึ่งจะเปลี่ยนการควบคุมจากควบคุมท้ายน้ำเป็นควบคุมเหนือน้ำถ้าระดับน้ำ ด้านเหนือน้ำต่ำกว่าระดับที่กำหนด ประตู. แบบนี้เรียกว่า composite gate นอกจากนี้ ได้มีการพัฒนาวิธีการควบคุมทั้งเหนือน้ำและท้ายน้ำร่วมกัน โดยใช้วิธีการควบคุมเหนือน้ำในช่วงต้นคลอง และวิธีควบคุมท้ายน้ำในช่วงท้ายคลองโดยมีอ่างเก็บน้ำอยู่ตรงจุดเชื่อมต่อระหว่างวิธีการควบคุมน้ำทั้ง 2 วิธี เพื่อเก็บกักน้ำส่วนเกินแล้วค่อยระบายออกตามความต้องการทางด้านท้ายน้ำ เช่น โครงการ Doukkala และ Beni-Amir ในประเทศมอริสโก (Plusquellec, 1988)

1.1 การควบคุมระบบคลองแบบ HY-FLO (hydraulic filter offset method) ระยะการเปิดบานประตูระบายน้ำจะควบคุมระดับน้ำด้านท้ายประตู ถ้าระดับน้ำด้านท้ายประตูลดต่ำกว่าระดับที่กำหนดประตูจะเปิดบานขึ้นเพื่อเพิ่มระดับน้ำด้านท้ายและทางกลับกันประตูจะลดบานลงถ้าระดับ

น้ำด้านท้ายสูงกว่าระดับที่กำหนด (Ploss, 1987) และในเวลาต่อมาได้นำวิธีการตรวจวัดโดยเครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์และใช้ชื่อการควบคุมใหม่นี้ว่า EL-FLO plus Reset ทำให้การควบคุมคลองอัตโนมัติทำได้ดียิ่งขึ้น Pongput (1994) ได้เปรียบเทียบระยะเวลาการทำให้ระบบคลองเข้าสู่ steady-state ซึ่งพบว่าระบบ BIVAL ที่พัฒนาโดย Chevereau and Schwartz-Benezeth (1987) ซึ่งเป็นระบบที่ประสบความสำเร็จมากที่สุดในสนามซึ่งระบบนี้มีวิธีการที่เรียกว่า constant downstream volume system คือการตรวจวัดระดับน้ำและควบคุมทางท้ายน้ำ ประตุนิรบายน้ำที่อยู่ต้นน้ำจะระบายน้ำให้ระดับน้ำที่อยู่หน้าประตูถัดไปมีค่าระดับน้ำเท่ากับค่าที่กำหนด การทำงานนี้จะมีลักษณะเดียวกันทั้งคลอง

1.2 การควบคุมคลองแบบ CARDD โดย Burt (1983) ได้พัฒนาระบบการควบคุมคลองแบบ CARDD โดยใช้ การตรวจวัดหลายแห่งพร้อมกันและควบคุมแบบ downstream waterlevel control แต่วิธีการนี้จะใช้เวลามากสำหรับการเข้าสู่สภาวะ steady-state เมื่อเทียบกับวิธีการอื่น Zimbelman and Bedworth (1983) ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการควบคุมจากคอมพิวเตอร์ศูนย์กลาง มีหลักการควบคุมแบบ downstream control ประตุนิรบายน้ำด้านเหนือน้ำจะควบคุมระดับทางด้านท้ายน้ำให้เข้าระดับน้ำเป้าหมายโดยการปรับบานประตูเรียกการควบคุมนี้ว่า dead band or tolerance in control routine คือถ้าระดับน้ำท้ายน้ำอยู่ในช่วงที่มีค่าระดับยอมรับได้โดยมีความผิดพลาดไม่เกินค่ากำหนด เครื่องจะไม่ทำงานและรอจนกว่าระดับน้ำไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวจึงเริ่มทำงานใหม่ Shanan (1992) อธิบายว่าการส่งน้ำชลประทานเพื่อเพิ่มผลผลิตอาหารสำหรับเลี้ยงประชากรเป็นเหตุทำให้เกิดภาวะขาดแคลนพื้นที่และน้ำสำหรับเพาะปลูก การพิจารณาระบบชลประทานที่สร้างแล้วในขอบเขตลุ่มน้ำเพื่อพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพการชลประทานมีความจำเป็นมาก ดังนั้นการปรับปรุงระบบบริหารจัดการน้ำโดยใช้เทคโนโลยีทันสมัยทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ การปรับเปลี่ยนกระบวนการส่งน้ำแบบใหม่ การปรับปรุงนี้จะเน้นที่คุณภาพการบริการให้กับเกษตรกรเป้าหมาย Seckler (1996) และ Uittenbogaard and Kuiper (1993) อธิบายว่าการมุ่งเน้นปรับปรุงการบริหารจัดการแบบทันสมัยจะไม่สามารถกำหนดการทำงานที่ละเอียดได้ทั้งระบบแต่การปรับวิธีการที่เคยใช้มานานแล้วให้เกิดประโยชน์มีความเหมาะสมมากกว่า

Skogerboe and Merkley (1996) และ Malaterre (1995) ได้จัดลำดับชั้นของระบบชลประทานโดยแนะนำให้ใช้วิธีการจัดแบ่งตามขอบเขตที่ทางรัฐกำหนด การแบ่งชั้นของระบบชลประทานถือเป็นเรื่องที่สำคัญสำหรับการจัดการระบบคลองอัตโนมัติ Boss and Nugteren (1974) และ Manz (1987a) ได้เน้นความเหมือนกันของระบบชลประทานแต่แยกพิจารณาเฉพาะความแตกต่าง



แบ่งลำดับความสำคัญของคลองส่งน้ำ Manz (1987b) แยกลำดับชั้นของระบบชลประทานตาม ส่วนประกอบพื้นฐาน คือฟังก์ชันการบริหารจัดการ อาคารแบ่งน้ำ ความลึกของน้ำ การควบคุม การส่งน้ำ และกักเก็บน้ำ Clemmens (1987) ให้มีศัพท์และวิธีการเฉพาะสำหรับการส่งน้ำที่แตกต่างกัน paudyal and Loof (1988) ได้จัดแบ่งระดับชั้นระบบชลประทานหลักซึ่งมีความจำเป็นอย่างมาก

Ankum (1992a) ได้รวมสภาวะการไหลของน้ำเข้ากับความต้องการน้ำที่พอเพียงสำหรับการใช้โดยเปรียบเทียบวิธีส่งน้ำแบบต่างๆ Sagardoy *et al.* (1982) อธิบายว่าให้จ่ายน้ำให้กับเกษตรกรเฉพาะส่วนที่ไม่พอเท่านั้น Burt (1987) ให้การควบคุมส่งน้ำโดยเลือกข้อเด่นการควบคุมระดับน้ำ และการควบคุมการกักเก็บน้ำ Ankum (1992b) แนะนำการควบคุมการไหลในลำดับชั้นของระบบให้เป็นไปตามขอบเขตที่บริหารจัดการ Uppal and Albinson (1986) รวมลักษณะเด่นทางไฮดรอลิกเข้ากับคุณสมบัติคลองส่งน้ำเป็นการปรับเข้าหากันระหว่างทฤษฎีกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงในสนาม Plusquellec *et al.* (1994) ได้กำหนดปัจจัยสำหรับนำมาใช้ควบคุมการส่งน้ำในคลองชลประทาน Kosuth (1996) ได้คัดเลือกปัจจัยต่าง ๆ ที่ต้องนำมาพิจารณาสำหรับควบคุมการส่งน้ำที่เด่นชัดคือ ขนาดคลอง เวลา การเป็นอิสระจากกันหรือไม่ ผลกระทบจากภายในระบบเองในระหว่างการส่งน้ำ ความหลากหลายของเกษตรกรในเขตรับน้ำ Renault and Godaliyadda (1999) อธิบายกระบวนการพื้นฐานของระบบควบคุมคลองแบบอัตโนมัติ ประกอบด้วยส่วนรับข้อมูลระดับน้ำ ค่าการระบายน้ำ ส่งข้อมูลให้ประตุน้ำได้โดยตรงปรับบานประตูให้ระบายน้ำตามต้องการ ในส่วน operation ส่งคำสั่งข้อมูลควบคุมผ่านการสื่อสาร และรับข้อมูลเพื่อเฝ้ามองการทำงานทั้งระบบ สามารถส่งคำสั่งเพื่อปรับประตุน้ำได้โดยตรงหรืออาจปล่อยให้ประตุน้ำปรับบานแบบอัตโนมัติเอง

1.3 การควบคุมคลองอัตโนมัติ Rey *et al.* (1996) ได้พิจารณาควบคุมคลองอัตโนมัติโดยมองว่าระบบดังกล่าวเป็นเครื่องจักรในโรงงานที่มีกระบวนการต่างๆ อย่างมีระเบียบตามที่ระบบจัดการไว้ในโรงงานที่มีเครื่องจักรทันสมัยจะประกอบด้วยอุปกรณ์ PLC หรือระบบฝังตัว หรืออาจมีทั้งสองอย่างซึ่งเหมือนกับระบบเครื่องจักรในโรงงาน Rogier, Coeuret and Bremond (1987) แนะนำให้ควบคุมคลองอัตโนมัติแบบ dynamic volume control และ Frederiksen (1985) ได้ยกตัวอย่างโครงการปรับปรุงระบบชลประทาน Sardar Sarovar เมือง Gujarat ในประเทศอินเดีย และ Majalgaon Project เมือง Maharashtra ประเทศอินเดียเช่นกัน Rousset (1990); Lele and Patil (1993) ให้ตัวอย่างโครงการ Krisha Project เมือง Kamataka ประเทศอินเดีย Plusquellec (1988) อธิบายว่าการชลประทานที่อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกจะอยู่บนพื้นฐานการควบคุมแบบเหนือน้ำ การควบคุม

โดยอาศัยระดับน้ำที่อยู่ด้านหน้าอาคารบังคับน้ำต่างๆ แต่การควบคุมการใช้น้ำทางด้านท้ายน้ำจะให้ผลดีมากเช่นกัน Plusquellec, Burt, and Wolter (1994) อธิบายว่าระบบคลองอัตโนมัติควบคุมแบบท้ายน้ำจะตอบสนองการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความต้องการน้ำที่เกษตรกรใช้จะช่วยลดการสูญเสียได้ดี แต่มีข้อสังเกตว่าระดับท้องคลองต้องอยู่ในแนวราบและคลองต้องมีเนื้อที่ว่างพอที่จะรับน้ำสำหรับการควบคุมแบบท้ายน้ำ Goussard (1987) อธิบายว่าระบบอัตโนมัติ หรือกึ่งอัตโนมัติ สำหรับคลองอัตโนมัติส่วนใหญ่ควบคุมระดับน้ำโดยวิธีการปรับบานประตูระบายน้ำ

Clemmens and Replogle (1987) อธิบายว่าประตูระบายน้ำบางชนิดใช้แบบแมคคานิค โดยอาศัยพลังงานจากน้ำคือใช้ลูกกลอยปรับระดับน้ำ Burt and Plusquellec (1990) ได้ยกกระดပ်และปรับปรุงระบบที่มีลักษณะควบคุมน้ำแบบตายตัว Walker (1987) จัดทำอาคารบังคับน้ำแบบฝ่ายที่มีการระบายน้ำแบบตายตัว Plusquellec (1988) อธิบายว่าการควบคุมแบบเหนือน้ำและการส่งน้ำแบบพอเพียงสามารถทำได้กับโครงการชลประทานที่ส่งน้ำแบบหมุนเวียน O'Mara (1988) อธิบายว่าการใช้เครื่องสูบน้ำสำหรับการชลประทาน ควบคุมง่าย สามารถใช้ได้ทั้งน้ำในคลองหรือน้ำใต้ดินในประเทศอินเดียในแต่ละปีมีการใช้เครื่องสูบน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 13% Moench (1996) อธิบายว่าเครื่องสูบน้ำสามารถควบคุมการไหลของน้ำได้ง่ายทำได้กับทุกที่ ทำให้ได้รับความนิยมจากเกษตรกรในประเทศอินเดีย Vander and Kijne (1992) อธิบายว่าในประเทศปากีสถานใช้เครื่องสูบน้ำกันมากขึ้นมีปริมาณท่อสูบน้ำแบบบ่อน้ำตื้นประมาณ 300,000 แห่งในปี 1992 และ Strosser and Kuper (1994) อธิบายว่าการใช้เครื่องสูบน้ำมีผลโดยตรงกับโครงข่ายน้ำใต้ดินทั้งนี้เนื่องจากการเจาะบ่อน้ำบาดาลที่หนาแน่น Hunter *et al.* (1993) อธิบายว่าการขึ้น-ลงของระดับน้ำในคลองส่งน้ำและอัตราการไหลของน้ำจะต้องนำมาพิจารณาสำหรับระบบควบคุมด้วยความหลากหลายของนโยบายที่ยืดหยุ่นได้มากหรือไม่ยืดหยุ่นเลยจัดให้เป็นค่าตัวแปรสำหรับใช้ควบคุมระบบเช่นกัน Clemmens (1987) อธิบายว่าสำหรับการส่งน้ำที่มีการวางแผนไว้ต้องยืดหยุ่นให้มาก

Steiner and Walter (1993) ให้ข้อกำหนดการใช้ปัจจัยข้อมูลต่างๆ สำหรับควบคุมการส่งน้ำ Palmer *et al.* (1989) อธิบายว่าการส่งน้ำที่มีแบบแผนต้องให้การไหลเข้าสู่สถานะ steady state การส่งน้ำในโครงการชลประทานที่เคยชินกันมาคือการปรับระดับน้ำที่ส่งให้กับเกษตรกรแบบคงที่ Johnson (1997) ได้ยกตัวอย่างโครงการชลประทานในประเทศเม็กซิโกที่ให้ความสมดุลระหว่างหน่วยงานที่ควบคุมระบบกับการตอบสนองของผู้ใช้น้ำ การควบคุมบังคับน้ำเป็นการปฏิบัติงานร่วมกัน (interaction) ของ physical facilities การวางแผนและการออกแบบระบบส่งน้ำควรพิจารณาจากแปลงนาขึ้นไปจนถึงแหล่งน้ำ ข้อมูลที่ใช้ในการวางแผน ได้แก่ ดิน ภูมิอากาศ พืช และเกษตรกร

กับพื้นที่เพาะปลูกของเขา ระบบส่งน้ำที่วางแผนไว้จะต้องสามารถส่งน้ำในปริมาณที่กำหนดไปยังแต่ละแปลงนา และต้องสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณได้ตามเวลาที่ต้องการด้วย ทั้งนี้เพื่อให้ปริมาณน้ำที่ให้แก่พื้นที่เพาะปลูกเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อความต้องการของพืชและเป็นการประหยัดจุดประสงค์ของการชลประทาน เพื่อการส่งน้ำให้แก่พืชตามปริมาณที่พืชต้องการ ในแต่ละช่วงเวลาการเติบโต ดังนั้นการส่งน้ำที่ดีจึงต้องสามารถที่จะควบคุมปริมาณน้ำของคลองแต่ละคลองในทุกๆ ขณะ เพื่อคลื่อนั้นสามารถส่งน้ำให้แก่พื้นที่ได้ หรือการตอบสนองต่อความต้องการน้ำของพืชต้องเป็นไปอย่างเฉียบพลัน ปริมาณน้ำจะไหลเป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้น้ำนั้น ระดับน้ำก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องควบคุม ทั้งนี้ด้วยเหตุผลสำคัญ คือให้ระดับน้ำในคลองอยู่ในระดับสูงเท่าที่จะทำได้ โดยประหยัดพอที่จะส่งให้แก่พื้นที่ทั้งหมด และเพื่อควบคุมการแปรเปลี่ยนของระดับน้ำในคลองโดยไม่ให้ลดต่ำลงมาก เพื่อป้องกันการพังทลายของลาดตลิ่งคลอง และเพื่อการเก็บกักน้ำในคลองไม่ให้สูงเกินไปไม่ล้นข้ามคันคลอง ให้อยู่ในขอบเขตจำกัดเพื่อประโยชน์ในการรักษาอัตราการไหลของปริมาณน้ำผ่านท่อส่งน้ำเข้านาให้คงที่

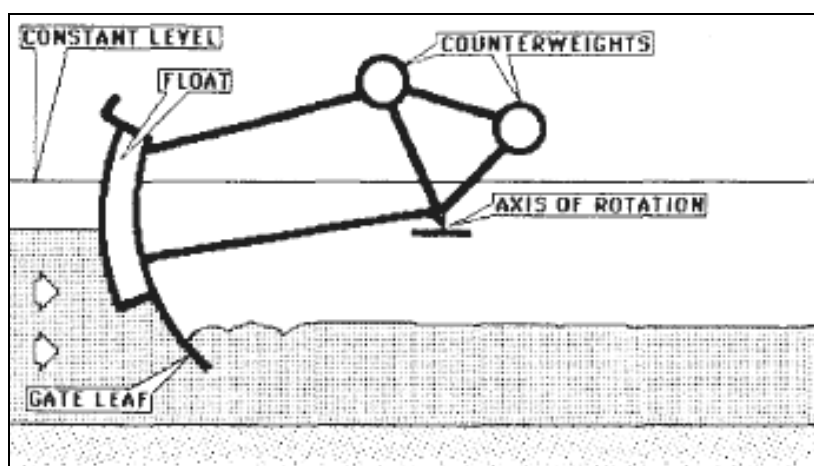
1.4 การควบคุมด้านเหนือน้ำ (upstream control) น้ำจากแหล่งน้ำจะถูกส่งเข้าคลองส่งน้ำสายใหญ่ตามปริมาณที่กำหนดไว้ก่อน ปริมาณน้ำที่กำหนดเป็นไปตามแผนการส่งน้ำ (irrigation program) ส่วนการแบ่งสรรน้ำในคลองซอย และคูน้ำจะเป็นไปตามปริมาณน้ำที่ต้องการ อาคารชลประทานออกแบบให้ควบคุมระดับน้ำด้านเหนือน้ำให้คงที่ และเป็นไปตามที่กำหนดไว้ การกำหนดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านโดยการเปิด-ปิดประตูระบายทั้งแบบควบคุมด้วยมือ (manual) และแบบอัตโนมัติ โดยใช้ stop log, slide gates และ radial gates ในระบบนี้ปริมาณน้ำในคลองส่งน้ำจะคงที่ ไม่ว่าอัตราการไหลในแต่ละส่วนของคลองจะแปรเปลี่ยนไป ระบบการควบคุมด้านเหนือน้ำเหมาะสมกับโครงการชลประทานซึ่งมีน้ำต้นทุนจำกัด

1.5 การควบคุมด้านท้ายน้ำ (downstream control) เป็นการส่งน้ำโดยผู้ใช้น้ำแต่ละรายควบคุมปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ทางด้านท้ายน้ำ การส่งน้ำด้วยระบบการควบคุมด้านท้ายน้ำคลองส่งน้ำต้องมีขนาดใหญ่รองรับความต้องการน้ำได้อย่างพอเพียงทุกช่วงเวลาที่ต้องการ

1.6 อาคารควบคุมการไหลของน้ำโดยอัตโนมัติแบบแมคคานิค (hydro-mechanical automatic flow control) เนื่องจากการควบคุมการไหลของน้ำโดยการใช้นักเปิด-ปิดบานต่างๆ ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายเดินทางปรับบานประตูขึ้นลงจนกว่าจะได้ระดับน้ำตามต้องการ ความผิดพลาดเนื่องจากการปรับบานซึ่งเกิดจากระยะทางที่ห่างไกลของอาคารกับหัวงาน ทำให้การเปิด-ปิดบาน

ไม่เป็นไปตามกำหนด และมีโอกาสทำให้น้ำล้นคลองเกิดการเสียหายแก่คลองส่งน้ำได้ ในการใช้ระบบการควบคุมการไหลของน้ำโดยอัตโนมัติแบบแมคคานิค เพื่อช่วยในการประหยัดกำลังคน และป้องกันการสูญเสียน้ำ ทำให้การส่งน้ำเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพขึ้น

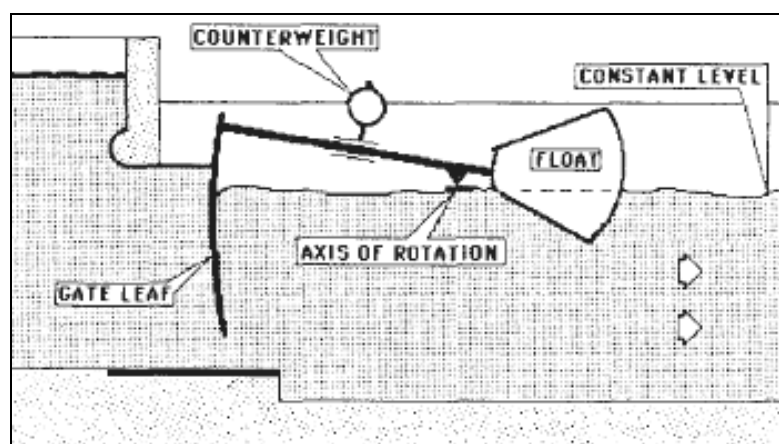
1.6.1 อาคารควบคุมน้ำด้านเหนือน้ำคงที่ (hydro-mechanical devices for automatic control of constant upstream water level) ระบบนี้จะมีอาคารซึ่งมีบานแบบควบคุมน้ำด้านเหนือน้ำอัตโนมัติ (AMIL) แสดงในภาพที่ 2 หรืออาจจะใช้ฝายซึ่งมีสันยาวหรือฝายซึ่งมีสันฝายเฉียงกับลำน้ำ เพื่อควบคุมระดับน้ำในคลองเป็นช่วง ๆ ทั้งนี้อาคารดังกล่าวจะควบคุมให้การเปลี่ยนแปลงของระดับด้านเหนือน้ำเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ไม่ว่าปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจะแปรเปลี่ยนไปอย่างไร ระยะห่างของอาคารจะขึ้นอยู่กับความลาดเทของคลองและขนาดของท่อแยกออกจากคลองส่งน้ำ การควบคุมที่ประตูระบายปากคลองโดยแรงคน ส่วนการแบ่งปริมาณน้ำในคลองซอยและคูน้ำจะส่งให้ตามความต้องการ



ภาพที่ 2 AMIL ประตูควบคุมน้ำด้านเหนือน้ำ

1.6.2 อาคารควบคุมน้ำด้านท้ายน้ำคงที่ (hydro-mechanical devices for automatic control of constant downstream water level) ระบบควบคุมน้ำด้านท้ายน้ำคงที่ที่ปริมาณน้ำที่ไหลถูกควบคุมจากการใช้น้ำ ความต้องการน้ำที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งจะถูกถ่ายทอดต่อเนื่องถึงปากคลองสายใหญ่ และระบบทั้งระบบจะปรับตัวตามความต้องการใช้น้ำ การถ่ายทอดความต้องการน้ำโดยติดตั้ง constant downstream level gate เช่น AVIO (ภาพที่ 3) หรือ AVIS เป็นระยะ ๆ ตลอดความยาวคลอง เมื่อเกิดการเปิดน้ำออก ณ ช่วงใดของคลอง บานที่อยู่เหนือน้ำของคลองช่วงนั้นจะเปิด

ขึ้นให้น้ำไหลเพิ่มเพื่อชดเชยระดับที่ลดลงไป จนถึงปากคลองสายใหญ่ในทางกลับกัน การความต้องการน้ำลดลงบานประตูทุก ๆ บานจะปรับลดลงตามลำดับ



ภาพที่ 3 AVIO ประตูควบคุมระดับน้ำด้านท้ายน้ำ

1.7 ระบบควบคุมวงเปิด (open-loop control systems) ระบบควบคุมแบบนี้จะพยายามปรับสภาพกระบวนการหรือรักษาสภาพการทำงานของกระบวนการให้มีค่าเป็นไปตามที่ตั้งไว้ทางอินพุต (set point) หรือให้มีเป้าหมายเป็นไปตามที่ผู้ควบคุมกระบวนการต้องการ การควบคุมลักษณะนี้ สภาพกระบวนการของระบบสามารถเป็นไปตามค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้จากอินพุตได้ โดยไม่มีการวัดหรือตรวจสอบสภาพกระบวนการที่เอาต์พุตของระบบ จากผังสัญญาณของระบบมีการส่งผ่านสัญญาณอินพุตเป็นลำดับไปยังเอาต์พุต โดยไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของระบบป้อนสัญญาณกลับมายังอินพุตอีกเลย ตัวอย่างการควบคุมระบบแสงสว่างทางเดินหรือตามท้องถนนแบบตั้งเวลาเปิด-ปิด แสดงถึงลักษณะการควบคุมแบบวงเปิด เป้าหมายที่ต้องการของระบบควบคุมแสงสว่างแบบนี้ คือ เมื่อถึงเวลากลางคืนแสงมีลดลง ระบบควบคุมแสงสว่างจะทำงานเปิดหลอดไฟตามทางเดินให้สว่างขึ้น และเมื่อถึงตอนเช้าหลอดไฟจะต้องดับลง การทำงานของระบบจะถูกควบคุมโดยสัญญาณควบคุมจากสวิทช์ซึ่งทำหน้าที่เปิด-ปิดหลอดไฟตามช่วงเวลาที่ได้ตั้งค่าไว้ในช่วงเช้าและช่วงเย็น โดยใช้อุปกรณ์ตั้งเวลา การทำงานของระบบควบคุมแสงสว่างทางเดินแบบตั้งเวลาเปิด-ปิดนี้มีช่วงเวลาที่เหมาะสมเพียงไม่กี่อาทิตย์เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากช่วงเวลากลางวันและช่วงเวลากลางคืนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดปีทำให้ช่วงเวลาที่ได้ตั้งค่าในการเปิด-ปิดหลอดไฟ อาจช้าหรือเร็วเกินไป ไม่สอดคล้องกับแสงสว่างทางเดินที่ต้องการ ข้อเสียอีกประการหนึ่งที่พบในการควบคุมระบบแบบนี้ ก็คือจำเป็นต้องมีผู้ควบคุมระบบอย่างน้อยหนึ่งคนในการตรวจสอบการทำงาน และยังต้องมีการปรับแต่งค่าเวลา

ดังกล่าวอีกด้วย สรุปได้ว่าระบบควบคุมวงเปิดเป็นระบบควบคุมพื้นฐานที่มีรูปแบบง่าย การออกแบบระบบไม่ซับซ้อน มีราคาไม่แพงมากนัก แต่ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบค่อนข้างต่ำ ต้องการผู้ควบคุมเข้าไปทำการตรวจสอบ หรือปรับแต่งระบบบ่อยครั้ง และเนื่องจากสภาพกระบวนการของระบบมักมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมภายนอกต่างๆ ที่มากระทบกับระบบ จำเป็นต้องมีการปรับแต่งค่าอินพุตของระบบที่ตั้งไว้อยู่เสมอ และต้องอาศัยประสบการณ์ ความชำนาญในการปรับแต่งค่าเพื่อให้ระบบมีสภาพการทำงานเป็นไปอย่างถูกต้องตามที่ต้องการ นอกจากนี้ระบบควบคุมวงเปิดยังไม่เหมาะสมกับกรณีของกระบวนการที่มีตัวแปรนอกเหนือจากการควบคุมซึ่งหากเกิดขึ้นแล้วก่อให้เกิดความเสียหาย

1.8 ระบบควบคุมวงปิด (close-loop control systems) มีองค์ประกอบของระบบต่างจากระบบควบคุมวงเปิด โดยมีการเพิ่มส่วนของระบบการวัดเพื่อทำหน้าที่วัดและตรวจสอบค่าตัวแปรเอาต์พุตหรือสภาพกระบวนการทางด้านเอาต์พุตของระบบแล้วนำสัญญาณป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้เป็นสัญญาณอ้างอิงทางอินพุตอีก จึงทำให้สภาพกระบวนการของระบบทางด้านเอาต์พุตมีผลโดยตรงกับเงื่อนไขทางอินพุต สัญญาณอ้างอิง (reference signal) หรือค่าที่ตั้งไว้ (set point) เป็นเป้าหมายในการควบคุมระบบให้มีสภาพกระบวนการเป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งสัญญาณส่วนนี้จะถูกอุปกรณ์เปรียบเทียบ (comparator) นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณป้อนกลับ (feedback signal) ที่ได้จากระบบการวัด โดยผลต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณป้อนกลับที่ได้เรียกว่า สัญญาณคลาดเคลื่อน (error signal) จากนั้นอุปกรณ์ควบคุมจะนำสัญญาณคลาดเคลื่อนนี้ไปปรับแต่งให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม แล้วสร้างเป็นสัญญาณควบคุม (control signal) เพื่อปรับการทำงานของระบบให้สภาพกระบวนการทางด้านเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง จนกระทั่งสัญญาณป้อนกลับที่ได้จากระบบการวัดค่าเข้าใกล้สัญญาณอ้างอิง สัญญาณคลาดเคลื่อนมีค่าเป็นศูนย์ หรือการสภาพกระบวนการของระบบเข้าสู่เป้าหมายในการควบคุม

เนื่องจากระบบควบคุมวงปิดมีการตรวจสอบและปรับสภาพกระบวนการด้วยการทำงาน ของระบบเอง ทำให้ข้อผิดพลาดในการควบคุมเกิดขึ้นน้อยกว่าระบบควบคุมแบบวงเปิด ระบบควบคุมแบบนี้จึงมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงกว่าระบบควบคุมวงเปิด บางครั้งมักนิยมเรียกระบบควบคุม ในลักษณะนี้ว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติ (automatic system) หรือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control system) อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบควบคุมแบบนี้ ก็คือ มีราคาแพง และ มีความซับซ้อนมากกว่าระบบควบคุมแบบวงเปิด อนุชา (2548) อธิบายว่าวงจรควบคุมแบบวงปิด ในรูปแบบมาตรฐานที่สามารถใช้กับสัญญาณหรืออุปกรณ์ประเภทใดก็ได้ โดยมาตรฐาน DIN

19226 closed - loop and open – loop control technology ประกอบด้วยตัวแปรที่ถูกควบคุม (controlled variable) จะเป็นตัวแปรเอาต์พุตของวงจรควบคุมแบบวงปิด หรือเรียกว่า ค่าที่เกิดขึ้นจริง (actual value) ตัวแปรอ้างอิง (reference variable) จะแสดงถึงค่าตัวแปรที่ถูกควบคุมจะต้องถูกสมมติทำให้เกิดขึ้น ในบางครั้งตัวแปรอ้างอิงก็มักจะถูกเรียกว่า ค่าเป้าหมาย (set point value) ตัวแปรป้อนกลับ (feedback variable) หมายถึง ค่าที่วัดได้จากตัวแปรที่ถูกควบคุม ค่าคลาดเคลื่อนของระบบ (system deviation) คือ ความแตกต่างระหว่างตัวแปรอ้างอิง และตัวแปรป้อนกลับ เครื่องควบคุมทำการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าตัวแปรที่ถูกควบคุม กับตัวแปรอ้างอิง จากนั้นเครื่องควบคุมก็จะทำการส่งสัญญาณเอาต์พุตออกไป โดยสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นนี้จะถูกเรียกว่า ตัวแปรแก้ไขปรับกระบวนการ (correcting variable) ซึ่งค่าของตัวแปรนี้จะเป็นการนำเอาผลลัพธ์ หรือ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นกับเครื่องควบคุม ส่งต่อไปยังอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้าย (final control element) ต่อไป

1.9 ความเสถียรภาพ และความไม่เสถียรภาพของระบบ (stability and instability) ระบบควบคุมแบบวงปิดทำงานด้วยการเลือกชนิดของเครื่องควบคุม และการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมอย่างถูกต้องจะส่งผลทำให้ตัวแปรที่ถูกควบคุมมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามตัวแปรอ้างอิง โดยจะมีการหน่วง และความคลาดเคลื่อนระหว่างสัญญาณทั้งสองเกิดขึ้นบ้างเพียงเล็กน้อย ถ้าหากการตั้งค่าเครื่องควบคุมไม่ถูกต้อง อาจทำให้ตัวแปรที่ถูกควบคุมเกิดการแกว่ง ถ้าการตั้งค่าของเครื่องควบคุมมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นมาก ส่งผลทำให้เกิดการแกว่งของตัวแปรที่ถูกควบคุมเกิดขึ้นในสภาวะคงตัว ถ้าไม่มีการแกว่งของตัวแปรที่ถูกควบคุมเกิดขึ้น หรือการแกว่งเกิดขึ้นน้อยลงไปเรื่อยๆ แสดงว่าการตั้งค่าของเครื่องควบคุมสามารถทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะมีเสถียรภาพ แต่ถ้าการแกว่งของตัวแปรที่ถูกควบคุมเกิดขึ้นในสภาวะคงตัวแสดงว่าการตั้งค่าของเครื่องควบคุมทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะไม่มีเสถียรภาพ การควบคุมที่ดีต้องมีคุณภาพของการควบคุม (control quality) ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในสภาวะคงตัวน้อย มีการเกิดผลตอบสนองเกินค่าเป้าหมายเกิดขึ้นน้อย ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลน้อย

## 2. แนวทางพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ ระยะการเปิดประตูและควบคุมอุปกรณ์ระยะไกล

แนวทางการพัฒนาอุปกรณ์แบ่งแยกตามลักษณะหน้าที่การทำงานคือ สถานีลูกข่ายในสนาม ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ ระยะเปิดประตูระบายน้ำ การแสดงผลที่เครื่อง การสื่อสารรับ-ส่งข้อมูล และพัฒนาอุปกรณ์สถานีแม่ข่ายที่รวมกับการเขียนโปรแกรมเรียกใช้ข้อมูลจากสถานี

ลูกข่ายเพื่อควบคุมระดับน้ำหน้าประตูระบายน้ำและระดับน้ำปลายคลองส่งน้ำให้คงที่อยู่ที่ระดับเป้าหมายแบบอัตโนมัติ การศึกษาเพื่อการพัฒนาอุปกรณ์ดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

2.1 อุปกรณ์เซนเซอร์มีความสำคัญมากในระบบการวัด ตลอดจนระบบควบคุมกระบวนการผลิตต่างๆ ทางอุตสาหกรรม เช่น เซอร์ เช่น อุณหภูมิ แสง เสียง แรงทางกล (force) ความดันบรรยากาศ (pressure) ระยะขจัด (displacement) ความเร็ว (speed) อัตราเร่ง (acceleration) ระดับของของเหลว (liquid level) หรือ อัตราการไหล (flow rate) เป็นต้น จากนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณออก หรือเอาต์พุตที่ได้จากการวัดในอีกรูปแบบหนึ่ง (measurable output) ที่สามารถนำไปประมวลผลต่อไปได้ (วรพงษ์, 2548) อธิบายว่าการตรวจวัดปริมาณทางฟิสิกส์ กำหนดตามความต้องการของการตรวจสอบ ควบคุมกระบวนการ ตลอดจนนำตัวแปรทางฟิสิกส์เหล่านั้นไปใช้งาน ดังนั้นเงื่อนไขซึ่งเป็นปัจจัยในการเลือกเซนเซอร์ใช้งานจึงขึ้นอยู่กับธรรมชาติของปริมาณทางฟิสิกส์ที่จะทำการวัด และควบคุมค่าเป็นสำคัญ รวมไปถึงราคา ความน่าเชื่อถือ ตลอดจนคุณภาพของข้อมูลที่ทำกรวัด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญอื่นที่ควรพิจารณาอีก เช่น ความเหมาะสมของเซนเซอร์ที่จะนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมนั้นๆ ตัวอย่างเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ออกแบบใช้งานในบ้านพักอาศัยทั่วไป จะมีความแตกต่างและไม่สามารถนำไปใช้แทนเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้งานในโรงงานผลิตสารเคมีได้ ทั้งนี้เนื่องจากเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิซึ่งใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ นั้น จำเป็นต้องทนต่อสภาพการใช้งานในสภาวะที่อุณหภูมิสูง ความดันสูง หรือทนต่อสภาพการกัดกร่อน ได้สูงกว่าเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ถูกออกแบบมาให้ใช้งานทั่วไป

เทคโนโลยีของเซนเซอร์ได้ถูกนำไปใช้เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในลักษณะงาน 2 ประเภท คือ ใช้ตรวจวัดปริมาณทางฟิสิกส์เพื่อนำไปแสดงผลการตรวจวัดหรือจัดเก็บบันทึกเป็นข้อมูลในระบบการวัด (measurement system) ใช้ตรวจสอบสภาพกระบวนการในระบบควบคุม (control system) เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดข้อมูลที่เป็นตัวแปรทางฟิสิกส์ โดยมากจะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อแสดงสถานะสภาพของระบบในขณะนั้น เช่น เซนเซอร์วัดความเร็วในรถยนต์ และมีเตอร์วัดความเร็ว (speed meter) เป็นต้น แต่ในบางครั้งเซนเซอร์อาจจะใช้สำหรับการบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลของระบบได้ สำหรับกรณีของเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพกระบวนการในระบบควบคุมส่วนใหญ่มักมีความหลากหลายและแตกต่างกันน้อยกว่าเซนเซอร์ที่ใช้สำหรับตรวจวัดและบันทึกข้อมูล เนื่องจากเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดและบันทึกข้อมูลจำเป็นต้องมีความหลากหลายแตกต่างกันไปตามปริมาณทางฟิสิกส์ที่ทำกรวัดและจัดเก็บเป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้งานต่อไป ในส่วนของระบบควบคุมทั่วไปนั้นสัญญาณออกหรือข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์จะถูกป้อน



ไปเป็นสัญญาณอินพุตให้กับอุปกรณ์ควบคุมกระบวนการ (controller) จากนั้นอุปกรณ์ควบคุมก็จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมไปปรับสภาพกระบวนการของระบบ เพื่อให้การทำงานของระบบมีความสอดคล้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์และไมโครโปรเซสเซอร์ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ทำให้เทคโนโลยีดังกล่าวได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก การใช้คอมพิวเตอร์และไมโครโปรเซสเซอร์เป็นเทคโนโลยีพื้นฐานของอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ จึงพบเห็นได้ทั่วไปไม่ว่าจะเป็นภายในบ้านพักอาศัย ที่ทำงาน การทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลจากภายนอกที่ป้อนให้กับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลด้วยเช่นกัน ซึ่งส่วนหนึ่งของข้อมูลต่างๆ เหล่านี้ก็เป็นข้อมูลจากการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ โดยข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์จะถูกปรับให้เหมาะสมก่อนป้อนให้กับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลและตอบสนองโดยการสร้างสัญญาณควบคุมหรือกระบวนการให้มีสภาพการทำงานเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ ดังนั้นหากใช้เซนเซอร์ที่มีสมรรถนะและมีความไม่เหมาะสมกับลักษณะของงานที่ใช้แล้ว ย่อมส่งผลให้การทำงานของระบบหรือกระบวนการนั้นๆ ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ และอาจก่อให้เกิดข้อผิดพลาดในการทำงานขึ้นอีกด้วย

2.1.1 เซนเซอร์ (sensor) และ ทรานสดิวเซอร์ (transducer) ทั้งสองนี้มีความหมายคล้ายคลึงกันมาก บางครั้งถูกนำมาใช้แทนกันได้ แต่โดยความเป็นจริงแล้ว เซนเซอร์กับทรานสดิวเซอร์นั้นมีความหมายและจุดประสงค์ในการใช้งานต่างกัน กล่าวคือ ทรานสดิวเซอร์นั้นหมายถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเซนเซอร์โดยทั่วไปก็คือ ทรานสดิวเซอร์ แต่ในทางกลับกันทรานสดิวเซอร์บางชนิดเท่านั้นที่ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์ อธิบายเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเซนเซอร์กับทรานสดิวเซอร์ ตัวอย่างเช่น หลอดไฟที่ใช้ตามบ้านเรือนทั่วไปก็จะเป็นลักษณะของทรานสดิวเซอร์อย่างหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสงสว่าง และพลังงานความร้อน ในที่นี้จุดประสงค์ในการใช้งานของหลอดไฟก็คือ ทำหน้าที่ให้แสงสว่างภายในห้องเท่านั้น ไม่ใช่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดหรือบ่งชี้ปริมาณไฟฟ้าในขณะนั้น แต่ถ้าหากนำหลอดไฟดวงดังกล่าวไปใช้ในวงจรเพื่อทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์บ่งชี้หรือแสดงผล (หลอดไฟสว่างขึ้น) กรณีเช่นนี้หลอดไฟที่ใช้ในวงจรทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์

2.1.2 ระบบเซนเซอร์ (sensor system) โดยทั่วไปสามารถจะจำแนกชนิดและคุณลักษณะของระบบได้มากมายหลายแบบ แต่ในที่นี้จะพิจารณาตามลักษณะของระบบเซนเซอร์ที่ให้สัญญาณออกหรือปริมาณเอาต์พุตของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนไปตามปริมาณต่างๆ ที่ตรวจวัดทางอินพุต ซึ่งการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในกระบวนการสามารถจำแนกการนำไปใช้งานในระบบการวัด (measurement systems) ระบบควบคุมวงเปิด (open-loop control systems) และระบบควบคุมวงปิด (closed-loop control systems)

2.1.3 ระบบการวัด (measurement systems) ทำหน้าที่แสดงผลหรือบันทึกข้อมูลของปริมาณเอาต์พุตซึ่งได้จากปริมาณอินพุตที่ได้ทำการวัด หลักการทำงานของระบบการวัด คือ ทำหน้าที่เพียงแสดงผลหรือบันทึกข้อมูลค่าที่ได้จากการวัดปริมาณจากอินพุตเท่านั้น ไม่สามารถปรับหรือควบคุมสภาพการทำงานของระบบให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ ตัวอย่างพื้นฐานที่ง่ายที่สุดของระบบการวัด ได้แก่ เทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะแก้ว ซึ่งใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ ปริมาณอินพุตของระบบการวัดอุณหภูมิจะเป็นความร้อนจากอากาศที่ส่งผ่านให้กับเทอร์โมมิเตอร์ โดยปริมาณเอาต์พุตของระบบเป็นค่าอุณหภูมิของอากาศที่อ่านได้จากสเกลแสดงผลอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์เอง ส่วนประกอบสำคัญในระบบการวัดคือ ส่วนตรวจจับสัญญาณ (sensing unit) ส่วนปรับแต่งสัญญาณ (signal condition unit) และส่วนแสดงผล หรือส่วนบันทึกข้อมูล (display or recording unit) ปริมาณทางฟิสิกส์ที่ทำการวัดจะถูกเซนเซอร์เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณออก จากนั้นหน่วยปรับแต่งสัญญาณจะทำหน้าที่ปรับแต่งสภาพของสัญญาณออกที่ได้จากเซนเซอร์ให้มีรูปแบบเหมาะสมเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้กับหน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูล ถ้าสัญญาณจากเซนเซอร์เป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดของสัญญาณต่ำมากต้องมียูนิทขยายแรงดัน (amplifier) เพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือถ้าสัญญาณออกเป็นการเคลื่อนที่ทางกลที่มีระยะขจัดสั้นต้องเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ให้มีระยะขจัดเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นสัญญาณที่มีการปรับแต่งนำไปแสดงผลให้กับผู้ใช้งานอ่านค่า เก็บค่าที่วัดได้ลงในเครื่องบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาใช้งาน

2.1.4 คุณสมบัติที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์ การเลือกนำเอาเซนเซอร์ไปประยุกต์ใช้งานในระบบการวัดหรือระบบควบคุมกระบวนการต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ราคา ความเหมาะสม รวมไปถึงปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอกต่างๆ แต่ปัจจัยสำคัญที่สุดประการหนึ่งในการเลือกพิจารณา คือ คุณสมบัติของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ควรมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับสัญญาณหรือรูปแบบที่ต้องการนำไปใช้งานต่อ ตัวอย่างเช่น เซนเซอร์ตรวจสอบอุณหภูมิโดยทั่วไปมีมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดต่างก็มีคุณสมบัติประจำตัวไม่เหมือนกัน

บางชนิดอาจจะมีช่วงของการวัดอุณหภูมิไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการใช้ บางชนิดอาจมีราคาแพงเกินความจำเป็น หรือบางชนิดต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง คุณสมบัติที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. ความแม่นยำ (accuracy) ความแม่นยำเป็นค่าบ่งชี้ถึงความสามารถของเซนเซอร์ในการแสดงค่าเอาต์พุตว่าใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงของปริมาณที่ทำการวัดอยู่มากน้อยแค่ไหน ในทางปฏิบัติแล้วอุปกรณ์การวัดทุกชนิดจะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดขึ้นเสมอ แต่จะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความแม่นยำของอุปกรณ์การวัดนั้น ซึ่งทั่วไปค่าความแม่นยำนี้อาจแสดงในรูปของหน่วยในการวัด เช่น เทอร์โมมิเตอร์ตัวหนึ่งถูกกำหนดไว้ว่ามีค่าความแม่นยำเท่ากับ  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  นั้นหมายถึงว่าหากนำเทอร์โมมิเตอร์ตัวนี้ไปทำการวัดอุณหภูมิแล้วแสดงค่าเท่ากับ  $+20.1^{\circ}\text{C}$  แสดงว่าขณะนี้อุณหภูมิจริงที่ทำการวัดมีค่าอยู่ระหว่าง  $19.9^{\circ}\text{C}$  กับ  $20.3^{\circ}\text{C}$  ในบางครั้งค่าความแม่นยำนี้อาจใช้บ่งชี้ถึงเปอร์เซ็นต์ค่าคลาดเคลื่อนของย่านการวัดของอุปกรณ์วัดตัวนั้น

ข. ความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ (repeatability หรือ reproducibility) ความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ เป็นข้อกำหนดของความแน่นอนซึ่งถูกระบุมาประจำตัวเซนเซอร์นั้นๆ โดยหมายถึงค่าความแน่นอนของเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขในการวัดแบบเดิม ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการแสดงค่าเอาต์พุตให้มีค่าเหมือนเดิม เมื่อนำไปใช้งานในลักษณะการวัดปริมาณทางฟิสิกส์อินพุตค่าเดิมซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง อาจแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์สูงสุดของการอ่านความคลาดเคลื่อน (error) ความคลาดเคลื่อน คือ ผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่แท้จริง ยกตัวอย่างเช่น เมื่อนำไม้บรรทัดอันหนึ่งไปวัดความกว้างของหน้ากระดาษหนังสือ ได้เท่ากับ 210.5 mm. แต่ค่าความกว้างที่แท้จริงของหน้ากระดาษหนังสือ ก็คือ 209.9 mm ดังนั้นในกรณีนี้จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดมีค่าเท่ากับ 0.6 mm เป็นต้น โดยทั่วไปค่าความคลาดเคลื่อนนี้นิยมบอกเป็นหน่วยของเปอร์เซ็นต์ และยังเป็นค่าบ่งชี้ถึงความแม่นยำของระบบการวัดนั้นอีกด้วย ความคลาดเคลื่อนสถิต (static error) ความคลาดเคลื่อนสถิต คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าคงที่ตลอดย่านการวัดของอุปกรณ์ ดังนั้น หากทราบค่าความคลาดเคลื่อนสถิตของอุปกรณ์นั้นแล้ว สามารถทำการชดเชยให้มีค่าน้อยลงได้เพื่อลดผลกระทบต่อค่าความแม่นยำของอุปกรณ์

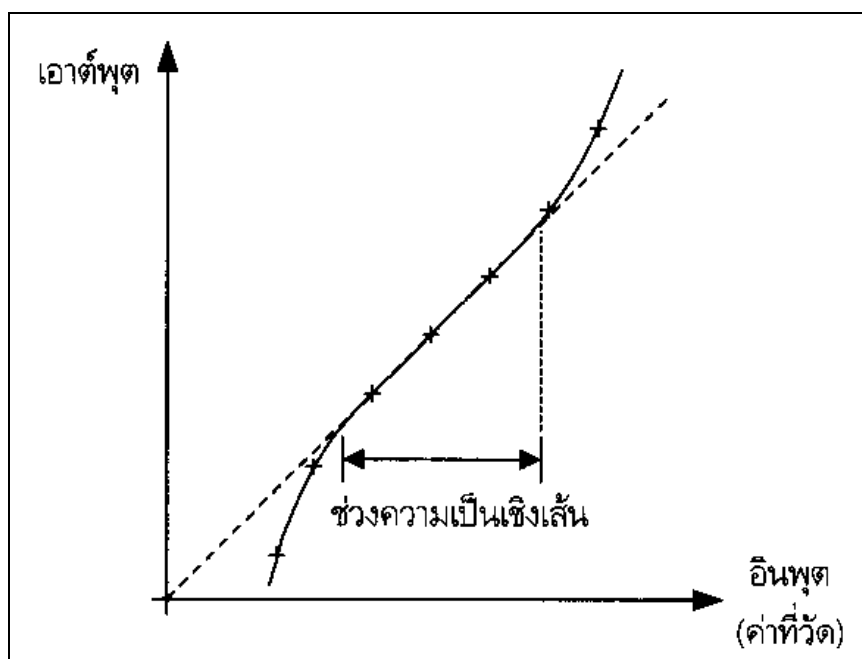
ค. บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone) ขนาดอินพุตสูงสุดที่ยังคงทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ สาเหตุที่ทำให้เกิดบริเวณไร้การตอบสนองนี้ขึ้นมาจาก static friction

ง. ขนาด (dimension) คือขนาดทางกายภาพของเซนเซอร์ (กว้าง ยาว สูง) ที่ระบุมาประจำตัวเซนเซอร์นั้นๆ

จ. ฮิสเทอรีซิส (hysteresis) เกิดขึ้นจากผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์เมื่อทำการตรวจวัดปริมาณฟิสิกส์ทางอินพุตโดยการปรับค่าจากน้อยไปมากและปรับค่าลดลงจากมากไปน้อย คุณสมบัติฮิสเทอรีซิสนี้ก่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นและส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบหรืออุปกรณ์ด้วย ปริมาณอินพุตของเซนเซอร์ซึ่งเป็นค่าที่ทำการวัดหรือต้องการตรวจสอบจะถูกปรับค่าให้มีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงย่านในการวัดสูงสุด ในทางกลับกันก็ทำการปรับค่าให้ลดลงจนกระทั่งถึงย่านในการวัดต่ำสุดเช่นกัน ซึ่งพบว่าเกิดผลต่างสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ขึ้น โดยเรียกค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นนี้ว่า ฮิสเทอรีซิส

ฉ. การหน่วงสัญญาณ (lag) คือ การล่าช้าของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตที่ทำการวัด ทั่วไปมีหน่วยเป็นวินาที (seconds) หรือเศษส่วนของวินาที ในการประยุกต์ใช้งานบางประเภท เช่น ในงานระบบควบคุมกระบวนการ หน่วงสัญญาณเป็นข้อกำหนดสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเนื่องจากมีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบเป็นอย่างมาก

ช. ความเป็นเชิงเส้น (linearity) คุณสมบัติของความเป็นเชิงเส้น คือ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของเซนเซอร์เป็นเชิงเส้น หรือมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 4 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นยังแสดงถึงช่วงสูงสุดที่กราฟคุณสมบัติยังคงเป็นเชิงเส้นอยู่ หรือเรียกช่วงดังกล่าวนี้ว่า ช่วงในการปฏิบัติงาน (operating range) ของเซนเซอร์



ภาพที่ 4 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น

ซ. อายุการใช้งาน (operating life หรือ reliability) เป็นค่าแสดงถึงอายุในการใช้งานของเซนเซอร์ที่ยังคงให้คุณสมบัติในการทำงานเป็นไปตามข้อกำหนดประจำตัวต่างๆ ที่ระบุมาให้ เช่น ระยะเวลาการใช้งาน หรือจำนวนครั้งในการใช้งาน เป็นต้น

ฌ. ย่านปฏิบัติงาน (range) คือ ขอบเขตในการปฏิบัติงานของอุปกรณ์นั้น ซึ่งทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับย่านปฏิบัติงานของเซนเซอร์ มักกำหนดมาในรูปของปริมาณอินพุตต่ำสุดกับปริมาณอินพุตสูงสุดที่เซนเซอร์สามารถวัดและตรวจสอบได้

ญ. อัตราการทำงาน (rating) อัตราการทำงานของอุปกรณ์แสดงการทนต่อสัญญาณต่างๆ ในการทำงานของอุปกรณ์ โดยยังคงสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยไม่เสียหาย ส่วนใหญ่ข้อกำหนดของอัตราการทำงานต้องระบุรายละเอียดชนิดของสัญญาณมาด้วย เช่น อัตราของอุณหภูมิในการทำงานสูงสุด หรืออัตราโหลดเฉลี่ยในการใช้งาน

ฎ. ผลตอบสนอง (response) คือ ช่วงเวลาที่อุปกรณ์นั้นใช้ในการตอบสนองสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าเท่ากับค่าเอาต์พุตสุดท้ายทั่วไปมีหน่วยเป็นวินาที หรือเศษส่วนของวินาที หรือบางครั้งอาจบอกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเอาต์พุตสุดท้ายก็ได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าข้อกำหนดของ

อุปกรณ์การวัดตัวหนึ่งระบุว่ามีผลตอบสนองทางเวลาเป็น 80% ใช้เวลา 2 วินาที นั้นหมายความว่า อุปกรณ์ตัวนี้จะใช้เวลา 2 วินาทีเพื่อตอบสนองให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 80% ของค่าสุดท้าย

ฎ. ความละเอียด (resolution) คือ ขนาดปริมาณอินพุตต่ำสุดที่อุปกรณ์สามารถวัดหรือตรวจสอบได้

ฐ. ความไว (sensitivity) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอินพุต สำหรับค่าความไวของเซนเซอร์ จะมีค่าเท่ากับผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตในย่านการวัดที่กำหนดให้หารด้วยผลต่างของสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นปริมาณที่ทำการวัด

ฑ. เสถียรภาพ (stability) สัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์หรือระบบว่ามีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อยแค่ไหน เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตมีค่าคงที่ในช่วงเวลานานๆ ภายใต้อารมณ์ในการวัดที่ไม่เปลี่ยนแปลง หากอุปกรณ์หรือระบบมีความเป็นเสถียรภาพแล้วสัญญาณเอาต์พุตควรมีคุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

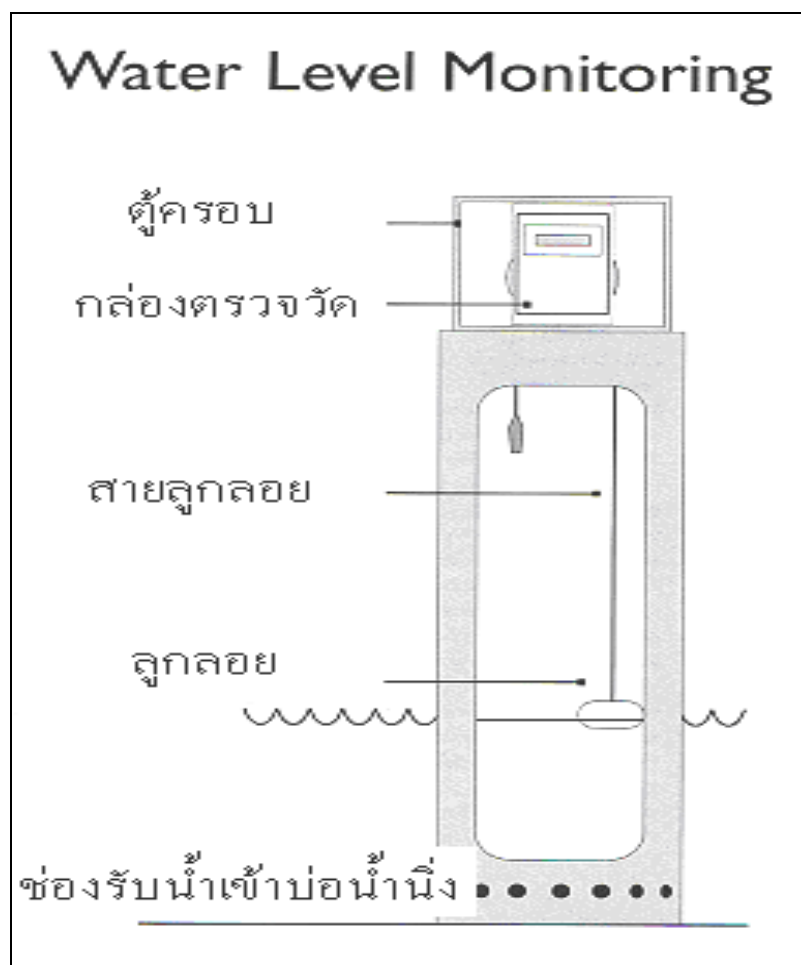
ฒ. ค่าเบี่ยงเบน (tolerance) บอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการวัด ในบางครั้งค่าเบี่ยงเบนนี้อาจใช้ในการแสดงถึงความแม่นยำของอุปกรณ์ได้อีกด้วย

2.1.5 การทำงานของระบบวัด ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่พื้นฐาน (basic functional elements) อุปกรณ์เสริม (auxiliary elements) พจนานุกรม (2545) อธิบายว่าสำหรับอุปกรณ์เสริมจะอยู่รวมกับระบบการวัดค่าที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วย อุปกรณ์สอบเทียบ เพื่อทำการสอบเทียบอุปกรณ์ให้ทำงานถูกต้อง แหล่งจ่ายกำลังภายนอก เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้ เช่น จ่ายให้กับทรานสดิวเซอร์ ตัวปรับสภาพสัญญาณ อุปกรณ์ประมวลสัญญาณ หรือ อุปกรณ์ป้อนกลับทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงจำนวนทางกายภาพที่วัดได้ โดยอุปกรณ์ป้อนกลับนี้อาจเป็นโพเทนชิโอมิเตอร์ที่ปรับสมดุลด้วยตัวเอง หรือวงจรวิธไดนามิกส์เพื่อให้ปรับสภาพตัวเองโดยอัตโนมัติ หากอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับสัญญาณไม่มีคุณภาพที่ดีแล้วระบบก็จะไม่สามารถทำงานเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ออกมาดีได้

ดังนั้นจึงต้องมีขอบเขตของทรานสดิวเซอร์ คือมีความสามารถในการรับสัญญาณและตรวจจับพร้อมทั้งรับค่าสัญญาณอินพุตที่ต้องการและต้องไม่มีความไวกับสัญญาณอื่น ที่ไม่ต้องการขณะที่ทำการวัด ตัวอย่างเช่น ทรานสดิวเซอร์ที่วัดความเร็วจะต้องรับความเร็วอย่างทันทีทันใดนั้น ต้องไม่รับเอาตัวแปร ของแรงเคลื่อน หรืออุณหภูมิที่อยู่ในบริเวณนั้น ไม่ดัดแปลงหรือแก้ไขค่านัยสำคัญที่จะวัด มีความสามารถต่อการดัดแปลงระบบ นั่นคือให้ง่ายต่อการปรับปรุงระบบโดยใช้อุปกรณ์ที่อยู่ภายในกระบวนการเดิมๆ ได้ เช่น รูปสัญญาณของทรานสดิวเซอร์ที่มักจะทำให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า เพราะจะทำให้ง่ายต่อการจัดการและได้เปรียบในการต่อเข้ากับอุปกรณ์คำนวณหรืออุปกรณ์แสดงค่าสมัยใหม่ เพื่อแสดงรายละเอียดของสัญญาณดังกล่าว มีความแน่นอน (accuracy) ที่ดี มีความสามารถในการทำซ้ำ (reproducibility) ที่ดี (เช่น ความเที่ยงตรง) มีขนาด (amplitude) ที่เป็นเชิงเส้น มีผลตอบสนองต่อความถี่ที่เพียงพอ (เช่น มีผลตอบสนองทางพลวัตที่ดี) ไม่สร้างหรือกำเนิดการรบกวนเฟสต่อกัน ไม่มี time lag ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของทรานสดิวเซอร์ มีความสามารถในการต่อต้านสิ่งรบกวนจากสิ่งแวดล้อม โดยไม่ทำลายความถูกต้องของระบบ

2.2 อุปกรณ์เซ็นเซอร์สำหรับระบบคลองอัตโนมัติ ข้อมูลที่ต้องตรวจวัดคือระดับน้ำและระยะการเปิดประตูระบายน้ำ ได้ศึกษาอุปกรณ์ที่นิยมใช้เพื่อตรวจวัดดังกล่าวต่อไปนี้

2.2.1 อุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัดระดับน้ำแบบลูกลอยแสดงในภาพที่ 5 ใช้ลูกลอยต่อพ่วงกับเซ็นเซอร์วัดระยะทางโดยที่ปลายด้านหนึ่งมีตุ้มน้ำหนักถ่วง ระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงขึ้น-ลง ถูกถ่ายทอดผ่านลูกลอยไปยังเซ็นเซอร์แปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า การตรวจวัดโดยลูกลอยมีข้อดีคือตัวเซ็นเซอร์ไม่สัมผัสกับน้ำดูแลรักษาง่าย ให้ข้อมูลไม่ขึ้นกับปัจจัยหรือตัวแปรอื่น โดยเฉพาะในส่วนแปลงสภาพสัญญาณที่มีประสิทธิภาพดีจะให้ค่าความเที่ยงตรงในการตรวจวัดค่าระดับน้ำดีกว่าทุกแบบ การวัดระดับน้ำโดยลูกลอยสามารถแบ่งลักษณะการทำงานได้ 2 แบบคือ



ภาพที่ 5 การตรวจวัดระดับน้ำโดยใช้ลากลอย

ก. เกจวัดระดับของเหลวโดยใช้ลากลอย ซึ่งอาศัยหลักการทำงานโดยใช้น้ำหนักถ่วง (counterweight operated float gauge) การเคลื่อนที่ของลากลอยมีการเปลี่ยนแปลงผันไปตามระดับของของเหลว ซึ่งส่งผลให้กับเข็มชี้เบี่ยงเบนแสดงผลบนสเกลหน้าปัด โดยที่สเกลวัดนี้มักเปรียบให้ออกมาในหน่วยของปริมาตรหรือมวล ความถูกต้องและแม่นยำในการวัด และการอ่านค่านั้นขึ้นอยู่กับความยาวของสเกลและการระบุขีดของสเกล

ข. เกจลากลอยแบบใช้วงจรไฟฟ้าวงจรไฟฟ้า (electrically operated float gauge) โดยออกแบบให้ลากลอยเคลื่อนที่ตามระดับของของเหลวซึ่ง ดังนั้นเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของลากลอยขึ้นจะส่งผลให้เดือยหมุนทำการเปลี่ยนแปลงระยะจัดเชิงมุมในตัวโพเทนทิโอมิเตอร์ ค่าความต้านทานภายในโพเทนทิโอมิเตอร์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แรงดันไฟฟ้าที่อ่านค่าได้จากโวลต์มิเตอร์จะแปรผันไปตามสัดส่วนของระดับของของเหลวที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก



เซนเซอร์ชนิดนี้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นจึงง่ายที่จะนำไปปรับแต่งสภาพสัญญาณ (signal conditioning) เพื่อให้แสดงผลหรือบันทึกข้อมูลในระยะไกล (remote) ได้ ทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับ (feedback signal) ในระบบควบคุมอัตโนมัติ

2.2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดระดับของเหลวโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic level indicator) คลื่นอัลตราโซนิกจากแหล่งกำเนิดจะถูกส่งกระทบผิวหน้าของเหลว ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณพัลส์จากฐานล่างของถังบรรจุ และการสะท้อนกลับของสัญญาณพัลส์บางส่วนจากผิวหน้าของของเหลว เมื่อนำสัญญาณสะท้อนกลับทั้งสองป้อนให้กับอุปกรณ์บันทึกผล หรืออุปกรณ์แสดงผล เช่น ออสซิลโลสโคปจะพบว่าช่วงผลต่างของเวลาของสัญญาณพัลส์ทั้งสองที่วัดได้นั้นมีค่าแปรผันกับความลึกของของเหลวที่กำลังตรวจสอบอยู่ และสามารถที่จะทำการปรับเทียบให้แสดงผลออกมาในรูปของความสูงได้อีกด้วย แม้ว่าเทคนิคดังกล่าวนี้มักจะมีราคาค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นก็ตาม แต่ข้อดีก็คือ ให้ผลการตรวจวัดที่มีความละเอียดและแม่นยำ รวมทั้งสามารถนำไปใช้กับระดับความลึกมาก ๆ ระบบการตรวจวัดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ตั้งแต่เป็นส่วนหนึ่งในระบบการตรวจวัดระดับความลึกของเรือเดินทะเล ทางด้านการทหาร ทางด้านการศึกษาและวิจัยทางทะเล อุปกรณ์ทางการแพทย์บางชนิด คลื่นเสียงความถี่สูงย่านอัลตราโซนิกสำหรับวัดระดับน้ำ อยู่ระหว่างช่วงความถี่ 23 KHz ถึง 40 KHz ที่พบเห็นมากคือ 23 KHz 25 KHz และ 40 KHz โดยความถี่ 40 KHz เป็นรุ่นที่นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะมีทิศทางดีกว่า จากนั้นจะมีระบบนับพัลส์ที่รับได้ในช่วงเวลา 1 มิลลิวินาที ดังตัวอย่างเช่นคลื่นเสียงที่มีความเร็ว 340 เมตรต่อวินาทีที่อุณหภูมิ 20 °C ในช่วงเวลา 120 มิลลิวินาที จะเดินทางได้ 6.8 เมตร คิดที่ไปและกลับจึงได้ระยะทางจริงที่ตรวจวัด 3.4 เมตร โดยค่าความละเอียดขึ้นอยู่กับคุณภาพของอุปกรณ์

2.2.3 เกจตรวจวัดระดับของเหลวโดยใช้ฟองอากาศ (bubble level gauge) ส่วนประกอบพื้นฐานของเกจวัดระดับของเหลวโดยใช้ฟองอากาศประกอบด้วย วาล์วปรับแต่งความดันอากาศ (regulating valve) ทำหน้าที่ควบคุมความดันอากาศภายในท่อฟองอากาศ (bubble tube) เพื่อให้เริ่มเกิดฟองอากาศไหลออกจากปลายท่อตั้งรูป เนื่องจากความดันอากาศที่เริ่มทำให้ฟองอากาศผุดออกมาจากท่อฟองอากาศนั้นจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสูง (h) ของของเหลวที่บรรจุภายในถัง ดังนั้นเมื่อทำการปรับวาล์วปรับแต่งความดันให้เริ่มเกิดฟองอากาศภายในถังขึ้น ความดันบรรยากาศภายในท่อที่เกจวัดได้จึงมีค่าแปรผันตรงกับระดับความสูงของของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในถัง นำค่า

ความดันบรรยากาศที่วัดได้จากเกจมาปรับเทียบให้กลายเป็นหน่วยความสูงของของเหลวอีกครั้ง ตัวอย่างอุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบนี้คืออุปกรณ์วัดระดับน้ำของโทรมาตรเขื่อนป่าสัก จ.ลพบุรี

2.2.4 อุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัดระดับของเหลวแบบใช้ความดัน (pressure sensor) ได้สัญญาณการวัดออกมาในรูปของสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้คุณสมบัติของเพียโซรีซิสทีฟ (piezo resistive) การใช้งานอุปกรณ์วัดระดับน้ำใช้หลักการแรงดันของน้ำเพื่อตรวจวัดระดับน้ำได้ผลดีพอควรแต่มีปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้องมากเช่นอุณหภูมิ แรงดันบรรยากาศ อุปกรณ์นี้จึงต้องมีการชดเชยทางด้านปัจจัยตัวแปรเหล่านี้ด้วย

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบชนิดเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำเบื้องต้น

| ลำดับที่ | ชนิดเซ็นเซอร์    | ข้อดี                                                        | ข้อเสีย                                                                                                                |
|----------|------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | แบบลูกลอย        | ตรวจวัดที่ระดับผิวน้ำ<br>ความคลาดเคลื่อนใน<br>การตรวจวัดน้อย | ติดตั้งยากต้องมีบ่อน้ำนิ่งทำให้มี<br>ค่าใช้จ่ายเพื่อการติดตั้งมาก                                                      |
| 2        | แรงดันของน้ำ     | ติดตั้งง่าย                                                  | มีปัจจัยเรื่องอุณหภูมิและแรงดัน<br>บรรยากาศมาเกี่ยวข้องทำให้เกิดค่า<br>คลาดเคลื่อนในการตรวจวัด                         |
| 3        | เสียงอัลตราโซนิก | ติดตั้งง่าย เซ็นเซอร์ไม่<br>สัมผัสกับผิวน้ำ<br>โดยตรง        | มีปัจจัยเรื่องอุณหภูมิ ความชื้นใน<br>อากาศและแรงดันบรรยากาศเข้ามา<br>เกี่ยวข้องทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อน<br>ในการตรวจวัด |

ในตารางที่ 1 การใช้เซ็นเซอร์แบบลูกลอยวัดระดับน้ำได้ดีกว่าแบบอื่นแต่มีข้อเสียคือต้องจัดสร้างบ่อน้ำนิ่งให้ลูกลอยที่มีราคาแพงกว่าการใช้เซ็นเซอร์แบบอื่น การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของอุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อดี-ข้อเสียของอุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบต่างๆ

| อุปกรณ์วัดระดับน้ำ                                                                                                            | ข้อดี                                                                                                              | ข้อเสีย                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. อุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบลูกลอย โดยใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (slide) ขนาด $10\text{ K}\Omega$ ความยาว 4-8 ซม. ราคา 30-200 บาท | ไม่ต้อง reset เหมือน encoder<br>ราคาถูก<br>ไม่อันตราย                                                              | linear (approximately linear) พอประมาณ<br>ช่วงวัด 0-5 V<br>มี error ทั้งทางกล และทางไฟฟ้า<br>Contact สกปรกง่าย ทำให้เกิด error ในการส่งสัญญาณไฟฟ้า |
| 2. อุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบลูกลอย โดยใช้ potentiometer แบบกลม ขนาด $10\text{ K}\Omega$ ราคา 700-2,000 บาท                        | มีความ linear มากกว่า แบบ slide<br>วัดได้ละเอียดกว่า (5-10V) มีความผิดพลาด +0.25 %<br>ไม่ต้อง reset เหมือน encoder | ราคาแพงกว่า แบบ slide<br>กลไกทำได้ยากกว่า แต่ error ทางกลน้อยกว่า                                                                                  |
| 3. อุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบอินฟราเรด (infrared) ระยะทำการ 40 ซม. ราคา 1,000 บาท                                                  | ไม่ต้องการกลไกทางกลทำงาน<br>โดยการส่งแสงที่ความเข้มคงที่ แล้ววัดความเข้มแสงที่สะท้อนกลับ แล้วแปลงเป็น volt         | ไม่ linear ต้องการการ calibration ที่ละเอียด<br>ช่วงวัดสั้น                                                                                        |
| 4. อุปกรณ์วัดระดับน้ำแบบวัดความดันน้ำ (pressure transducer) วัดระดับน้ำได้ไม่เกิน 40-50 ซม. ราคา 1,200 บาท                    | สร้างง่ายไม่ต้องอาศัยกลไก<br>อื่นๆ ทำงานโดยการวัดความดันน้ำ แล้วแปลงเป็น volt                                      | ต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier)<br>ต้องชดเชยอุณหภูมิ<br>มิฉะนั้นจะมี error มาก<br>ท่อวัดความดันอุดตันได้<br>ง่าย ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด  |

ที่มา: วราวุธ และ วิษณุ (2548)

2.3 PLC (programmable logic controller) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบ canal automation ณรงค์ (2541) อธิบายว่า PLC ได้เริ่มสร้างขึ้นมาครั้งแรกในปี ค.ศ. 1968 โดยกลุ่มวิศวกร hydromantic division ของบริษัท general motors corporations เนื่องจากมีความต้องการที่จะสร้างอุปกรณ์ควบคุมมาทดแทนการใช้รีเลย์ในการควบคุมสำหรับโรงงานประกอบรถยนต์ ซึ่งจะต้องสามารถรองรับการประกอบรถยนต์ รุ่นใหม่ๆ ได้ตลอดเวลา ลักษณะของอุปกรณ์ควบคุมที่สร้างขึ้นมามีจุดเด่นคือ ใช้การเขียนโปรแกรมในการสร้างฟังก์ชันการทำงานแทนการใช้สายไฟฟ้าในการสร้างฟังก์ชันเพื่อควบคุมการทำงานของระบบ ดังนั้นจึงเหมาะกับงานที่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงหรือ แก้ไข ฟังก์ชันการควบคุม อยู่ตลอดเวลา มีประสิทธิภาพในการควบคุม และมีขนาดเล็กกว่า เมื่อเทียบกับการใช้รีเลย์ในการควบคุม การดูแลรักษา และ การซ่อมบำรุง ทำได้ง่าย และค่าใช้จ่ายต่ำราคาถูก เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้รีเลย์

ในปี ค.ศ. 1970 ได้พัฒนานำเอาไมโครโปรเซสเซอร์ มาใช้ในการประมวลผล ทำให้ PLC มีความสามารถและขอบเขตการใช้งานมากขึ้น เช่น การประมวลผลฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ซึ่งทำให้ PLC สามารถที่จะทำการควบคุมอุปกรณ์ ที่มีลักษณะเป็นสัญญาณแอนะล็อก (analog signal) และสามารถทำการสื่อสารกับระบบคอมพิวเตอร์ต่างๆ ได้ และจากการพัฒนา PLC อย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1975 ได้มีการนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์ และ ซอฟต์แวร์ มาใช้กับ PLC ทำให้ความสามารถในการทำงานเพิ่มสูงขึ้น เช่น มีหน่วยความจำเพิ่มขึ้นโดยส่วนประกอบที่สำคัญของ PLC จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความสามารถสูง ทำให้ติดต่อกับอินพุตและเอาต์พุตแบบระยะไกล (remote input/output) สามารถใช้หน่วยประมวลผลจำนวนหลายตัว (multi-processor) ร่วมกันประมวลผลโปรแกรม สามารถทำการควบคุมโดยใช้โมดูลแบบพิเศษ (intelligent module) ในปัจจุบัน PLC สามารถติดต่อสื่อสารข้อมูลเป็นโครงข่ายผ่าน ethernet protocol, profibus และ ASI-bus เป็นต้น

ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลจากกระบวนการผลิตมาใช้ในการตัดสินใจ และสามารถที่จะควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติผ่านการสื่อสารแบบต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว นอกจาก PLC แล้วยังมีอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่ใช้ประกอบเป็นระบบ automation คือ embedded system หรือระบบฝังตัวที่มีความสามารถมากกว่า PLC embedded system คือระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับงานควบคุมรวมถึงการแสดงผลการทำงานต่างๆ โดยที่ระบบเหล่านี้ถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งของระบบและอุปกรณ์ควบคุมเครื่องมือ เครื่องจักรต่างๆ ระบบแบบฝังตัว เป็นส่วนหนึ่งของระบบใหญ่ ระบบแบบฝังตัวไม่ใช่เครื่องคอมพิวเตอร์ แต่มีระบบที่ทำงานอย่างเดียวกับคอมพิวเตอร์อยู่ภายใน ซึ่งอาจเป็นเพียง

ไมโครโปรเซสเซอร์(microprocessor) หรือชิป (chip) ธรรมดาหรือโปรเซสเซอร์ (processor) ที่ประกอบด้วย ชิป (chip) ที่มีวงจรซับซ้อน โดยจะมีหลักการทำงาน คือ มีสัญญาณข้อมูลเข้า (input) จากอุปกรณ์ เซนเซอร์ (sensor) เข้าสู่ระบบ และมีสัญญาณผลลัพธ์ (output) ของระบบไปควบคุม บังคับสวิตซ์เครื่องควบคุมต่าง ๆ เช่นสวิตซ์เครื่องจักร หรือ วาล์วควบคุมทิศทางการไหลของท่อ ทางต่างๆ นอกจากนี้แบบและรุ่นของระบบแบบฝังตัว (embedded system) มีมากมายมีทั้งระบบที่เป็นแบบง่าย ๆ การทำงานไม่ซับซ้อน ตลอดจนแบบระบบที่ซับซ้อน ไมโครโปรเซสเซอร์ (microprocessor) ที่ได้รับการออกแบบจะมีทั้งแบบที่ออกแบบเพื่อให้สามารถเพิ่มโปรแกรมเข้าไปในระบบฝังตัวได้ แต่ที่พบเห็นโดยทั่วไปเป็นแบบที่ควบคุมด้วยคำสั่งโปรแกรมไม่สามารถแก้ไขได้อีก ถ้าต้องการแก้ไขก็ต้องเอาชิปดังกล่าวออกและเปลี่ยนชิปตัวใหม่ที่บรรจุคำสั่งโปรแกรมที่แก้ไขแล้ว PLC และ embedded system จะมีส่วนประกอบภายในคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller)

2.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์(microcontroller) คืออุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก แต่ในตัวอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กนี้ ได้บรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์คือได้รวมเอา ซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ท ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุเข้าไว้ในตัวถังเดียวกัน นักออกแบบ พัฒนาผลิตภัณฑ์ ตลอดจนนักประดิษฐ์ โดยใช้เทคโนโลยีขั้นสูงถ้าใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดโดยไม่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำให้ อุปกรณ์มีขนาดใหญ่และมีค่าใช้จ่ายในการผลิตมากไม่ตรงกับความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการของคุณภาพดีและราคาถูก ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จึงเป็นทางเลือกที่รองรับกับความต้องการที่จะนำไปควบคุมระบบที่เราต้องการโดยให้มีขนาดเล็กที่สุด แต่มีใช้เพียงแต่ขนาดเล็กเท่านั้น มันยังสามารถป้อนชุดคำสั่งให้สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ ด้วยรูปแบบการเขียนโปรแกรมภาษาต่างๆ ตามความถนัด เช่น assembly C BASIC สำหรับภาษา assembly จะเข้าถึงอุปกรณ์ได้ดีกว่าการพัฒนาโดยใช้ภาษานี้ผู้ที่เขียนจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอย่างดี

ปัจจุบันการแข่งขันด้านการตลาดของไมโครคอนโทรลเลอร์มีมากขึ้น ดังนั้นผู้ผลิตจึงรวมกับผู้ผลิตซอฟต์แวร์ จัดทำคอมไพเลอร์ออกมารองรับการพัฒนางานด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น คอมไพเลอร์ C ที่มีความยืดหยุ่นสูงมีความสามารถใกล้เคียงกับ assembly หรือ อย่างคอมไพเลอร์ BASIC ที่ใช้งานง่ายแต่การเข้าถึงอุปกรณ์ในระดับสูงยังคงให้มีการเขียน assembly เข้าช่วยแต่ภาษา BASIC จะมีข้อด้อยบ้างคือถ้าเขียนโปรแกรมที่ยาวมากเมื่อทำการคอมไพล์แล้ว hex file จะมีขนาดใหญ่มากทำให้มีปัญหาตอนโปรแกรมลงชิปที่มีหน่วยความจำน้อย

แต่ปัจจุบัน ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นใหม่จะมีหน่วยความจำและความเร็วการทำงานสูงปัญหาดังกล่าวจึงไม่เกิดขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในเมืองไทยมีขายหลายตระกูล เช่น MCS51 ที่มีขายมากกว่า 10 ปีการค้นคว้าหาข้อมูลมีมากและมีผู้ผลิตชิพหลายรายให้เลือกเช่น Atmel Phillips หรือ Dallas มีชุดคำสั่งการใช้งานที่คล้ายกัน แต่มีความแตกต่างที่หน่วยความจำภายในหรือการเพิ่มวงจร ADC DAC และ PWM (ธีรวัฒน์, 2546) ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ของบริษัทไมโครชิพที่มีความนิยมไม่แพ้ MCS51 ความสามารถสูงมีให้เลือกหลายเบอร์มีภาษารองรับการพัฒนาหลายภาษาเช่น C หรือ BASIC ที่ต้องหาซื้อกันเอง ถ้าต้องการประหยัดเงินก็เลือก assembly ที่สามารถดาวน์โหลดจากผู้ผลิต หนังสืออ้างอิงต่างๆ หรือตัวอย่างการใช้งานมีขายมากมาย นอกจากนี้แล้วยังมีไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลอื่นอีกเช่น 68HC ของโมโตโรล่า AVR ST7 Basic Stamp ซึ่ง เบสิก แสตมป์ เขียนชุดคำสั่งโดยใช้ภาษาเบสิกมีความคล้ายคลึงกับ PIC แต่ PIC มีความสามารถมากกว่าเนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์เบสิกแอสตมป์ใช้งานง่ายภาษาที่ใช้เขียนไม่ยากจึงได้มีผู้นำไปใช้ทำหุ่นยนต์ขนาดเล็ก เป็นต้น

2.3.2 ระบบฝังตัว (embedded system) ธนารักษ์ (2549) ระบบฝังตัวเกี่ยวข้องกับระบบต่างๆ หลายด้าน เช่น ฮาร์ดแวร์ เครือข่าย การสื่อสาร และเครื่องกล ลักษณะเฉพาะของเทคโนโลยีสมองกลฝังตัว (characteristics of embedded technology) ใช้เทคโนโลยีออกแบบวงจรตรรกะ (logic circuit) ภายในและส่วนที่เกี่ยวข้องกับไทมิง (timing) เหมือนกัน ถึงแม้ว่าจะเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดไม่เท่ากัน นอกจากนี้เทคโนโลยีสมองกลฝังตัวยังใช้ในโทรศัพท์มือถือ และสายการผลิตในโรงงานด้วย กล่าวคือ เทคโนโลยีนี้เริ่มกลายเป็นเทคโนโลยีพื้นฐานที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในสาขาต่างๆ มากมาย ชิ้นส่วนฮาร์ดแวร์ในระบบเก่าซึ่งมีราคาสูงมากนั้นทำให้มีราคาต่ำด้วยเทคโนโลยีสมองกลฝังตัว และองค์ประกอบเชิงฮาร์ดแวร์ที่เหลือนั้นยังถูกทำให้ไปอยู่บนชิพที่เรียกว่าระบบบนชิพ หรือ system-on-chip (SOC) สามารถสร้างระบบที่เล็กลงไปอีก และทำให้จำนวนชิ้นส่วนสมองกลฝังตัวที่เป็นฮาร์ดแวร์มีจำนวนน้อยลงเกิดผลดีตามมาในหลายๆ ด้าน เช่น ความเสี่ยงในการซื้อชิ้นส่วนลดลงกระบวนการออกแบบและพัฒนา มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ต้นทุนการผลิตลดลง สามารถสร้างฟังก์ชันงานที่ยากหรือซับซ้อนได้ ทำให้ใส่ฟังก์ชันที่หลากหลายลงไปในอุปกรณ์ได้ และทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ การใช้ฮาร์ดแวร์ของระบบสมองกลฝังตัวใช้ผ่านทางอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตโดยไม่จำเป็นต้องสัมผัสส่วนอื่นของระบบ ข้อมูลจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิและความดันจะถูกนำเข้าสู่ระบบผ่านทางพอร์ตอินพุต (input port) มาสู่ไมโครการการทำงานเพื่อจัดเก็บหรือประมวลผล ตัวอย่างของอุปกรณ์อินพุต ได้แก่ เซนเซอร์ความร้อนและเซนเซอร์ความดัน ข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสัญญาณแบบ analog แต่โดยมากไมโคร

ฟังก์ชันต่างๆ มักจะจัดการประมวลผลแบบดิจิทัล (digital) ดังนั้นต้องแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นข้อมูลดิจิทัลด้วยเครื่องแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (A/D converter) นอกจากนี้ไมโครฟังก์ชันงานจะนำเอาข้อมูลที่รับเข้ามาจากสิ่งแวดล้อมภายนอกมาใช้ประมวลผลเพื่อเป็นสารสนเทศในการควบคุมสิ่งแวดล้อมภายนอกโดยส่งผ่านทางพอร์ตเอาต์พุต (output port) หรืออินเทอร์เฟซแบบเอาต์พุต ของอุปกรณ์เอาต์พุต (output device) สำหรับอุปกรณ์เอาต์พุตที่ทำงานด้วยสัญญาณอนาล็อกจะมีอุปกรณ์แปลงข้อมูลดิจิทัลไปเป็นสัญญาณอนาล็อก (D/A converter) การแบ่งงานระหว่างอุปกรณ์อินเทอร์เฟซอินพุต และอุปกรณ์เอาต์พุตอินเทอร์เฟซ จะเป็นตามข้อกำหนดเฉพาะ (specification) ของการออกแบบระบบสมองกลฝังตัวส่วนนี้จะมีทั้งระบบที่เป็นมาตรฐานแล้วกับระบบที่ยังไม่เป็นมาตรฐาน

ระบบฝังตัวสามารถเชื่อมโยงกันเป็นเน็ตเวิร์ก กลายเป็นระบบสมองกลฝังตัวระดับสูง การพัฒนาฮาร์ดแวร์ใหม่หรือปรับปรุงฮาร์ดแวร์เดิมนั้นจะเกิดจากการพัฒนาซอฟต์แวร์มาประกอบกันเป็นระบบสมองกลฝังตัวขึ้น ฟังก์ชันของระบบสมองกลฝังตัวนั้นจะขึ้นกับซอฟต์แวร์เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นต้องให้ความสำคัญกับความถูกต้องและความชัดเจนของข้อกำหนดเฉพาะด้านความต้องการของซอฟต์แวร์ที่จะสร้าง ในการกำกวมหรือข้อผิดพลาดที่เกิดในซอฟต์แวร์ให้สามารถใช้งานจริงได้ หรือเลือกระบบที่เคยใช้ในสนามจริง (field) และมีผลการทำงานดีกลับมาใช้ใหม่ ถ้าระบบนั้นมีความใกล้เคียงกับฟังก์ชันที่ต้องการ ไม่มีการรับประกันว่าฮาร์ดแวร์ที่รันซอฟต์แวร์หรือควบคุมด้วยซอฟต์แวร์นั้นจะทำงานถูกต้อง ขณะที่กำลังเขียนซอฟต์แวร์ ฮาร์ดแวร์ที่รันซอฟต์แวร์หรือถูกควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ นั้นอาจยังไม่ถูกสร้างขึ้น

การลดขนาดของซอฟต์แวร์ที่กำลังพัฒนาด้วย การสร้างแบบจำลองโดยใช้เทคนิค UML (unified modeling language) เพื่อสร้างระบบสมองกลฝังตัวที่ตรงตามจุดประสงค์ และนำไปใช้ในสนามใช้งานจริงให้เร็วที่สุด จำเป็นต้องหาวิธีการหรือเทคนิคในการพัฒนาที่ไม่ขึ้นกับฮาร์ดแวร์ โดยเฉพาะปัจจุบันมีแนวโน้มที่ชิ้นส่วนที่จะฝังตัวเข้าสู่ระบบสมองกลฝังตัวนั้นมีความเร็วสูงขึ้น และมีการทำให้ระบบอยู่บนชิป หรือแผ่นวงจรมีความหนาแน่นของวงจรสูงขึ้นมาก ทำให้ความต้องการระบบที่สนับสนุนการจำลอง (simulation) เพื่อนำซอฟต์แวร์ที่เคยพัฒนามาแล้วมาใช้ใหม่ โดยการใช้ระบบปฏิบัติการหรือ OS (operating system) เข้าช่วย โดยให้โปรแกรมหรือซอฟต์แวร์ประยุกต์ทำงานบนระบบปฏิบัติการ ดังนั้นผู้พัฒนาซอฟต์แวร์ประยุกต์ไม่จำเป็นต้องรู้เกี่ยวกับเรื่องการอินเทอร์รัพต์ (interrupt) หรือการจัดการพื้นที่ในหน่วยความจำ (memory management) ซึ่งเป็นความรู้ในระดับฮาร์ดแวร์และไม่จำเป็นต้องรู้ลำดับการควบคุมฮาร์ดแวร์นั้นๆ นอกจากนี้ถ้า

ใช้ระบบปฏิบัติการแบบเรียลไทม์ (real-time OS) สามารถพัฒนาซอฟต์แวร์ได้ง่าย ไม่ว่าจะเป็นระบบที่ต้องจัดการกับจังหวะหรือไทมิงในการทำงาน หรือการซิงโครไนเซชัน (synchronization) หรือการจัดการที่ขึ้นกับลักษณะพิเศษของฮาร์ดแวร์

การพัฒนาซอฟต์แวร์ของระบบสมองกลฝังตัวส่วนใหญ่จะมีความต้องการหลากหลาย แต่ระยะเวลาในการพัฒนามักจะถูกจำกัด ดังนั้นระบบปฏิบัติการจึงเป็นสิ่งจำเป็นมากในการเลือกใช้ระบบปฏิบัติการในระบบสมองกลฝังตัว ต้องคำนึงถึงความแพร่หลายของซอฟต์แวร์ประยุกต์ ความพร้อมของดีไวส์ไดรเวอร์ (device driver) ที่ควบคุมดูแลฮาร์ดแวร์ และสิ่งแวดล้อมเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์บนระบบปฏิบัติการนั้น

ก. ทรัพยากรระบบและการออกแบบระบบสมองกลฝังตัว (resource and design of embedded systems) ประกอบขึ้นจาก MPU (micro-processing unit) หน่วยความจำ อุปกรณ์อินพุต อุปกรณ์เอาต์พุต ซอฟต์แวร์ ได้แก่ โปรแกรม ข้อมูล และระบบเน็ตเวิร์กซึ่งเชื่อมโยงอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ นอกจากนี้อาจมองได้ว่าผู้ใช้ระบบสมองกลฝังตัวก็เป็นส่วนหนึ่งของระบบสมองกลฝังตัวนั้น การออกแบบระบบสมองกลฝังตัว คือ การนำเอาข้อกำหนดเฉพาะด้านความต้องการ (requirement specification) เมื่อนำฟังก์ชันที่ต้องการมาแบ่งย่อยลงไปเรื่อยๆ ในที่สุดจะได้ชุดของทรัพยากรระบบที่ประกอบด้วย MPU หน่วยความจำ และโปรแกรมนงานหรือเทสค์ (task) การออกแบบระบบสมองกลฝังตัวอีกอย่างที่ใช้กันก็คือ การนำเอาเทสค์ที่แบ่งย่อยเหล่านี้มารวมกัน เพื่อให้สามารถแสดงฟังก์ชันได้ตามข้อกำหนดเฉพาะด้านความต้องการ ระบบสมองกลฝังตัวส่วนใหญ่ประกอบด้วยเทสค์หลายตัวที่ทำงานร่วมกัน เพื่อทำงานให้ตรงตามข้อกำหนดเฉพาะด้านความต้องการ การเลือกเทสค์ใดเทสค์หนึ่งจากเทสค์ที่กำลังทำงานพร้อมกันอยู่ขึ้นมาทำงานนั้นขึ้นกับเหตุการณ์ (event) ใดที่ทำให้เกิดความจำเป็นต้องเกิดเทสค์นั้น ในระหว่างความต้องการนั้นระบบส่วนใหญ่จะมีข้อกำหนดว่า ระบบจะต้องตอบสนองความต้องการภายในเวลาที่กำหนด และเสร็จสิ้นงานหรือเทสค์นั้นในเวลาที่กำหนด

ข. การสร้างระบบสมองกลฝังตัว (technology for building embedded systems) ระบบสมองกลฝังตัวส่วนใหญ่มีลักษณะของความเป็น ระบบเรียลไทม์ (real-time system) มีจุดประสงค์ในการตอบสนองต่อเหตุการณ์หรืออินพุตภายในเวลาที่กำหนด การพัฒนาซอฟต์แวร์สมองกลฝังตัวนั้นทำได้ยากเพราะการพัฒนาซอฟต์แวร์สมองกลฝังตัวส่วนใหญ่ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากเครื่องมือทันสมัยที่ใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์ใช้งานทั่วไปได้ แต่ผู้พัฒนาจำเป็นต้องมีความรู้ขั้นสูง



ในเรื่องสถาปัตยกรรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีบ่อยครั้งที่จำเป็นต้องมีความรู้ในเรื่องฮาร์ดแวร์ด้วย สาเหตุที่สำคัญมากที่สุดอีกอันหนึ่งก็คือ ในการสร้างอุปกรณ์สมองกลฝังตัว หรือที่เรียกว่าระบบสมองกลฝังตัวนั้น จำเป็นต้องมีการพัฒนาและออกแบบที่ค่อนข้างเฉพาะ เพื่อให้ฮาร์ดแวร์เป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับแพลตฟอร์มฮาร์ดแวร์ใช้งานทั่วไป (general hardware platform) นอกจากนี้ในปัจจุบันยังไม่มีหนังสือหรือเอกสารมากนักที่อธิบายและให้ความรู้เกี่ยวกับการพัฒนาซอฟต์แวร์สมองกลฝังตัวอย่างเป็นระบบ การพัฒนาซอฟต์แวร์สมองกลฝังตัวนั้นมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับฟังก์ชันของซอฟต์แวร์พื้นฐาน เช่น ระบบปฏิบัติการ ไม่ว่าจะซื้อฟังก์ชันระบบปฏิบัติการแบบเป็นแพ็คเกจหรือสร้างขึ้นมาเอง

ค. ลักษณะเฉพาะของซอฟต์แวร์สมองกลฝังตัว (characteristics of embedded software) การเพิ่มขีดความสามารถหรือฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์สมองกลฝังตัว (หรืออุปกรณ์ที่ใส่เข้าไปในระบบสมองกลฝังตัว) โดยปรกติอุปกรณ์สมองกลฝังตัวจะมีหลากหลายประเภทและรูปแบบ ตั้งแต่อุปกรณ์ในดาวเทียม เครื่องบิน หรือในผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค เช่น กล้องดิจิทัล ระบบนำทางในรถยนต์ การควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ อุปกรณ์สมองกลฝังตัวส่วนใหญ่จะเป็นระบบตอบสนองทันที หรือที่รู้จักกันในชื่อของ ระบบเรียลไทม์ (real-time system) ซึ่งจะรับสัญญาณจากภายนอก และตอบสนองภายในเวลาที่กำหนด ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษอย่างหนึ่งของซอฟต์แวร์สมองกลฝังตัว โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ต่างกันมักต้องมียุคประกอบด้านฮาร์ดแวร์ของระบบสมองกลฝังตัวที่ต่างกันไป เพราะอุปกรณ์เหล่านั้นจะมีรูปแบบและฟังก์ชันการใช้งานที่แตกต่างกันไป ดังนั้นซอฟต์แวร์สมองกลฝังตัวจึงถูกสร้างขึ้นบนพื้นฐานของฮาร์ดแวร์แพลตฟอร์มที่หลากหลายแตกต่างกันไปตามระบบ

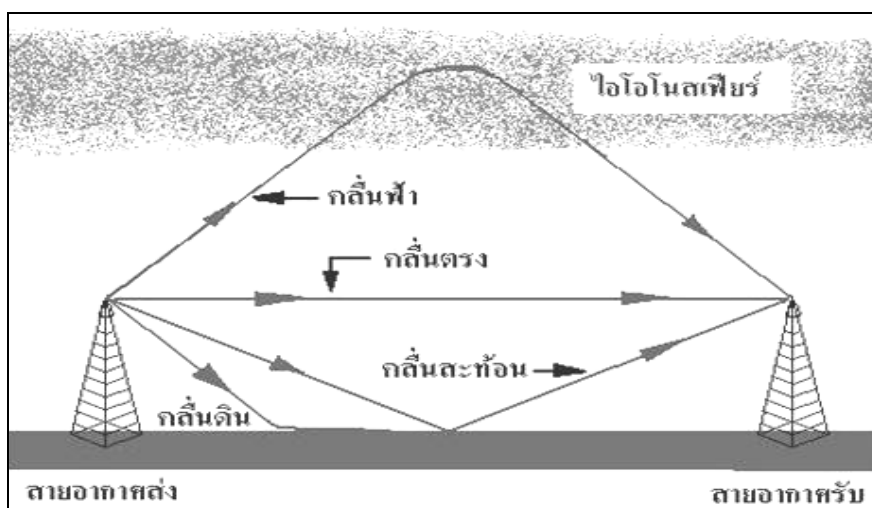
ง. การประมวลผลแบบเรียลไทม์ (real-time processing) โดยทั่วไประบบสมองกลฝังตัวจะรับคำร้องขอประมวลผลต่างๆ จากภายนอก ตัวอย่างของคำร้องขอประมวลผล ได้แก่ การเริ่มทำงานของอุปกรณ์ตามค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ (sensor) การแสดงผลบนหน้าจอตามคำสั่งของผู้บังคับควบคุมเครื่องมือ การตอบสนองต่อข้อมูลที่กำลังสื่อสาร คำร้องขอประมวลผลต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่ต้องการความเป็นเรียลไทม์ หมายความว่า การประมวลผลต้องเสร็จสิ้นภายในเวลาที่กำหนด ฟังก์ชันในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เหล่านี้ต้องตอบสนองภายในเวลาที่จำกัด การได้รับคำสั่งต่างๆ จากภายนอกโดยต้องการการตอบสนองจากระบบเรียกสภาวะการตอบสนองว่า เหตุการณ์ (event) ระบบเรียลไทม์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือประเภทที่มีข้อจำกัดด้านเวลาแบบหลวมๆ เช่น การควบคุมเครื่องมืออุปกรณ์ของมนุษย์ และ ประเภทที่มีข้อจำกัดด้านเวลาที่เข้มงวดมาก เช่น

การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์กับอุปกรณ์ โดยแบบแรกจะเรียกว่า ระบบเรียลไทม์แบบอ่อน (soft real-time system) และแบบหลังจะเรียกว่า ระบบเรียลไทม์แบบแข็ง (hard real-time system) ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์หลายเหตุการณ์พร้อมๆ กัน ระบบจะต้องสามารถตอบสนองต่อเหตุการณ์แต่ละเหตุการณ์ภายในเวลาที่กำหนด แต่โดยปกติแล้วหน่วยประมวลผลไมโครชิพจะมีเพียงชิ้นเดียว จึงไม่สามารถตอบสนองต่อเหตุการณ์มากกว่าหนึ่งเหตุการณ์ในเวลาเดียวกันได้ ดังนั้นต้องให้ลำดับแก่เหตุการณ์ที่เข้ามา เพื่อควบคุมให้เหตุการณ์ไหนถูกประมวลผลก่อน เหตุการณ์ไหนถูกประมวลผลหลังโดยการจัดตารางเวลางาน (task scheduling) ตัวชี้วัดว่าโปรเซสทำก่อน โปรเซสทำหลังนั้น เรียกว่าค่าความสำคัญหรือไพร้อริตี (priority) เหตุการณ์ที่มีไพร้อริตีสูงนั้นจะประมวลผลก่อน การให้ค่าความสำคัญหรือไพร้อริตีเพื่อจัดลำดับให้ประมวลผลก่อนหรือหลังนี้ อาจทำให้เกิดกรณีเหตุการณ์ที่มีไพร้อริตีต่ำนั้นไม่ถูกตอบสนองในเวลาที่กำหนด สถานการณ์เช่นนี้เรียกว่า หกเวลาหรือไทม์เอาต์ (time out) หรือเลยเวลา หรือไทม์โอเวอร์ (time over)

2.4 การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ในสนามและแม่ข่าย มีความสำคัญมากถ้าใช้การสื่อสารแบบสายจะให้ผลดีมากแต่การลงทุนสูงการใช้เครือข่ายโทรศัพท์มือถือหรือคลื่นวิทยุจำเป็นต้องเข้าใจการเดินทางของคลื่นและอุปสรรคข้อจำกัดต่างๆ สำนักคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2537) ได้อธิบายว่าคลื่นวิทยุที่กระจายออกจากสายอากาศจะเดินทางไปทุกทิศทาง ในทุกระนาบ การกระจายคลื่นนี้มีลักษณะเป็นการขยายตัวของพลังงานออกเป็นทรงกลม ถ้าจะพิจารณาในส่วนของพื้นที่แทนหน้าคลื่นจะเห็นได้ว่ามันพุ่งออกไปเรื่อยๆ จากจุดกำเนิด และสามารถเขียนแนวทิศทางเดินของหน้าคลื่นได้ด้วยเส้นตรงหรือเส้นรังสีที่ลากจากสายอากาศออกไปจะทำมุมกับระนาบแนวนอน มุมนี้เรียกว่า มุมแผ่คลื่น อาจมีค่าเป็นบวก (มุมยก) หรือมีค่าเป็นลบ (มุมกดลง) ก็ได้ มุมของการแผ่คลื่นนี้อาจนำมาใช้แบ่งประเภทของคลื่นวิทยุได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ คลื่นดิน (ground wave) กับคลื่นฟ้า (sky wave) พลังงานคลื่นวิทยุส่วนใหญ่จะเดินทางอยู่ใกล้ๆ ผิวโลก เรียกว่าคลื่นดิน ซึ่งคลื่นนี้จะเดินไปตามส่วนโค้งของโลก ส่วนคลื่นที่ออกจากสายอากาศ ด้วยมุมแผ่คลื่นเป็นค่าบวกเดินทางจากพื้นโลกพุ่งไปยังบรรยากาศจนถึงชั้นเพดานฟ้าและสะท้อนกลับลงมายังโลกเรียกว่า คลื่นฟ้า

2.4.1 องค์ประกอบของคลื่นในภาพที่ 6 แบ่งออกเป็น 4 องค์ประกอบด้วยกัน คือ คลื่นผิวดิน (surface wave) คลื่นตรง (direct wave) คลื่นสะท้อนดิน (ground reflected wave) และคลื่นหักเหโทรโปสเฟียร์ (reflected troposphere wave) คลื่นผิวดินเป็นคลื่นที่เดินตามไปยังผิวโลก อาจเป็นผิวดิน หรือผิวน้ำก็ได้ พิสัยของการกระจายคลื่นชนิดนี้ขึ้นอยู่กับค่าความนำทางไฟฟ้าของ

ผิวที่คลื่นนี้เดินทางผ่านไป เพราะค่าความนำจะเป็นตัวกำหนดการดูดกลืนพลังงานของคลื่นผิวโลก การดูดกลืนของคลื่นผิวนี้อาจเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่สูงขึ้น คลื่นตรงเป็นคลื่นที่เดินทางออกไปเป็นเส้นตรงจากสายอากาศ ส่งผ่านบรรยากาศตรงไปยังสายอากาศรับ โดยมีได้มีการสะท้อนใดๆ คลื่นสะท้อนดิน หมายถึง คลื่นที่ออกมาจากสายอากาศ ไปกระทบผิวดินแล้วเกิดการสะท้อนไปเข้าที่สายอากาศรับ คลื่นหักเหโทรโปสเฟียร์ หมายถึง คลื่นหักเหในบรรยากาศชั้นต่ำของโลกที่เรียกว่าโทรโปสเฟียร์ การหักเหมีมิใช่เป็นการหักเหแบบปกติที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศของโลกกับความสูง แต่เป็นการหักเหที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศอย่างทันทีทันใด และไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นและในความชื้นของบรรยากาศ ได้แก่ ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ออณหภูมิแปรกลับ



ภาพที่ 6 คลื่นแบบต่างๆ

ที่มา: สำนักคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2537)

ก. คลื่นผิวดิน (surface wave propagation) เป็นคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศโดยผิวพื้นดินเป็นสื่อ นำ คลื่นผิวดินจะมีขึ้นได้ก็ต่อเมื่อสายอากาศของเครื่องส่งจะต้องอยู่ใกล้ชิดกับพื้นดิน ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อความถี่ในย่าน VLF LF และ MF การแพร่กระจายคลื่นชนิดนี้สามารถแพร่กระจายได้ระยะทางไกลมาก ส่วนย่าน VHF และ UHF ก็สามารถที่จะแพร่กระจายคลื่นชนิดนี้ได้เช่นกัน แต่ระยะทางติดต่อไม่ไกลนัก เพราะค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพื้นดินมีผลต่อความถี่สูงๆ เป็นอย่างมาก เพราะจะทำให้เกิดความสูญเสียกำลังไปในพื้นดิน นั่นคือ เมื่อคลื่นแพร่ผ่านผิวดินไป เส้นแรงของสนามไฟฟ้าของคลื่นจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นบนดิน

ทำให้เกิดกระแสไหลในดินขึ้น และเนื่องจากพื้นดินมิใช่เป็นตัวนำสมบูรณ์แบบ ทำให้มีความต้านทานเกิดขึ้นเป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียกำลังขึ้น การแผ่ขยายของคลื่นดินที่สามารถเดินทางตามผิวโค้งของโลกได้ จึงสามารถส่งคลื่นไปได้ไกลเมื่อใช้ความถี่ต่ำ ๆ เช่น ในย่าน LF หรือ MF โดยทั่วไปจะครอบคลุมได้ระยะถึง 100 ไมล์ (หรือ 160 กิโลเมตร) ตามมาตรฐานการแพร่กระจายคลื่นในช่วงเวลาตลอดวัน จากนั้นการลดทอนจะมีสูงมากขึ้นตามลำดับ คุณสมบัติข้อนี้พอสังเกตได้ เช่น เราไม่สามารถรับฟังคลื่นสั้น ซึ่งมีความถี่สูงมากจากสถานีส่งที่อยู่ไม่ไกลมากนัก ทั้งที่สามารถรับฟังคลื่นยาว หรือคลื่นกลางสถานีส่งนั้นได้ดี (กรณีที่สถานีนั้นส่งออกอากาศพร้อมกันทั้งคลื่นสั้นและคลื่นยาว) คลื่นดินจัดว่ามีความแน่นอนดีไม่ค่อยมีอาการจางหาย หรือ ดังๆ เบาๆ เกิดขึ้นและไม่ได้รับการกระทบกระเทือนมากเมื่อลมฟ้าอากาศเปลี่ยนแปลง แต่คลื่นดินมีข้อเสีย คือ ส่งได้ไม่ไกลมากนักเนื่องจากผิวโลกมีความต้านทานสูง ส่วนเหตุผลที่คลื่นสามารถเดินทางตามผิวโค้งของโลก เป็นผลมาจากตัวแปร 2 ค่า ด้วยกัน คือสภาพการนำของพื้นดิน (conductivity) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพื้นดิน (dielectric constant) แสดงในตารางที่ 3 สังเกตว่าบริเวณที่เป็นพื้นน้ำมีผลดีต่อการแพร่กระจายคลื่นดินเป็นอย่างมาก

ตารางที่ 3 สภาพการนำและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพื้นดิน

| ลักษณะของพื้นผิว | สภาพการนำ | ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก |
|------------------|-----------|----------------------|
| น้ำทะเล          | ดีมาก     | 80                   |
| แอ่งน้ำขนาดใหญ่  | ดี        | 80                   |
| ดินแฉะ           | ดี        | 30                   |
| พื้นที่แห้งแล้ง  | เลว       | 7                    |
| ทะเลทราย         | เลว       | 4                    |
| ป่า              | เลวมาก    | -                    |

ที่มา: สำนักคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2537)

ข. คลื่นตรง (direct wave propagation) ระบบสื่อสารรับส่งข้อมูลแบบดิจิทัลส่วนใหญ่จะใช้คลื่นวิทยุย่าน VHF และ UHF ซึ่งเป็นคลื่นตรงมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเหมือนกับการเดินทางของแสงคือพุ่งเป็นเส้นตรง และการกระจายคลื่นชนิดนี้จะอยู่ในระดับสายตา (line of sight) การกระจายคลื่นชนิดนี้จะมีการถ่าง ของ radio beam และมีการแตกกระจายหรือสะท้อนได้ เมื่อพบกับสิ่งกีดขวาง เช่น ดึก ภูเขา โดยที่ระยะทางของการแพร่กระจายคลื่นจะมากหรือน้อยนั้นต้องขึ้นอยู่กับความสูงของเสาอากาศเป็นสำคัญ การแพร่กระจายคลื่นชนิดนี้ จะมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่น ในย่านความถี่ที่สูงกว่าย่าน VHF ขึ้นไป แต่ส่วนใหญ่ จะใช้ความถี่ในย่านที่สูงกว่า UHF ขึ้นไป เนื่องจากการใช้ความถี่ในย่าน VHF และ UHF (low band) จะมีการสะท้อนบนพื้นดินด้วย (reflection propagation) เกิดขึ้นเป็นอย่างมาก จากการแพร่กระจายคลื่นตรงนี้ยังแบ่งการแพร่กระจายออกเป็น 2 แบบคือ

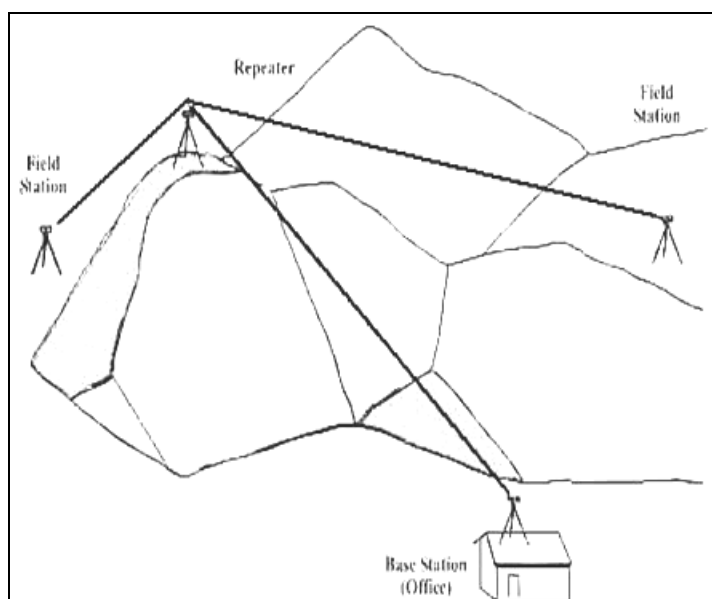
1) การแพร่กระจายเป็นแนวโค้ง เนื่องจากการเบี่ยงเบนในชั้นบรรยากาศ (refraction propagation) โดยปกติ คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายไปในอากาศ จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง เช่นเดียวกับแสง แต่ข้อเท็จจริงประการหนึ่ง คือ ชั้นบรรยากาศก็ย่อมมีความแตกต่างกัน ดังนั้นคลื่นวิทยุที่ส่งออกอากาศไป ย่อมที่จะเบี่ยงเบนไปบ้างนอกเหนือจากที่พุ่งเป็นเส้นตรงแล้ว ด้วยเหตุนี้ทำให้สามารถรับสัญญาณคลื่นวิทยุที่อยู่ห่างไกลจากระดับสายตาได้ การแพร่กระจายคลื่นชนิดนี้จะมีอิทธิพลต่อการติดต่อสื่อสารความถี่วิทยุในย่านสูงกว่า VHF ขึ้นไป การกระจายคลื่นดังกล่าวนี้ไม่มีทฤษฎีที่แน่นอนว่า คลื่นวิทยุที่ส่งออกไปแล้วจะเบี่ยงเบนลงสู่พื้นดินในช่วงใดบ้าง แต่จากการทดลองพบว่า คลื่นวิทยุที่เบี่ยงเบนจะมีลักษณะเป็น multi part เบี่ยงเบนลงสู่พื้นดินเป็นจำนวนมาก

2) การแพร่กระจายคลื่นไปยังด้านที่มองไม่เห็นในระยะสายตา (diffraction Propagation) เป็นการกระจายคลื่นโดยการแตกกระจายของคลื่นวิทยุ ลักษณะของการติดต่อกล่าวคือ เมื่อคลื่นวิทยุที่ส่งออกไปจะกระทบกับสิ่งที่กีดขวาง พลังงานบางส่วนจะเกิดการแตกกระจายรอบๆ บริเวณสิ่งกีดขวางนั้น ในทางปฏิบัติ เราจะให้คลื่นวิทยุพุ่งไปกระทบกับส่วนบนของสิ่งกีดขวางนั้นๆ สืบเนื่องจากเหตุผลที่ว่า คลื่นที่เกิดการแตกกระจายไปนั้น สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้ตามหลักการของ ray theory จะถือเอาส่วน โค้งของผิวโลก อาคาร ต้นไม้ เนินเขา ที่ราบสูง ภูเขา หรืออากาศยาน เหล่านี้เป็นต้น แต่ถ้าสิ่งกีดขวางมีขนาดเล็กและมียอดแหลมคล้ายสันมีด (มุมยอดเล็ก) คลื่นที่มาตกกระทบจะไม่มีผลต่อการที่จะทำให้เกิด diffraction loss หรือ shower effect ได้ แต่ถ้าหากสิ่งกีดขวางมีขนาดใหญ่ ค่าของ shower effect จะเกิดขึ้นมาก ซึ่งเป็นผลทำให้ความแรงของสัญญาณลดลง ปกติ radio beam ที่ส่งไป ชั้นบรรยากาศจะโค้งตามผิวโลกและเป็นเส้นตรง แต่ถ้าหากเครื่องส่งและ

เครื่องรับอยู่ห่างไกลเกินกว่าแนวระดับสายตามากๆ แล้ว เราสามารถติดต่อได้โดยการใช้คลื่นวิทยุไปกระทบหรือเสียดผิวโลก ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกกระจายของคลื่นวิทยุ ทำให้สามารถรับคลื่นวิทยุได้ในระยะทางไกลเกินกว่าแนวระดับสายตา

ค. คลื่นฟ้า (sky wave propagation) เป็นการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นวิทยุที่สะท้อนบรรยากาศชั้น ionospheric และสะท้อนกลับมายังผิวโลก การกระจายคลื่นชนิดนี้จะมีอิทธิพลต่อการแพร่กระจายคลื่นในย่าน HF ซึ่งจะสะท้อนในชั้นนี้ จะทำให้ได้ระยะทางการติดต่อได้ไกลมาก โดยที่การเดินทางของคลื่นวิทยุในย่าน HF คือ การเดินทางโดยการสะท้อนชั้นบรรยากาศเป็นหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างมากที่จะต้องพิจารณาถึงชั้นบรรยากาศต่างๆที่เกิดขึ้นในชั้น ionospheric นี้ และพิจารณาถึงความถี่ที่เหมาะสมต่อการติดต่อ การที่ทราบว่าชั้นบรรยากาศชั้นต่างๆ เนื่องจากมี ionization แตกต่างกัน จึงทำให้คลื่นวิทยุหักเหและเบี่ยงเบน จนกระทั่งทำให้คลื่นวิทยุเบี่ยงเบนกลับมายังโลกอีกครั้งหนึ่ง คลื่นวิทยุที่เดินทางไปกระทบกับชั้นบรรยากาศต่างๆ ดังกล่าวจะต้องไม่ให้กระทบตรงๆ เพราะจะทำให้คลื่นวิทยุสะท้อนกลับลงมาในแนวตั้ง ซึ่งไม่มีผลต่อการติดต่อสื่อสารแต่อย่างใด แต่ถ้าหากให้คลื่นวิทยุกระทบชั้นบรรยากาศเอียงเป็นมุมกับชั้นบรรยากาศ และเมื่อคลื่นวิทยุผ่านชั้นบรรยากาศเข้าไปกระทบกับบรรยากาศชั้นนี้ที่มีความหนาแน่นของบรรยากาศ (ionization density) ต่างกันตามความสูง จึงทำให้คลื่นวิทยุค่อยเบี่ยงเบนไปจากเดิมจนในที่สุดกลับลงสู่พื้นโลกอีกครั้ง

2.4.2 การสื่อสารของระบบ SCADA แนวทางการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ปลายทางกับส่วนกลางการควบคุมเป็นสิ่งที่ต้องเชื่อถือได้มากโดยเฉพาะระบบ SCADA ใช้ในกิจการที่เกี่ยวกับความปลอดภัย แนวทางการสื่อสารที่ดีคือการเดินสายสัญญาณอาจเป็นสายใยแก้วนำแสง หรือใช้สายโทรคมนาคมที่มีอยู่ แต่บ่อยครั้งที่ระบบการสื่อสารพื้นฐานไม่มีในบริเวณที่ตั้งของอุปกรณ์ปลายทางการควบคุม ทางเลือกที่เป็นไปได้ถ้ามีงบประมาณมากอาจใช้การสื่อสารผ่านดาวเทียม หรือถ้าจะประหยัดเงินสามารถใช้การสื่อสารผ่านเครือข่ายโทรศัพท์มือถือที่มีอยู่ทั่วไปตามชุมชน หรือทางหลวงต่างๆ แต่บางแห่งที่อยู่ห่างไกลสัญญาณจากเครือข่ายโทรศัพท์มือถือไปไม่ถึง การใช้คลื่นวิทยุเพื่อการสื่อสารจะทำได้ดีกว่า ในระบบ SCADA การสื่อสารโดยใช้คลื่นวิทยุค่อนข้างมาก โดยคลื่นวิทยุที่ใช้จะอยู่ในย่าน VHF UHF และ SHF ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตการใช้งานในกรณีที่ต้องติดต่อกับสถานีปลายทาง ในหุบเขาจะใช้วิธีทวนสัญญาณผ่านสถานีทวนสัญญาณ (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 บริเวณหุบเขาใช้การสื่อสารผ่านสถานีทวนสัญญาณ

ก. วิธีการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุแบบ packet radio (แพ็กเก็ตเรดิโอ) จะเป็นหนทางที่ดี รายละเอียดเบื้องต้นของ packet radio คือวิธีการสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์แบบหนึ่งซึ่งรับ-ส่งผ่านข้อมูลที่ละชุด หรือจะเรียกว่าทีละ แพ็กเก็ต และสามารถใช้เวลาวิทยุทุกย่าน คือ HF VHF UHF และ SHF packet radio เป็นการสื่อสารที่มีความผิดพลาดต่ำ โดยสถานีรับ จะได้รับข้อมูลที่ถูส่งมาให้ ได้อย่างไม่มีผิดพลาด และอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ในกิจการวิทยุสมัครเล่นยังมีการทำเป็นศูนย์ข่าว หรือ ที่เรียกกันว่า BBS (bulletin - board - system) สามารถเรียกดูและดึงข้อมูลมาเก็บในคอมพิวเตอร์ ของตัวเองได้ (download) สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการรับ-ส่งนั้นเป็นแบบแพ็กเก็ต หรือรับ-ส่งทีละชุด จะเป็นการรับ-ส่งที่เพิ่มความมั่นใจว่าการรับ-ส่งข้อมูลนั้นจะถูกต้องแน่นอน 100% หากทำการรับ-ส่งไม่สำเร็จระบบก็จะทำการรับ-ส่งข้อมูลนั้นใหม่จนกว่าจะเสร็จสิ้น หรือถูกยกเลิกไป การสื่อสารแบบนี้ทำให้เราสามารถใช้เวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในเวลาที่ 1 ความถี่ สามารถใช้กัน ได้หลาย สถานี ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งแต่ละสถานีจะไม่มีมารบกวนกันและยังสามารถสร้างเป็นเครือข่าย (network) เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลทั้งในประเทศ และต่างประเทศ อีกทั้งยังสามารถส่งถึงนักวิทยุสมัครเล่นทั่วโลกผ่านดาวเทียมสมัครเล่น เช่นดาวเทียม OSCAR ได้ อีกด้วย หลักการส่งข้อมูลดิจิทัลของ packet radio คือทำการรับ-ส่งข้อมูลแบบ AFSK (audio frequency shift keying) โดยใช้ความถี่เสียง 2 เสียงที่แตกต่างกัน โดยให้ tone เสียงหนึ่งแสดงเป็น 0 และอีก tone เสียงหนึ่งแสดงสถานะเป็น 1 ถ้าความเร็วของ radio modem มีความเร็ว 1,200bps จะใช้ tone เสียง 1,200Hz กับ 2,200Hz มีtone เสียงต่างกัน 1,000Hz และถ้าใช้ radio modem ความเร็ว

300bps ใช้ tone เสียง 2,125Hz กับ 2,295Hz มี tone เสียงต่างกัน 170Hz ด้วยความสามารถการรับส่งข่าวสารข้อมูลได้พร้อมๆ กันหลายสถานีในความถี่เดียวจึงต้องมี การกำหนดโปรโตคอล (protocol) หรือระเบียบวิธีการติดต่อสื่อสารให้เป็นไปตามหลักสากลดังนี้คือในย่าน HF จะใช้ความเร็ว 300 baud ส่วน VHF UHF และ SHF จะใช้ความเร็วที่ 1,200 และ 9,600 baud หรือ สูงกว่า

ข. การใช้ระบบสื่อสารผ่านเครือข่ายโทรศัพท์มือถือจะใช้การทำงานในแบบ GPRS (general packet radio service) ซึ่งเป็นการ overlay network บน network GSM ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลในระบบ GSM นั้นดีขึ้น โดยมีหลักการทำงานคือข้อมูลที่รับส่งผ่านเครือข่าย GPRS จะถูกตัดแบ่งเป็น packet ย่อยๆ ก่อน ในแต่ละ packet จะมีข้อมูลระบุถึงที่มาที่สัมพันธ์กันเพื่อใช้ในการประกอบ กลับขึ้นมาเป็นข้อมูลเดิมอีกครั้ง เปรียบได้กับเกม jigsaw ที่รูปภาพถูกตัดออกเป็นชิ้นเล็กๆ จากโรงงานแล้วบรรจุใส่ถุงขายให้ลูกค้า โดยในระหว่างทางขนส่งให้กับลูกค้าชิ้นภาพชิ้นเล็กแต่ละชิ้นก็จะถูกคลุกคละกันไป เมื่อเรานำมันมาต่อเข้าด้วยกันก็ใช้วิธีดูจากความสัมพันธ์ของแต่ละชิ้น ซึ่งอาจจะมีวิธีการที่แตกต่างกันไป ในอินเทอร์เน็ตเป็นอีกหนึ่งตัวอย่างของเครือข่ายข้อมูลแบบ packet ซึ่งถือเป็นรูปแบบที่นิยมสูงสุดในปัจจุบัน สำหรับข้อดีข้อดีของ GPRS คือการรับส่งข้อมูลที่รวดเร็วกว่าระบบ GSM ธรรมดา ที่มีความเร็วเพียง 9.6 KBPS แต่ GPRS สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้เร็วกว่า

2.4.3 การเลือกระบบสื่อสาร ระบบควบคุมระดับน้ำในคลองอัตโนมัติจำเป็นต้องมีระบบสื่อสารที่ดี โดยอาจเป็นระบบวิทยุสื่อสารย่าน VHF หรือ UHF หรือ ระบบโทรศัพท์ซึ่งอาจเป็นแบบมีสายหรือไร้สาย ระบบ GPRS หรือระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมก็ได้ ระบบสื่อสารแต่ละระบบมีข้อดี-ข้อเสียต่างกัสดังตารางที่ 4



ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของระบบสื่อสารสำหรับระบบคลองอัตโนมัติ

| ระบบสื่อสาร                | ข้อดี                                                                                                                                                                                                            | ข้อเสีย                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. วิทยุ                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่ต้องเสียค่าบริการเหมือนระบบโทรศัพท์ ซึ่งปกติจะต้องเสียค่าบริการตามจำนวนครั้งและระยะเวลาที่ใช้งาน ถ้าใช้งานบ่อย เช่น ทุกชั่วโมงจะทำให้ต้องเสียค่าบริการสูง</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องเสียค่าติดตั้งระบบวิทยุสื่อสารและเสาอากาศ ซึ่งค่าติดตั้งค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบโทรศัพท์ไร้สาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าระยะทางการสื่อสารไกลต้องติดตั้งเสาอากาศสูง และใช้วิทยุกำลังวัตต์สูง</li> <li>- ต้องมีช่องสัญญาณวิทยุอยู่แล้ว มิฉะนั้นต้องขออนุมัติจากการสื่อสารฯ</li> <li>- มีปัญหาเรื่องฟ้าผ่า ต้องมีระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ดี</li> </ul> |
| 2. โทรศัพท์                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าลงทุนขั้นแรกต่ำกว่าระบบวิทยุสื่อสาร</li> <li>- ใช้โทรศัพท์สอบถามข้อมูลที่ remote station ได้โดยตรง</li> <li>- สามารถจัดทำระบบแจ้งเตือนผ่านระบบ SMS ได้</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องเสียค่าบริการต่อครั้งที่ใช้งานและต่อระยะเวลาที่ใช้งานเป็นนาที ถ้าใช้งานบ่อยและแต่ละครั้งใช้เวลานานจะต้องเสียค่าบริการมาก</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                   |
| 3. GPRS                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- เสียค่าบริการตามจำนวนข้อมูล (byte) ที่ส่ง ซึ่งค่าใช้จ่ายจะต่ำกว่าการใช้ระบบโทรศัพท์มือถือซึ่งคิดตามจำนวนครั้ง และเวลาที่ใช้ต่อครั้ง</li> </ul>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการ์ด GPRS จะแพงกว่าราคาโทรศัพท์มือถือ</li> <li>- บางพื้นที่อาจไม่มีบริการ GPRS</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 4. ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม | <ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถใช้ได้ในทุกพื้นที่</li> <li>- สื่อสารข้อมูลได้รวดเร็วกว่า</li> </ul>                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ถ้าต้องติดตั้งจานดาวเทียม ทุกจุดที่มีการรับส่งข้อมูลจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                        |

2.5 การเชื่อมต่อกับไมโครคอมพิวเตอร์ สถานีแม่ข่ายทั้งระบบโทรมาตรหรือ SCADA ต้องใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ (PC) ทำงานเรียกรับข้อมูลหรือส่งคำสั่งให้ RTU ตามที่ได้โปรแกรมไว้ การเลือกใช้ PC สำหรับระบบคล่องอัตโนมัติจะใช้เครื่องที่สามารถเปิดทำงานตลอดเวลา ความร้อนสะสมที่เครื่องมีไม่มาก ระบบปฏิบัติการมีเสถียรภาพมั่นคงไม่ล่มหรือค้างระหว่างเปิดใช้งานซึ่งในที่นี้เลือก WINDOWS ที่มีการใช้งานแพร่หลายที่สุดมีเอกสารตำรารองรับมาการใช้งานง่าย ธีรบุญ และคณะ (2545) ได้อธิบายว่าการทำงานติดต่อกันระหว่างซีพียูกับอุปกรณ์อื่นๆ การโอนถ่ายข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ นอกจากจะต้องทำงานติดต่อกับ RAM แล้วยังต้องมีการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกที่มีการส่งข้อมูลอินพุต เอาท์พุทอีกทางหนึ่ง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบสมบูรณ์ ในระบบต่างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะทำงานต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ ดังเช่น การส่งรับข้อมูลจากซีพียูไปยังส่วนอื่นๆ

การที่จะโอนย้ายข้อมูลทุกตัวนั้นจะต้องมีแหล่งที่ส่งข้อมูล และแหล่งที่รับข้อมูล สำหรับขบวนการเหล่านี้เรียกว่าแอดเดรส การทำงานเหล่านี้โดยทั่วไป จะต้องมียุทธศาสตร์ ในการตรวจสอบอุปกรณ์ว่าพร้อมที่จะส่ง-รับข้อมูล หรือยังก่อนเสมอ เนื่องจากจุดที่ส่งและรับข้อมูล จะต้องมียุทธศาสตร์ตรวจสอบความพร้อมเสมอเพื่อที่จะให้ข้อมูลที่เรากำลังใช้นั้นๆ เป็นระเบียบ ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูลจากซีพียูไปที่อุปกรณ์รอบข้าง ซึ่งจุดรับส่งคู่หนึ่งๆ อาจจะเป็นระหว่างซีพียูด้วยกันหรือซีพียูกับหน่วยความจำ หรือ ซีพียูกับอุปกรณ์รอบข้างหรือระหว่างอุปกรณ์รอบข้างด้วยกันหรือระหว่างหน่วยความจำกับอุปกรณ์รอบข้างก็ได้สำหรับข้อมูลที่โอนย้ายไป-มานั้นจะอยู่ในลักษณะของเลขฐานสอง ตัวอย่างเช่น 01101100 ซึ่งเลขแต่ละตัวจะแทนด้วย 1 bit อาจเป็น 8 bit หรือ 16 bit ขึ้นอยู่กับของระบบนั้นๆ ถ้าหากเป็นการต่อจากพอร์ตพีซีไม่ว่าจะเป็น serial หรือ parallel สัญญาณที่ส่งมาจะมีแรงดันไฟฟ้าสามารถควบคุมและนำมาใช้กับอุปกรณ์รอบข้างหรืออุปกรณ์ภายนอกได้ เช่น parallel port (printer port) ระดับแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ สามารถนำมาใช้ในการขับรีเลย์ ทราานซิสเตอร์ หลอดไฟ 5 โวลต์ หรือ LED ให้ทำงานได้ โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปควบคุมที่พอร์ต printer ดังนั้นการที่จะนำพีซีมาประยุกต์ใช้งานเป็นไปได้หลายวิธีการใช้พีซีติดต่ออุปกรณ์ (PC interface hardware) คือการเชื่อมต่ออุปกรณ์กับพอร์ตและระบบของการติดต่อสื่อสารของพีซี โดยผ่าน connecter ที่อยู่ภายนอกซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ข้างหลังเครื่องคอมพิวเตอร์

2.6 hardware interface programming ชุดคำสั่งสำหรับระบบคลองอัตโนมัติต้องทำงานสอดคล้องกับส่วนฮาร์ดแวร์เป็นอย่างดี ภาษาที่เลือกใช้เขียนชุดคำสั่งอาจเป็นภาษาระดับต่ำซึ่งเข้าถึงอุปกรณ์ได้รวดเร็วหรือภาษาระดับสูงการเข้าถึงอุปกรณ์ช้ากว่าแต่ด้วยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ปัจจุบันที่ทำงานรวดเร็ว การใช้ภาษาระดับสูงไม่ทำให้รู้สึกว่าการเข้าถึงอุปกรณ์ช้าแต่เกิดผลดีในการพัฒนาชุดคำสั่งได้รวดเร็วกว่าการใช้ภาษาระดับต่ำที่ผู้ใช้งานต้องรู้ด้านฮาร์ดแวร์เป็นอย่างดี การใช้ภาษาระดับสูงสำหรับระบบคลองอัตโนมัติช่วยให้การแก้ไขชุดคำสั่งทำได้ง่ายและสามารถพัฒนาชุดคำสั่งให้ดีขึ้นโดยการทำงานร่วมกันของโปรแกรมเมอร์ได้รวดเร็ว

กฤษฎา (2545) อธิบายว่าการใช้ภาษา BASIC เขียนโปรแกรมติดต่อ I/O ผ่านทาง Port ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ไม่ว่าจะเป็นทาง serial port (RS-232) หรือที่รู้จักในชื่อ com1 com2 และ parallel port หรือ printer port หรืออาจใช้ card I/O 8255 ซึ่งเป็นการขยาย port I/O ของ parallel สามารถทำการติดต่อกับ hardware ภายนอกผ่าน port ดังที่กล่าวมาได้ อีกทั้งสามารถติดต่อผ่านระบบ network โดยผ่านช่องทางการติดต่ออย่าง TCP/IP จะเห็นได้ว่า ภาษา BASIC สามารถทำงานด้าน interface hardware ได้แต่ต้องทำความเข้าใจให้ดีเพื่อนำไปใช้งานได้สะดวกและรวดเร็ว serial port (RS-232) สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก เช่น โหมดเซลล์ เครื่องตรวจวัดงานทางด้านไฟฟ้า ไมโครคอนโทรลเลอร์ ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า โอนถ่ายข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยกัน ควบคุมเสตปมอเตอร์ เป็นต้น ข้อดีของการติดต่อข้อมูลกันผ่านทาง RS-232 ก็คือสามารถใช้ได้ในระยะทางไกลๆ ระหว่างอุปกรณ์ ที่ติดต่อกัน การใช้คอมพิวเตอร์ Microsoft Visual Basic 5 หรือ 6 จะมีคอนโทรลชื่อ MS comm ที่ใช้ติดต่อกับ serial port(RS-232) ทำให้การพัฒนาโปรแกรมในด้านนี้ได้เร็วและเป็นมาตรฐานเดียวกันของทุกโปรแกรมเมอร์ที่ทำงานร่วมกันเป็นทีม parallel port สามารถทำการประยุกต์ใช้งานได้ดีเพราะสามารถทำงานได้ที่ละ 8 บิตในการติดต่อข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอกให้ระดับแรงดันที่ใช้กับอุปกรณ์ TTL ที่สัญญาณลอจิกเป็น 1 เท่ากับ +5 โวลต์ และลอจิกเป็น 0 เท่ากับ 0 โวลต์ ข้อเสียคือไม่สามารถทำงานในระยะทางที่ไกลๆ ระหว่างอุปกรณ์ที่ติดต่อกันจะเกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้นง่ายเนื่องจากระดับแรงดันไม่สม่ำเสมอ

2.7 SCADA (supervisory control and data acquisition) ระบบคลองอัตโนมัติโดยพื้นฐานจะใช้อุปกรณ์ของระบบ SCADA ดังนั้นการเข้าใจหลักการทำงานของต่างๆ มีความจำเป็นอย่างมาก สุทธิพงษ์ (2549) เป็นระบบตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Real-time ใช้ในการตรวจสอบสถานะตลอดจนถึงควบคุมการทำงานของระบบควบคุมในอุตสาหกรรมและงานวิศวกรรมต่างๆ เช่น งานด้านโทรคมนาคมสื่อสาร การประปา การบำบัดน้ำเสีย การจัดการด้านพลังงาน อุตสาหกรรม

การกลั่นน้ำมันและก๊าซ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ การขนส่ง กระบวนการนิวเคลียร์ในโรงไฟฟ้า เป็นต้น ตัวอย่างการใช้งานเช่น ใช้ SCADA ตรวจสอบข้อมูลเช่นการรั่วไหลของของเหลวที่เกิดขึ้นในท่อขนส่งจากตัวตรวจจับแล้วส่งสัญญาณแจ้งเตือนให้พนักงานทราบ โดยส่งข้อมูลสู่ส่วนกลางของระบบ SCADA เป็นต้นนอกจากนั้น SCADA อาจทำหน้าที่คำนวณและประมวลผลข้อมูลที่ได้จากฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ เช่น PLC หรือ controller หรือ RTU แล้วแสดงข้อมูลทางหน้าจอ หรือส่งสัญญาณควบคุมฮาร์ดแวร์ดังกล่าว เช่น หากอุณหภูมิของอุปกรณ์สูงเกินไปก็ทำให้ทำการปิดอุปกรณ์นั้นเป็นต้น โดยสั่งงานผ่าน PLC หรือ Controller ที่ติดต่อยู่ทั้งนี้ SCADA สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากระบบควบคุมทั้งหมดไว้ในฐานข้อมูลเพื่อให้พนักงานหรือโปรแกรมอื่นๆ สามารถนำมาใช้งานได้ SCADA นั้นเข้าไปมีส่วนในงานควบคุมทั้งเล็กและใหญ่ที่ต้องการแสดงผล แลกเปลี่ยนข้อมูล หรือควบคุมระบบต่างๆ จากส่วนกลาง เพื่อการทำงานของระบบรวมทั้งสัมพันธ์กันมองเห็นภาพรวมได้อย่างชัดเจนและมีความรวดเร็วต่อเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น ระบบ SCADA ในปัจจุบันมีความสามารถในการสื่อสาร ควบคุม และประมวลผลข้อมูลจาก I/O ของอุปกรณ์เช่น PLC RTU ได้ถึงระดับที่เกินหนึ่งแสน I/O แล้ว และได้รับการพัฒนาให้มีความสามารถรองรับความต้องการใหม่ๆ ของผู้ใช้งานอย่างต่อเนื่องตลอดมา SCADA เริ่มใช้งานในคอมพิวเตอร์ตั้งแต่ระบบปฏิบัติการ DOS, VMS และ UNIX จนมาถึงระบบปฏิบัติการ Windows และ LINUX ลักษณะสำคัญของ SCADA ตามโครงสร้าง (architecture) หน้าที่การทำงาน (functionality) และ application development

2.7.1 โครงสร้างด้านฮาร์ดแวร์ (hardware architecture) SCADA แบ่งตามโครงสร้างฮาร์ดแวร์ได้สองระดับคือ client และ data server หรือ server โดยที่ client คือคอมพิวเตอร์ที่รับและส่งข้อมูลไปยัง data server โดยฝั่ง client จะแสดงผลการทำงานของระบบควบคุมเช่น แสดงเป็นกราฟิก กราฟต่อเนื่อง หรือระบบแจ้งเตือนเมื่อเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินหรือต้องการแจ้งเตือน client สามารถสั่งงานควบคุมไปยัง data sever เพื่อส่งสัญญาณไปยัง PLC หรือ controller ส่วน data server จะทำหน้าที่ติดต่อกับ PLC controller หรือ RTU ต่าง ๆ เพื่อรับสัญญาณและส่งสัญญาณไปยัง client และรับการร้องขอจาก client เพื่อควบคุมอุปกรณ์ PLC และ controller

2.7.2 โครงสร้างด้านซอฟต์แวร์ (software architecture) ใช้เทคโนโลยีในการสื่อสารกับฮาร์ดแวร์ต่างกันไปตามผู้ผลิต เช่นการใช้ driver เฉพาะของผู้ผลิต SCADA เพื่อสื่อสารกับ PLC ซึ่งในปัจจุบันการกำหนดมาตรฐานกลางขึ้นมาเพื่อยุติปัญหาการใช้เทคโนโลยีเฉพาะด้านการสื่อสาร นอกจากนั้นยังมีความสามารถในการบริหารข้อมูลให้กับ client ที่รวดเร็วและมีเสถียรภาพ

ในส่วนของ SCADA server การติดต่อกับ PLC หรือ controller นั้น ทำได้ทั้งผ่าน driver หรือ OPC โดยที่ OPC และ driver สามารถรับคำสั่งแบบ read / write เพื่ออ่านข้อมูลจาก PLC หรือ เขียนข้อมูลเพื่อส่งงานไปยัง PLC ได้ SCADA Sever จะทำหน้าที่จัดการข้อมูล RTDB (real time data base) ที่ได้จาก PLC แล้วส่งให้กับ SCADA client โดยที่ SCADA server บางประเภทจะติดต่อกับ SCADA client ผ่าน DDE server ซึ่งทำให้สามารถนำเข้าข้อมูลจาก PLC เข้าสู่โปรแกรมเช่น MS excel หรือ โปรแกรม client อื่น ๆ ที่ติดต่อกับ DDE Server ได้ SCADA บางตัวจะออกแบบให้ SCADA sever ทำหน้าที่ตรวจจับและเก็บไว้ใน alarm DB หรือเก็บข้อมูลที่เป็น historian ไว้ใน log DB เป็นต้น เพื่อส่งให้ alarm display และ log display ทางฝั่ง SCADA client สำหรับส่วน development environment นั้นจะขึ้นอยู่กับกรออกแบบของ SCADA ซอฟต์แวร์นั้นๆ ซึ่งโดยทั่วไปก็จะมีเครื่องมือในการสร้างและจัดการกราฟิก (graphic editor) เครื่องมือในการจัดการโปรเจกต์ที่สร้างขึ้นมา (project editor) มีเครื่องมือในการนำเข้าและส่งออก text file ที่เก็บค่าคอนฟิกูเรชันของการติดต่อกับ Driver หรือ OPC sever ไว้ โครงสร้างด้านการสื่อสาร (communications) สื่อสารผ่านโปรโตคอล โดยทั่วไปเช่น TCP/IP โดย client จะติดต่อกับพารามิเตอร์ หรือ tag ภายใน server ที่บริการข้อมูลด้วยรูปแบบที่แตกต่างกันไปตามผู้ผลิต เช่นมีการส่งค่าจาก sever เมื่อค่าของ I/O ของ PLC มีการเปลี่ยนแปลง การสื่อสารกับอุปกรณ์นั้น Sever จะทำการตรวจสอบค่าจากอุปกรณ์ตามช่วงเวลาที่ผู้ใช้งานกำหนดไว้ (defined polling rate) โดยตัว controller จะส่งค่าพารามิเตอร์ตามที่ถูกร้องขอให้กับ data sever พร้อมค่าเวลาขณะนั้น (time stamp) การสื่อสารกับอุปกรณ์ของ Data Sever นั้นขึ้นอยู่กับมาตรฐานการสื่อสารของอุปกรณ์ ในปัจจุบันมีการสร้าง OPC sever ที่สนับสนุนการติดต่อด้วยมาตรฐานต่างๆ เพิ่มขึ้นมากมายจนครอบคลุมอุปกรณ์ทุกประเภท และมีการพัฒนาให้ทั่วถึงไปยังอุปกรณ์ใหม่ๆ อย่างต่อเนื่อง

2.7.3 โครงสร้างอินเทอร์เฟซ (interface) การติดต่อระหว่าง data sever กับอุปกรณ์ หรือระหว่าง data sever และ data sever และกับ client นั้น มีการผลิตเป็น driver ออกมามากมาย ตามเทคนิคเฉพาะของแต่ละผู้ผลิต ต่อมาจึงมีการกำหนดมาตรฐานของอินเทอร์เฟซขึ้นมาเป็น OPC (OLE for process control) ซึ่งมีความเร็วในการสื่อสารและบริการข้อมูลโดยมีการจัดตั้ง OPC foundation ขึ้นเป็นองค์กรหลักในการกำหนดมาตรฐานและถ่ายทอดเทคโนโลยีให้แก่สมาชิก OPC จึงเป็นมาตรฐานกลางที่เปิดกว้างมากที่สุดการติดต่อกับฐานข้อมูลนอกของ SCADA software นั้น มีการสร้างให้สามารถติดต่อได้ผ่าน ODBC (open data base connectivity), OLEDB (linking and embedding data base), DDE (dynamic data exchange)

2.7.4 โครงสร้างความสามารถในการขยายระบบ (scalability) ความสามารถในการรองรับและต่อขยายระบบ SCADA กับส่วนต่างๆ เช่น I/O ของอุปกรณ์ controller และจำนวนเครื่อง SCADA client ที่เพิ่มขึ้น หรือการต่อพ่วงกับระบบ SCADA ของยี่ห้ออื่นๆ ถ้าหาก data sever เป็นแบบ driver ที่สร้างด้วยเทคโนโลยีเฉพาะในการติดต่อกับอุปกรณ์ ก็เป็นเรื่องลำบากในการต่อขยาย เพราะ driver บางประเภทสามารถติดต่อได้เฉพาะ SCADA software บางยี่ห้อปัจจุบันได้หันมาใช้มาตรฐานกลางคือ OPC เพื่อแก้ไขปัญหา

2.7.5 โครงสร้างการสำรองระบบ (redundancy) ส่วนใหญ่มีความสามารถในการทำสำรองระบบของ data server โดยที่เมื่อ data sever ความขัดข้องก็จะสั่งงานให้ data server อีกตัวหนึ่งทำงานแทนที่ โดยจะมีการกำหนดคอนฟิกูเรชันไว้ที่ client ที่จะให้เลือกติดต่อกับ data sever ตัวไหน เมื่อเกิดความขัดข้องเกิดขึ้นในบางครั้ง โมดูลที่ทำหน้าที่จัดการด้าน redundancy นี้อาจจะทำหน้าที่อีกประการหนึ่งคือเป็นจุดพักข้อมูลที่ได้รับมาจาก data server เพื่อนำไปส่งให้กับ client ต่างๆ เพราะในกรณีที่ client จำนวนมากติดต่อกับ data server ตัวเดียวนั้นอาจมีความล่าช้าในการบริการข้อมูลของ data sever เพราะต้องให้บริการข้อมูล client ให้ครบจำนวนก่อนที่จะไปรับข้อมูลใหม่จากอุปกรณ์มาได้ ดังนั้น โมดูลที่ทำหน้าที่ redundant จึงทำหน้าที่เป็นจุดรับข้อมูลแล้วช่วยส่งต่อไปให้ client ต่างๆ อีกทอดหนึ่ง data sever จะได้ทำหน้าที่บริการข้อมูลให้แก่โหนดเพียงจุดเดียว จึงมีความเร็วในการบริการข้อมูล

2.7.6 ระบบแสดงผลแบบ MMI (man machine interface) แสดงผลการทำงานของอุปกรณ์ในรูปแบบ กราฟิก ข้อความ สัญลักษณ์ แผนภาพ โดยสามารถเชื่อมโยงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกราฟิกเหล่านี้กับพารามิเตอร์จาก data server ได้ ความสามารถในการสั่งงานผ่านระบบกราฟิก เช่น การปิด/เปิด สวิตช์บนจอมอนิเตอร์ส่งผลไปยัง I/O ของ PLC ความสามารถในการจัดการกราฟิก เช่น การย่อ ขยาย การกำหนดการเคลื่อนไหวแบบต่าง ๆ เช่น การหมุน การเคลื่อนที่แบบซิกแซกตามสัญญาณของ data sever การแสดงผลสัญญาณในรูปแบบมิเตอร์และเกจวัดแบบต่างๆ การนำเข้ากราฟิกประเภทต่างๆ

2.7.7 ระบบแสดงกราฟสัญญาณแบบต่อเนื่อง (trending) ความสามารถในการพล็อตกราฟต่อเนื่องกันไปบนจอภาพเพื่อแสดงค่าสัญญาณจาก data sever โดยอาจจะสามารถพล็อตสัญญาณได้หลายสัญญาณพร้อมกันในหน้าต่างเดียว เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบสัญญาณที่พล็อตได้ และไม่จำกัดว่าจะสร้างหน้าต่างพล็อตจำนวนเท่าใด trending อาจมีความสามารถในการ ขยายภาพ

สัญญาณที่พล็อต และหยุดการพล็อตเพื่อเลื่อนค่าที่พล็อตในแต่ละช่วงเวลาได้ด้วยตัวของผู้ใช้งานเอง นอกจากนั้นการพล็อตอาจสามารถเลือกได้ว่าจะให้เป็นการพล็อตแบบใดเช่น time plot, logarithmic plot, strip chart, bar chart, circular, X-Y plot เป็นต้น นอกจากนั้นบางผู้ผลิตยังสามารถนำค่าข้อมูลสัญญาณที่เก็บไว้ในฐานข้อมูลออกมาพล็อต ได้อีกด้วย โดย trending module นี้อาจเป็นแบบ activeX control

2.7.8 ระบบการแจ้งเตือน (alarm) ส่วนใหญ่มีระบบแจ้งเตือนโดย alarm display จะรับสัญญาณมาจาก alarm DB ในฝั่ง SCADA sever โดย alarm DB สามารถที่จะทำการกำหนดคอนฟิกูเรชันว่าจะนำสัญญาณตัวใดมาเป็นตัวพารามิเตอร์ในการแจ้งเตือนบ้างและมีการแบ่งระดับของ priority limit ระบบแจ้งเตือนยังสามารถที่จะเก็บข้อมูลการแจ้งเตือนไว้ในฐานข้อมูลประเภทต่างๆ เช่น MS SQL sever, MS access, Oracle, MS excel เป็นต้น และบางชนิดสามารถแสดงออกมาเป็นรายงานในรูปแบบตาราง หรือแผนภูมิ

2.7.9 ซอฟต์แวร์ระบบ SCADA กาจ (2547) อธิบายว่าซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคู่กับอุปกรณ์ระบบ SCADA สำหรับควบคุมตรวจสอบเก็บรวบรวมข้อมูลและบริหารงานตามที่ต้องการ ส่วนประกอบหลักคือ หน่วยติดต่อปฏิบัติการของผู้ใช้ระดับบน หน่วยควบคุมระยะไกล ผู้ใช้สามารถตรวจสอบและควบคุมกิจกรรมต่างๆ ในระยะทางไกลได้โดย การสื่อสารข้อมูลแบบดิจิทัลทางระบบเครือข่าย คมนาคม กอบเกียรติ (2547) อธิบายว่า SCADA เป็นซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับ PLC เพื่อรับข้อมูลจาก PLC มาใช้ประโยชน์ต่างๆ เช่น การแสดงค่าข้อมูลอินพุต เอาต์พุต ข้อมูลหน่วยความจำลงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ การเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ ในระบบควบคุม รวมทั้งบันทึกการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ในระหว่างระบบควบคุมกำลังทำงาน สามารถทำการควบคุมสั่งงาน PLC ได้โดยจำลองหน้าจอคอมพิวเตอร์เป็น operator panel สามารถใช้เมาส์กดปุ่มควบคุมการทำงานตามที่ต้องการได้ ตามฟังก์ชันหลักของซอฟต์แวร์ SCADA ซึ่งผู้ผลิตรายต่างๆ โดยทั่วไปมีฟังก์ชันใช้งานหลักคล้ายกัน จะมีข้อแตกต่างกันก็ตรงที่ระดับขีดความสามารถ ประสิทธิภาพ ฟังก์ชันพิเศษ หรือความเป็นระบบเปิดที่รองรับการเชื่อมต่อเข้ากับ PLC และ SCADA ของผู้ผลิตรายอื่นได้ ฟังก์ชันหลักจะประกอบด้วย

ก. การจัดการสัญลักษณ์กราฟิก หรือ graphic symbol editor เพื่อสร้างภาพหน้าจอให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยทั่วไป ส่วนนี้ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยจะมี symbol สำเร็จรูปของซอฟต์แวร์ที่ผู้ใช้สามารถเลือกมาใช้ได้เลย มีการกำหนดให้เชื่อมโยงกับค่า I/O (อินพุต-

เอาต์พุต) หรือค่าหน่วยความจำภายใน PLC เรียกว่าแท็ก (tag) มีการเปลี่ยนแปลงสถานะตามค่าที่ถูกเชื่อมโยง คือการกำหนด animation ให้กับ symbol หรือทำให้ symbol มีคุณสมบัติความเป็น dynamic สามารถสร้าง symbol ขึ้นมาใช้งานได้เอง symbol ที่สร้างเองประกอบด้วยวัตถุพื้นฐานต่างๆ เช่น เส้นตรง เส้นโค้ง พื้นที่สี่เหลี่ยม พื้นที่วงกลม นำมารวมกันเป็น symbol ตัวหนึ่งแล้ว กำหนดการเชื่อมโยง symbol นั้น ๆ เข้ากับแท็ก

ข. ฟังก์ชันเชื่อมโยงสัญลักษณ์กราฟิกเข้ากับสถานะและค่าของ I/O ใน PLC ปกติซอฟต์แวร์ SCADA ไม่อาจเชื่อมต่อกับ PLC ได้โดยตรง ต้องอาศัยซอฟต์แวร์ตัวกลางชนิดหนึ่ง เรียกว่า OPC server (OLE for process control server) ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับ PLC ตามแอดเดรสและโปรโตคอลที่กำหนด เพื่อเป็นเซิร์ฟเวอร์บริการรับส่งข้อมูลระหว่าง PLC กับ OPC client ซึ่งในที่นี้ SCADA จัดเป็น OPC client ตัวหนึ่ง การติดต่อกับ PLC ตัวไหนที่แอดเดรสหมายเลขเท่าใด และติดต่อด้วยโปรโตคอลอะไรเป็นต้น โดยทั่วไป OPC server ทำงานแบบ polling คือ จะคอยอัปเดตข้อมูลไปเรื่อยๆ ตามรอบระยะเวลาที่กำหนด เช่น ทำการอัปเดตข้อมูลทุกๆ 1000 มิลลิวินาที หรือ 1 วินาที (การเขียน code หน่วงเวลาควบคุมการทำงาน PLC นิยมใช้ มิลลิวินาที)

ค. กราฟแสดงค่าสัญญาณ ณ เวลาต่างๆ เปรียบเทียบได้กับเครื่องบันทึกกราฟ ข้อมูลหรือ data chart recorder ในสมัยก่อน ที่ใช้การบันทึกค่าสัญญาณด้วยการลากปากกาลงบนกระดาษกราฟ ที่มีทั้งแบบเป็นกระดาษต่อเนื่อง หรือกระดาษกราฟแบบวงกลม การบันทึกกราฟแบบด้วยฟังก์ชันของ SCADA มีข้อดีคือ ข้อมูลถูกจัดเก็บในระบบคอมพิวเตอร์ที่สามารถนำเอาออกมาใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้อีก นอกจากการทำกราฟแต่เพียงอย่างเดียว สามารถปรับเปลี่ยนแก้ไขรูปแบบของกราฟได้ เช่น แก้ไขสเกลของแกน x และแกน y ของตัวกราฟ

ง. การทำข้อมูลของระบบ ณ เวลาต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราไหล จะถูกนำมาเก็บบันทึกลงในระบบฐานข้อมูล ข้อมูลนี้มีประโยชน์ในการใช้วิเคราะห์เพื่อปรับปรุงพัฒนาระบบ และที่สำคัญคือข้อมูลขณะเกิดความผิดพลาดหรือ alarm event ทำให้การวิเคราะห์หาสาเหตุเพื่อแก้ไขปัญหาทำได้ง่ายขึ้น

จ. การแจ้งเตือนระบบควบคุมอัตโนมัติทั่วไปจะมีการตรวจจับและแสดงสัญญาณเตือนหากเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ



ฉ. การทำงานด้วยโปรแกรมสคริปต์ ซึ่งสคริปต์เป็นชุดคำสั่งที่ต้องการให้ SCADA ทำงาน จัดเป็นฟังก์ชันสำคัญ เพราะช่วยให้ SCADA สามารถทำงานได้ซับซ้อนมากกว่าการเป็นเพียงแค่ช่องรับส่งข้อมูลระหว่างผู้ใช้งานกับ PLC เท่านั้น ชุดคำสั่งภายในสคริปต์อาจเป็นการสั่งให้ SCADA ประมวลผล แล้วส่งผลลัพธ์ที่ได้ไปยัง PLC เช่น อาจกำหนดสคริปต์สำหรับปุ่มกด start ว่า เมื่อกดปุ่มนี้ SCADA จะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นให้กับ PLC ก่อนที่จะส่งสถานะ start ไปสั่งให้ PLC เริ่มทำงาน เป็นต้น สคริปต์แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ สคริปต์ที่ทำงานเมื่อมีเหตุการณ์ตามที่ระบุเกิดขึ้น (event-based) เป็นสคริปต์ที่จะถูกเรียกใช้งานเมื่อมีเหตุการณ์ที่ระบุไว้ล่วงหน้าสำหรับสคริปต์นั้นๆ เกิดขึ้น สคริปต์ที่กำหนดค่าพารามิเตอร์เมื่อกดปุ่ม start ในที่นี้เป็นแบบ event-based โดยมีการกดปุ่มเป็นเหตุการณ์ หรือ event และสคริปต์ที่ทำงานตามรอบระยะเวลาที่กำหนด (time-based) เป็นสคริปต์ที่ทำงานด้วยเงื่อนไขเวลา คือ เมื่อ SCADA เข้าสู่โหมดการทำงานหรือโหมด run แล้วสคริปต์แบบ time-based จะถูกเรียกใช้งานทุกๆ รอบระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปจะสามารถกำหนดค่าเวลานี้ได้ SCADA บางตัวอาจใช้คำว่า cyclic หรือ periodic แทน

ช. การกำหนดสถานะของจอภาพกราฟิก ในขณะที่ทำงาน ความปลอดภัยและความมีเสถียรภาพของระบบ SCADA ในขณะทำงาน เป็นฟังก์ชันหลักที่สำคัญ เพราะระบบ SCADA นั้น ไม่ควรอย่างยิ่งที่จะถูกรบกวนจากระบบภายนอก เพราะอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความสูญเสียขนาดใหญ่ได้ ขณะที่ SCADA กำลังทำงานอยู่นั้น หน้าจอคอมพิวเตอร์จะแสดงภาพกราฟิกตามที่ได้ออกแบบไว้ และเนื่องจาก SCADA เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ PC และเครื่องคอมพิวเตอร์ PC ในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ ดังนั้น ซอฟต์แวร์ SCADA ก็เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำงานบนวินโดวส์ด้วยเช่นกัน คือ มีส่วนประกอบต่าง ๆ ของวินโดวส์เหมือนโปรแกรมบนวินโดวส์อื่นๆ ทั่วไป เช่น title bar system menu ไอคอนซ่อนขยายและปิดวินโดวส์ ส่วนประกอบบางส่วนของระบบวินโดวส์อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพในการทำงานของ SCADA ได้ เช่น ไอคอนปิดวินโดวส์ ที่หากปล่อยให้มันไว้ในขณะทำงาน อาจถูกผู้ไม่เกี่ยวข้องมารบกวนโดยการปิดหน้าจอของ SCADA ได้ ด้วยเหตุนี้ SCADA ทุกตัวจึงเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานสามารถระบุได้ว่า ต้องการให้มีหรือไม่มีส่วนประกอบส่วนใดๆ ได้ตามต้องการ

2.7.10 การใช้เครื่อง PC เชื่อมต่อกับ PLC หรือ embedded system ทางพอร์ตต่างๆ เรียกว่า computer interface และผลจากการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่อรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โดยอาศัยคอมพิวเตอร์จะเรียกว่า data acquisition system (DAQ system) ในเรื่องของ DAQ มีใช้มานานแล้วอุปกรณ์ที่ใช้งานสำหรับ DAQ ที่จำหน่ายในท้องตลาดคือ data logger ตัวอย่าง ซอฟต์แวร์ SCADA ที่ใช้งานกันทั่วไปสามารถใช้งานร่วมกับ PLC จากผู้ผลิตต่างๆ ได้เช่น

ก. Lab View เป็นซอฟต์แวร์ที่ให้ผู้ใช้งานสามารถโปรแกรมได้เชิงกราฟิกสามารถพัฒนาแอปพลิเคชันระบบวัด ระบบ data acquisition และระบบควบคุมอัตโนมัติได้โดยง่าย

ข. Lab Windows/CVI สำหรับโปรแกรมเมอร์ที่ถนัดใช้ภาษาซี เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชัน

ค. Component Works เป็นซอฟต์แวร์ที่ได้รับการพัฒนามาเพื่อโปรแกรมเมอร์ที่ถนัดใช้ Visual Basic ให้สามารถออกแบบระบบ data acquisition ได้ผ่านทางคอนโทรล

ง. Virtual Bench เป็นซอฟต์แวร์ที่จะต้องใช้คู่กับฮาร์ดแวร์ DAQ สามารถเปลี่ยนคอมพิวเตอร์ให้เป็นเครื่องมือวัดอันชาญฉลาด เช่น ออสซิลโลสโคป ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ เครื่องกำเนิดรูปคลื่นสัญญาณ คาลคูล็อกเกอร์ (data logger) และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (signal analyzer) เป็นต้น

จ. Visual Designer เป็นซอฟต์แวร์ความสามารถสูง สามารถใช้ออกแบบให้เป็นได้ทั้งเครื่องมือวัดความสามารถสูง หรือใช้ออกแบบแอปพลิเคชันงานวัดควบคุมในอุตสาหกรรมได้ง่าย

ฉ. GNESIS32 เป็นซอฟต์แวร์ประเภท SCADA ที่ใช้ความสามารถสูงสุดของสถาปัตยกรรม Microsoft's DNA ประกอบด้วย VBA COM DCOM และเทคโนโลยี active x เพื่อมาตรฐานในการสร้างแอปพลิเคชัน จึงสามารถสร้างโปรเจกต์ได้บนระบบปฏิบัติการ Windows ด้วยเครื่องมือในการพัฒนาเดียวแต่ให้แอปพลิเคชันหลากหลายประเภท (one development tool many targets)

2.8 แบบจำลองเพื่อคาดการณ์ระดับน้ำในคลองสำหรับปรับประตุน้ำในช่วงเวลาต่างๆ กันให้ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับเป้าหมาย ตลอดช่วงการส่งน้ำ นิพนธ์ (2549) อธิบายว่า การใช้วิธีวิเคราะห์ระบบและการทำโมเดล (model) หรือ แบบจำลอง ช่วยในการตัดสินใจแก้ปัญหาต่างๆ ที่สลับซับซ้อน วิธีวิเคราะห์ระบบและการใช้โมเดลให้เหมาะกับงานวิจัย ทั้งในด้านที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบทฤษฎีและในด้านที่ทดลองใช้กับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง หลักการดังกล่าวมีพื้นฐานมาจากการประยุกต์ใช้หลักตรรกวิทยาและคณิตศาสตร์ ลอกเลียนแบบพฤติกรรมธรรมชาติที่เกิดขึ้นอยู่แล้ว ผสมกับทฤษฎีการตัดสินใจ เทคโนโลยีของคอมพิวเตอร์และการพัฒนาระบบฐานข้อมูล ทำให้กรรมวิธีนี้สร้างความสนใจและเป็นที่เชื่อถือให้นักวิทยาศาสตร์ การวิเคราะห์ระบบ เกษม (2530) อธิบายว่าในทางปฏิบัติแล้ว การวิเคราะห์ระบบ หมายถึง การใช้หลักการร่วมกันหลายฝ่าย หลายสาขา หลายหลักการ ในการที่จะทราบถึงสถานภาพขององค์ประกอบ โครงสร้าง กระบวนการทำงาน และการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ ทั้งนี้เพื่อจะหาทางแก้ไขปรับปรุงให้คงไว้ซึ่งสภาพสมดุลของระบบให้มากที่สุด ระบบการทำงานสามารถทำให้มองเห็นชัดเจนหรือใกล้เคียงความจริงขึ้นได้ โดยอาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (mathematical model) เข้ามาช่วย แบบจำลองชนิดนี้ สามารถอธิบายสมมติฐานของการทำงานของระบบได้ถูกต้องขึ้น (แต่ไม่จำเป็นต้องแม่นยำเสมอไป) ในรูปแบบที่เป็นตัวเลขของปริมาณของสิ่งที่ต้องการรู้เช่น ฝนตกลงมา 1,000 มม. จะไหลซึมลงไปในดินเท่าใด ดันไม้คูดขึ้นไปใช้เท่าไร และจะกลายเป็นไอน้ำในแม่น้ำลำธารเท่าใด เป็นต้น (ซึ่งถ้าเป็นแบบจำลองมโนภาพ หรือแบบจำลองแผนภาพก็มองเห็นออกมาเป็นตัวเลขได้ยาก) แบบจำลองสมการถดถอย (regression models) สร้างขึ้นเพื่อจะใช้คาดคะเนตัวแปรตาม (dependent variables) เมื่อกำหนดให้ตัวแปรอิสระ (independent variables) การใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แทนโครงสร้างและกระบวนการที่สลับซับซ้อนของระบบใดๆ ต้องใช้คอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณ ซึ่งแบบจำลองชนิดนี้นับวันจะมีความสำคัญมาก ชนิดของแบบจำลองในทางวิทยาศาสตร์ Churchman (1971) ได้แบ่งออกเป็น 3 ชนิด

2.8.1 แบบจำลองเหมือนของจริง (iconic models) คือแบบหรือรูปแบบที่เหมือนของจริงทุกอย่างคือมีคุณสมบัติทุกอย่างคล้ายของจริง เพียงแต่มีมาตราส่วนเล็กลงเท่านั้น ดังนั้น iconic models จึงดูเหมือนของจริง แต่มีขนาดต่างไปจากของจริง เช่น ภาพถ่าย ภาพที่เขียนขึ้น แบบจำลองของเครื่องบิน เรือเดินสมุทร และรถยนต์ เป็นต้น แบบจำลองเหมือนของจริงของระบบสุริยะจักรวาล ภาพที่แสดงให้เห็นในห้องฟ้าจำลอง ซึ่งทำให้เล็กลงมานั้นเป็นตัวอย่างที่ดีที่เห็นได้ชัด iconic models นั้น โดยทั่วไปมองเป็นรูปเป็นร่างได้ชัดเจน (specific) มองเป็นรูปแบบเดียวกัน (concrete) แต่ยากที่นำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการทดลองและคาดการณ์

2.8.2 แบบจำลองเลียนแบบของจริง (analogue models) หมายถึงแบบจำลองที่ใช้เพียงองค์ประกอบเพียงชุดเดียว แทนสมบัติหรือพฤติกรรมของสิ่งใดสิ่งหนึ่ง เช่น การใช้เส้นสายขอบเขา (contour lines) แทนความสูงจากระดับน้ำทะเลของพื้นที่พฤติกรรมการไหลของวัตถุที่ใช้เป็น analog model ของระบบไฟฟ้า ระบบจราจร และระบบเศรษฐกิจ เส้นสายต่างๆ ซึ่งสัมพันธ์กันโดยทั่วไปแล้วแบบจำลองแบบนี้มองดูเป็นรูปร่างคล้ายของจริงได้ยากกว่า iconic model และแต่ละคนอาจมองเข้าใจแตกต่างกันไป หรือไม่เหมือนกัน แต่ง่ายที่จะนำมาใช้จัดหรือแสดงพฤติกรรมและความสัมพันธ์ (relational function) ของสิ่งต่าง ๆ ที่ต้องการได้มากกว่า iconic model

2.8.3 แบบจำลองที่ใช้สัญลักษณ์ (symbolic models) แบบจำลองแบบนี้ใช้ตัวอักษร ตัวเลข หรือสัญลักษณ์อื่นๆ แทนค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งสัมพันธ์กัน ดังนั้นจึงเป็นแบบจำลองที่นิยมกัน และสามารถบอกพฤติกรรมต่างๆ ของความสัมพันธ์ได้กะทัดรัดกว่าแบบอื่นๆ เป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุดที่จะนำมาใช้กับการทดลอง และเป็นเครื่องมือช่วยในการปรับความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ แบบจำลองแบบนี้จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยทั่วไปเป็นสมการหรือไม่เป็นสมการ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง ซึ่งมีสัญลักษณ์ต่างๆ แทนอยู่

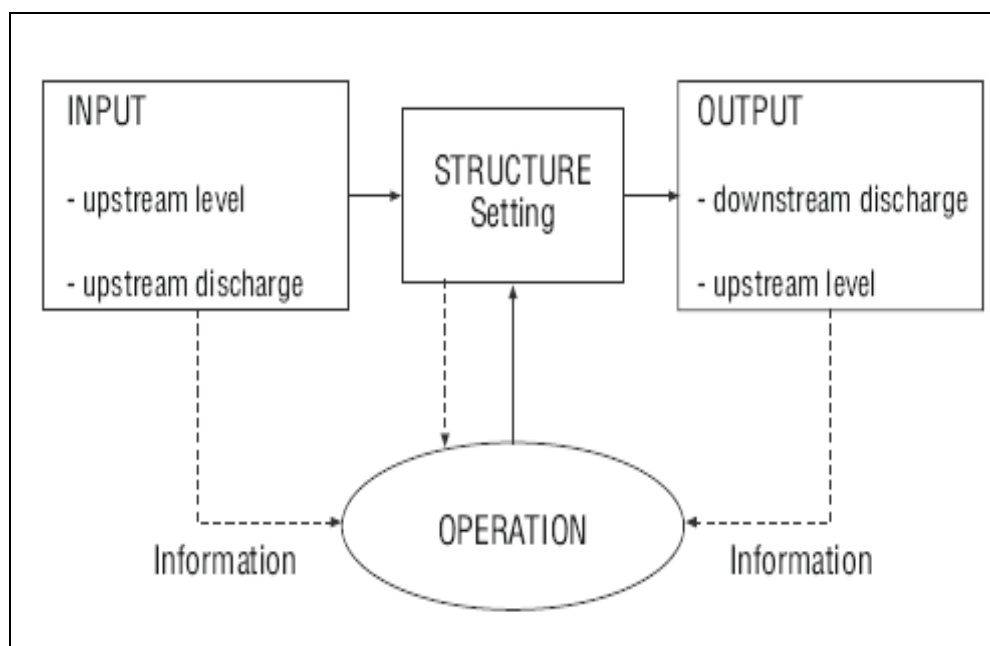
2.9 ระบบช่วยตัดสินใจ (DSS) เป็นระบบฐานข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ประเภทหนึ่งที่ใช้ช่วยในการตัดสินใจ เพื่อดำเนินกิจการใดๆ เป็นระบบฐานข้อมูลที่ใช้คอมพิวเตอร์เชื่อมโยงระบบย่อยๆ ที่สร้างขึ้นเพื่อช่วยให้ผู้บริหารสามารถใช้ข้อมูล เอกสาร (document) องค์ความรู้ และ/หรือแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่รวมอยู่ในระบบจำแนกและแก้ไขปัญหาและช่วยทำการตัดสินใจหาแนวทางในการจัดการ (Power, 2002) ส่วน Sharifi (2002) อธิบายว่า DSS เป็นระบบย่อยของการจัดการระบบสารสนเทศ (management information system, MIS) ซึ่งช่วยให้นักวิเคราะห์ นักวางแผน และผู้จัดการใช้ในการกระบวนการตัดสินใจในกิจการใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับ DSS จะช่วยทำให้เกิดมโนทัศน์ในการทำการตัดสินใจที่แตกต่างกันไปตามสถานการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเป็นประโยชน์กับปัญหาที่ไม่มีโครงสร้างที่แน่นอน ลักษณะสำคัญของ DSS ก็คือการใช้ศักยภาพของคอมพิวเตอร์สร้างฐานการจัดการข้อมูล DM (data management) ให้เข้าไปเพื่อใช้ค้นหาข้อมูลและแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการตัดสินใจ ดังนั้น DSS จึงถูกใช้เพื่อสร้างและประเมินผลทางเลือกที่กำหนดขึ้นในการแก้ปัญหาพร้อมทั้งให้คำตอบถึงผลลัพธ์ที่ควรจะได้รับตามวัตถุประสงค์ต่างๆ ที่กำหนด และช่วยสร้างกระบวนการตัดสินใจ การพัฒนา DSS ช่วยในเรื่องการจัดการข้อมูลเฉพาะเรื่องใดเรื่องหนึ่ง หรือเป็นกลุ่มของข้อมูลหลายเรื่องมากกว่าที่จะใช้ช่วยจัดการให้หมดทั้งของระบบ

กล่าวคือ การสร้างระบบที่สามารถทำให้ข้อมูลที่มีอยู่ถูกสร้างให้เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงวิเคราะห์ (analytical model) ที่สามารถใช้ช่วยในกระบวนการตัดสินใจได้ ด้วยเหตุที่ DSS เป็นเครื่องมือที่ช่วยตัดสินใจแก้ปัญหาที่ซับซ้อนหลายมิติ และทำงานได้รวดเร็ว ทำหน้าที่ทั้งจัดเก็บและแสดงข้อมูล สารสนเทศ กลั่นกรองและเก็บความจำแทรกหรือเพิ่มเติมคำที่ต้องการรู้ เป็นที่รวบรวมทฤษฎีทางคณิตศาสตร์หลากหลาย รวมทั้งหาค่าความเหมาะสมพอดีที่ต้องการ (optimization technique) และการเปรียบเทียบเชิงตรรกะในแบบจำลองที่สลับซับซ้อน ดังนั้น DSS จึงประกอบไปด้วยแบบจำลองเชิงทำนายที่สามารถให้คำตอบที่ต้องการ

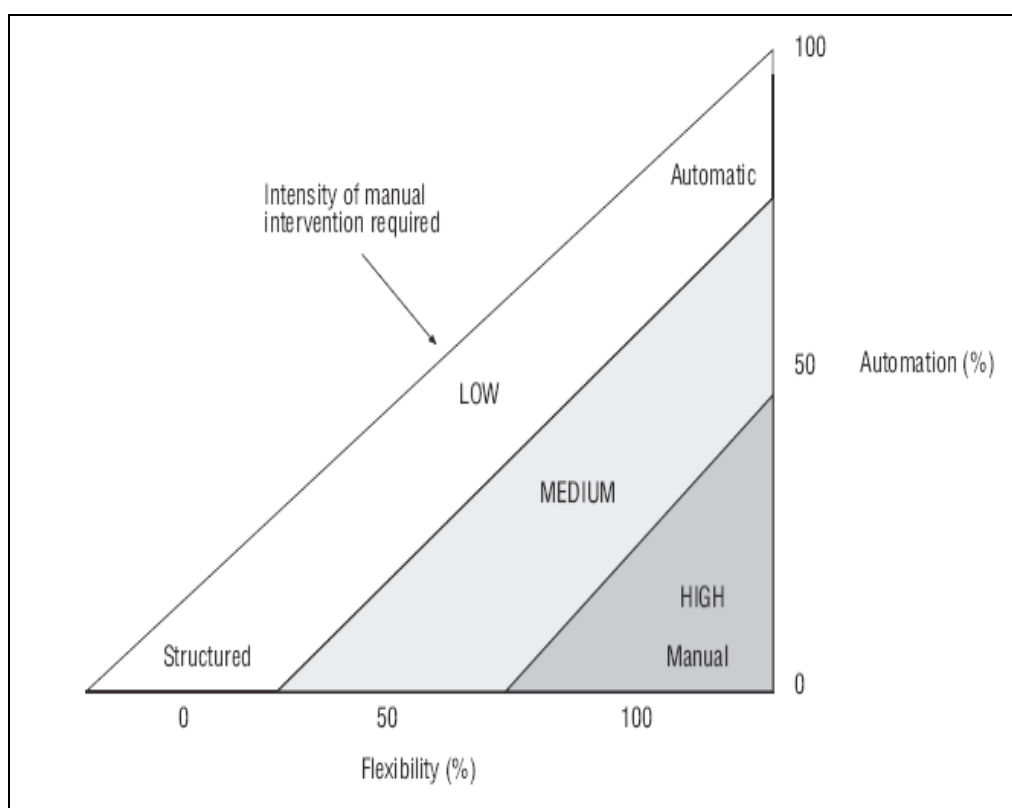
2.9.1 ระบบช่วยตัดสินใจแบบแอคทีฟ ADSS (active) โดยทั่วไปใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการกำหนดแผนและทำการตัดสินใจมีฐานข้อมูลสารสนเทศที่สามารถสนทนากับผู้ใช้ได้ เพื่อทำให้เกิดระบบสร้างสรรค์ความคิดที่ทำให้คนและคอมพิวเตอร์ช่วยกันแก้ปัญหาาร่วมกันได้ หรือในทำนองสร้างสภาพแวดล้อมองค์ความรู้ที่สูงกว่าธรรมดา (hyperknowledge environment) ทำให้สามารถวางแผนแก้ปัญหาและทำการตัดสินใจแบบก้าวหน้าได้ (Carlsson and Walden, 1999) ได้ผนวกปัญญาประดิษฐ์ IS (intelligent systems) เข้ากับระบบ DSS ให้เป็นระบบตัดสินใจเพื่อแก้ปัญหาที่สลับซับซ้อนและมีสถานการณ์ไม่แน่นอน โดยใช้หลักของการค้นหาค้นพบ (discovery) เรียนรู้ปัญหาและสถานการณ์ (learning) และค้นหาทางแก้ปัญหาแล้วช่วยตัดสินใจให้ในที่สุด

### 3. ตัวอย่างคล่องอัตโนมัติ ที่ใช้อุปกรณ์พื้นฐานของระบบ SCADA

งานควบคุมการจัดสรรน้ำในคลองชลประทานแบบ real time เป็นการเก็บข้อมูลระดับน้ำระยะเปิดบานประตูระบายน้ำด้วยการเฝ้ามองเหตุการณ์อย่างใกล้ชิดราวกับอยู่ในบริเวณติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและควบคุม โดยข้อมูลที่ได้จะทำการวิเคราะห์เพื่อจัดสรรน้ำ อย่างถูกต้อง ณ บริเวณงานส่งน้ำต่างๆ Renault and Godaliyadda (1999) ได้อธิบายกระบวนการควบคุมของระบบคล่องอัตโนมัติในภาพที่ 8 และระดับความเข้มข้นของการควบคุมในภาพที่ 9



ภาพที่ 8 กระบวนการควบคุมของคลองอัตโนมัติ



ภาพที่ 9 ความเข้มข้นการปรับระดับอัตโนมัติ

การปรับระดับการควบคุมคลองอัตโนมัติที่ Maricopa Stanfield เริ่มจากการควบคุมด้วยมือ ไปจนถึงระดับควบคุมอัตโนมัติทั้งระบบ



ภาพที่ 10 ส่วนแสดงผลการควบคุมคลองอัตโนมัติ

ส่วนแสดงผลการควบคุมคลองอัตโนมัติในภาพที่ 10 มีความสำคัญทำให้ผู้ดูแลสามารถเข้าใจสถานการณ์เพื่อตัดสินใจส่งคำสั่งปรับประตูหรือเฝ้ามองการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับระบบคลองอัตโนมัติคือ เกียร์มอเตอร์เพื่อปรับบานประตูระบายน้ำในภาพที่ 11 และอุปกรณ์วัดระยะการเปิดประตูระบายน้ำในภาพที่ 12

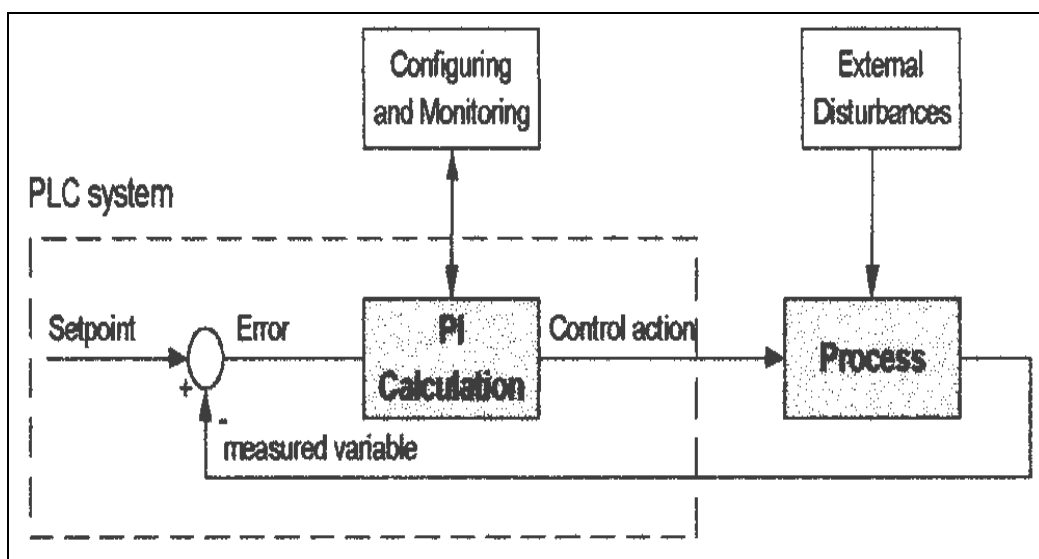


ภาพที่ 11 เกียร์มอเตอร์เปิด-ปิดประตูระบายน้ำ



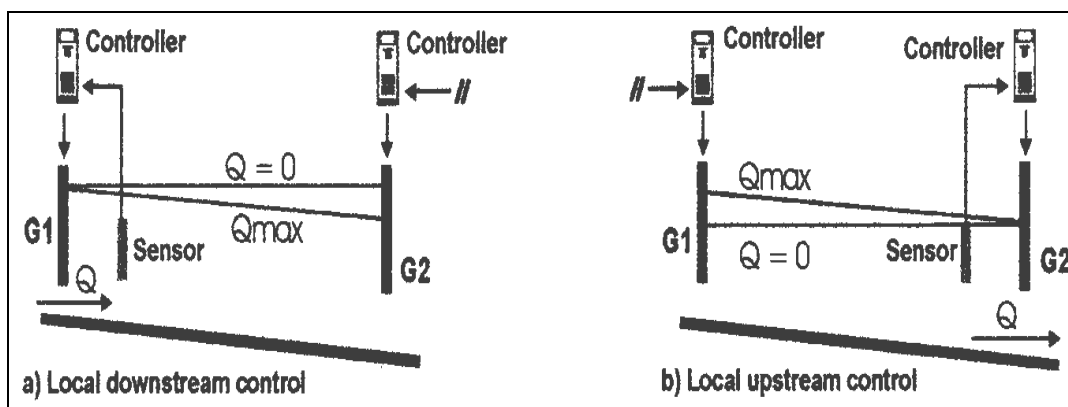
ภาพที่ 12 อุปกรณ์วัดระยะเปิดประตูระบายน้ำ





ภาพที่ 13 การควบคุมคลองอัตโนมัติโดยใช้ PLC

ในภาพที่ 13 การควบคุมระดับน้ำในคลองอัตโนมัติโดยใช้อุปกรณ์ PLC ที่ตั้งค่าระดับน้ำเป้าหมายไว้ที่หน้าประตูระบายน้ำและใช้ค่าระดับน้ำนี้เป็นสัญญาณป้อนกลับเพื่อปรับระยะเปิดประตูระบายน้ำให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายช่วยให้การส่งน้ำมีความสม่ำเสมอ



ภาพที่ 14 การควบคุมระดับน้ำอัตโนมัติแบบเหนือน้ำและท้ายน้ำ

การใช้อุปกรณ์ controller ควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดทั้งแบบควบคุมเหนือน้ำและการควบคุมด้านท้ายน้ำ (ภาพที่ 14)

ระบบคลองอัตโนมัติ ติดตั้งที่โครงการชลประทาน Kerian ประเทศมาเลเซีย (ภาพที่ 15)  
รับน้ำจากอ่างเก็บน้ำ Bukit Merah ควบคุมพื้นที่ส่งน้ำ 23,400 ha.



ภาพที่ 15 The Kerian Irrigation Scheme ในประเทศมาเลเซียติดตั้งอุปกรณ์  
ตรวจวัดระดับน้ำและควบคุมระยะการเปิดบานประตู

ที่มา: Hensan *et al.* (2002)

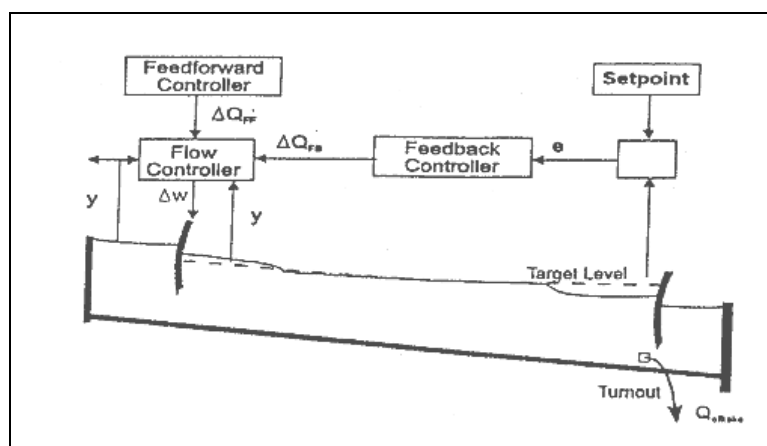
ระบบ SCADA ที่นำมาใช้งานเป็นแบบต้นทุนต่ำ สามารถตรวจสอบและควบคุมระยะการเปิดบานประตูระบายน้ำ (ภาพที่ 16) มีซอฟต์แวร์ที่ออกแบบจากหลักการ modified-PI algorithm ไว้สำหรับการควบคุมประตูแบบ 2 กรณี คือควบคุมแบบใช้เจ้าหน้าที่และแบบอัตโนมัติ การควบคุมต่างๆ จะใช้ข้อมูลจาก data logger มาทำการวิเคราะห์ก่อน ใช้การสื่อสารผ่านโทรศัพท์มือถือบริเวณที่มีสัญญาณ และใช้ระบบวิทยุย่าน UHF และ SHF high-speed wireless บริเวณที่ไม่มีสัญญาณ โทรศัพท์มือถือ และใช้ดาวเทียม INMARSAT เพื่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์สถานีแม่ข่ายระยะไกล



ภาพที่ 16 การตรวจวัดระยะเปิดประตูระบายน้ำ

ที่มา: Hensan *et al.* (2002)

ตัวอย่างคลองอัตโนมัติ ในประเทศสหรัฐอเมริกา คือ คลองส่งน้ำสายใหญ่ชื่อ Narmada และโครงการชลประทาน Sardar Sarovar ในรัฐ Gujarat ประเทศอินเดีย เป็นคลองส่งน้ำที่ยาวมาก ครอบคลุมพื้นที่ส่งน้ำ 1.9 million hectare ได้นำระบบคลองอัตโนมัติ แบบต้นทุนต่ำมาใช้งานที่ ประกอบด้วย data logger การสื่อสารของข้อมูลใช้เครือข่ายโทรศัพท์มือถือ ที่สถานีตรวจวัดระดับน้ำ และควบคุมประตูระบายน้ำส่วนใหญ่ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ การทำงานพื้นฐานต่างๆ ยังคงอยู่ในรูปแบบของระบบ SACDA ที่ประกอบด้วย PLC และใช้ซอฟต์แวร์บริหารระบบ

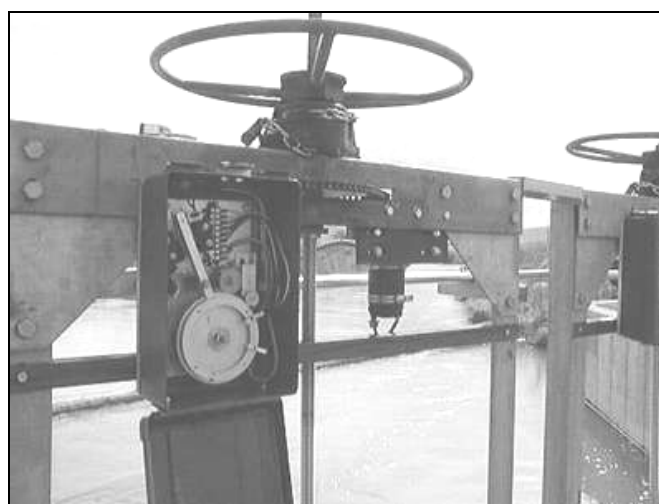


ภาพที่ 17 ผังการทำงานของอาคารบังคับน้ำในคลองแบบอัตโนมัติ

ที่มา: Clemmens (1995)

Clemmens (1995) ได้ออกแบบอุปกรณ์ติดตั้งที่อาคารประตูระบายน้ำเพื่อให้เป็นระบบคลองแบบอัตโนมัติซึ่งแสดงในภาพที่ 17

Hansen and Pugh (1997) ได้ใช้ DC เกียร์มอเตอร์ในภาพที่ 18 เพื่อเปิด-ปิดประตูระบายน้ำที่โครงการ Richfield Canal automation project ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพที่ 18 การใช้ DC เกียร์มอเตอร์สำหรับยกบานประตูระบายน้ำ

ที่มา: Hansen and Pugh (1997)

## อุปกรณ์และวิธีการ

การพัฒนาแบบจำลองอัตโนมัติต้นทุ่นต่ำเริ่มจากพัฒนาแบบจำลองคลองอัตโนมัติเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และใช้งานจริงที่คลองส่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม และที่คลอง 5L – 2L โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้อง จ.สุพรรณบุรี โดยมีรายละเอียดการพัฒนาอุปกรณ์และวิธีการทดสอบต่อไปนี้

### 1. การพัฒนา algorithm ของระบบคลองอัตโนมัติ

1.1 การพัฒนา algorithm ควบคุมระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉพาะจุดโดยใช้ประตูยนต์ (มีระบบฝังตัวที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการปรับบานประตูเพื่อควบคุมระดับน้ำ)

1.2 การพัฒนา algorithm ควบคุมปริมาตรน้ำในคลองด้านท้ายน้ำแบบอัตโนมัติตามหลัก constant volume control จากส่วนกลาง

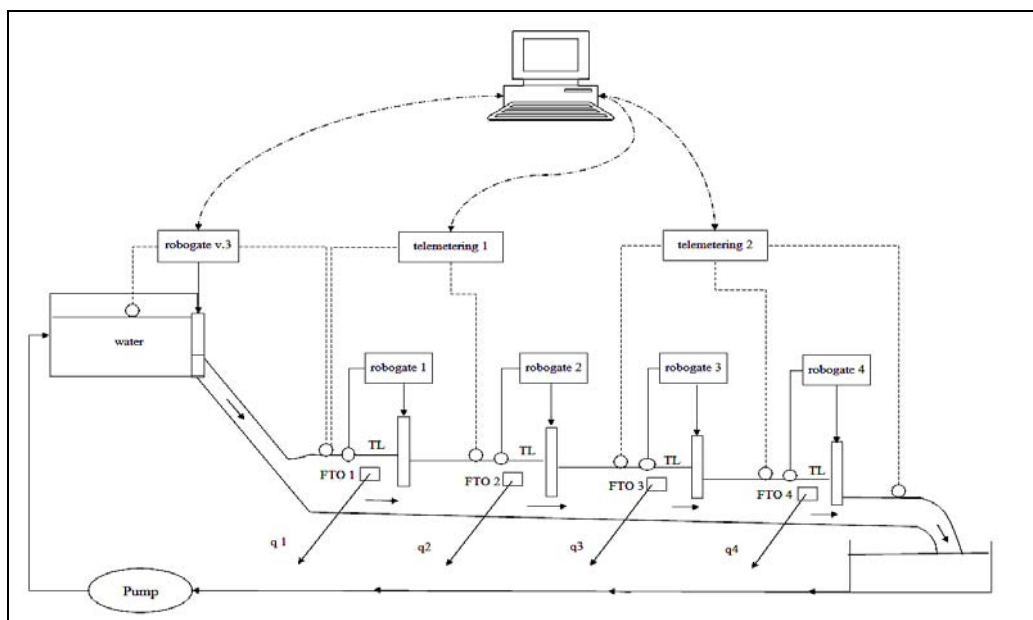
### 2. การพัฒนาและทดสอบแบบจำลองระบบคลองอัตโนมัติ (Canal Automation Model)

การสร้างแบบจำลองคลองอัตโนมัติในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ศึกษา ทดลอง การควบคุมระดับน้ำด้านเหนือน้ำหน้าประตูระบายน้ำกลางคลองให้อยู่ที่ระดับเป้าหมาย แบบจำลองคลองอัตโนมัติประกอบด้วยส่วนสำคัญ 6 ส่วนดังรายละเอียดตารางที่ 5 ส่วนรายละเอียดทางด้านเทคนิคของอุปกรณ์แสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 5 องค์ประกอบและการทำงานของอุปกรณ์แบบจำลองคลองอัตโนมัติ

| องค์ประกอบของระบบ                                                                                                                                                                                                   | หน้าที่และการทำงานของอุปกรณ์                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. ถังน้ำขนาด 1.5 ลบ.ม. และคลองส่งน้ำจำลอง รูปตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ขนาดท้องคลอง 20 ซม.ลาดด้านข้าง 1:1 ลาดก้นคลอง 1:200 ยาวประมาณ 13 ม. มีเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง ขนาดท่อ 4 นิ้ว อัตราสูบสูงสุด 15 ลิตร/วินาที | 1. ใช้ทดสอบการทำงานของคลองอัตโนมัติ                                                                                                                                 |
| 2. ปตร.ปากคลองส่งน้ำขนาด $17 \times 20$ ซม. ที่ใช้ประตูชนิดรูนที่ 3 จำนวน 1 แห่ง                                                                                                                                    | 2. ทำหน้าที่ระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำจำลองสามารถทำงานได้ทั้งแบบควบคุมด้วยมือ การควบคุมปรับขนาดการเปิดบานประตูระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุโดยสถานีแม่ข่าย                      |
| 3. ปตร.กลางคลองส่งน้ำที่ใช้ประตูชนิดรูนที่ 4 จำนวน 4 แห่ง                                                                                                                                                           | 3. ทำหน้าที่รักษาระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉพาะจุดที่หน้า ปตร. ให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายตลอดระยะเวลาส่งน้ำ                                                                 |
| 4. โทรมมาตรรูนที่ 3 จำนวน 2 แห่ง                                                                                                                                                                                    | 4. ทำหน้าที่ตรวจวัดระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำจำลอง 1 จุด ตรวจวัดระดับน้ำที่หน้า ปตร. 4 จุด                                                                               |
| 5. FTO. ขนาด $5 \times 5$ ซม. จำนวน 4 ตัว                                                                                                                                                                           | 5. ใช้จำลองการระบายน้ำซึ่งควบคุมด้วยมือจากคลองเข้าแปลงนาตามความต้องการของผู้ใช้น้ำซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา                                                      |
| 5. สถานีแม่ข่ายมีคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ 1 ชุด ต่อเชื่อมกับ canal automation interface และติดตั้งซอฟต์แวร์ที่เขียนเอง                                                                                                | 5. ทำหน้าที่เรียกดูระดับน้ำจากสถานีโทรมาตร นำค่าระดับน้ำมาคำนวณปริมาณน้ำในคลองและส่งคำสั่งปรับบานประตูปากคลองส่งน้ำทำให้ระดับน้ำในแต่ละช่วงคลองอยู่ที่ระดับเป้าหมาย |

2.1 หลักการทำงาน(ภาพที่ 19) ระบบคลองประกอบด้วยประตูยนต์ที่ทำหน้าที่ควบคุมระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉพาะจุดและระบบ SCADA คอยตรวจสอบระดับน้ำในช่วงคลองต่างๆ แล้วส่งควบคุม ประตู ปากคลองส่งน้ำให้ระบายน้ำเข้าคลองให้เพียงพอกับความต้องการ



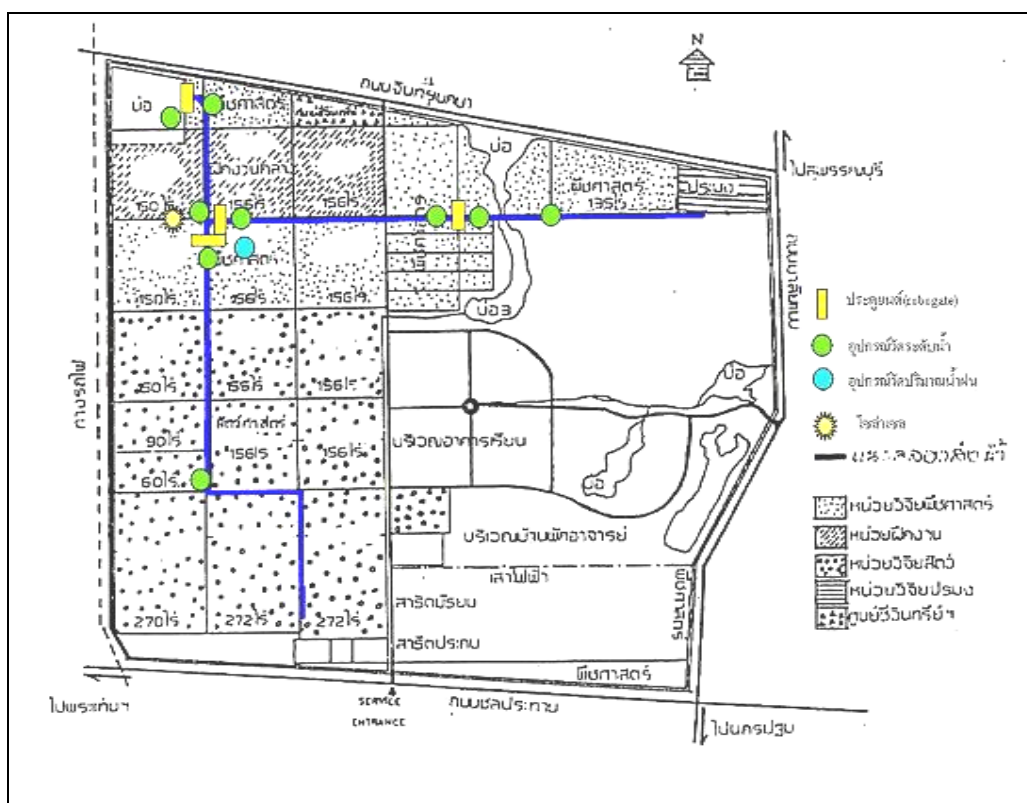
ภาพที่ 19 หลักการทำงานของแบบจำลองคลองอัตโนมัติ

2.2 วิธีการทดสอบ กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดการเปิดบานประตูของ ประตู. ทุกตัวเพื่อให้ น้ำไหลเข้าคลองจำลองจนได้ระดับน้ำเป้าหมาย หลังจากนั้นระบบอัตโนมัติจะเริ่มทำงาน สถานีแม่ข่ายจะเริ่มบันทึกข้อมูลระดับน้ำในคลองทุก ๆ ครึ่งนาทิจนที่แบบอัตโนมัติ จากนั้นกำหนดเวลา ทุก 1 ชั่วโมงให้คนเข้าปรับบานประตู FTO แบบสุ่ม การทดสอบนี้ใช้เวลาทดสอบอย่างต่อเนื่อง อย่างน้อย 4 ชั่วโมง ผลการทดสอบจำนวนการทดลอง 9 ครั้ง บันทึกข้อมูลที่คอมพิวเตอร์แม่ข่าย ในตำแหน่ง C:\My Documents\datalogger1.txt นำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงผลการทำงาน วิเคราะห์ ค่าความคลาดเคลื่อนของระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากค่าระดับน้ำเป้าหมายเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับ ปรับแก้ algorithm การควบคุมระดับน้ำด้านเหนือน้ำของประตูยนต์และโปรแกรมควบคุมปริมาณ น้ำในคลองของสถานีแม่ข่ายต่อไป

### 3. การพัฒนาและทดสอบระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน KPS CAS

(Kamphaengsaen canal automation system)

ระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสนพัฒนาขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ประจักษ์ควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดด้านเหนือน้ำโดยใช้งานจริงในสนาม และพัฒนาเขียนโปรแกรม CAS (canal automation system) ที่สถานีแม่ข่ายส่วนกลาง ควบคุมการปรับบานประตูปากคลองส่งน้ำเพื่อเพิ่มหรือลดปริมาณการระบายน้ำเข้าคลองทำให้ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับเป้าหมายตลอดช่วงการส่งน้ำ ลักษณะของคลองส่งน้ำโดยทั่วไปของคลองส่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม (ภาพที่ 20) คือมีคลองส่งน้ำสายใหญ่ (MC) 1 สายและคลองแยกย่อย (IL-MC) 1 สายความยาวรวม 6,300 เมตรสามารถส่งน้ำให้พื้นที่เพาะปลูกประมาณ 4,500 ไร่ รายละเอียดแสดงในตารางที่ 6



ภาพที่ 20 ลักษณะของคลองส่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน



ตารางที่ 6 ลักษณะของคลองส่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

| คลอง  | กม.      | รายละเอียดคลองด้านท้ายน้ำ |      |       |         |              |                        |
|-------|----------|---------------------------|------|-------|---------|--------------|------------------------|
|       |          | B                         | D    | SS    | slope   | Elev.<br>U/S | พื้นที่ส่งน้ำ<br>(ไร่) |
| MC    | km.0+000 | 1.10                      | 0.65 | 1:1.5 | 1:5,000 | +8.394       | 600                    |
|       | km.0+725 |                           |      |       |         |              |                        |
|       | km.0+725 | 0.60                      | 0.45 | 1:1.5 | 1:6,000 | +8.012       | 2,500                  |
|       | km.2+175 |                           |      |       |         |              |                        |
| 1L-MC | km.0+000 | 0.60                      | 0.50 | 1:1.5 | 1:5,000 | +7.856       | 650                    |
|       | km.1+200 |                           |      |       |         |              |                        |
|       | km.1+200 | 0.60                      | 0.50 | 1:1.5 | 1:7,000 | +6.666       | 750                    |
|       | km.2+500 |                           |      |       |         |              |                        |
|       |          |                           |      |       |         | รวม          | 4,500                  |

หมายเหตุ B คือความกว้างของท้องคลอง

D คือความลึกของน้ำในคลอง

SS ความลาดเอียงของผนังด้านข้างคลอง

U/S Elev. คือระดับของท้องคลองด้านเหนือ

อัตราการไหลของน้ำผ่านประตูระบาย

$$Q = C_s L h_s G_o \sqrt{2gh} \quad (2)$$

Q คือ อัตราการระบายน้ำไหลผ่านประตู (ลบ.ม./วินาที)

$C_s$  คือ สัมประสิทธิ์การระบายน้ำไหลผ่านประตูแบบท่วมท้ายบาน (submerge flow)

L คือ ขนาดความกว้างของบานประตู (ม.)

$h_s$  คือ ค่าระดับน้ำท้ายประตู – ระดับธรณีประตู (ม.)

$G_o$  คือ ขนาดการเปิดบานประตู (ม.)

g คือ อัตราเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที<sup>2</sup>)

h คือ ค่าระดับน้ำหน้าประตู – ระดับน้ำท้ายประตู (ม.)

และค่า  $C_s$  หาได้จากสมการ 3 และตารางที่ 7

$$C_s = C_1 \left( \frac{h_s}{G_0} \right)^{C_2} \quad (3)$$

$C_1$  และ  $C_2$  คือ สัมประสิทธิ์สมการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำไหลผ่านประตูแบบทว่มท้ายบานที่ได้จากการสอบเทียบอัตราการไหลของน้ำผ่านบานประตู

$h_s$  คือ ค่าธรณีประตู (ม.รทก.)

ตารางที่ 7 ค่าธรณีสันประตูระบายน้ำ ค่า  $C_1$  และ  $C_2$

| ประตูระบายน้ำ      | ค่าธรณีประตู<br>(ม.รทก.) | $C_1$     | $C_2$     |
|--------------------|--------------------------|-----------|-----------|
| ปตร.กม.0+000 MC    | 8.394                    | 1.1417600 | -2.158621 |
| ปตร.กม.0+725 MC    | 8.012                    | 0.4798980 | -0.197093 |
| ปตร.กม.0+000 1L-MC | 7.856                    | 0.3383708 | -0.599790 |
| ปตร.กม.1+200 1L-MC | 6.666                    | 0.2216000 | -0.405600 |

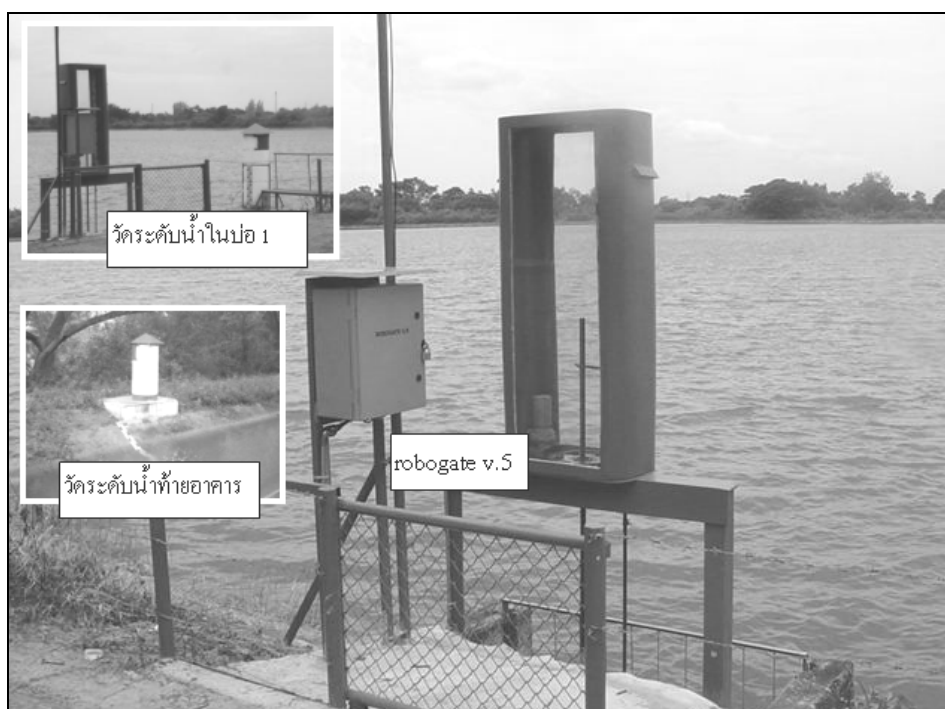
องค์ประกอบของระบบและการทำงานของอุปกรณ์แสดงในตารางที่ 8 ส่วนรายละเอียดทางด้านเทคนิคของอุปกรณ์แสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 8 องค์ประกอบและการทำงานของอุปกรณ์คลองอัตโนมัติกำแพงแสน

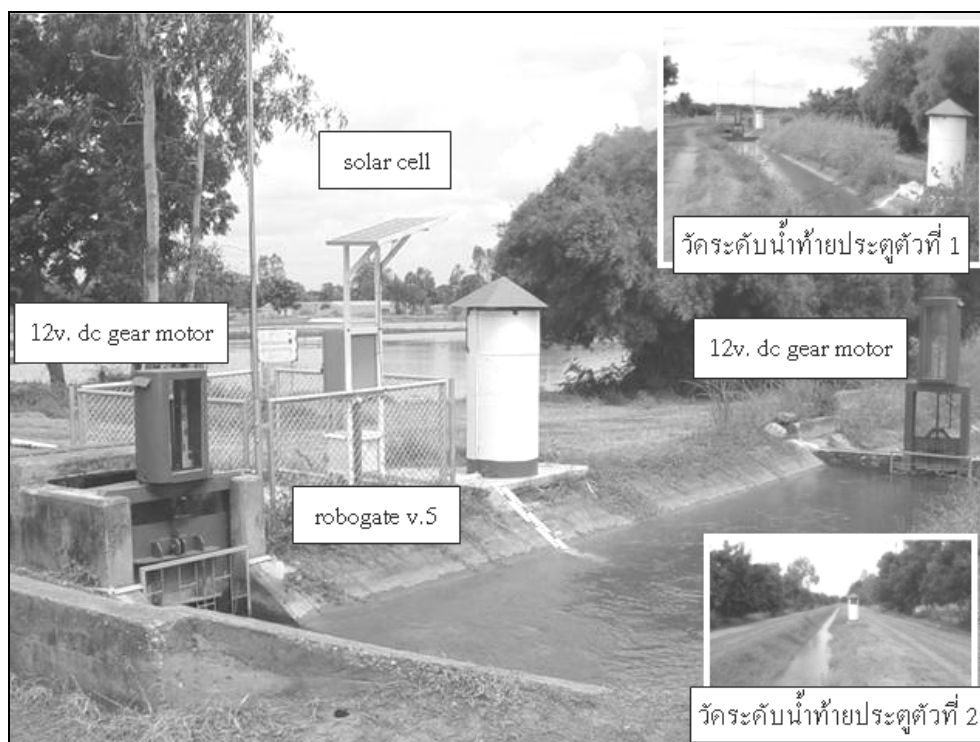
| องค์ประกอบของระบบ                                                                    | หน้าที่และการทำงานของอุปกรณ์                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. RTU ปตร.ปากคลองส่งน้ำ MC กม.0+000<br>ใช้ประตูชนิดรูนที่ 5 จำนวน 1 แห่ง(ภาพที่ 21) | 1. ทำหน้าที่ควบคุมการระบายน้ำจากบ่อ 1 สามารถทำงานได้ทั้งแบบควบคุมด้วยมือ การควบคุมปรับระยะการเปิดบานประตู ระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุโดยสถานีแม่ข่ายและการควบคุมระยะการเปิดบานประตูแบบอัตโนมัติ |

## ตารางที่ 8 (ต่อ)

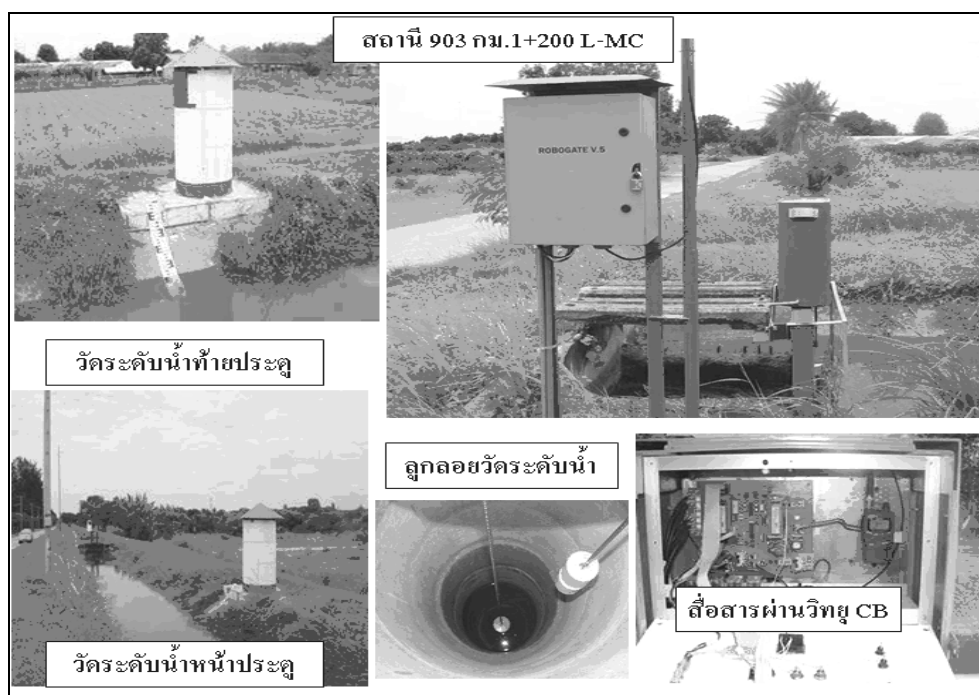
| องค์ประกอบของระบบ                                                                                                              | หน้าที่และการทำงานของอุปกรณ์                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2. RTU ปตร.กลางคลองส่งน้ำ MC กม.0+725 ใช้ประตุน้ำที่ 5 จำนวน 1 แห่ง(ภาพที่ 22)                                                 | 2. ทำหน้าที่รักษาระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉพาะจุดที่หน้า ปตร.ให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายตลอดระยะเวลาส่งน้ำ                                                                                                                                                                                                      |
| 3. RTU ปตร.ปากคลองส่งน้ำ 1L-MC กม. 0+000 ใช้ประตุน้ำที่ 5 จำนวน 1 แห่ง(ภาพที่ 22)                                              | 3. ทำหน้าที่ระบายน้ำจากคลอง MC ไหลเข้าคลอง 1L-MC การปรับระยะการเปิดประตูทำได้ทั้งแบบควบคุมด้วยมือและการควบคุมระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุโดยสถานีแม่ข่าย                                                                                                                                                       |
| 4. RTU ปตร.กลางคลองส่งน้ำ MC กม.1+200 ใช้ประตุน้ำที่ 5 จำนวน 1 แห่ง(ภาพที่ 23)                                                 | 4. ทำหน้าที่รักษาระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉพาะจุดที่หน้า ปตร.ให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายตลอดระยะเวลาส่งน้ำ                                                                                                                                                                                                      |
| 5. โทรมมาตรวัดระดับน้ำปลายคลองส่งน้ำ MC กม. 2+175 จำนวน 1 แห่ง(ภาพที่ 24)                                                      | 5. ทำหน้าที่ตรวจวัดระดับน้ำปลายคลองส่งน้ำ MC กม. 2+175                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 6. โทรมมาตรวัดระดับน้ำปลายคลองส่งน้ำ 1L-MC กม. 2+500 จำนวน 1 แห่ง(ภาพที่ 25)                                                   | 6. ทำหน้าที่ตรวจวัดระดับน้ำปลายคลองส่งน้ำ 1L-MC กม. 2+500                                                                                                                                                                                                                                               |
| 6. สถานีตรวจวัดอากาศที่คลอง MC กม. 0+725 จำนวน 1 แห่ง(ภาพที่ 26)                                                               | 6. ทำหน้าที่ตรวจวัดปริมาณฝนตก ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศและอุณหภูมิ                                                                                                                                                                                                                                        |
| 7. สถานีแม่ข่ายมีคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ 1 ชุดต่อเชื่อมกับ canal automation interface และติดตั้งซอฟต์แวร์ที่เขียนเอง(ภาพที่ 27) | 7. รับข้อมูลการตรวจวัดระดับน้ำ ระยะเปิดบานประตูระบายน้ำ ผ่านคลื่นวิทยุ นำข้อมูลมาคำนวณควบคุมปริมาณน้ำในคลองเพื่อส่งปรับบานประตูระบายน้ำ ปตร.ปากคลองส่งน้ำ MC กม.0+000 และ L-MC กม.0+000 ระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุทำให้ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับเป้าหมายตลอดช่วงการส่งน้ำ และรวบรวมข้อมูลเก็บใน data logger |



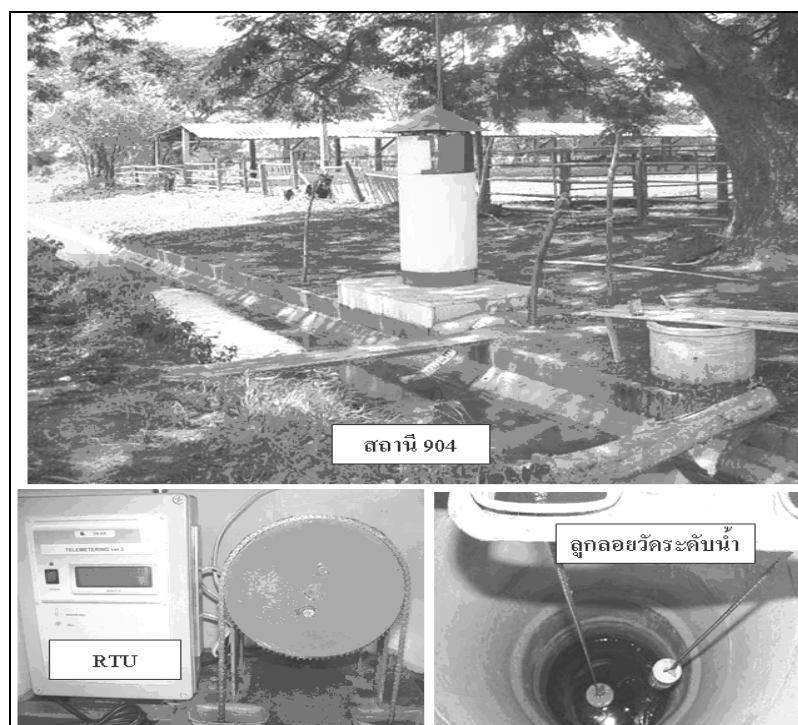
ภาพที่ 21 ปตร. ปากคลองส่งน้ำ MC กม. 0 + 000



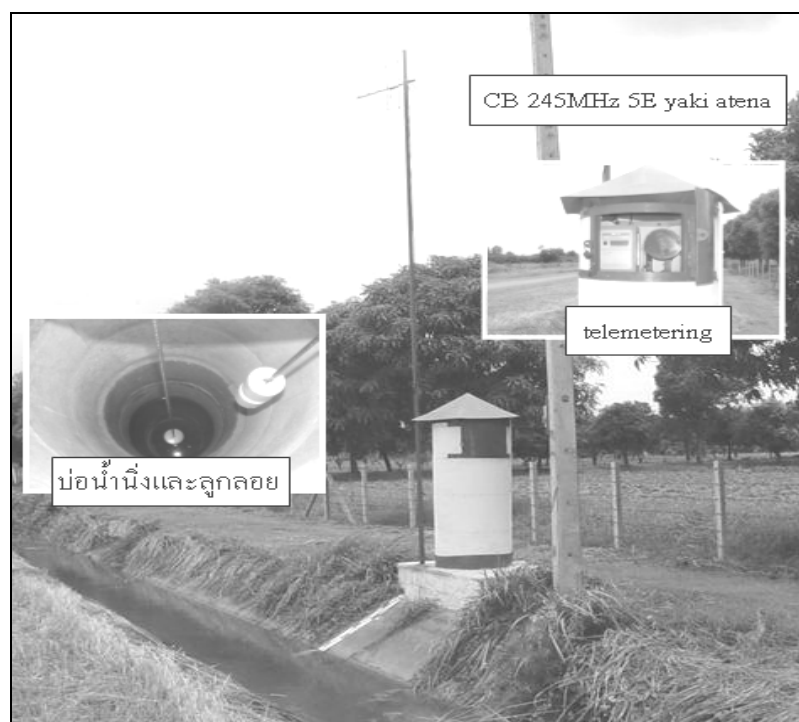
ภาพที่ 22 ปตร.กลางคลอง MC กม. 0+725 และ ปตร.ปากคลอง 1L-MC กม. 0+000



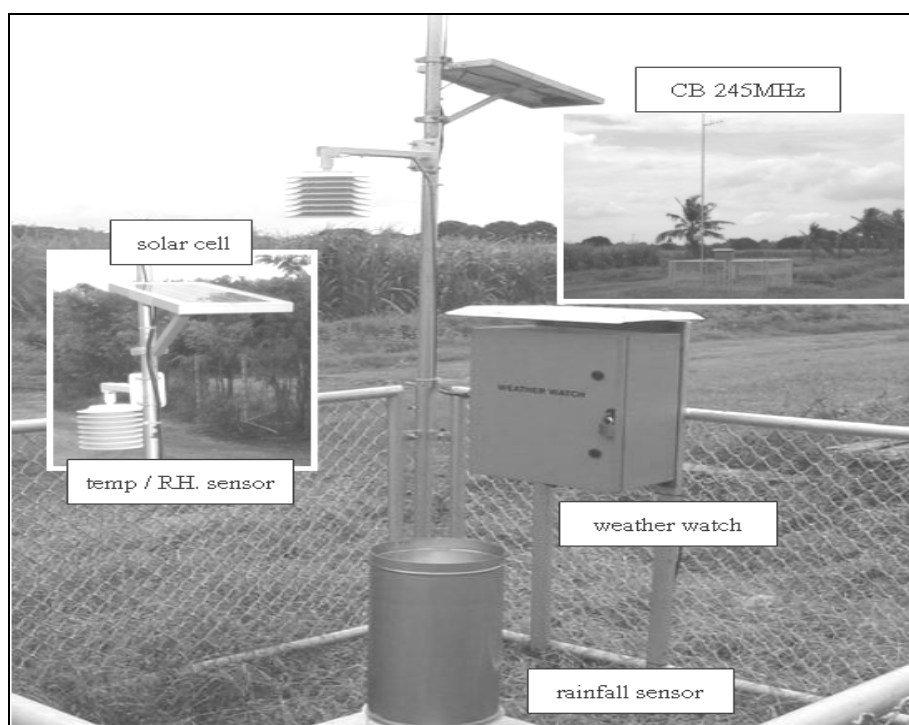
ภาพที่ 23 ปตร.กลางคลอง 1L-MC กม. 2+500



ภาพที่ 24 โทรมตรวัดระดับน้ำปลายคลอง MC กม. 2+175



ภาพที่ 25 โทรมาตรวัดระดับน้ำปลายคลอง 1L-MC กม. 2+500

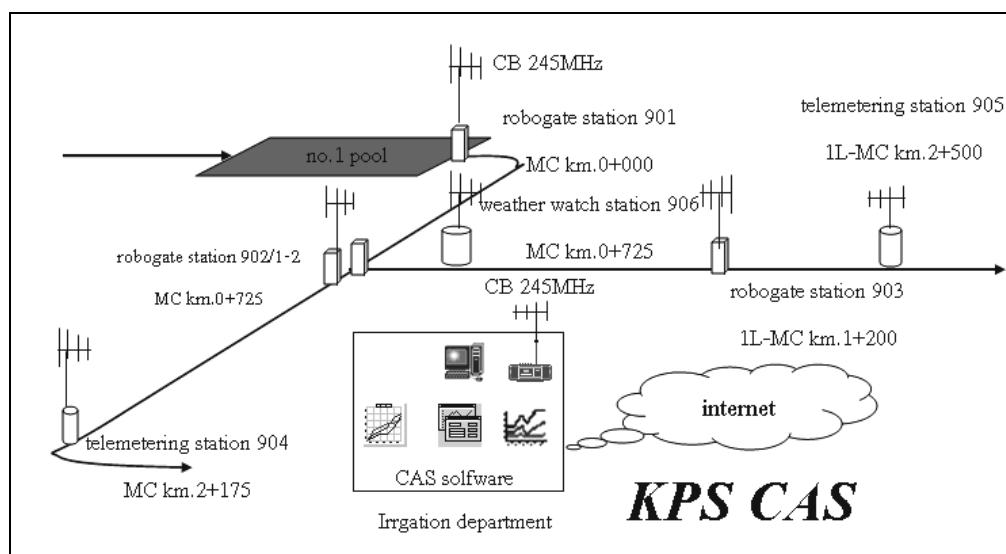


ภาพที่ 26 สถานีตรวจวัดอากาศที่คลอง MC กม.0+725



ภาพที่ 27 สถานีแม่ข่าย (base station)

3.1 หลักการทำงานของระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน (ภาพที่ 28) โดยใช้ประตูน้ควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดที่หน้าประตูระบายน้ำกลางคลองให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายและระบบคอมพิวเตอร์ส่วนกลางคอยตรวจสอบระดับน้ำในช่วงคลองต่างๆ แล้วสั่งควบคุม ประตู.ปากคลองส่งน้ำให้ระบายน้ำเข้าคลองให้เพียงพอกับความต้องการตามหลัก constant volume



ภาพที่ 28 หลักการทำงานของระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน

3.2 วิธีการทดสอบแบ่งเป็น 2 ช่วงคือการทดสอบการทำงานด้วยมือและทดสอบระบบการทำงานในแบบอัตโนมัติ ดังรายละเอียดวิธีทดสอบดังนี้

3.2.1 การทดสอบการทำงานของ sensor ตรวจวัดระดับน้ำและระยะการเปิดบานด้วยมือทุกๆ ครึ่งชั่วโมง จำนวน 66 ครั้ง ระหว่างวันที่ 10 ตุลาคม 2549 – 30 พฤศจิกายน 2550 และคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน RMSE

3.2.2 การทดสอบการทำงานแบบโทรมาตรระหว่างวันที่ 10 ตุลาคม 2549 – 3 มกราคม 2551 และการทดสอบการทำงานในระบบอัตโนมัติ ระหว่างวันที่ 4 มกราคม 2551 – 1 มิถุนายน 2551 โดยทดสอบความน่าเชื่อถือในการตรวจวัดและการส่งข้อมูลให้ทุกๆ ครึ่งชั่วโมง ทดสอบความคลาดเคลื่อน RMSE ของความสามารถในการควบคุมระดับน้ำตามเป้าหมายในระบบโทรมาตรและระบบอัตโนมัติ

#### 4. การพัฒนาและทดสอบระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง SPN CAS (Songpheenong canal automation system)

การพัฒนาคลองอัตโนมัติสองพี่น้องมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบใช้งานจริงที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้อง จ.สุพรรณบุรี โดยใช้ประตูบังคับควบคุมระดับน้ำหน้าประตูระบายน้ำกลางคลอง 5L – 2L ให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายและระบบคอมพิวเตอร์ส่วนกลาง ควบคุมปริมาณน้ำในคลองโดยการปรับบานประตูปากคลองส่งน้ำเพื่อเพิ่มหรือลดปริมาณการระบายน้ำเข้าคลอง ทำให้ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับเป้าหมายตลอดช่วงการทดสอบ ลักษณะโดยทั่วไปของคลองส่งน้ำ 5L-2L โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาสองพี่น้อง แสดงในตารางที่ 9



ตารางที่ 9 ลักษณะทั่วไปของคลองส่งน้ำ 5L-2L

| กม.        | ปตร.                                           | $C_d$ | B    | D    | SS    | Elev.           |         |
|------------|------------------------------------------------|-------|------|------|-------|-----------------|---------|
|            |                                                |       |      |      |       | of canal bottom |         |
|            |                                                |       | (ม.) | (ม.) |       | U/S             | D/S     |
| กม. 0+000  | แบบบานโค้ง 2 บาน<br>2 - 4.00 x 3.40 x 61.40 ม. | 0.70  | 8.00 | 3.55 | 1:1.5 | +13.293         | +12.450 |
| กม. 3+650  | แบบบานโค้ง 2 บาน<br>2 - 4.00 x 3.40 x 65.65 ม. | 0.65  | 8.00 | 3.35 | 1:1.5 | +12.285         | +11.485 |
| กม. 9+813  | แบบบานโค้ง 1 บาน<br>1 - 5.00 x 3.40 x 70.00 ม. | 0.65  | 8.00 | 3.05 | 1:1.5 | +10.969         | +9.969  |
| กม. 20+300 | แบบบานโค้ง 1 บาน<br>1 - 5.00 x 3.40 x 58.55 ม. | 0.65  | 7.00 | 2.80 | 1:1.5 | +8.160          | +7.510  |

หมายเหตุ  $C_d$  คือ สัมประสิทธิ์การระบายน้ำ

B คือความกว้างของท้องคลอง

D คือความลึกของน้ำในคลอง

SS ความลาดเอียงของผนังด้านข้างคลอง

U/S Elev. คือระดับของท้องคลองด้านเหนือ

U/S Elev. of canal bottom คือระดับของท้องคลองด้านเหนือของประตู

D/S Elev. of canal bottom คือระดับของท้องคลองด้านท้ายน้ำของประตู

ระบบคลองอัตโนมัติสองฟิโนมิ่งประกอบของระบบและการทำงานของอุปกรณ์แสดง  
ในตารางที่ 10 ส่วนรายละเอียดทางด้านเทคนิคของอุปกรณ์แสดงในภาคผนวก ค

ตารางที่ 10 องค์ประกอบและการทำงานของอุปกรณ์คลองอัตโนมัติสองพี่น้อง

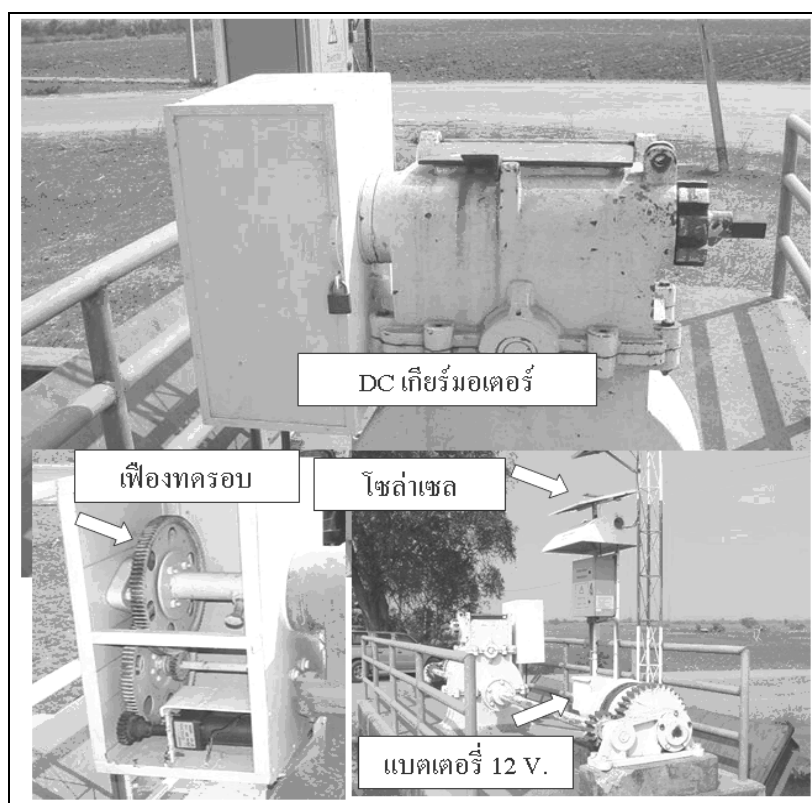
| องค์ประกอบของระบบ (ภาพที่ 29)                                                                                       | หน้าที่และการทำงานของอุปกรณ์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. RTU ปตร.ปากคลองส่งน้ำ 5L-2L กม. 0+000                                                                            | 1. ทำหน้าที่ควบคุมระบายน้ำจากคลองส่งน้ำ 2L เข้าคลองส่งน้ำ 5L-2L สามารถปรับบานประตู ได้ทั้งแบบการควบคุมด้วยมือและการสั่งปรับ บานประตูผ่านระบบ SCADA ของโครงการ สองพี่น้อง                                                                                                                                                                                                         |
| 2. RTU ปตร.กลางคลองส่งน้ำ 5L-2L กม. 3+650 ติดตั้งประตูยนต์รุ่นที่ 5 จำนวน 1 แห่ง                                    | 2. ทำหน้าที่รักษาระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉพาะจุด ที่หน้า ปตร.ให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายและใช้ DC gear motor ติดตั้งร่วมกับเครื่องกว้านของประตู ระบายน้ำ(ภาพที่ 30)เพื่อใช้ปรับขนาดการเปิด ประตู อุปกรณ์ทั้งหมดใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์                                                                                                                                                  |
| 3. RTU ปตร.กลางคลองส่งน้ำ 5L-2L กม. 9+813 ติดตั้งประตูยนต์รุ่นที่ 5 จำนวน 1 แห่ง                                    | 3. ทำหน้าที่รักษาระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉพาะ จุดที่หน้า ปตร.ให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายและใช้ DC gear motor ติดตั้งร่วมกับเครื่องกว้านของประตู ระบายน้ำเพื่อใช้ปรับขนาดการเปิดประตู อุปกรณ์ทั้งหมดใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์                                                                                                                                                              |
| 4. RTU ปตร.กลางคลองส่งน้ำ 5L-2L กม. 20+300 ติดตั้งประตูยนต์รุ่นที่ 5 จำนวน 1 แห่ง                                   | 4. ทำหน้าที่รักษาระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉพาะจุด ที่หน้า ปตร.ให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายและใช้ DC gear motor ติดตั้งร่วมกับเครื่องกว้านของประตู ระบายน้ำเพื่อใช้ปรับขนาดการเปิดประตู อุปกรณ์ทั้งหมดใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์                                                                                                                                                              |
| 5. สถานีแม่ข่ายมีคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ 1 ชุดต่อเชื่อมกับ canal automation interface และติดตั้งซอฟต์แวร์ที่เขียนเอง | 5. รับข้อมูลการตรวจวัดระดับน้ำ ระยะเปิด บานประตูระบายน้ำ กม. 3+650 กม. 9+813 และ กม. 20+300 ผ่านคลื่นวิทยุ นำข้อมูลมาคำนวณ ปริมาณน้ำในคลองเพื่อสั่งปรับบานประตูระบาย น้ำ กม.0+000 ผ่านระบบ SCADA ของโครงการ สองพี่น้อง และรวบรวมข้อมูลเก็บใน data logger ส่งผลการตรวจวัดระดับน้ำ ระยะเปิด ประตูระบายน้ำ ของประตูยนต์ผ่านดาวเทียม IPSTAR เข้าเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทุกครึ่งชั่วโมง |

ตารางที่ 10 (ต่อ)

| องค์ประกอบของระบบ (ภาพที่ 29) | หน้าที่และการทำงานของอุปกรณ์                                        |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 6. PC starter (ภาพที่ 31)     | 6. ทำหน้าที่กดปุ่ม PC start กรณี PC ไม่เปิดทำงานหลังจากไฟฟ้าขัดข้อง |



ภาพที่ 29 องค์ประกอบของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง



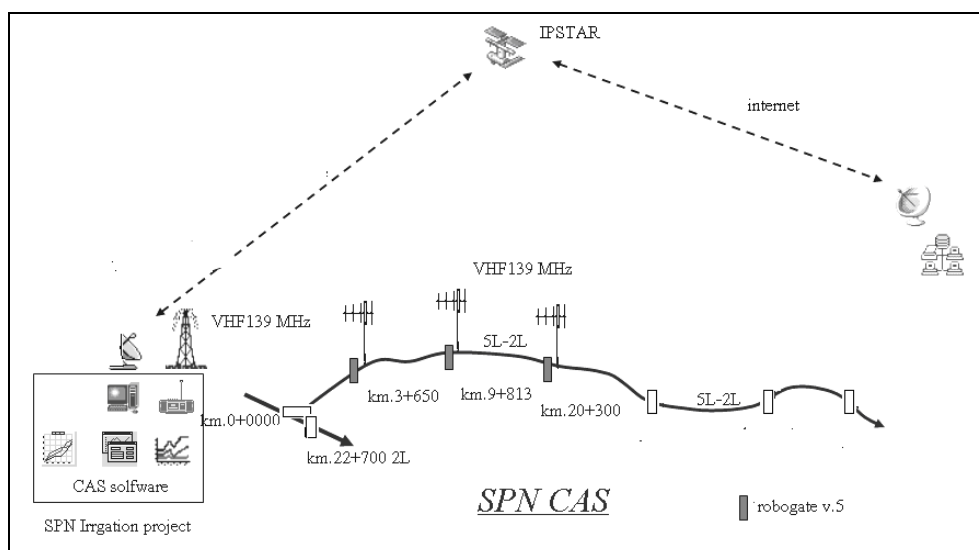
ภาพที่ 30 DC gear motor ติดตั้งร่วมกับเครื่องกวนของประตูละบายน้ำ



ภาพที่ 31 การติดตั้ง PC starter ร่วมกับ PC แม่ข่าย

4.1 หลักการทำงานของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง (ภาพที่ 32) โดยใช้ประตุน้ำ (RTU) ควบคุมระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉพาะจุดด้านเหนือน้ำหน้าประตูระบายน้ำที่ กม.3+650 กม. 9+813 และ กม. 20+300 ให้อยู่ที่ระดับเป้าหมาย และระบบคอมพิวเตอร์ส่วนกลางควบคุมปริมาณน้ำในคลองโดยการปรับบานประตูปากคลองส่งน้ำ กม. 0+000 ผ่านระบบ SCADA เพื่อเพิ่มหรือลดปริมาณการระบายน้ำเข้าคลองเพื่อควบคุมปริมาณน้ำในคลองให้อยู่ที่ระดับเป้าหมาย

ที่ระบบคอมพิวเตอร์สถานีแม่ข่ายบันทึกข้อมูลการตรวจวัดใน data logger และส่งข้อมูลผ่านดาวเทียม IPSTAR ทุก ๆ ครึ่งชั่วโมงเพื่อนำเสนอข้อมูลระดับน้ำที่ตรวจวัดและระยะเปิดประตูในอินเทอร์เน็ต



ภาพที่ 32 หลักการทำงานของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง

4.2 วิธีการทดสอบแบ่งเป็น 2 ช่วงคือการทดสอบการทำงานด้วยมือ (แบบโทรมาตร) ระหว่างวันที่ 4 ธันวาคม 2549 – 3 มกราคม 2551 และทดสอบการทำงานในแบบอัตโนมัติระหว่างวันที่ 4 มกราคม 2551 – 24 มิถุนายน 2551 ดังรายละเอียดวิธีทดสอบดังนี้

4.2.1 การทดสอบการทำงานของ sensor ตรวจวัดระดับน้ำและระยะการเปิดบานด้วยมือทุกๆ ครึ่งชั่วโมง จำนวน 80 ครั้งระหว่างเดือนตุลาคม 2550 และเดือนมกราคม 2551 และคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน RMSE

4.2.2 การทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติระหว่างวันที่ 4 มกราคม 2551 – 24 มิถุนายน 2551 โดยทดสอบความน่าเชื่อถือในการตรวจวัดและการส่งข้อมูลให้ทุกๆ ครึ่งชั่วโมง ทดสอบความคลาดเคลื่อน RMSE ของความสามารถในการควบคุมระดับน้ำตามเป้าหมายในระบบอัตโนมัติ

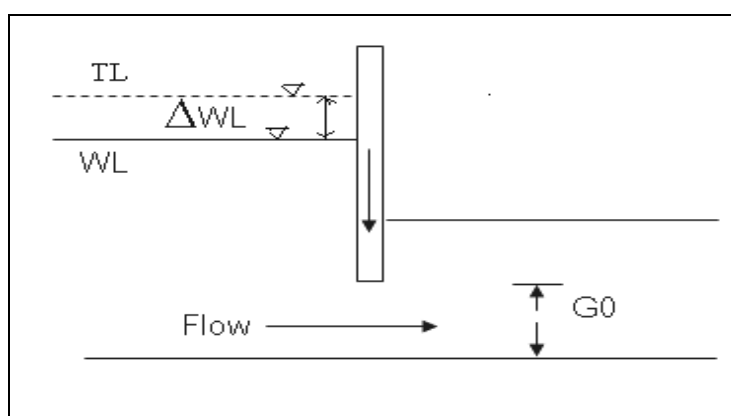
## ผลและวิจารณ์

การพัฒนา algorithm ของคลองอัตโนมัติรวมทั้งผลทดสอบแบบจำลองคลองอัตโนมัติในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบอุปกรณ์ใช้งานจริงในสนาม และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

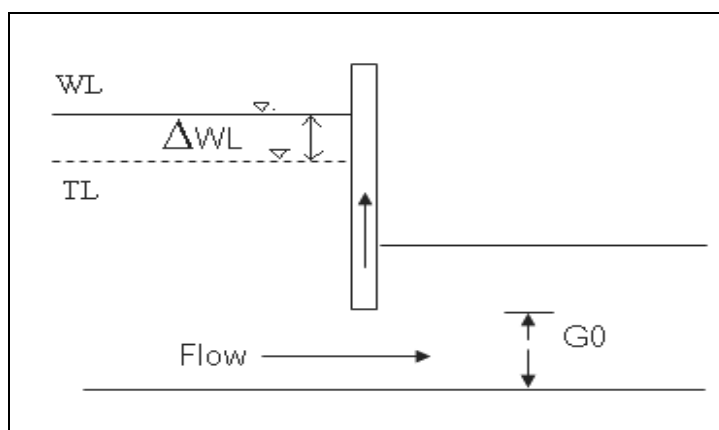
### 1. การพัฒนา algorithm ของระบบคลองอัตโนมัติ

การพัฒนาระบบคลองอัตโนมัติได้ใช้ประจักษ์นัยเข้ามาควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดด้านเหนือหน้าประตูระบายน้ำอยู่ที่ระดับเป้าหมายตลอดเวลา และใช้คอมพิวเตอร์ส่วนกลางซึ่งการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการคำนวณปริมาณน้ำในคลองโดยสั่งปรับเพิ่มหรือลดขนาดการเปิดบานประตูปากคลองส่งน้ำเพื่อให้ น้ำในคลองอยู่ที่ระดับเป้าหมาย การพัฒนา algorithm ของคลองอัตโนมัติมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 algorithm สำหรับประจักษ์นัย(RTU) ตรวจวัดระดับน้ำหน้าประตูระบายน้ำและระยะการเปิดประตูเพื่อคำนวณการปรับขนาดบานประตูเพื่อควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดด้านเหนือหน้าประตูให้อยู่ที่ระดับน้ำเป้าหมายแบบอัตโนมัติซึ่งได้จัดแบ่งการทำงานถ้าหากระดับน้ำต่ำกว่าระดับน้ำเป้าหมายต้องลดระยะการเปิดประตู (ภาพที่ 33) และถ้าหากระดับน้ำสูงกว่าระดับน้ำเป้าหมายต้องเพิ่มระยะการเปิดประตู (ภาพที่ 34) และถ้าหากระดับน้ำพอดีกับระดับน้ำเป้าหมายซึ่งกรณีนี้เป็นความต้องการของการควบคุมไม่ต้องปรับระยะการเปิดประตู



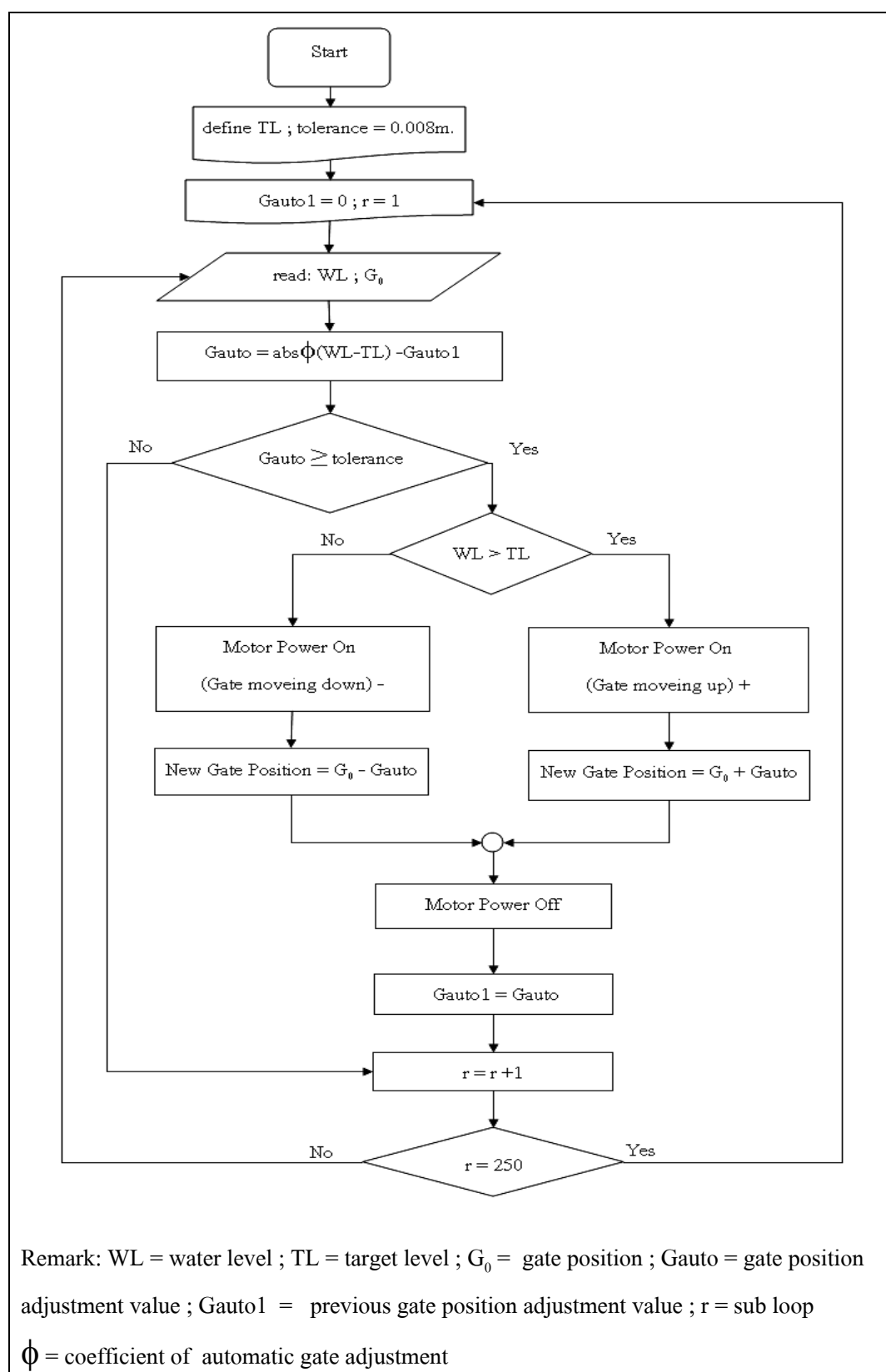
ภาพที่ 33 กรณีค่าระดับน้ำ WL มีค่าต่ำกว่าระดับน้ำเป้าหมาย



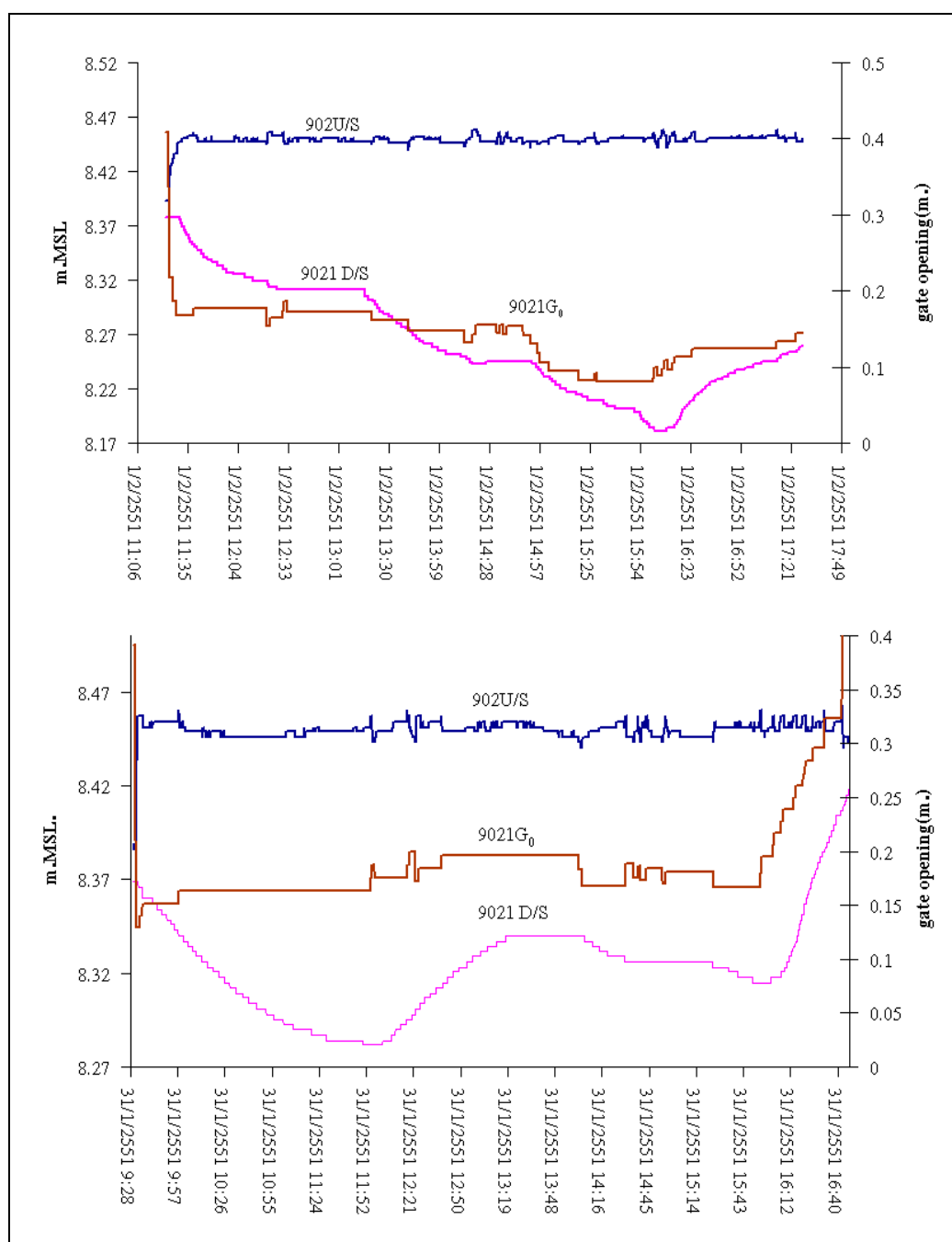
ภาพที่ 34 กรณีค่าระดับน้ำ WL มีค่าสูงกว่าระดับน้ำเป้าหมาย

algorithm การทำงานของประตุนต์แสดงในภาพที่ 35 มีขั้นตอนการทำงานซึ่งแบ่งออกเป็น 2 รอบ (loop) ในแต่ละรอบใหญ่กำหนดระดับน้ำเป้าหมายและช่วง tolerance ของค่าระดับน้ำเป้าหมายที่ต้องการในที่นี่กำหนดไว้ 0.008 เมตร แต่ละรอบย่อยประตุนต์จะตรวจวัดระดับน้ำด้านเหนือน้ำและระยะการเปิดบานประตูทุก 0.5 วินาที เพื่อทำการเปรียบเทียบระดับน้ำด้านเหนือน้ำที่ระดับเป้าหมาย ถ้าระดับน้ำต่างจากระดับเป้าหมายเกินกว่าช่วง tolerance ที่กำหนดจะทำการคำนวณหา ระยะการเปิดบานจากฟังก์ชันของระดับน้ำที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา 0.5 วินาทีนั้นและระยะเปิดบานในช่วง 0.5 วินาทีก่อนหน้านี้ หลังจากนั้นก็ตรวจสอบว่าจะต้องเปิดบานเพิ่มหรือลดบานโดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่ง MCC ให้ควบคุมการเปิด-ปิดมอเตอร์ขึ้น-ลงตามระยะการเปิดบานที่คำนวณได้ พร้อมบันทึกระยะการปรับบาน ประตุนต์จะทำงานตามหลักการดังกล่าวจำนวน 250 รอบย่อยหลังจากนั้นก็ reset ค่าการเปิดบานให้เป็นศูนย์เพื่อเริ่ม 250 รอบย่อยใหม่



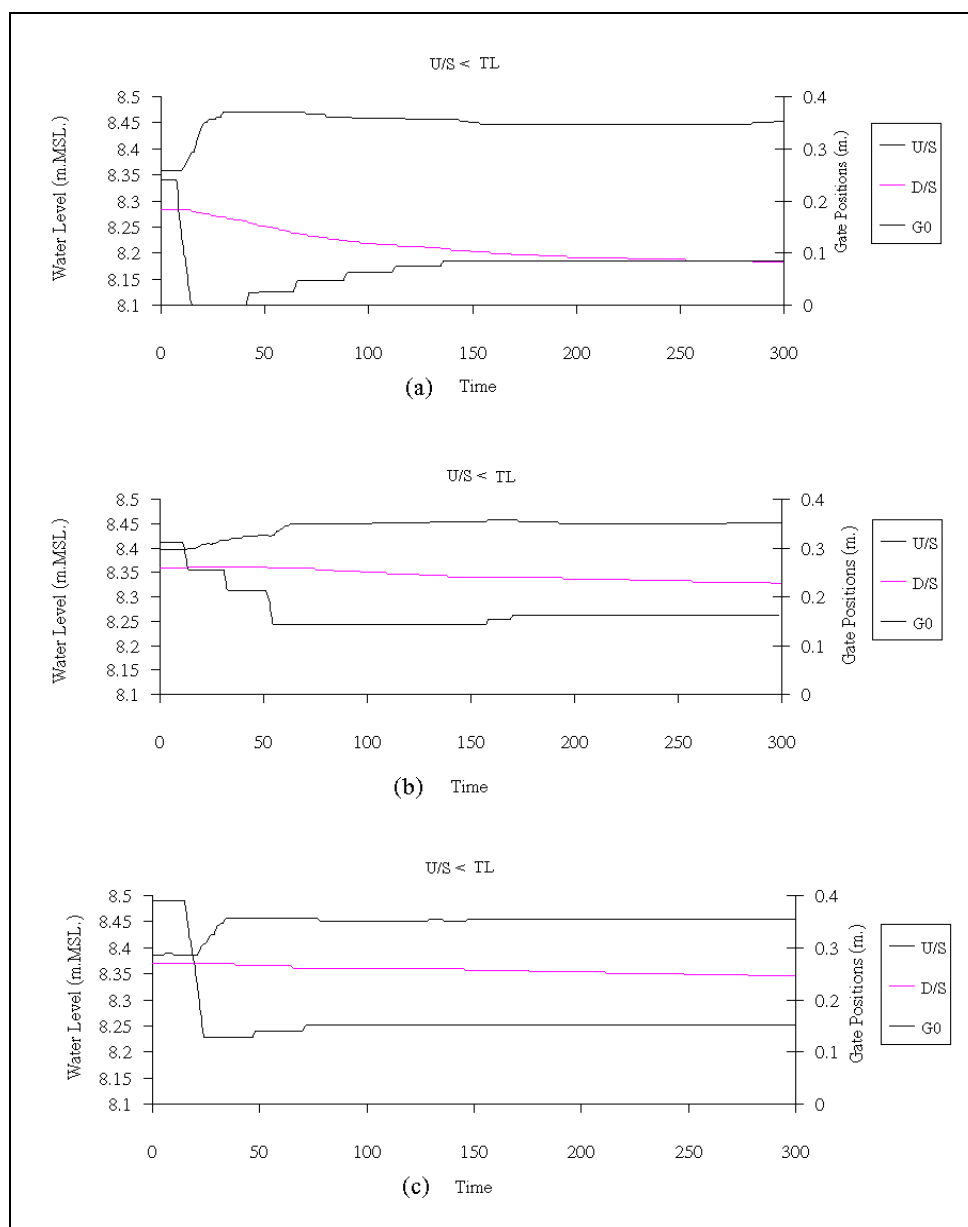


ภาพที่ 35 algorithm ของประตูยนต์เพื่อควบคุมระดับน้ำหน้าประตู



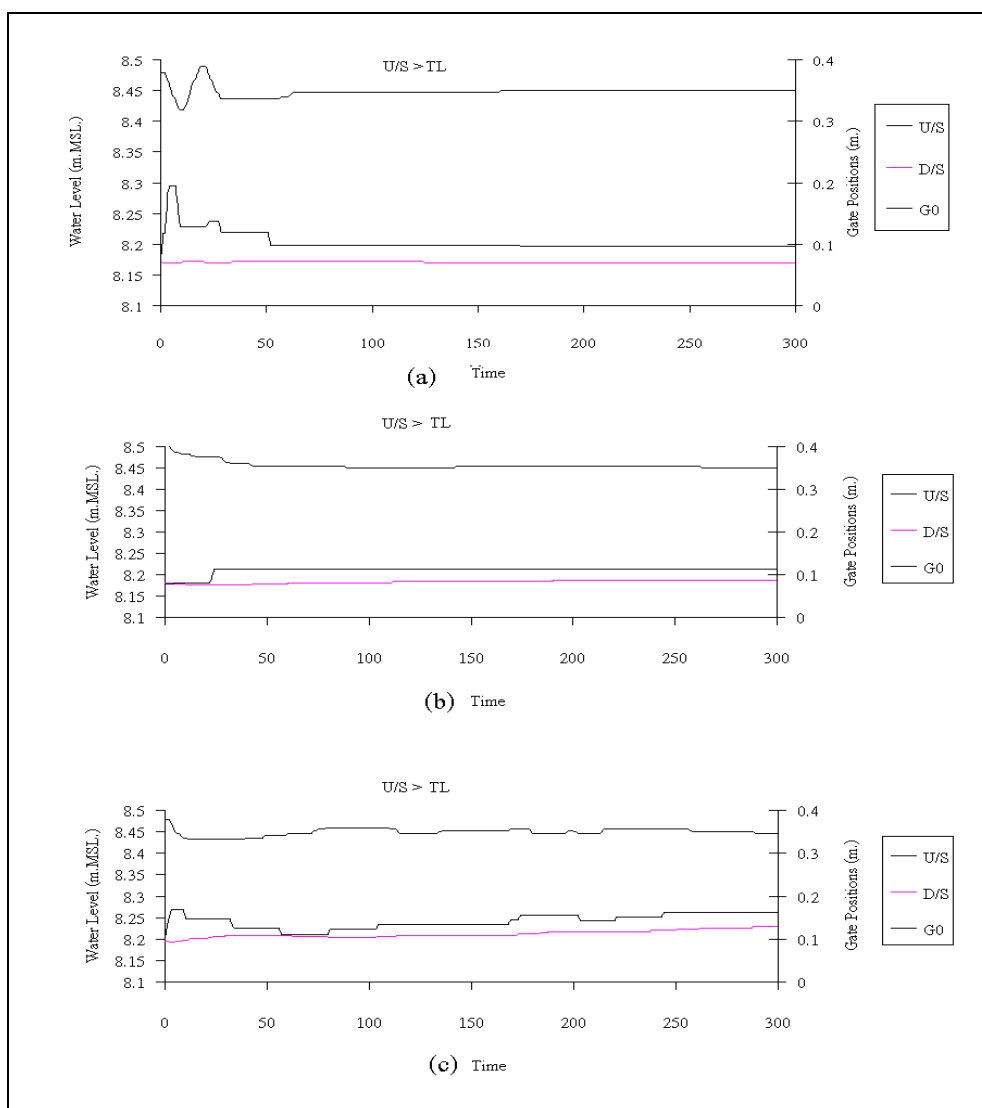
ภาพที่ 36 ทดสอบการทำงานของalgorithm ประตูนันต์สถานี 9021

ทดสอบการทำงานของalgorithm สำหรับประตูนันต์เพื่อควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดด้านเหนือ น้ำหน้าประตูให้อยู่ที่ระดับน้ำเป้าหมายแบบอัตโนมัติที่สถานี 9021 คลอง MC กม. 0+725 ระหว่าง วันที่ 14 มกราคม – 13 กุมภาพันธ์ ประมาณ 10 ชั่วโมง (ภาพที่ 36) บันทึกข้อมูลในทุกๆ 5 วินาที และเลือกกลุ่มจำนวน 10 ครั้ง ทั้งกรณี  $U/S < TL$  และ กรณี  $U/S > TL$  ซึ่งแสดงในตารางที่ 11



ภาพที่ 37 ตัวอย่างผลการทดสอบกรณี U/S ต่ำกว่า TL

จากภาพที่ 37 เป็นตัวอย่างกรณีค่าระดับน้ำด้านเหนือ (U/S) มีค่าต่ำกว่าระดับน้ำเป้าหมาย ในภาพที่ 37 (a) ระดับน้ำต่างจากเป้าหมาย 0.086 ซม. ปรับระยะเปิดบาน 0.155 ซม.รวม 6 ครั้ง โดยใช้เวลา 745 วินาที ในภาพที่ 37 (b) ระดับน้ำต่างจากเป้าหมาย 0.054 ซม. ปรับระยะเปิดบาน 0.168 ซม.รวม 5 ครั้งโดยใช้เวลา 130 วินาที ในภาพที่ 37 (c) ระดับน้ำต่างจากเป้าหมาย 0.064 ซม. ปรับระยะเปิดบาน 0.24 ซม.รวม 3 ครั้งโดยใช้เวลา 375 วินาที



ภาพที่ 38 ตัวอย่างผลการทดสอบกรณี U/S มากกว่า TL

และจากภาพที่ 38 เป็นตัวอย่างกรณีค่าระดับน้ำด้านเหนือหน้า (U/S) มีค่าสูงกว่าระดับน้ำเป้าหมาย ในภาพที่ 38 (a) ระดับน้ำต่างจากเป้าหมาย 0.04 ซม. ปรับระยะเปิดบาน 0.096 ซม.รวม 6 ครั้งโดยใช้เวลา 285 วินาที ในภาพที่ 38 (b) ระดับน้ำต่างจากเป้าหมาย 0.01 ซม. ปรับระยะเปิดบาน 0.02 ซม.รวม 1 ครั้งโดยใช้เวลา 110 วินาที ในภาพที่ 38 (c) ระดับน้ำต่างจากเป้าหมาย 0.02 ซม. ปรับระยะเปิดบาน 0.035 ซม.รวม 6 ครั้งโดยใช้เวลา 530 วินาที

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบ algorithm เพื่อควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดด้านเหนือ

| No.   | U/S < TL    |       |              |      | U/S > TL    |       |              |      |
|-------|-------------|-------|--------------|------|-------------|-------|--------------|------|
|       | $\Delta WL$ | count | $\Delta G_0$ | time | $\Delta WL$ | count | $\Delta G_0$ | time |
| 1     | 0.086       | 6     | 0.155        | 745  | 0.040       | 6     | 0.096        | 285  |
| 2     | 0.054       | 5     | 0.168        | 130  | 0.010       | 1     | 0.020        | 110  |
| 3     | 0.064       | 3     | 0.240        | 375  | 0.020       | 6     | 0.035        | 530  |
| 4     | 0.032       | 4     | 0.041        | 365  | 0.009       | 1     | 0.010        | 275  |
| 5     | 0.020       | 4     | 0.048        | 275  | 0.049       | 4     | 0.135        | 320  |
| 6     | 0.011       | 3     | 0.032        | 265  | 0.010       | 3     | 0.015        | 285  |
| 7     | 0.009       | 1     | 0.010        | 295  | 0.012       | 4     | 0.016        | 340  |
| 8     | 0.010       | 2     | 0.010        | 120  | 0.010       | 6     | 0.016        | 795  |
| 9     | 0.013       | 2     | 0.010        | 175  | 0.011       | 3     | 0.012        | 440  |
| 10    | 0.012       | 3     | 0.036        | 545  | 0.020       | 3     | 0.025        | 480  |
| total | 0.031       | 3.4   | 0.075        | 329  | 0.019       | 3.7   | 0.038        | 386  |

หมายเหตุ  $\Delta WL$  คือขนาดระดับน้ำที่ปรับเข้าหาเป้าหมาย (ม.)

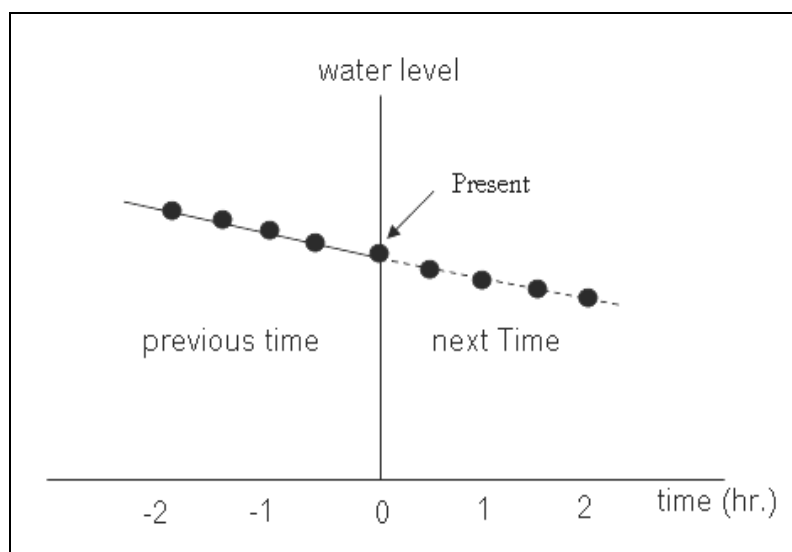
count คือจำนวนครั้งที่ปรับประตู

$\Delta G_0$  คือขนาดระยะการปรับบานประตู (ม.)

time เวลาที่ใช้เพื่อปรับระดับน้ำเข้าหาเป้าหมาย (วินาที)

จากตารางผลการทดสอบกรณี U/S > TL การปรับระดับน้ำเข้าหาเป้าหมายใช้เวลาอยู่ระหว่าง 120 – 745 วินาที จำนวนครั้งการปรับบานประตูระหว่าง 1 – 6 ครั้ง และกรณี U/S < TL การปรับระดับน้ำเข้าหาเป้าหมายใช้เวลาอยู่ระหว่าง 110 – 795 วินาที จำนวนครั้งการปรับบานประตูระหว่าง 1 – 6 ครั้งทั้งสองกรณีแสดงให้เห็นว่า algorithm สำหรับประตูยนต์เพื่อควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดด้านเหนือหน้าประตูให้อยู่ที่ระดับน้ำเป้าหมาย

1.2 algorithm การควบคุมปริมาณน้ำในคลองโดยคอมพิวเตอร์ส่วนกลางที่สถานีแม่ข่ายนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้ปัจจุบันและค่าระดับน้ำที่บันทึกใน data logger ย้อนหลัง 2 ชั่วโมงมาคาดการณ์ล่วงหน้าโดยใช้สมการ regression จากนั้นต่อเส้นกราฟออกไปจากเส้นเดิม (ภาพที่ 39) ค่าระดับน้ำที่คาดการณ์ได้นำไปคำนวณเพื่อปรับบานประตูระบายน้ำตามสมการที่ 1- 5 ดังนี้



ภาพที่ 39 คาดการณ์ระดับน้ำล่วงหน้าโดยสมการ regression

$$\Delta V_i = \Delta WL \times L \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = \frac{\Delta V_i}{t} \quad (2)$$

$\Delta WL$  พื้นที่หน้าตัดน้ำส่วนที่มากหรือน้อยกว่าระดับเป้าหมาย (ตร.ม.)

$\Delta V_i$  ปริมาตรน้ำส่วนที่มากหรือน้อยกว่าระดับเป้าหมายทุกช่วงคลอง (ลบ.ม.)

$L$  ความยาวช่วงคลองระหว่างประตูระบายน้ำ

$t$  เวลาที่จ่ายน้ำจากประตูระบายน้ำที่นี้กำหนดให้ 30 นาที

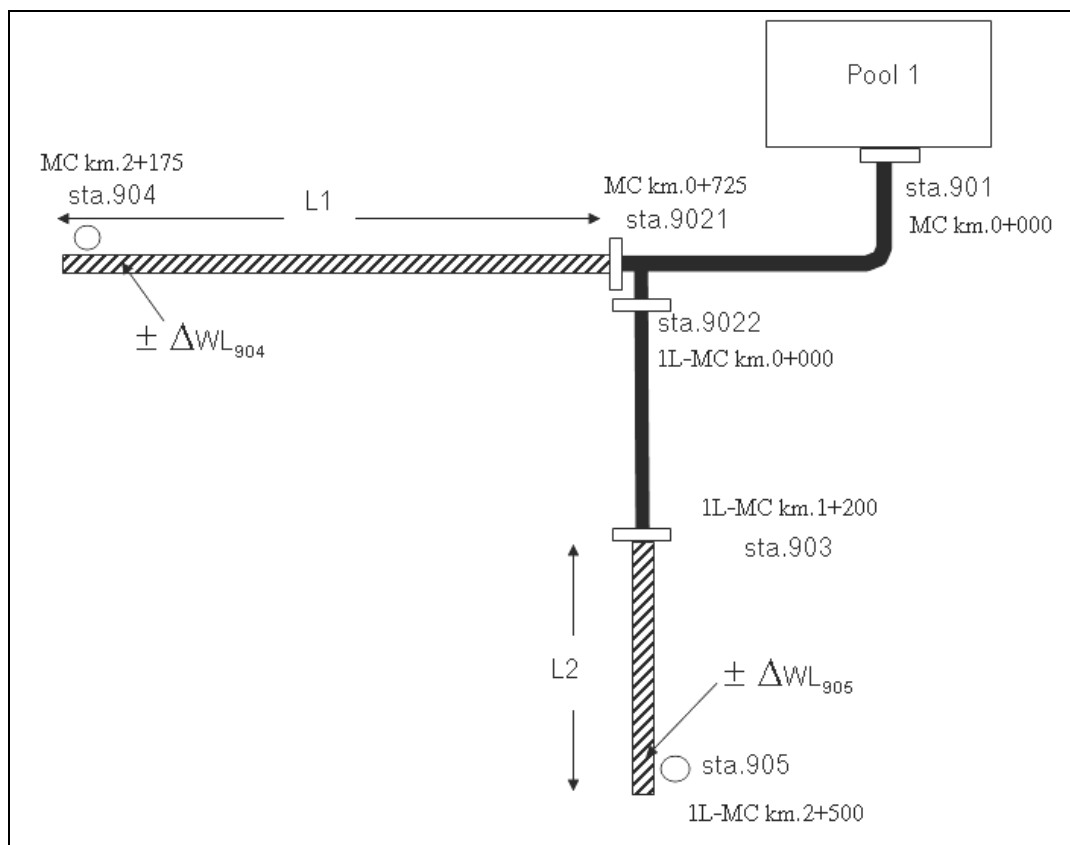
$\Delta Q_i$  อัตราการระบายน้ำที่เพิ่มหรือลดลงของประตูปากคลอง (ลบ.ม./วินาที)

จากสมการที่ 2 ได้ค่า  $\Delta Q$  นำมาหาค่าการส่งคำสั่งปรับระยะการเปิดบานประตูระบายน้ำปากคลอง  $G_0$  ด้วยสมการที่ 3 นำค่า  $Q_t$  แทนค่าใน  $Q$  สมการที่ 4 เพื่อหาค่า  $G_0$

$$Q_t = Q_{t-1} \pm \Delta Q \quad (3)$$

$$Q = C_s L G_0 \sqrt{2g\Delta h} \quad (4)$$

1.2.1 กรณีระบบคลองอัตโนมัติกักเก็บและระบายน้ำในคลอง โดยคอมพิวเตอร์ศูนย์กลางที่สถานีแม่ข่ายเพื่อเพิ่มหรือลดการระบายน้ำที่ ปลต.ปากคลองส่งน้ำ เพื่อให้ น้ำในคลองมีระดับน้ำอยู่ที่เป้าหมาย มีรายละเอียดและขั้นตอนการทำงานในภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ฟังการทำงานควบคุมปริมาณน้ำในคลองอัตโนมัติกักเก็บและระบายน้ำ

สถานีแม่ข่ายตรวจวัดระดับน้ำและระยะเปิดบานจากประตูน้ดทุกสถานีและที่สถานีโทรมาตร 904 ปลายคลองส่งน้ำ MC กม.2+175 และสถานีโทรมาตร 905 ที่ปลายคลอง L-MC กม.2+500 นำข้อมูลที่ตรวจวัดได้ปัจจุบันและค่าระดับน้ำที่บันทึกใน data logger ย้อนหลัง 2 ชั่วโมงมาคำนวณตามสมการที่ 5 - 10 เพื่อปรับบานประตูระบายน้ำสถานี 901 คลอง MC กม. 0+000 และ สถานี 9022 คลอง 1L-MC กม.0+000 เพื่อให้ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับเป้าหมาย

$$\Delta V_{904} = \Delta WL_{904} \times L1 \quad (5)$$

$$\Delta Q_{904} = \frac{\Delta V_{904}}{t} \quad (6)$$

$\Delta WL_{904}$  พื้นที่หน้าตัดน้ำส่วนที่มากหรือน้อยกว่าระดับเป้าหมาย (ตร.ม.)

$\Delta V_{904}$  ปริมาตรน้ำส่วนที่มากหรือน้อยกว่าระดับเป้าหมาย (ลบ.ม.)

L1 ความยาวช่วงคลองจากประตูระบายน้ำ 9021 ถึงสถานี 904 (ม.)

t เวลาที่ระบายน้ำจากประตูระบายน้ำ 901 ในที่นี้กำหนดที่ 30 นาที

$\Delta Q_{904}$  อัตราการระบายน้ำที่เพิ่มหรือลดลงของประตูปากคลอง (ลบ.ม./วินาที)

$$\Delta V_{905} = \Delta WL_{905} \times L1 \quad (7)$$

$$\Delta Q_{905} = \frac{\Delta V_{905}}{t} \quad (8)$$

$\Delta WL_{905}$  พื้นที่หน้าตัดน้ำส่วนที่มากหรือน้อยกว่าระดับเป้าหมาย (ตร.ม.)

$\Delta V_{905}$  ปริมาตรน้ำส่วนที่มากหรือน้อยกว่าระดับเป้าหมาย (ลบ.ม.)

L2 ความยาวช่วงคลองจากประตูระบายน้ำ 9022 ถึงสถานี 905 (ม.)

t เวลาที่ระบายน้ำจากประตูระบายน้ำ 9022 ในที่นี้กำหนดที่ 30 นาที

$\Delta Q_{905}$  อัตราการระบายน้ำที่เพิ่มหรือลดลงของประตูปากคลอง (ลบ.ม./วินาที)

จากสมการที่ 8 ได้ค่า  $\Delta Q_{905}$  นำมาหาค่าปรับบานประตูระบายน้ำ  $Q_{9022}$  ด้วยสมการที่ 9 และสมการที่ 4

$$Q_{9022} = Q_{9022,-1} + \Delta Q_{905} \quad (9)$$

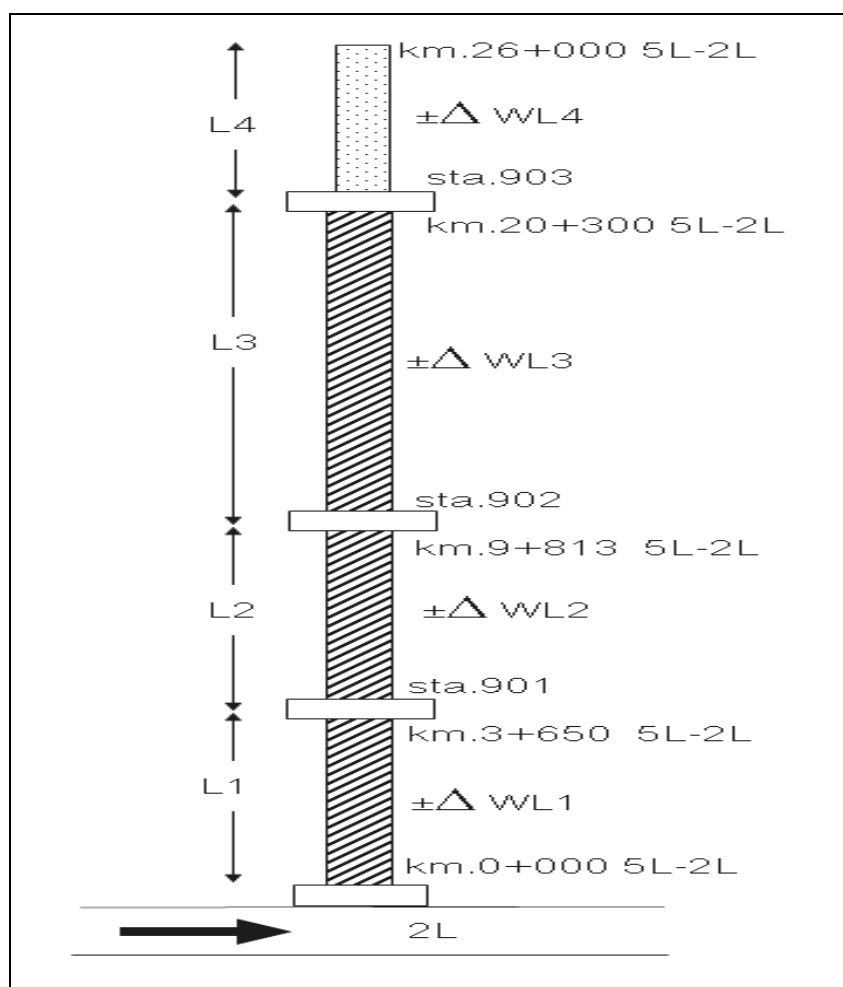
จากสมการที่ 6 และสมการที่ 8 ได้ค่า  $\Delta Q_{904}$  และ  $\Delta Q_{905}$  นำมาหาค่าปรับบานประตูระบายน้ำ  $Q_{901}$  ด้วยสมการที่ 10 และสมการที่ 4

$$Q_{901} = Q_{901,-1} + \Delta Q_{904} + \Delta Q_{905} \quad (10)$$



ที่สถานีแม่ข่ายจะส่งค่าระยะเปิดประตูระบายน้ำให้สถานี 901 และ 9022 ผ่านคลื่นวิทยุ และในเวลาครึ่งชั่วโมงถัดไปจะดำเนินการในลักษณะเช่นนี้อีกต่อเนื่องกันไป

1.2.2 กรณีของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง การควบคุมปริมาณน้ำในคลอง โดยคอมพิวเตอร์ที่สถานีแม่ข่ายเพื่อให้ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับเป้าหมายมีขั้นตอนการทำงานในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ขั้นตอนการทำงานควบคุมปริมาณน้ำในคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง

สถานีแม่ข่ายตรวจวัดระดับน้ำหน้าประตูระบายน้ำที่ กม.3+650 กม.9+813 กม.20+300 และระดับน้ำท้ายประตูระบายน้ำ กม.20+300 นำข้อมูลที่ตรวจวัดได้ปัจจุบันและค่าระดับน้ำท้ายประตูระบายน้ำ กม.20+300 ที่บันทึกใน data logger ย้อนหลัง 6 ชั่วโมงมาคำนวณเพื่อปรับบานประตูระบายน้ำ กม.0+000 เพื่อให้ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับน้ำเป้าหมาย ซึ่งการทำงานอัตโนมัติตามสมการที่ 11 – 19

$$\Delta v_{km.3+650} = \Delta WL_{km.3+650} \times L1 \quad (11)$$

$$\Delta Q_{km.3+650} = \frac{\Delta v_{km.3+650}}{t} \quad (12)$$

|                        |                                                                      |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $\Delta WL_{km.3+650}$ | พื้นที่หน้าตัดน้ำส่วนที่เกินหรือขาดหน้าประตูจากระดับเป้าหมาย (ตร.ม.) |
| $\Delta v_{km.3+650}$  | ปริมาตรน้ำส่วนที่เกินหรือขาดหน้าประตูจากระดับเป้าหมาย (ลบ.ม.)        |
| L1                     | ความยาวช่วงคลองจากประตูระบายน้ำ กม.0+000 ถึง กม.3+650 (ม.)           |
| t                      | เวลาระบายน้ำประตู กม.3+650 ในที่นี้กำหนดที่ 30 นาที                  |
| $\Delta Q_{km.3+650}$  | อัตราการระบายน้ำที่เพิ่มหรือลดลง (ลบ.ม./วินาที)                      |

$$\Delta v_{km.9+813} = \Delta WL_{km.9+813} \times L2 \quad (13)$$

$$\Delta Q_{km.9+813} = \frac{\Delta v_{km.9+813}}{t} \quad (14)$$

|                        |                                                                      |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $\Delta WL_{km.9+813}$ | พื้นที่หน้าตัดน้ำส่วนที่เกินหรือขาดหน้าประตูจากระดับเป้าหมาย (ตร.ม.) |
| $\Delta v_{km.9+813}$  | ปริมาตรน้ำส่วนที่เกินหรือขาดหน้าประตูจากระดับเป้าหมาย (ลบ.ม.)        |
| L2                     | ความยาวช่วงคลองจากประตูระบายน้ำ กม.3+650 ถึง กม.9+813 (ม.)           |
| t                      | เวลาระบายน้ำประตู กม.9+813 ในที่นี้กำหนดที่ 30 นาที                  |
| $\Delta Q_{km.9+813}$  | อัตราการระบายน้ำที่เพิ่มหรือลดลง (ลบ.ม./วินาที)                      |

$$\Delta v_{km.20+300} = \Delta WL_{km.20+300} \times L3 \quad (15)$$

$$\Delta Q_{\text{km.20+300}} = \frac{\Delta V_{\text{km.20+300}}}{t} \quad (16)$$

|                                |                                                                     |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $\Delta WL_{\text{km.20+300}}$ | พื้นที่หน้าตัดน้ำส่วนที่เกินหรือขาดหน้าประตูจากระดับเป้าหมาย(ตร.ม.) |
| $\Delta V_{\text{km.20+300}}$  | ปริมาตรน้ำส่วนที่เกินหรือขาดหน้าประตูจากระดับเป้าหมาย(ลบ.ม.)        |
| L3                             | ความยาวช่วงคลองจากประตูระบายน้ำ กม.9+813 ถึง กม.20+300 (ม.)         |
| t                              | เวลาระบายน้ำประตู กม.20+300 ในที่นี้กำหนดที่ 30 นาที                |
| $\Delta Q_{\text{km.20+300}}$  | อัตราการระบายน้ำที่เพิ่มหรือลดลง (ลบ.ม./วินาที)                     |

$$\Delta V_{\text{D/S km.20+300}} = \Delta WL_{\text{D/S km.20+300}} \times L4 \quad (17)$$

$$\Delta Q_{\text{D/S km.20+300}} = \frac{\Delta V_{\text{D/S km.20+300}}}{t} \quad (18)$$

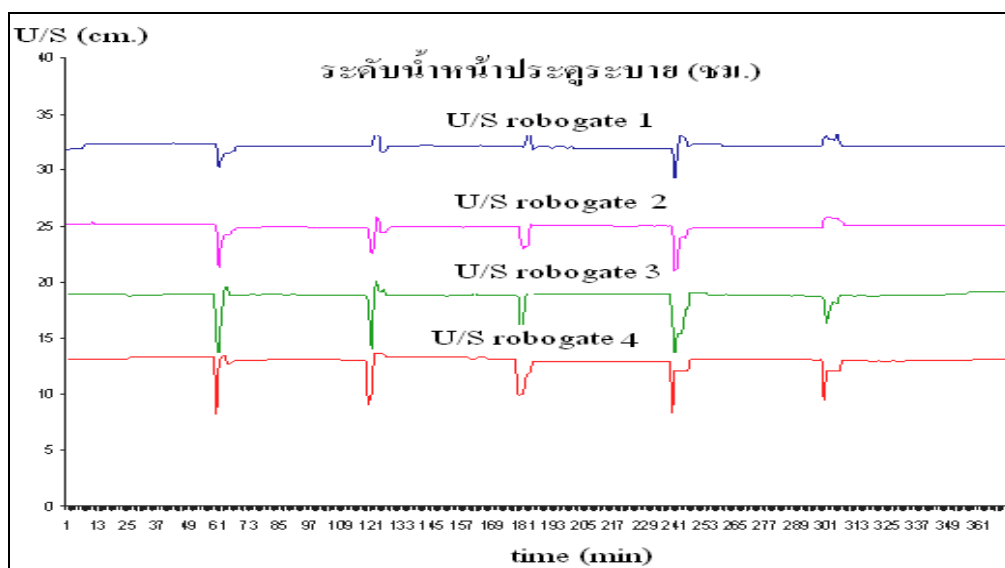
|                                    |                                                              |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $\Delta WL_{\text{D/S km.20+300}}$ | พื้นที่หน้าตัดน้ำส่วนที่เกินหรือขาดจากระดับเป้าหมาย (ตร.ม.)  |
| $\Delta V_{\text{D/S km.20+300}}$  | ปริมาตรน้ำส่วนที่เกินหรือขาดจากระดับเป้าหมาย (ลบ.ม.)         |
| L4                                 | ความยาวช่วงคลองจากประตูระบายน้ำ กม.20+300 ถึง กม.26+000 (ม.) |
| t                                  | เวลาระบายน้ำประตู กม.20+300 ในที่นี้กำหนดที่ 30 นาที         |
| $\Delta Q_{\text{D/S km.20+300}}$  | อัตราการระบายน้ำที่เพิ่มหรือลดลง (ลบ.ม./วินาที)              |

จากสมการที่ 15 – 18 ได้ปริมาณน้ำเพื่อใช้ปรับบานประตูระบายน้ำ กม.0+ 000 และคำนวณขนาดการเปิดบานประตูด้วยสมการที่ 19 และสมการที่ 4

$$Q_{\text{km.0+000}_i} = Q_{\text{km.0+000}_{i-1}} + \Delta Q_{\text{km.3+650}} + \Delta Q_{\text{km.9+813}} + \Delta Q_{\text{km.20+300}} + \Delta Q_{\text{D/S km.20+300}} \quad (19)$$

สถานีแม่ข่ายส่งค่าระยะเปิดประตูระบายน้ำแบบอัตโนมัติให้สถานี กม. 0+000 ผ่านระบบ SCADA ของโครงการสองพี่น้องที่ได้ติดตั้งไว้แล้วและในเวลาครึ่งชั่วโมงถัดไปจะดำเนินการในลักษณะนี้อีกต่อเนื่องกันไป





ภาพที่ 42 ตัวอย่างผลการควบคุมระดับน้ำที่ระดับเป้าหมาย

## 2. ผลการทดสอบใช้งานระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน

การทดสอบการทำงานของ sensor ตรวจวัดระดับน้ำและระยะการเปิดบานด้วยมือและคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน RMSE และการทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติโดยทดสอบความน่าเชื่อถือในการตรวจวัดและการส่งข้อมูลให้ทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง ทดสอบความคลาดเคลื่อน RMSE ของความสามารถในการควบคุมระดับน้ำตามเป้าหมายในระบบโทรมาตรและระบบอัตโนมัติผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

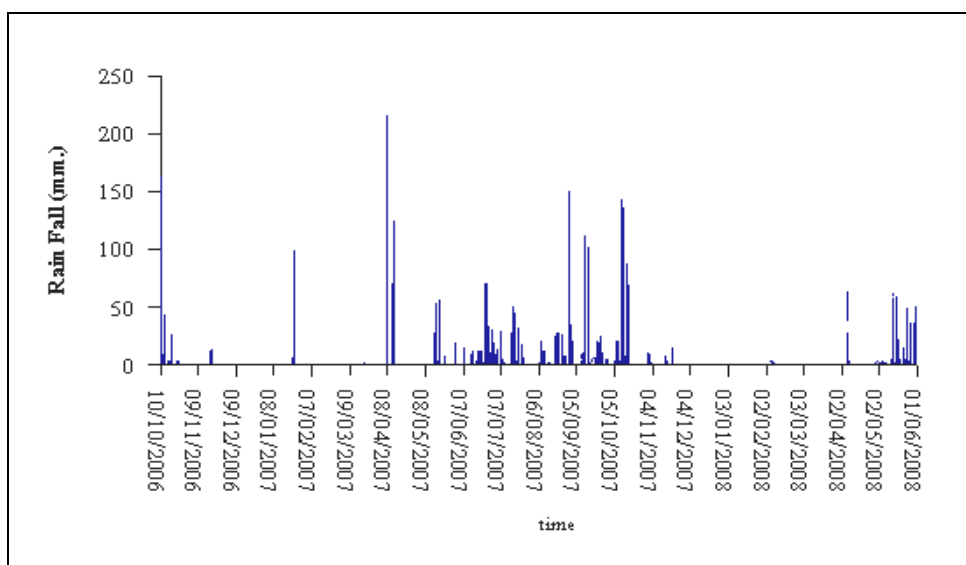
2.1 การทดสอบความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลผ่านระบบวิทยุให้คอมพิวเตอร์ส่วนกลาง โดยนำจำนวนครั้งของข้อมูลที่บันทึกอย่างต่อเนื่องทุกครึ่งชั่วโมงมาตรวจนับทั้งกรณีที่ไม่มีและมี pc starter ร่วมทำงานด้วย ผลการตรวจนับจำนวนข้อมูลที่รับได้ที่คอมพิวเตอร์ส่วนกลางแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการตรวจนับจำนวนข้อมูลที่รับได้ที่คอมพิวเตอร์ส่วนกลาง

| สถานี                                              | จำนวนข้อมูล             |                          |                   |                   |
|----------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
|                                                    | ที่ควรได้รับ<br>(ครั้ง) | ที่ได้รับจริง<br>(ครั้ง) | ขาดหาย<br>(ครั้ง) | % ที่ได้รับข้อมูล |
| ไม่มี pc starter ระหว่าง<br>10/10/2549 – 18/3/2551 |                         |                          |                   |                   |
| สถานี 901                                          | 29,046                  | 23,688                   | 5,358             | 81.55             |
| สถานี 902                                          | 29,046                  | 25,226                   | 3,820             | 86.85             |
| สถานี 903                                          | 29,046                  | 24,606                   | 4,440             | 84.71             |
| สถานี 904                                          | 29,046                  | 23,397                   | 5,649             | 80.55             |
| สถานี 905                                          | 29,046                  | 24,861                   | 4,185             | 85.59             |
| สถานี 906                                          | 29,046                  | 25,008                   | 4,038             | 86.10             |
|                                                    |                         | % ที่ได้รับข้อมูลเฉลี่ย  |                   | 84.23             |
| มี pc starter ระหว่าง<br>18/3/2551 – 1/6/2551      |                         |                          |                   |                   |
| สถานี 901                                          | 4,695                   | 4,162                    | 533               | 88.65             |
| สถานี 902                                          | 4,695                   | 4,151                    | 544               | 88.41             |
| สถานี 903                                          | 4,695                   | 4,162                    | 533               | 88.65             |
| สถานี 904                                          | 4,695                   | 4,169                    | 526               | 88.80             |
| สถานี 905                                          | 4,695                   | 4,167                    | 528               | 88.75             |
| สถานี 906                                          | 4,695                   | 4,166                    | 529               | 88.73             |
|                                                    |                         | % ที่ได้รับข้อมูลเฉลี่ย  |                   | 88.67             |

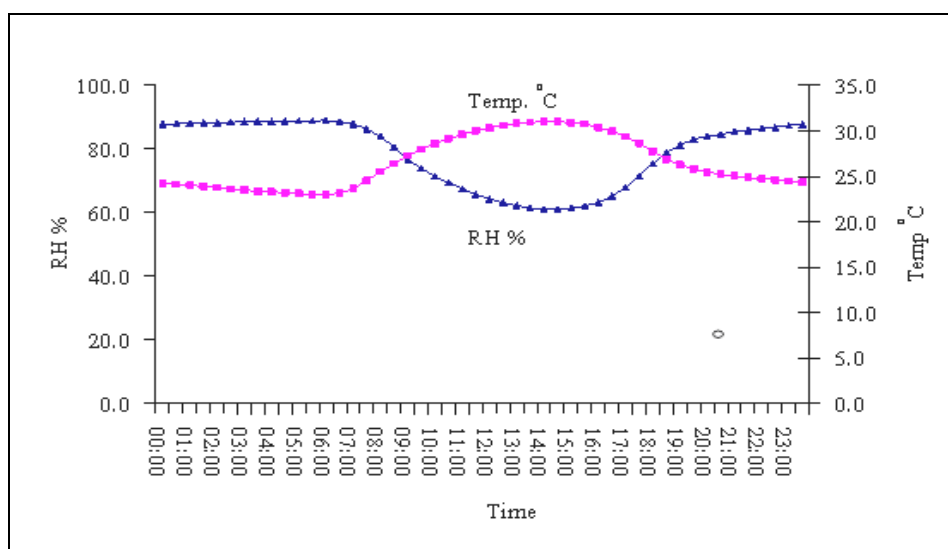
จากตารางที่ 11 การส่งข้อมูลจากสถานีในสนามช่วงแรกที่ยังไม่ติดตั้ง pc starter จำนวนครั้งของการรับส่งข้อมูลเฉลี่ย 84.23 % และหลังจากที่ได้ติดตั้ง pc starter จำนวนครั้งของการรับส่งข้อมูลเฉลี่ย 88.67 % แสดงว่าจำนวนครั้งของการส่งข้อมูลให้คอมพิวเตอร์ส่วนกลางมีความน่าเชื่อถือได้ดี

ที่สถานีตรวจอากาศ (สถานี 906) ได้นำผลการตรวจวัดปริมาณฝนตกและความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิมาเขียนกราฟแสดงในภาพที่ 43-44



ภาพที่ 43 ปริมาณฝนตก km. 1+500 MC ระหว่าง 10 ต.ค.49-1 มิ.ย.51

ในภาพที่ 44 ปริมาณฝนตกที่ตกชุกต่อเนื่องกันอยู่ระหว่างกลางเดือนพฤษภาคม – กลางเดือนตุลาคม

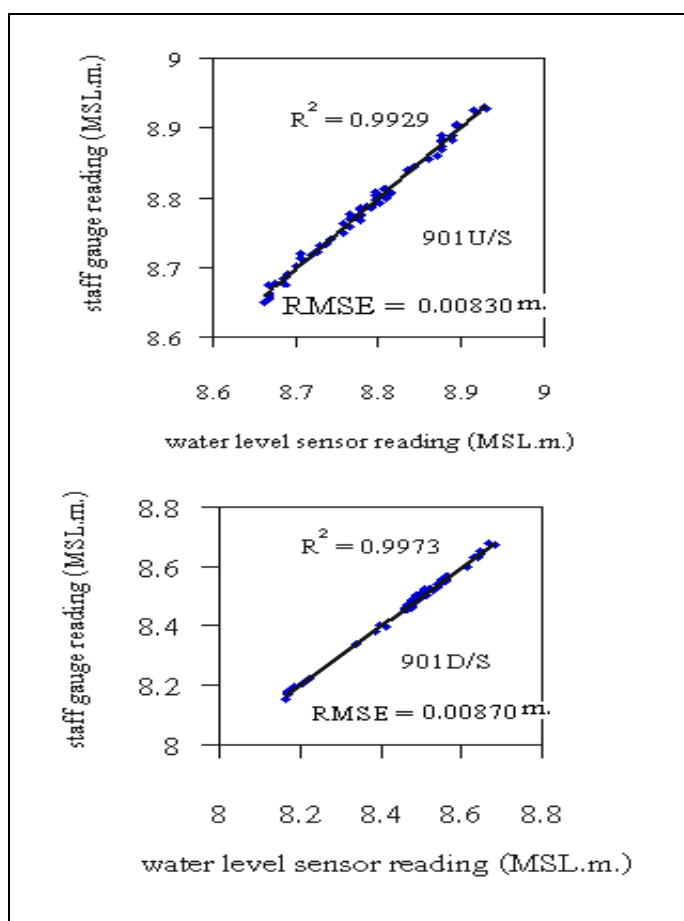


ภาพที่ 44 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ km. 1+500 MC ในรอบ 1 วัน

ในภาพที่ 46 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (RH %) เฉลี่ยในรอบ 24 ชั่วโมง อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 24 – 33 °C และความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 60 – 90 % โดยในเวลาประมาณ 15.00 น. จะมีอุณหภูมิสูงสุดและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด

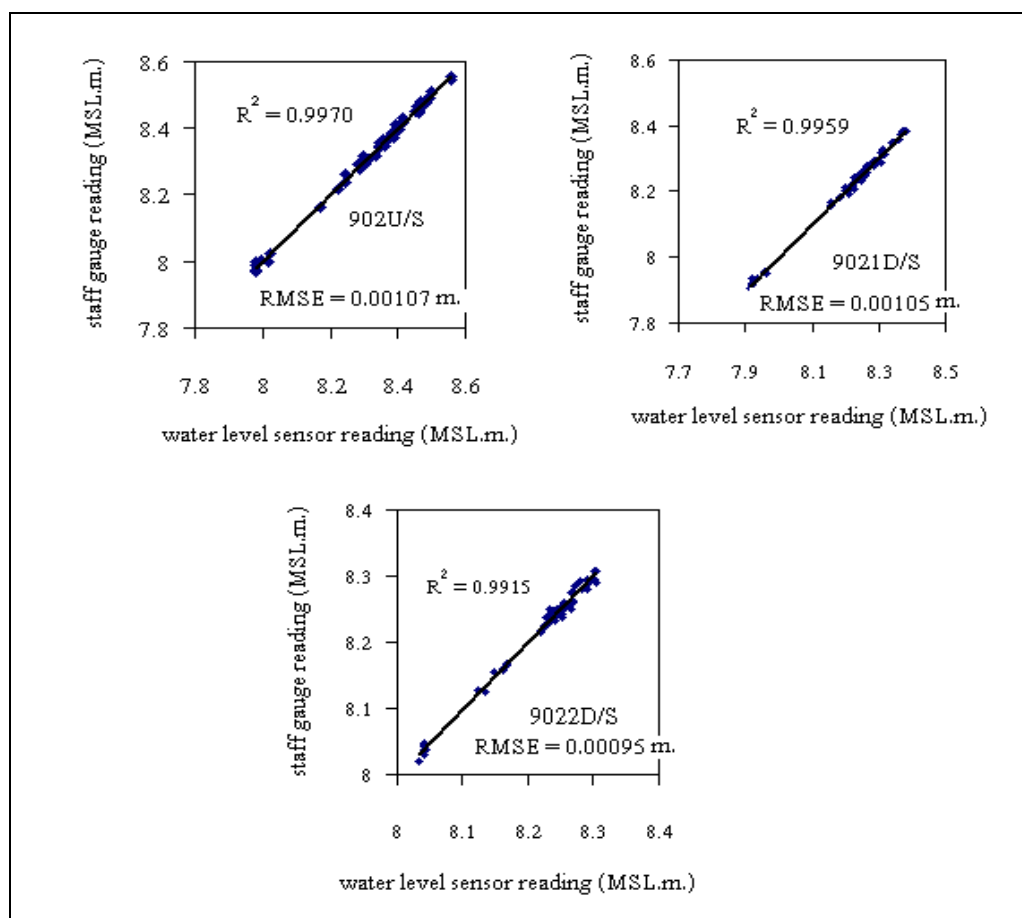
2.2 การทดสอบการทำงานของ sensor ตรวจวัดระดับน้ำและระยะการเปิดบานด้วยมือทุกๆ ครึ่งชั่วโมง จำนวน 66 ครั้ง ระหว่างวันที่ 10 ตุลาคม 2549 – 30 พฤศจิกายน 2550 และคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน RMSE

การสอบเทียบ sensor ตรวจวัดระดับน้ำเทียบกับคนอ่านค่าจากแผ่นระดับของระบบ คลองอัตโนมัติเป็นเวลา 3 เดือน คือ เดือน ตุลาคม - พฤศจิกายน พ.ศ. 2549 และ เดือน มกราคม พ.ศ. 2550 ได้ผลการสอบเทียบแสดงในภาพที่ 45 - 48

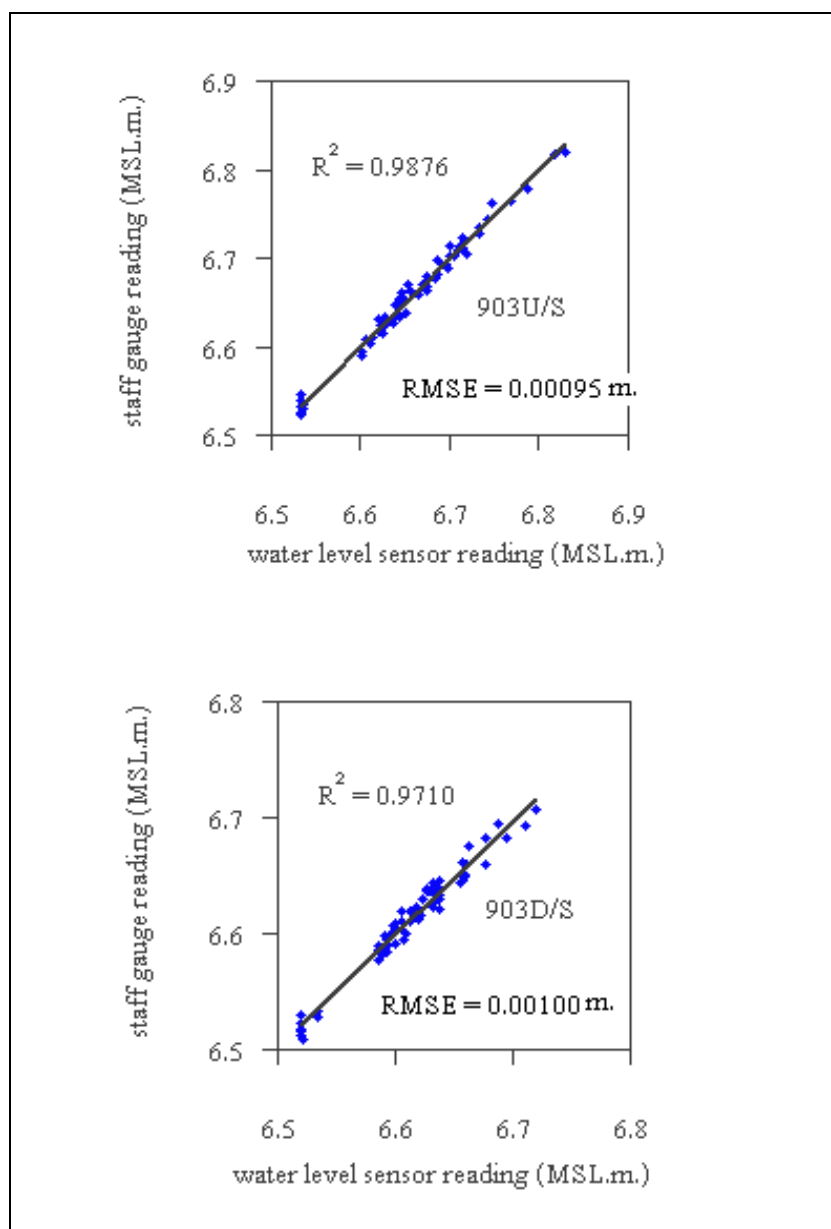


ภาพที่ 45 การสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำเหนือ-ท้ายน้ำสถานี 901

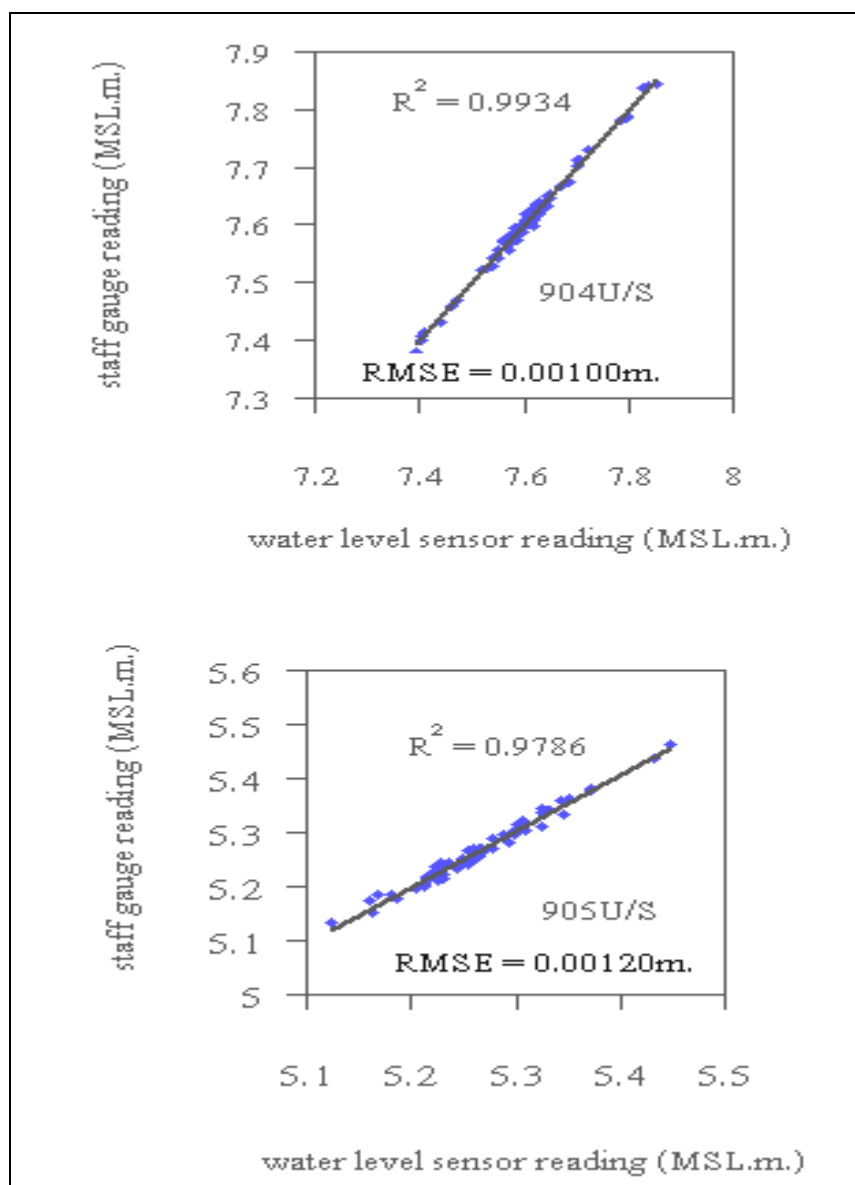




ภาพที่ 46 การสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำเหนือ-ท้ายน้ำ สถานี 902



ภาพที่ 47 การสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำเหนือ-ท้ายน้ำสถานี 903



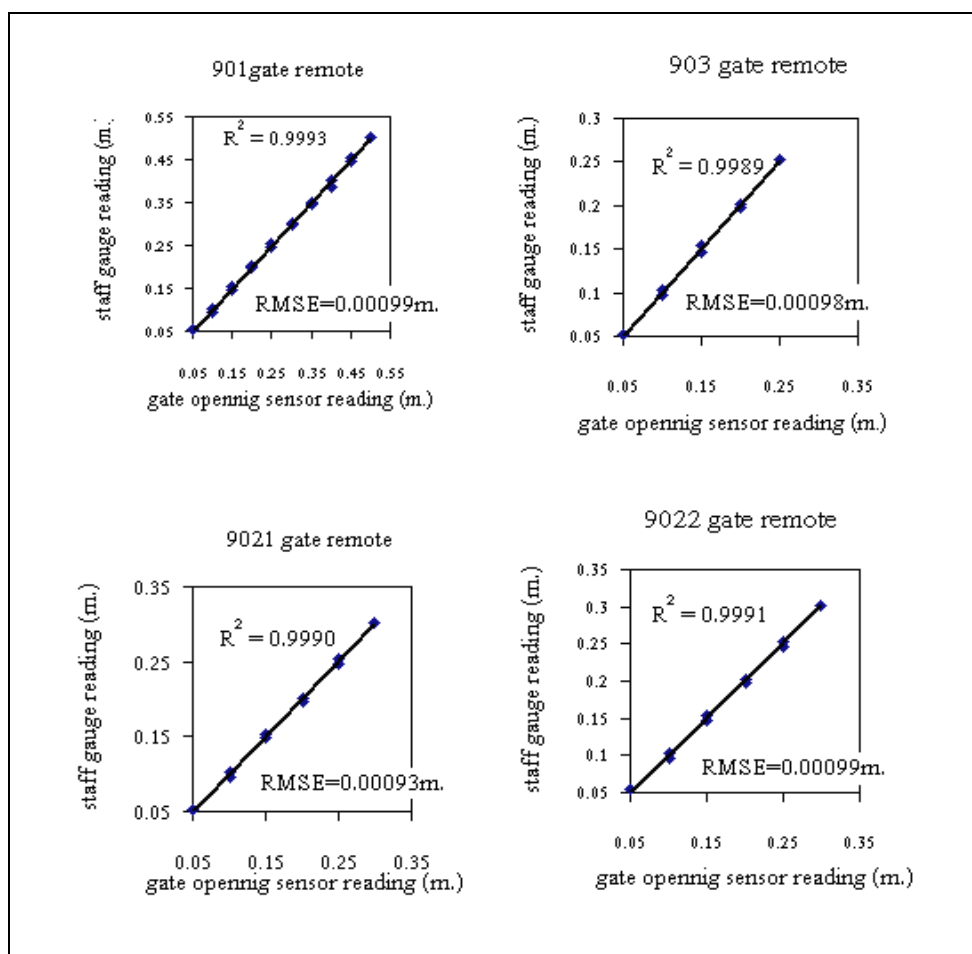
ภาพที่ 48 การสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำสถานี 904 และสถานี 905

จากภาพที่ 47 – 48 ผลการสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำในทุกสถานีได้ค่า  $R^2$  มากกว่า 0.95 และได้ค่า RMSE ต่ำกว่า 0.0012 ม. แสดงว่า sensor ที่ใช้ตรวจวัดระดับน้ำทำงานได้ดีมีความคลาดเคลื่อนต่ำ

การทดสอบการเปิด – ปิดประตูระบายน้ำระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุที่ สถานี 901 สถานี 9021/2 และสถานี 903 ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 14 และกราฟการสอบเทียบการเปิด - ปิดประตูระบายระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุในแต่ละช่วงการปรับบานประตูแสดงในภาพที่ 49

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบการเปิด – ปิดประตูระบายน้ำระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุ

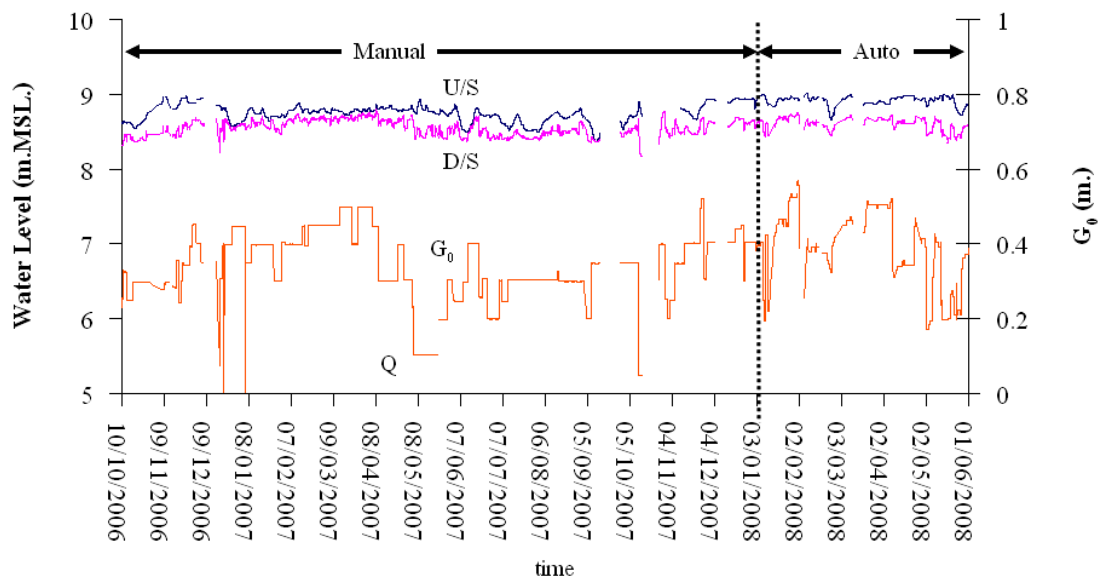
| no. | 901G0  |        | 9021G0 |        | 9022G0 |        | 903G0  |        |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|     | remote | device | remote | device | remote | device | remote | device |
|     | (m.)   | (m.)   | (m.)   | (m.)   | (m.)   | (m.)   | (m.)   | (m.)   |
| 1   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 2   | 0.05   | 0.053  | 0.05   | 0.053  | 0.05   | 0.054  | 0.05   | 0.052  |
| 3   | 0.1    | 0.103  | 0.1    | 0.103  | 0.1    | 0.102  | 0.1    | 0.103  |
| 4   | 0.15   | 0.154  | 0.15   | 0.154  | 0.15   | 0.153  | 0.15   | 0.154  |
| 5   | 0.2    | 0.202  | 0.2    | 0.202  | 0.2    | 0.203  | 0.2    | 0.202  |
| 6   | 0.25   | 0.254  | 0.25   | 0.254  | 0.25   | 0.254  | 0.25   | 0.253  |
| 7   | 0.3    | 0.302  | 0.3    | 0.302  | 0.3    | 0.302  | 0.2    | 0.197  |
| 8   | 0.35   | 0.352  | 0.25   | 0.246  | 0.25   | 0.246  | 0.15   | 0.147  |
| 9   | 0.4    | 0.403  | 0.2    | 0.197  | 0.2    | 0.197  | 0.1    | 0.098  |
| 10  | 0.45   | 0.454  | 0.15   | 0.148  | 0.15   | 0.148  | 0.05   | 0.046  |
| 11  | 0.5    | 0.504  | 0.1    | 0.095  | 0.1    | 0.097  | 0      | 0      |
| 12  | 0.45   | 0.447  | 0.05   | 0.048  | 0.05   | 0.047  | -      | -      |
| 13  | 0.4    | 0.387  | 0      | 0      | 0      | 0      | -      | -      |
| 14  | 0.35   | 0.348  | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| 15  | 0.3    | 0.297  | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| 16  | 0.25   | 0.246  | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| 17  | 0.2    | 0.197  | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| 18  | 0.15   | 0.148  | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| 19  | 0.1    | 0.095  | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| 20  | 0.05   | 0.048  | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| 21  | 0      | 0      | -      | -      | -      | -      | -      | -      |



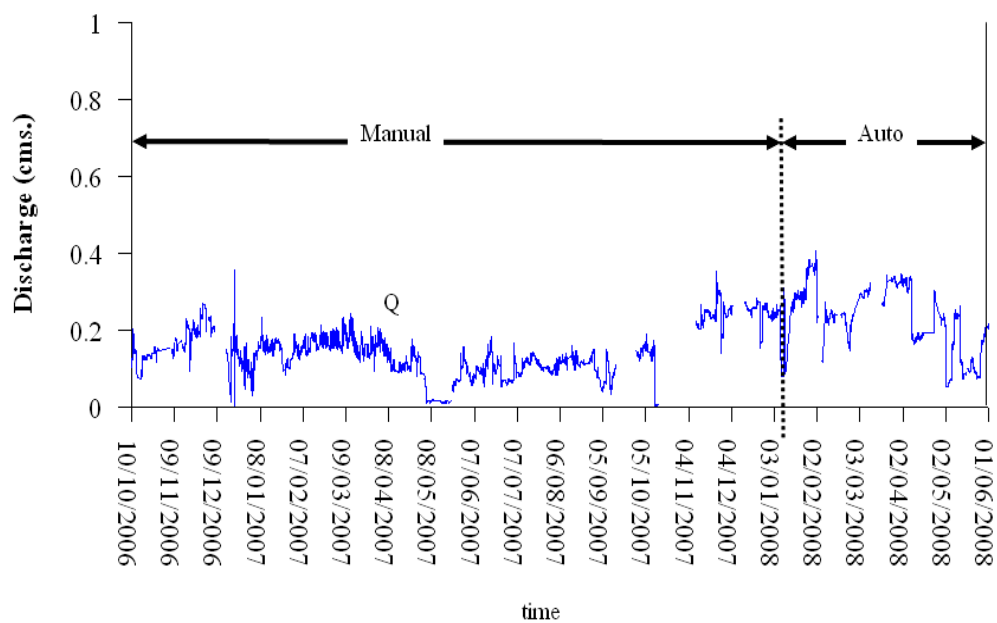
ภาพที่ 49 ผลการทดสอบเปิด – ปิดประตูระบายระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุ

ที่ประตูระบายน้ำสถานี 901, 9021, 9022 และ 903 ผลการส่งคำสั่งควบคุมการเปิด-ปิดบานประตูในระยะไกล(remote) เทียบจากผลการอ่านค่าจากแผ่นตรวจวัดระยะการเปิดบานที่อุปกรณ์ทำได้จริงได้ค่า  $R^2$  สูงกว่า 0.99 และค่า RMSE ต่ำกว่า 0.001ม. แสดงว่าการควบคุมปรับบานประตูระบายน้ำในระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุ ทำงานได้ดีผลการปรับบานประตูได้ระยะตำแหน่งตรงตามที่ต้องการมีความคลาดเคลื่อนต่ำ

2.3 การทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติ ระหว่างวันที่ 4 มกราคม 2551 – 1 มิถุนายน 2551 โดยทดสอบความน่าเชื่อถือในการตรวจวัดและการส่งข้อมูลให้ทุกๆ ครึ่งชั่วโมง ทดสอบความคลาดเคลื่อน RMSE ของความสามารถในการควบคุมระดับน้ำตามเป้าหมายในระบบโทรมาตรและระบบอัตโนมัติ โดยเขียนกราฟผลการทดสอบการใช้งานระบบคลองอัตโนมัติ กำแพงแสนเปรียบเทียบการส่งน้ำด้วยมือและการส่งน้ำแบบอัตโนมัติแสดงในภาพที่ 50 - 59

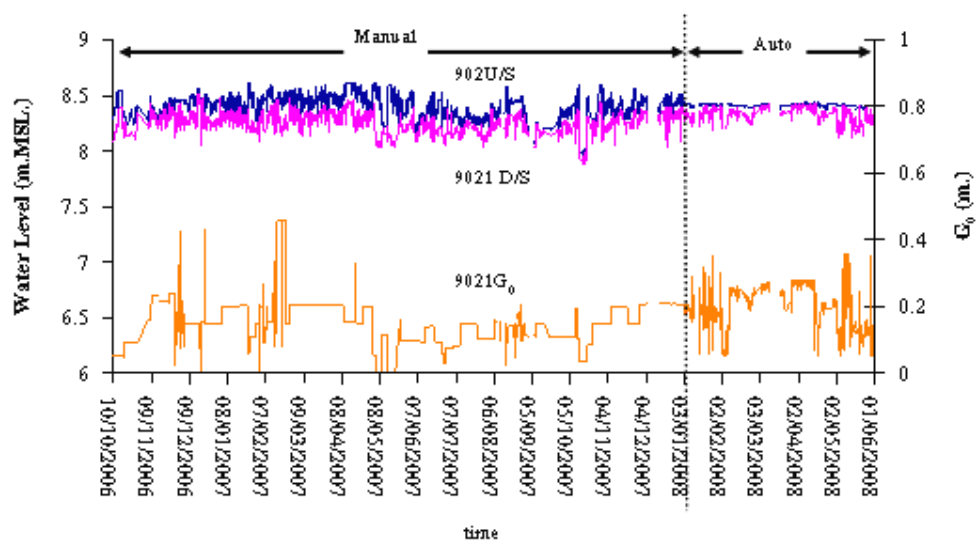


ภาพที่ 50 เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 901 ระหว่าง 10 ต.ค.49- 1มิ.ย.51

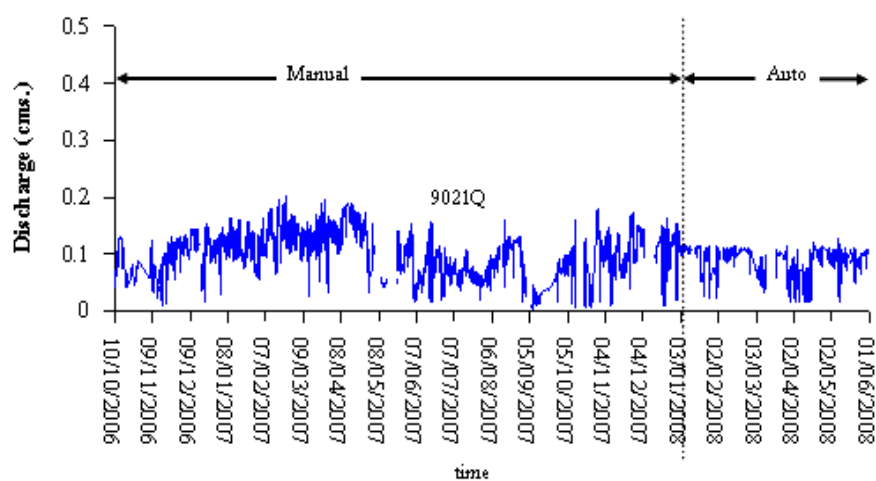


ภาพที่ 51 Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 901 ระหว่าง 10 ต.ค.49- 1มิ.ย.51

ในภาพที่ 50 ช่วงอัตโนมัติการปรับประตูระบายน้ำที่สถานี 901 ในมีมากกว่าและในภาพที่ 51 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านประตูระบาย 901 มีมากกว่าการใช้งานแบบบังคับด้วยมือ (manual)

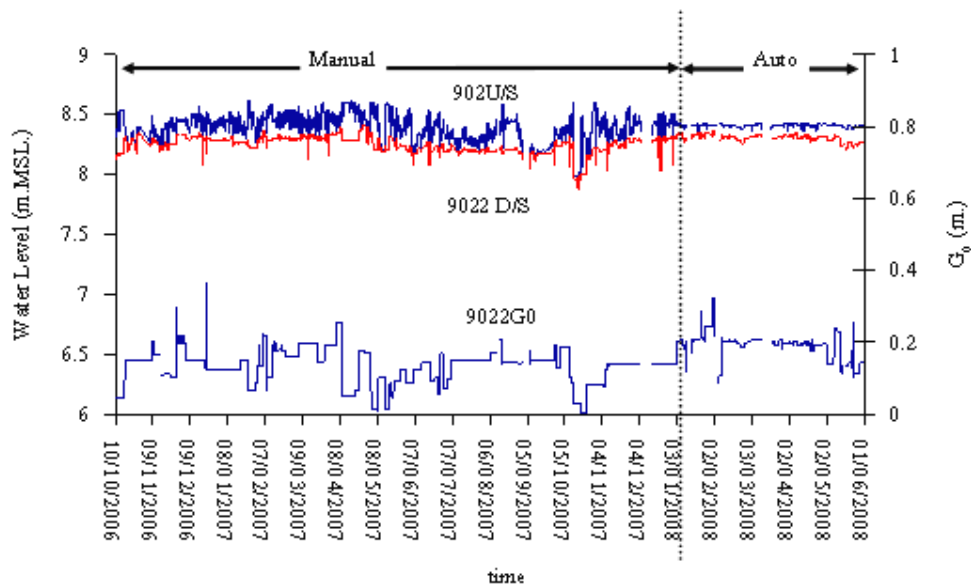


ภาพที่ 52 เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 9021 ระหว่าง 10 ต.ค.49- 1มิ.ย.51

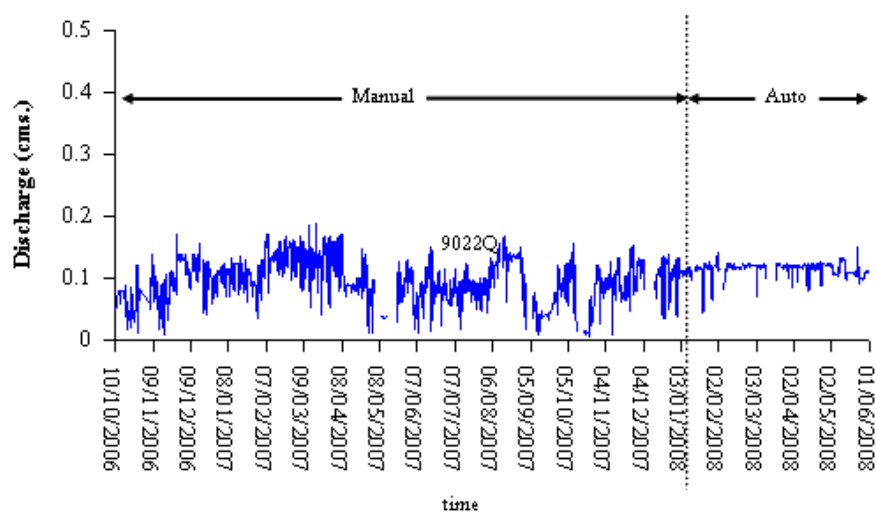


ภาพที่ 53 Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 9021ระหว่าง 10 ต.ค.49- 1มิ.ย.51

ในภาพที่ 52 ประดูระบายน้ำสถานี 9021 ช่วงทำงานอัตโนมัติสามารถรักษาระดับน้ำด้านเหนือน้ำให้อยู่ที่ระดับเป้าหมาย RMSE มีค่า 0.013 ม.



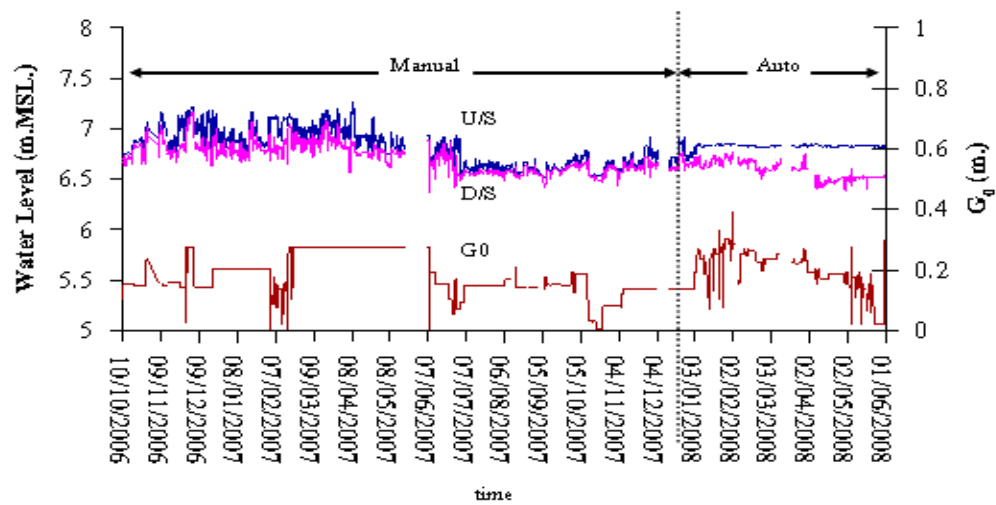
ภาพที่ 54 เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 9022 ระหว่าง 10 ต.ค.49- 1มิ.ย.51



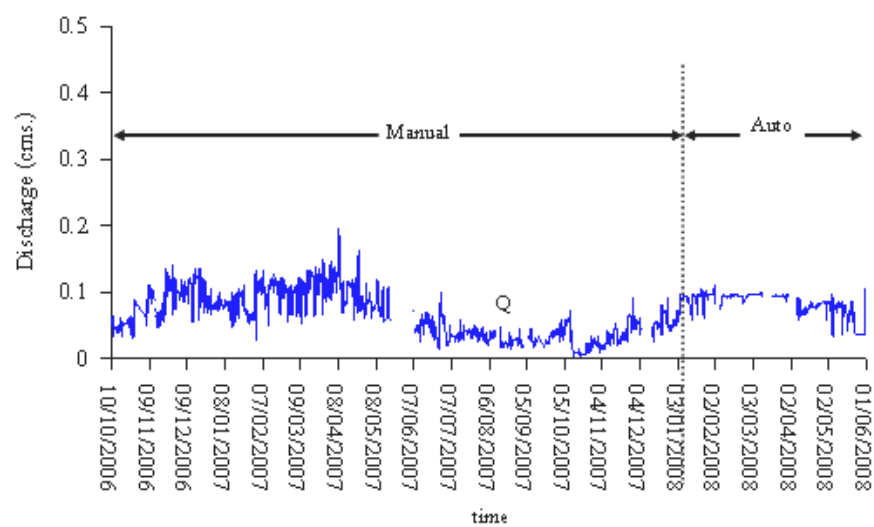
ภาพที่ 55 Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 9022 ระหว่าง 10 ต.ค.49- 1มิ.ย.51

ในภาพที่ 54 ประดูระบายน้ำสถานี 9022 ช่วงทำงานอัตโนมัติสามารถรักษาระดับน้ำด้านเหนือน้ำให้อยู่ที่ระดับเป้าหมาย RMSE มีค่า 0.013 ม.



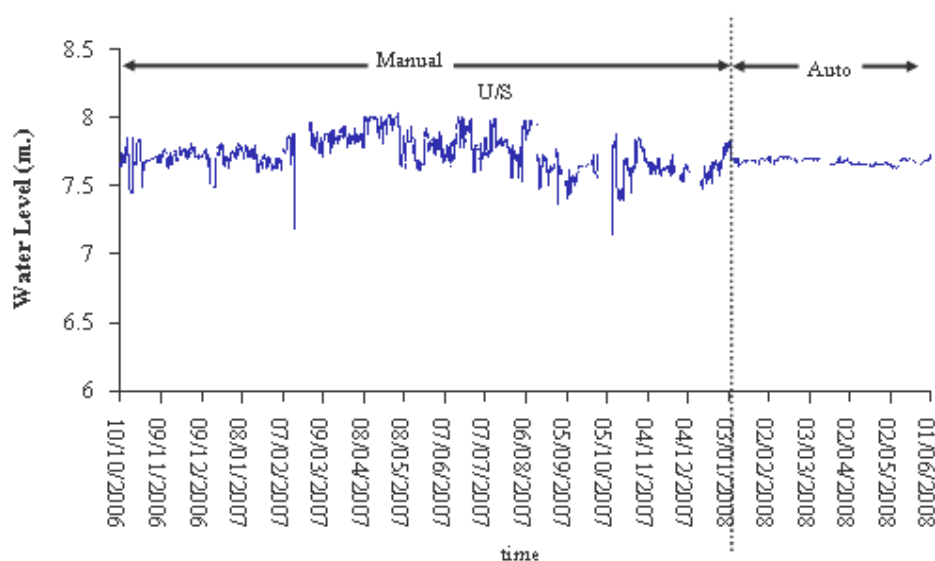


ภาพที่ 56 เปรียบเทียบ ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 903 ระหว่าง 10 ต.ค.49- 1มิ.ย.51

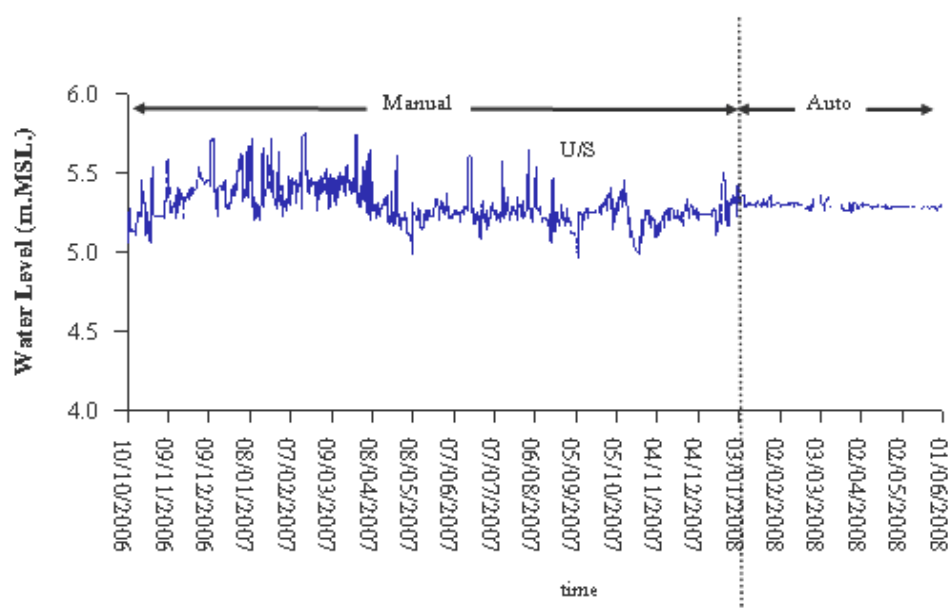


ภาพที่ 57 Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 903 ระหว่าง 10 ต.ค.49- 1มิ.ย.51

ในภาพที่ 56 ประสิทธิภาพน้ำสถานี 903 ช่วงทำงานอัตโนมัติสามารถรักษาระดับน้ำด้านเหนือน้ำให้อยู่ที่ระดับเป้าหมาย RMSE มีค่า 0.019 ม.



ภาพที่ 58 เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 904 ระหว่าง 10 ต.ค.49 - 1มิ.ย.51



ภาพที่ 59 เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่สถานี 905 ระหว่าง 10 ต.ค.49 - 1มิ.ย.51

ในภาพที่ 58 – 59 เป็นผลจากจากคอมพิวเตอร์ส่วนกลางควบคุมการปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านบานประตูระบายน้ำสถานี 901 และ 9022 แบบอัตโนมัติทำให้ระดับน้ำที่โทรมาตรสถานี 904 และสถานี 905 มีระดับน้ำอยู่ที่ระดับเป้าหมาย RMSE มีค่า 0.023 ม. และ 0.029 ม. ตามลำดับ

ดังนั้นแสดงว่าการทำงานแบบอัตโนมัติสามารถควบคุมระดับน้ำในคลองส่งน้ำได้ใกล้เคียงกับระดับน้ำเป้าหมายซึ่งผลจากการทำงานแบบโทรมาตรได้สรุปไว้ในตารางที่ 15 การทำงานแบบอัตโนมัติได้สรุปไว้ในตารางที่ 16

ตารางที่ 15 สรุปการทำงานระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสนในระบบโทรมาตร

| List                      | Max   | Min   | average | Standard Deviation | RMSE    |
|---------------------------|-------|-------|---------|--------------------|---------|
| 901U/S (m.MSL.)           | 8.999 | 8.367 | 8.761   | 0.119              | -       |
| 901D/S(m.MSL.)            | 8.797 | 8.107 | 8.536   | 0.115              | -       |
| 901G <sub>0</sub> (m.)    | 0.522 | 0.000 | 0.331   | 0.096              | -       |
| 901Q(m <sup>3</sup> /s.)  | 0.353 | 0.000 | 0.144   | 0.064              | -       |
| 902 U/S (m.MSL.)          | 8.726 | 7.891 | 8.391   | 0.115              | 0.118m. |
| 9021 D/S (m.MSL.)         | 8.516 | 7.868 | 8.244   | 0.096              | -       |
| 9022 D/S (m.MSL.)         | 8.411 | 7.864 | 8.244   | 0.076              | -       |
| 9021 G <sub>0</sub> (m.)  | 0.457 | 0.000 | 0.150   | 0.068              | -       |
| 9022 G <sub>0</sub> (m.)  | 0.365 | 0.003 | 0.139   | 0.066              | -       |
| 9021Q(m <sup>3</sup> /s.) | 0.203 | 0.000 | 0.094   | 0.043              | -       |
| 9022Q(m <sup>3</sup> /s.) | 0.263 | 0.000 | 0.094   | 0.040              | -       |
| 903 U/S (m.MSL.)          | 7.459 | 6.527 | 6.828   | 0.176              | 0.178m. |
| 903 D/S (m.MSL.)          | 7.309 | 6.378 | 6.727   | 0.137              | -       |
| 903 G <sub>0</sub> (m.)   | 0.277 | 0.000 | 0.181   | 0.065              | -       |
| 903Q(m <sup>3</sup> /s.)  | 0.186 | 0.000 | 0.035   | 0.038              | -       |
| 904 U/S (m.MSL.)          | 8.058 | 6.305 | 7.640   | 0.824              | 0.143m. |
| 905 U/S (m.MSL.)          | 5.750 | 2.760 | 5.278   | 0.293              | 0.295m. |

จากตารางที่ 15 การทดสอบการทำงานด้วยมือโดยให้ทำงานเป็นระบบโทรมาตร การควบคุมระดับน้ำในคลองมีค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.118 – 0.295 ม.

**ตารางที่ 16** การทำงานแบบอัตโนมัติของระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน

| List                     | Max   | Min   | average | Standard Deviation | RMSE(m.) |
|--------------------------|-------|-------|---------|--------------------|----------|
| 901U/S(m.MSL.)           | 9.008 | 8.609 | 8.895   | 0.086              | -        |
| 901D/S(m.MSL.)           | 8.749 | 8.345 | 8.574   | 0.105              | -        |
| 901G <sub>0</sub> (m.)   | 0.569 | 0.167 | 0.355   | 0.110              | -        |
| 901Q(m <sup>3</sup> /s.) | 0.405 | 0.051 | 0.202   | 0.091              | -        |
| 902 U/S (m.MSL.)         | 8.436 | 8.309 | 8.409   | 0.013              | 0.013m.  |
| 9021 D/S (m.MSL.)        | 8.424 | 8.097 | 8.312   | 0.090              | -        |
| 9022 D/S (m.MSL.)        | 8.367 | 8.140 | 8.292   | 0.037              | -        |
| 9021 G <sub>0</sub> (m.) | 0.357 | 0.043 | 0.195   | 0.065              | -        |
| 9022 G <sub>0</sub> (m.) | 0.321 | 0.087 | 0.180   | 0.038              | -        |
| 9021Q(m3/s.)             | 0.127 | 0.000 | 0.085   | 0.021              | -        |
| 9022Q(m3/s.)             | 0.152 | 0.000 | 0.115   | 0.012              | -        |
| 903 U/S (m.MSL.)         | 6.849 | 6.610 | 6.830   | 0.020              | 0.009m.  |
| 903 D/S (m.MSL.)         | 6.775 | 6.385 | 6.555   | 0.096              | -        |
| 903 G <sub>0</sub> (m.)  | 0.389 | 0.023 | 0.187   | 0.070              | -        |
| 903Q(m3/s.)              | 0.054 | 0.000 | 0.005   | 0.012              | -        |
| 904 U/S (m.MSL.)         | 7.756 | 7.621 | 7.681   | 0.022              | 0.023m.  |
| 905 U/S (m.MSL.)         | 5.364 | 5.251 | 5.294   | 0.017              | 0.029m.  |

จากตารางที่ 16 การทดสอบการทำงานด้วยมือโดยให้ทำงานเป็นระบบโทรมาตร การควบคุมระดับน้ำในคลองมีค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.009 – 0.029 ม.

ได้ทำการเปรียบเทียบหาค่า RMSE ของระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน เพื่อสนับสนุนว่าการควบคุมระดับน้ำในคลองให้อยู่ที่ระดับเป้าหมายได้ดีตลอดช่วงการทำงานแบบอัตโนมัติ ผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 17 ซึ่งผลจากการทำงานแบบอัตโนมัติมีค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.009 – 0.029 ม. ซึ่งต่ำกว่าการทำงานด้วยมือในทุกสถานีที่มีค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.118 – 0.295 ม.

**ตารางที่ 17** เปรียบเทียบ RMSE ของระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน

| List    | RMSE(Root Mean Square Error) |                |
|---------|------------------------------|----------------|
|         | Manual Mode                  | Automatic Mode |
| 902 U/S | 0.118 m.                     | 0.013 m.       |
| 903 U/S | 0.178 m.                     | 0.009 m.       |
| 904 U/S | 0.143 m.                     | 0.023 m.       |
| 905 U/S | 0.295 m.                     | 0.029 m.       |

### 3. ผลการทดสอบระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง

ผลการทดสอบซึ่งแบ่งเป็น 2 ช่วงคือผลการทดสอบการทำงานด้วยมือระหว่างวันที่ 4 ธันวาคม 2549 – 3 มกราคม 2551 และผลทดสอบการทำงานในแบบอัตโนมัติระหว่างวันที่ 4 มกราคม 2551 – 24 มิถุนายน 2551 และผลการส่งข้อมูลในสนามให้คอมพิวเตอร์ส่วนกลางบันทึกข้อมูลอัตโนมัติลงใน data logger ของฐานข้อมูลในทุกครึ่งชั่วโมงและนำเสนอผ่านอินเทอร์เน็ตแบบ real-time ผ่านดาวเทียม IPSTAR ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การทดสอบความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลผ่านระบบวิทยุ VHF ให้คอมพิวเตอร์ส่วนกลางโดยนำจำนวนครั้งของข้อมูลที่บันทึกอย่างต่อเนื่องทุกครึ่งชั่วโมงมาตรวจนับทั้งกรณีที่ไม่มีและมี pc starter ร่วมทำงานด้วย ผลการตรวจนับจำนวนข้อมูลที่รับได้ที่คอมพิวเตอร์ส่วนกลางแสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ผลการตรวจนับจำนวนข้อมูลที่รับได้ที่คอมพิวเตอร์ส่วนกลาง

| สถานี                    | จำนวนข้อมูล             |                          |                   |                   |
|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
|                          | ที่ควรได้รับ<br>(ครั้ง) | ที่ได้รับจริง<br>(ครั้ง) | ขาดหาย<br>(ครั้ง) | % ที่ได้รับข้อมูล |
| ไม่มี pc starter ระหว่าง |                         |                          |                   |                   |
| 04/12/2549 – 1/3/2550    |                         |                          |                   |                   |
| กม.3+650                 | 5,447                   | 4,253                    | 1,193             | 78.09             |
| กม.9+813                 | 5,447                   | 4,231                    | 1,215             | 77.69             |
| กม.20+300                | 5,447                   | 4,256                    | 1,191             | 78.13             |
|                          |                         | % ที่ได้รับข้อมูลเฉลี่ย  |                   | 77.97             |
| มี pc starter ระหว่าง    |                         |                          |                   |                   |
| 1/3/2550 – 24/6/2551     |                         |                          |                   |                   |
| กม.3+650                 | 22,898                  | 18,174                   | 7,423             | 79.37             |
| กม.9+813                 | 22,898                  | 20,671                   | 2,226             | 90.28             |
| กม.20+300                | 22,898                  | 20,680                   | 2,217             | 90.32             |
|                          |                         | % ที่ได้รับข้อมูลเฉลี่ย  |                   | 86.66             |

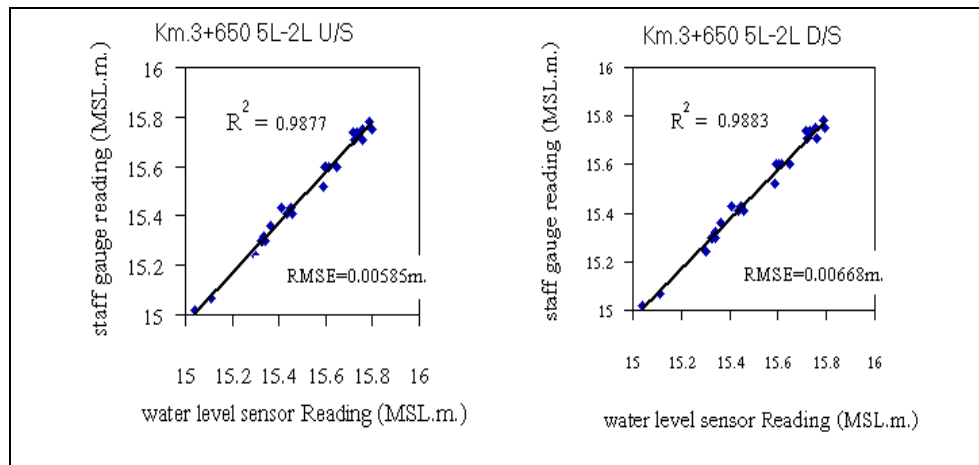
จากตารางที่ 18 การส่งข้อมูลจากสถานีในสนามช่วงแรกที่ยังไม่ได้ติดตั้ง pc starter จำนวนครั้งของการรับส่งข้อมูลเฉลี่ย 77.97 % และหลังจากที่ได้ติดตั้ง pc starter จำนวนครั้งของการรับส่งข้อมูลเฉลี่ย 88.66 % แสดงว่าจำนวนครั้งของการส่งข้อมูลให้คอมพิวเตอร์ส่วนกลางมีความน่าเชื่อถือได้ดี

3.2 การทดสอบการทำงานของ sensor ตรวจวัดระดับน้ำและระยะการเปิดบานด้วยมือทุกๆ ครั้งชั่วโมง จำนวน 80 ครั้งระหว่างเดือน ตุลาคม 2550 และเดือนมกราคม 2551 และคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน RMSE

การสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำที่ กม. 3+650 5L-2L ในเดือนมกราคม 2551 ได้ผลทดสอบในตารางที่ 19

ตารางที่ 19 สอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำประตูระบาย กม. 3+650 5L-2L

| date      | time    | km. 3+650 |         |          |         |
|-----------|---------|-----------|---------|----------|---------|
|           |         | U/S       |         | D/S      |         |
|           |         | sensor    | staff   | sensor   | staff   |
|           |         | reading   | gauge   | reading  | gauge   |
|           |         |           | reading |          | reading |
|           |         | (m.MSL.)  | (m.)    | (m.MSL.) | (m.)    |
| 1/1/2008  | 9:00:00 | 15.457    | 15.41   | 14.666   | 14.65   |
| 2/1/2008  | 9:00:00 | 15.457    | 15.41   | 14.678   | 14.66   |
| 3/1/2008  | 9:00:00 | 15.11     | 15.07   | 14.505   | 14.48   |
| 4/1/2008  | 9:00:00 | 15.039    | 15.02   | 14.485   | 14.37   |
| 6/1/2008  | 9:00:00 | 15.72     | 15.71   | 14.876   | 14.81   |
| 8/1/2008  | 8:30:00 | 15.449    | 15.43   | 14.639   | 14.62   |
| 9/1/2008  | 8:30:00 | 15.409    | 15.43   | 14.623   | 14.61   |
| 12/1/2008 | 8:30:00 | 15.342    | 15.3    | 14.591   | 14.6    |
| 13/1/2008 | 8:30:00 | 15.362    | 15.36   | 14.611   | 14.6    |
| 14/1/2008 | 8:30:00 | 15.33     | 15.3    | 14.591   | 14.6    |
| 15/1/2008 | 8:30:00 | 15.299    | 15.24   | 14.576   | 14.6    |
| 17/1/2008 | 8:30:00 | 15.433    | 15.41   | 14.619   | 14.62   |
| 18/1/2008 | 8:30:00 | 15.646    | 15.6    | 14.725   | 14.73   |
| 21/1/2008 | 8:30:00 | 15.756    | 15.75   | 14.772   | 14.79   |
| 23/1/2008 | 8:30:00 | 15.717    | 15.74   | 14.796   | 14.85   |
| 24/1/2008 | 8:30:00 | 15.614    | 15.6    | 14.725   | 14.73   |
| 26/1/2008 | 8:30:00 | 15.587    | 15.52   | 14.721   | 14.71   |
| 27/1/2008 | 8:30:00 | 15.594    | 15.6    | 14.717   | 14.75   |
| 28/1/2008 | 8:30:00 | 15.787    | 15.78   | 14.796   | 14.85   |
| 29/1/2008 | 8:30:00 | 15.602    | 15.6    | 14.765   | 14.76   |



ภาพที่ 60 สอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำ กม. 3+650 5L-2L

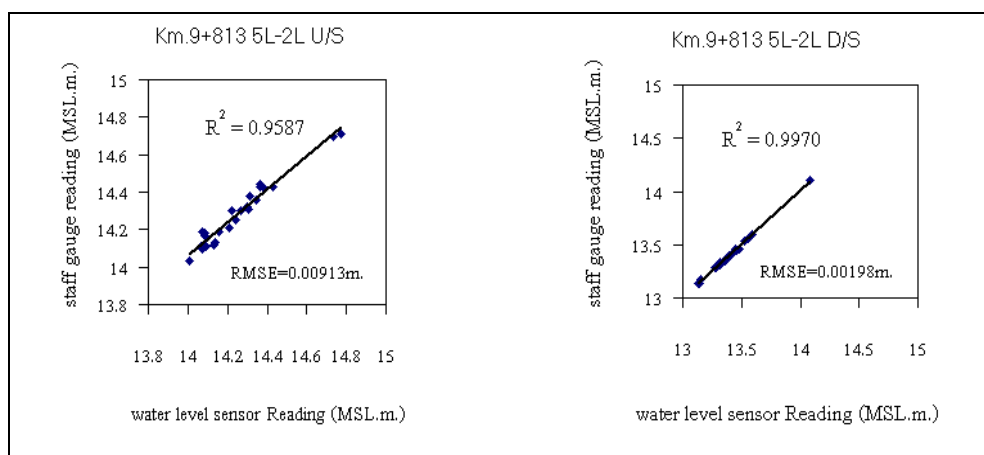
ในภาพที่ 60 ที่ประตูระบายน้ำ กม. 3+650 ผลสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำหน้า - ท้าย ประตูระบายน้ำ  $R^2$  มากกว่า 0.98 และได้ค่า RMSE ต่ำกว่า 0.007 แสดงว่าการตรวจวัดระดับน้ำ ทำงานได้ดีมีความคลาดเคลื่อนต่ำ

การสอบเทียบ sensor ตรวจวัดระดับน้ำที่ กม. 9+813 ในเดือนมกราคม 2551 ได้ผลทดสอบ ในตารางที่ 20



ตารางที่ 20 สอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำประตูระบาย กม. 9+813 5L-2L

| date      | time    | km. 9+813 |         |          |         |
|-----------|---------|-----------|---------|----------|---------|
|           |         | U/S       |         | D/S      |         |
|           |         | sensor    | staff   | sensor   | staff   |
|           |         | reading   | gauge   | reading  | gauge   |
|           |         |           | reading |          | reading |
|           |         | (m.MSL.)  | (m.)    | (m.MSL.) | (m.)    |
| 1/1/2008  | 9:00:00 | 14.299    | 14.32   | 13.316   | 13.31   |
| 2/1/2008  | 9:00:00 | 14.307    | 14.31   | 13.395   | 13.4    |
| 3/1/2008  | 9:00:00 | 14.063    | 14.11   | 13.292   | 13.3    |
| 4/1/2008  | 9:00:00 | 14.008    | 14.03   | 13.135   | 13.14   |
| 6/1/2008  | 9:00:00 | 14.772    | 14.71   | 13.139   | 13.14   |
| 7/1/2008  | 9:00:00 | 14.737    | 14.7    | 13.288   | 13.29   |
| 8/1/2008  | 8:30:00 | 14.347    | 14.36   | 13.277   | 13.28   |
| 9/1/2008  | 8:30:00 | 14.311    | 14.38   | 13.403   | 13.4    |
| 13/1/2008 | 8:30:00 | 14.083    | 14.17   | 13.363   | 13.35   |
| 14/1/2008 | 8:30:00 | 14.095    | 14.11   | 13.324   | 13.32   |
| 15/1/2008 | 8:30:00 | 14.075    | 14.1    | 13.285   | 13.3    |
| 16/1/2008 | 8:30:00 | 14.087    | 14.12   | 13.155   | 13.18   |
| 18/1/2008 | 8:30:00 | 14.268    | 14.3    | 13.438   | 13.44   |
| 20/1/2008 | 8:30:00 | 14.382    | 14.42   | 13.482   | 13.46   |
| 21/1/2008 | 8:30:00 | 14.366    | 14.44   | 13.454   | 13.45   |
| 22/1/2008 | 8:30:00 | 14.366    | 14.43   | 13.454   | 13.45   |
| 23/1/2008 | 8:30:00 | 14.429    | 14.43   | 13.592   | 13.6    |
| 24/1/2008 | 8:30:00 | 14.209    | 14.21   | 13.352   | 13.35   |
| 26/1/2008 | 8:30:00 | 14.134    | 14.12   | 13.446   | 13.46   |
| 27/1/2008 | 8:30:00 | 14.138    | 14.13   | 13.529   | 13.53   |
| 28/1/2008 | 8:30:00 | 14.221    | 14.3    | 13.556   | 13.56   |
| 29/1/2008 | 8:30:00 | 14.24     | 14.25   | 13.446   | 13.46   |



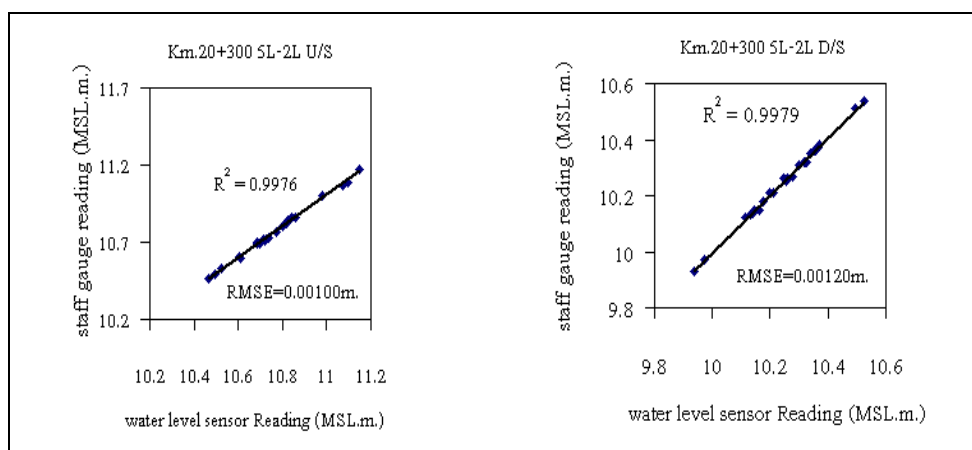
ภาพที่ 61 สอเทียบ sensor วัดระดับน้ำ กม. 9+813 5L-2L

ในภาพที่ 61 ที่ประตูระบายน้ำ กม. 9+813 ผลสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำหน้า - ท้าย ประตูระบายน้ำ  $R^2$  มากกว่า 0.95 และได้ค่า RMSE ต่ำกว่า 0.009 แสดงว่าการตรวจวัดระดับน้ำ ทำงานได้ดีมีความคลาดเคลื่อนต่ำ

การสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำที่ กม. 20+300 ในเดือนมกราคม 2551 ได้ผลทดสอบ ในตารางที่ 21

ตารางที่ 21 สอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำประตูละบาย กม. 20+300 5L-2L

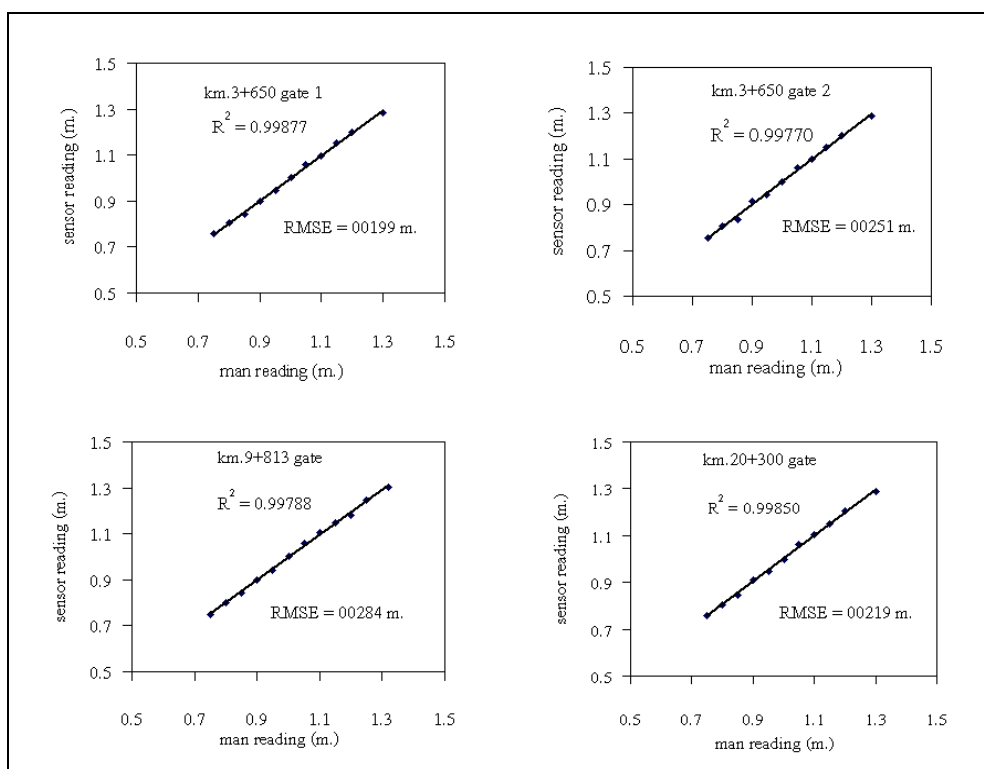
| date      | time    | Km.20+300 |         |          |         |
|-----------|---------|-----------|---------|----------|---------|
|           |         | U/S       |         | D/S      |         |
|           |         | sensor    | staff   | sensor   | staff   |
|           |         | reading   | gauge   | reading  | gauge   |
|           |         |           | reading |          | reading |
|           |         | (m.MSL.)  | (m.)    | (m.MSL.) | (m.)    |
| 1/1/2008  | 9:00:00 | 10.688    | 10.69   | 10.177   | 10.18   |
| 2/1/2008  | 9:00:00 | 10.727    | 10.72   | 10.197   | 10.21   |
| 3/1/2008  | 9:00:00 | 10.467    | 10.46   | 9.937    | 9.93    |
| 4/1/2008  | 9:00:00 | 10.822    | 10.83   | 10.146   | 10.15   |
| 6/1/2008  | 9:00:00 | 10.735    | 10.73   | 10.13    | 10.13   |
| 7/1/2008  | 9:00:00 | 10.774    | 10.77   | 9.972    | 9.97    |
| 8/1/2008  | 8:30:00 | 11.097    | 11.09   | 10.276   | 10.27   |
| 9/1/2008  | 8:30:00 | 10.609    | 10.6    | 10.114   | 10.12   |
| 12/1/2008 | 8:30:00 | 11.149    | 11.17   | 10.351   | 10.36   |
| 14/1/2008 | 8:30:00 | 10.495    | 10.49   | 10.142   | 10.14   |
| 15/1/2008 | 8:30:00 | 10.526    | 10.53   | 10.161   | 10.15   |
| 16/1/2008 | 8:30:00 | 10.983    | 11      | 10.496   | 10.51   |
| 17/1/2008 | 8:30:00 | 10.696    | 10.69   | 10.256   | 10.25   |
| 18/1/2008 | 8:30:00 | 10.727    | 10.72   | 10.248   | 10.26   |
| 20/1/2008 | 8:30:00 | 10.818    | 10.82   | 10.327   | 10.32   |
| 22/1/2008 | 8:30:00 | 10.857    | 10.86   | 10.339   | 10.35   |
| 23/1/2008 | 8:30:00 | 10.841    | 10.86   | 10.315   | 10.32   |
| 26/1/2008 | 8:30:00 | 10.723    | 10.71   | 10.366   | 10.37   |
| 27/1/2008 | 8:30:00 | 10.605    | 10.61   | 10.299   | 10.31   |
| 28/1/2008 | 8:30:00 | 10.739    | 10.73   | 10.37    | 10.38   |
| 29/1/2008 | 8:30:00 | 10.715    | 10.72   | 10.358   | 10.36   |



ภาพที่ 62 สอเทียบอ่านค่าวัดระดับน้ำ กม. 20+300 5L-2L

ในภาพที่ 62 ที่ประตูระบายน้ำ กม. 20+300 ผลสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำหน้า - ท้าย ประตูระบายน้ำ  $R^2$  มากกว่า 0.99 และได้ค่า RMSE ต่ำกว่า 0.001 แสดงว่าการตรวจวัดระดับน้ำ ทำงานได้ดีมีความคลาดเคลื่อนต่ำ

การทดสอบการเปิด - ปิดประตูระบายน้ำระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุที่ กม. 3+650 กม. 9+813 และกม. 20+300 ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 16 และกราฟการสอบเทียบการเปิด - ปิดประตู ระบายระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุในแต่ละช่วงการปรับบานประตูแสดงในภาพที่ 66

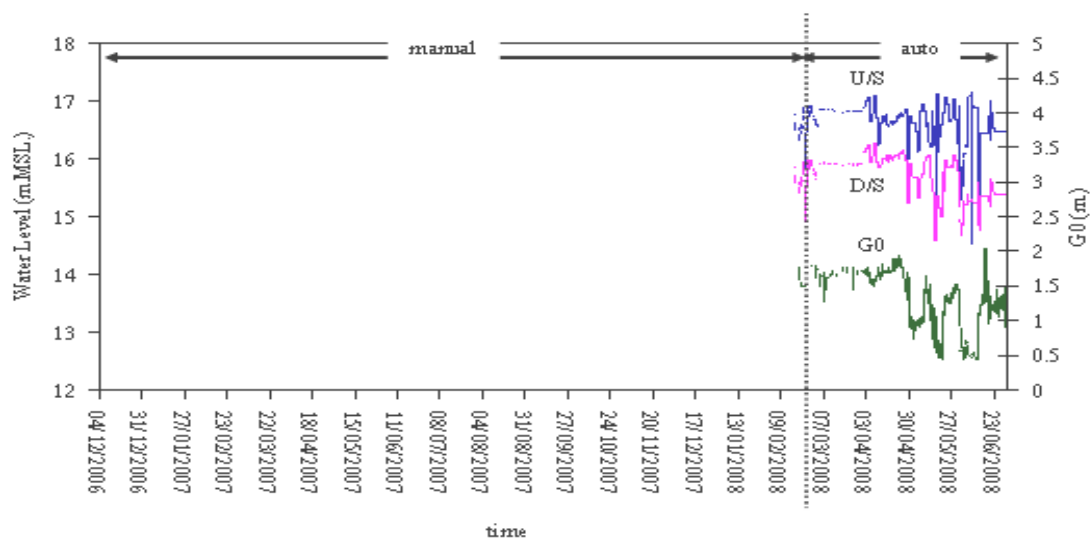


ภาพที่ 63 การทดสอบการเปิด – ปิดประตูระยะไกลของคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง

จากภาพที่ 63 ที่ประตูระบายน้ำ กม. 3+650 กม. 9+813 และกม. 20+300 ผลการส่งคำสั่งควบคุมการเปิด-ปิดบานประตูในระยะไกล(remote) เทียบจากผลการอ่านค่าโดยตรวจวัดระยะการเปิดบานที่อุปกรณ์ทำได้จริงได้ค่า  $R^2$  สูงกว่า 0.99 และค่า RMSE ต่ำกว่า 0.003ม. แสดงว่าการควบคุมปรับบานประตูระบายน้ำในระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุ ทำงานได้ดีผลการปรับบานประตูได้ระยะตำแหน่งตรงตามที่ต้องการมีความคลาดเคลื่อนต่ำ

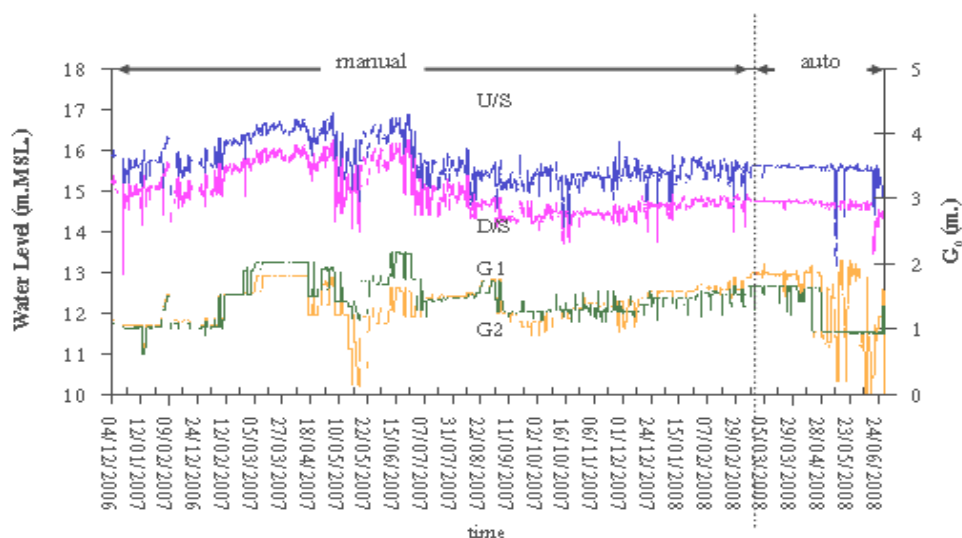
3.2 การทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติ โดยทดสอบความน่าเชื่อถือในการตรวจวัดและการส่งข้อมูลให้ทุก ๆ ครั้งชั่วโมง ทดสอบความคลาดเคลื่อน RMSE ของความสามารถในการควบคุมระดับน้ำตามเป้าหมายในระบบโทรมาตรและระบบอัตโนมัติ

ผลการทดสอบระบบคลองอัตโนมัติระหว่างเดือนมีนาคม - มิถุนายน 2551 แสดงในภาพที่ 64 - 73 และสรุปผลการทดสอบระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้องโดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจากข้อมูลการบันทึกอย่างต่อเนื่องทุก ๆ ครั้งชั่วโมงแสดงในตารางที่ 16

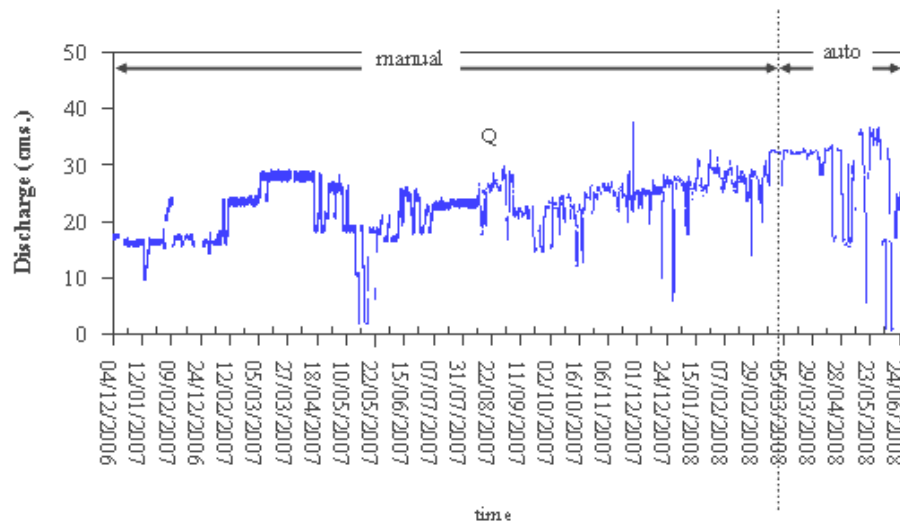


ภาพที่ 64 U/S, D/S และ  $G_0$  กม. 0+000 5L-2L ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51

จากภาพที่ 64 การควบคุมปริมาณน้ำในคลองโดยคอมพิวเตอร์ส่วนกลางควบคุมการเปิดประตูระบายน้ำแบบอัตโนมัติที่สถานี กม. 0+000 ผ่านระบบ SCADA ของโครงการสองพี่น้อง มีจำนวนครั้งการปรับบานประตูมากกว่าการควบคุมด้วยมือ

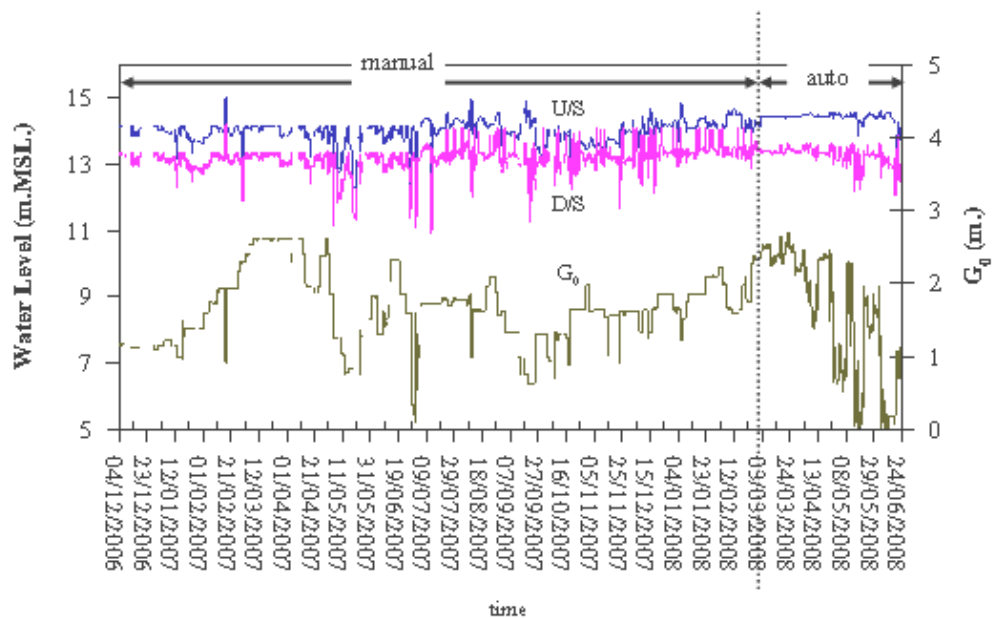


ภาพที่ 65 เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่ กม.3+650 ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51

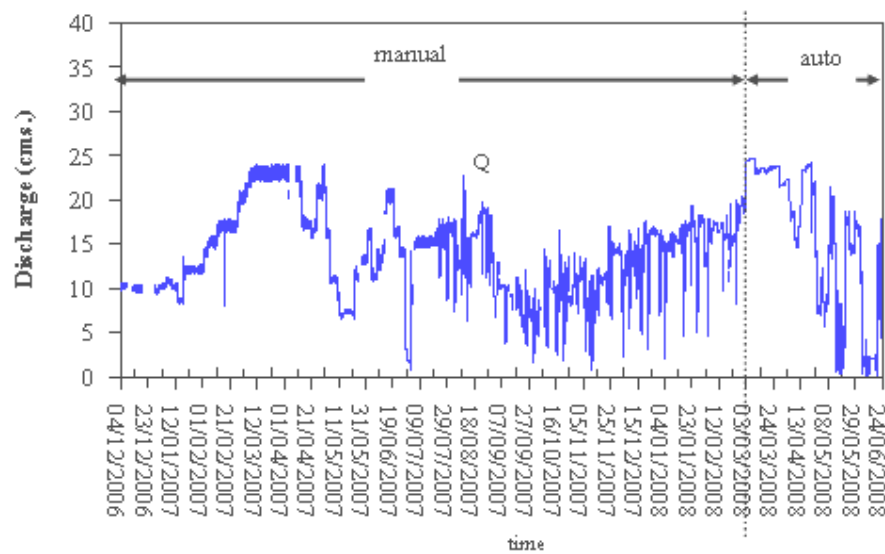


ภาพที่ 66 Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่ กม..3+650 ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51

จากภาพที่ 65 robogate ประสิทธิภาพน้ำ กม.3+650 ช่วงทำงานอัตโนมัติสามารถควบคุมระดับน้ำด้านเหนือน้ำที่ระดับน้ำเป้าหมายที่หน้าประตูได้ค่า RMSE 0.262 ม. ในขณะที่การควบคุมด้วยมือมีค่า RMSE 0.551 ม.

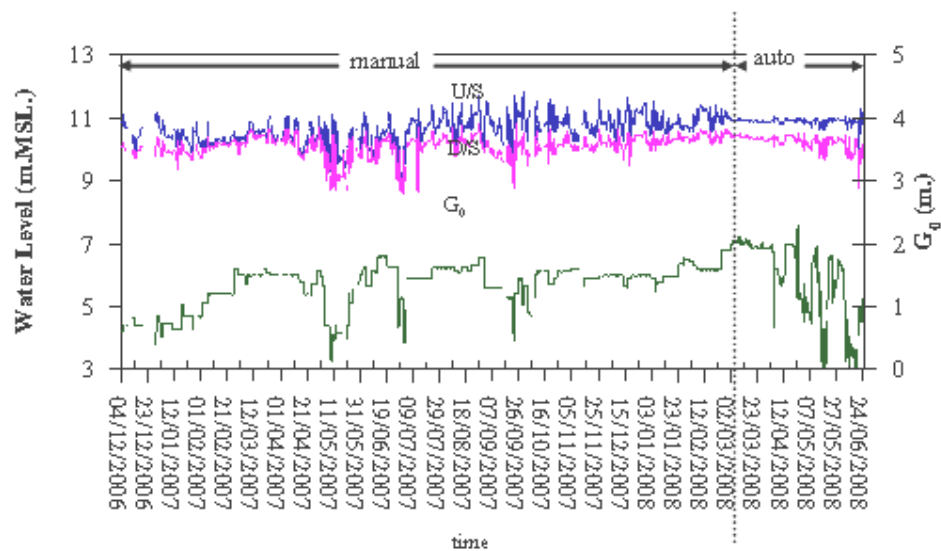


ภาพที่ 67 เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่ กม..9+813ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51



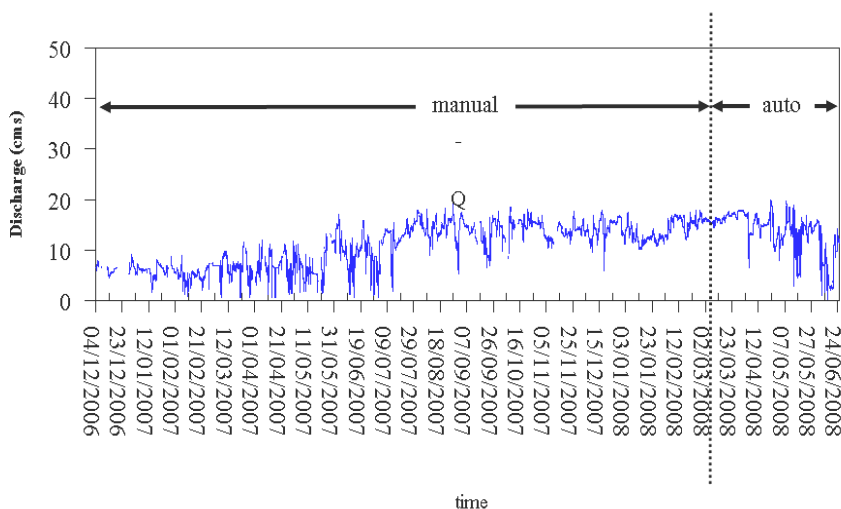
ภาพที่ 68 Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่ กม..9+813ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51

จากภาพที่ 67 robogate ประสิทธิภาพน้ำ กม.9+813 ช่วงทำงานอัตโนมัติสามารถควบคุมระดับน้ำด้านเหนือน้ำที่ระดับน้ำเป้าหมายที่หน้าประตูได้ค่า RMSE 0.178 ม. ในขณะที่การควบคุมด้วยมือมีค่า RMSE 0.541 ม.



ภาพที่ 69 เปรียบเทียบส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่ กม..20+300ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51





ภาพที่ 70 Q ส่งน้ำด้วยมือและอัตโนมัติที่ กม..20+300ระหว่าง 4 ธ.ค.49- 24 มิ.ย.51

จากภาพที่ 69 robogate ประตุระบายน้ำ กม.20+300 ช่วงทำงานอัตโนมัติสามารถควบคุมระดับน้ำด้านเหนือที่ระดับน้ำเป้าหมายที่หน้าประตูได้ค่า RMSE 0.319 ม. ในขณะที่การควบคุมด้วยมือมีค่า RMSE 0.427 ม.

ผลการบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องทุก ๆ ครึ่งชั่วโมงในช่วงระหว่างการทำงานด้วยมือ โดยทำงานเป็นไตรมาสของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้องสรุปได้ในตารางที่ 22 และทำงานแบบอัตโนมัติสรุปได้ในตารางที่ 23

ตารางที่ 22 สรุปการทำงานด้วยมือของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง

| list                           | Max    | Min    | average | standard deviation | RMSE    |
|--------------------------------|--------|--------|---------|--------------------|---------|
| Km.3+650 U/S(m.MSL.)           | 16.915 | 13.603 | 15.720  | 0.506              | 0.551m. |
| Km.3+650 D/S(m.MSL.)           | 16.262 | 12.950 | 14.989  | 0.557              | -       |
| Km.3+650 G <sub>1</sub> (m.)   | 1.825  | 0.127  | 1.401   | 0.266              | -       |
| Km.3+650 G <sub>2</sub> (m.)   | 2.174  | 0.615  | 1.479   | 0.306              | -       |
| Km.3+650 Q(m <sup>3</sup> /s.) | 37.441 | 1.918  | 22.699  | 4.575              | -       |
| Km.9+813 U/S(m.MSL.)           | 15.036 | 11.770 | 13.990  | 0.353              | 0.541m. |

ตารางที่ 22 (ต่อ)

| list                            | Max    | Min    | average | standard deviation | RMSE    |
|---------------------------------|--------|--------|---------|--------------------|---------|
| Km.9+813 D/S(m.MSL.)            | 14.205 | 10.898 | 13.193  | 0.340              | -       |
| Km.9+813 $G_1$ (m.)             | 2.627  | 0.082  | 1.673   | 0.461              | -       |
| Km.9+813 Q(m <sup>3</sup> /s.)  | 24.097 | 0.701  | 14.167  | 4.453              | -       |
| Km.20+300 U/S(m.MSL.)           | 11.855 | 8.912  | 10.614  | 0.425              | 0.427m. |
| Km.20+300 D/S(m.MSL.)           | 10.801 | 8.597  | 10.105  | 0.330              | -       |
| Km.20+300 $G_1$ (m.)            | 1.898  | 0.110  | 1.343   | 0.338              | -       |
| Km.20+300 Q(m <sup>3</sup> /s.) | 20.186 | 0.000  | 9.498   | 5.253              | -       |

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง

| List                            | Max    | Min    | average | standard deviation | RMSE     |
|---------------------------------|--------|--------|---------|--------------------|----------|
| Km.3+650 U/S(m.MSL.)            | 15.655 | 13.132 | 15.516  | 0.252              | 0.262 m. |
| Km.3+650 D/S(m.MSL.)            | 14.775 | 13.413 | 14.630  | 0.178              | -        |
| Km.3+650 $G_1$ (m.)             | 2.058  | 0.000  | 1.496   | 0.533              | -        |
| Km.3+650 $G_2$ (m.)             | 1.655  | 0.916  | 1.295   | 0.339              | -        |
| Km.3+650 Q(m <sup>3</sup> /s.)  | 36.816 | 0.569  | 28.319  | 6.882              | -        |
| Km.9+813 U/S (m.MSL.)           | 14.597 | 13.879 | 14.440  | 0.077              | 0.178m.  |
| Km.9+813 D/S (m.MSL.)           | 13.614 | 12.152 | 13.278  | 0.226              | -        |
| Km.9+813 $G_0$ (m.)             | 2.471  | 0.023  | 1.574   | 0.713              | -        |
| Km.9+813 Q(m <sup>3</sup> /s.)  | 24.700 | 0.269  | 18.331  | 6.636              | -        |
| Km.20+300 U/S (m.MSL.)          | 11.184 | 10.693 | 10.907  | 0.054              | 0.319m.  |
| Km.20+300 D/S (m.MSL.)          | 10.552 | 9.969  | 10.290  | 0.119              | -        |
| Km.20+300 $G_0$ (m.)            | 2.309  | 0.659  | 1.630   | 0.412              | -        |
| Km.20+300 Q(m <sup>3</sup> /s.) | 19.893 | 0.000  | 15.437  | 2.127              | -        |

จากตารางที่ 22-23 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านประตูระบายน้ำ กม.3+650 กม.9+813 และ กม.20+300 เทียบกับการทำงานด้วยมือจะต่ำกว่าเล็กน้อยแต่ถ้าเทียบกับระดับน้ำหน้าประตูระบายน้ำทุกแห่ง การควบคุมแบบอัตโนมัติช่วยให้ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับเป้าหมาย RMSE มีค่าระหว่าง 0.178 – 0.319 ม. ซึ่งต่ำกว่าการควบคุมด้วยมือที่มีค่าระหว่าง 0.427 – 0.551 ม.

ได้ทำการเปรียบเทียบค่า RMSE(Root Mean Square Error) ของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง เพื่อสนับสนุนว่าการควบคุมระดับน้ำในคลองที่หน้าประตู กม.3+650 กม.9+813 กม.20+300 และระดับน้ำด้านท้ายประตูระบายน้ำ กม.20+300 อยู่ที่ระดับน้ำเป้าหมายได้ดีตลอดช่วงการทำงานแบบอัตโนมัติ ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่า RMSE แสดงในตารางที่ 24

**ตารางที่ 24** เปรียบเทียบ RMSE ของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง

| List          | RMSE(Root Mean Square Error) |                |
|---------------|------------------------------|----------------|
|               | manual Mode                  | automatic Mode |
| Km.3+650 U/S  | 0.551m.                      | 0.262m.        |
| Km.9+813 U/S  | 0.541m.                      | 0.178m.        |
| Km.20+300 U/S | 0.427m.                      | 0.319m.        |

จากตารางที่ 24 การทำงานแบบอัตโนมัติมีค่า RMSE ระหว่าง 0.178 – 0.319 ม. ซึ่งต่ำกว่าการควบคุมด้วยมือที่มีค่า RMSE ระหว่าง 0.427 – 0.551 ม. ในทุกสถานี แสดงว่าระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้องสามารถควบคุมระดับน้ำในคลองให้อยู่ที่ระดับเป้าหมาย

## 5. วิเคราะห์ค่าการลงทุนและปัญหาการใช้งานในสนาม

5.1 การวิเคราะห์การลงทุนโดยใช้ประโยชน์ที่มีฟังก์ชันการตรวจวัดระดับน้ำ ระยะเปิดบานประตู การควบคุมเปิด-ปิดประตูระบายน้ำ (กรณีมีเกียร์มอเตอร์ติดตั้งไว้ที่ประตูระบายน้ำแล้ว) การสื่อสาร ส่ง – รับข้อมูลและใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นเองบันทึกข้อมูลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ ในที่นี้ให้การสื่อสารมีระยะทางจากแม่ข่ายที่โครงการชลประทานถึงประตูระบายน้ำคิดประมาณ 30 กิโลเมตร ใช้วิทยุสื่อสารที่กรมชลประทานใช้งานย่านความถี่ VHF 139 MHz และที่สถานีแม่ข่ายมีเสาอากาศต้นเดิมอยู่แล้วสามารถใช้งานได้กับสถานีลูกข่ายจำนวน 10 สถานีซึ่งการประมาณราคาลงทุนต่อ 1 สถานีตรวจวัดและควบคุมน้ำในสนามแสดงในตารางที่ 25

ตารางที่ 25 การประมาณราคาลำงทุนต่อ 1 สถานีตรวจวัดและควบคุมน้ำในสนาม

| ที่                                                                                      | รายการ                                                                                                           | การใช้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น                                                                                                                                         |                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
|                                                                                          |                                                                                                                  | อุปกรณ์                                                                                                                                                           | ราคา<br>(บาท)    |
| 1                                                                                        | ที่ประตุน้ำระบายน้ำ<br>ตรวจวัดระดับน้ำหน้า-ท้าย<br>ประตุน้ำระบายน้ำระยะเปิดบานประตู<br>(กรณีมีเกียร์มอเตอร์แล้ว) | ประตูยนต์แบบ robogate v.5<br>พร้อมระบบควบคุมเกียร์มอเตอร์<br>(ไม่รวมค่าระบบเกียร์มอเตอร์)                                                                         | 150,000          |
| 2                                                                                        | การส่งข้อมูลให้ส่วนกลาง<br>(ระยะเกิน 30 กิโลเมตร)                                                                | วิทยุสื่อสาร 5 วัดพร้อม<br>อุปกรณ์สายอากาศและอุปกรณ์แปลง<br>สัญญาณ                                                                                                | 18,000           |
| 3                                                                                        | การรับข้อมูลในส่วนกลาง                                                                                           | วิทยุสื่อสาร 5 วัด / 10 สถานีลูกข่าย<br>(อุปกรณ์แปลงสัญญาณใช้งานได้<br>กับ 10 สถานีลูกข่าย)<br>บันทึกข้อมูลได้วันละ 48 records<br>เฉลี่ย 5 ปีจำนวน 87,600 records | 2,300            |
| 4                                                                                        | การบันทึกข้อมูล<br>การใช้งานข้อมูล<br>จากการตรวจวัด                                                              | คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง / 10 สถานีลูกข่าย<br>(พร้อมโปรแกรมแม่ข่ายใช้งานได้<br>กับ 10 สถานีลูกข่าย)                                                                  | 2,500            |
| 5                                                                                        | ค่าบำรุงรักษา 5 ปี                                                                                               | อุปกรณ์ 10 % (17,200 บาท / ปี)<br>ค่าจ้างแรงงานบำรุงรักษา 10 %<br>(17,200 บาท / ปี)                                                                               | 86,400<br>86,400 |
| - สรุปค่าลงทุนที่สามารถใช้งานได้ 5 ปี                                                    |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                   | 345,600          |
| - อัตราค่าบันทึกข้อมูลใน 5 ปี<br>ที่มีจำนวนการส่งข้อมูลได้ 87 %<br>ประมาณ 76,212 records |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                   | 4.53             |

จากตารางที่ 25 ค่าลงทุนโดยใช้ประตุนต์ที่พัฒนาขึ้นมีค่าใช้จ่าย 345,600 บาท ซึ่งสามารถใช้งานได้ 5 ปี อัตราค่าบันทึกข้อมูลต่อหน่วยที่มีจำนวนการส่งข้อมูลได้ 87 % (บันทึกข้อมูลในทุกๆ 30 นาทีอัตโนมัติ ประมาณ 76,212 records) มีค่า 4.53 บาท / record ข้อมูลที่บันทึกไว้สามารถนำมาใช้อ้างอิงหรือหาค่าประสิทธิภาพคลองส่งน้ำ หรือใช้วางแผนการส่งน้ำได้ละเอียดกว่าใช้คนทำงานดังนั้นสรุปได้ว่าอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมีความคุ้มค่าการลงทุน

5.2 ปัญหาการใช้งานของระบบคลองอัตโนมัติต้นทุนต่ำในสนาม จากการทดสอบใช้งาน มีปัญหาระหว่างการทดสอบหลายประการ พอสรุปและจัดแบ่งปัญหาที่เกิดขึ้นประจำซึ่งมีทางแก้ไขได้ดังต่อไปนี้

5.2.1 การใช้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นทำงานเป็นเพียงระบบโทรมาตรสามารถนำไปใช้ได้กับทุกระบบคลอง โดยเจ้าหน้าที่ไม่ต้องมีความเข้าใจหรือมีความรู้เกี่ยวกับฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์มากนัก การใช้งานไม่ยุ่งยาก แต่ต้องมีการตรวจสอบถูกต้องของข้อมูลที่ตรวจวัด สำหรับการใช้งานแบบ SCADA ซึ่งมีระบบควบคุมระยะไกล การใช้งานในช่วงแรกๆ ต้องมีความระมัดระวัง ต้องตรวจสอบในสนามว่าการควบคุมระยะไกลให้ผลตามที่สั่งการหรือไม่ ถ้าไม่เป็นไปตามที่สั่งการต้องปรับแก้ให้แน่ใจว่าอุปกรณ์ทำตามคำสั่งการไป สำหรับการใช้งานเป็นระบบคลองอัตโนมัติเต็มรูปแบบต้องมีเจ้าหน้าที่ชำนาญการคอยตรวจสอบการทำงานของระบบตลอดเวลา และมีเจ้าหน้าที่ชำนาญการคอยดูแลบำรุงรักษาเครื่องอย่างสม่ำเสมออย่างน้อยเดือนละ 2 ครั้ง

5.2.2 ปัญหาการปรับตั้งค่าอุปกรณ์ เนื่องจากการติดตั้งใช้งานจำเป็นต้องตั้งค่าประจำเครื่องเช่นระดับน้ำ (ม.รทก.) ระยะเปิดประตูระบายน้ำ ผู้ใช้งานต้องเตรียมค่าระดับต่างๆ ที่ประตูระบายน้ำหรือบริเวณที่จะติดตั้งอุปกรณ์ไว้ให้พร้อมซึ่งที่ผ่านมามีประสบการณ์ปัญหาเรื่องการโยกค่าระดับที่คลาดเคลื่อน ทำให้การตรวจวัดระดับน้ำคลาดเคลื่อนตามไปด้วย

5.2.3 ปัญหาเรื่องการใช้คลื่นวิทยุความถี่เดียวกันในเวลาพร้อมกัน ระบบคลองอัตโนมัติมีอุปกรณ์โทรมาตรเป็นอุปกรณ์พื้นฐานการส่ง – รับข้อมูลต้องไม่ติดขัด การใช้คลื่นวิทยุสำหรับสื่อสารต้องจัดสรรคลื่นความถี่โดยเฉพาะเท่านั้น

5.2.4 ปัญหาเรื่องกระแสไฟฟ้าขัดข้อง ต้องจัดเตรียมระบบกระแสไฟฟ้าสำรองทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มตามความจำเป็นซึ่งในแต่ละสถานีแต่ถ้ามีงบประมาณเพียงพอควรจัดให้มีระบบกระแสไฟฟ้าสำรองในทุกสถานี

5.2.5 ปัญหาเรื่องฝนฟ้าคะนอง ทำความเสียหายกับอุปกรณ์รับ – ส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุทางแก้ไขต้องคัดเลือกตำแหน่งที่ตั้งเสาอากาศ การจัดทำสายดิน การจัดระยะเวลาการรับ-ส่งข้อมูลในแต่ละครั้งให้สั้นที่สุดโดยส่งข้อมูลออกอากาศเท่าที่จำเป็นไม่มีลักษณะส่งข้อมูลถี่เกินไปหรือส่งข้อมูลตลอดเวลาและประการที่สำคัญถ้ามีงบประมาณเพียงพอควรจัดซื้ออุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้ากระชาก (surge protection) เนื่องจากฟ้าคะนอง

5.2.6 ปัญหาการใช้งานคอมพิวเตอร์ที่แม่ข่าย ควรแยกจากการใช้งานปกติเนื่องจากระบบต้องการข้อมูลแบบ real time ดังนั้นเครื่องคอมพิวเตอร์ต้องทำงานเก็บข้อมูลตามระยะเวลาที่ต้องการ สถานีแม่ข่ายต้องมีระบบสำรองข้อมูลโดยจัดเก็บไว้ที่ฮาร์ดไดรฟ์ตัวอื่นที่ไม่ใช่ระบบปฏิบัติการ เช่น ใว้ที่ไดรฟ์ D เป็นต้น การใช้งานข้อมูลควรดึงข้อมูลผ่านเครือข่ายภายในตามที่ได้จัดเตรียมไว้ อาจใช้วิธีคัดลอกไปใช้งานไม่ควรเปิดฐานข้อมูลค้างไว้เพราะข้อมูลใหม่จะไม่สามารถบันทึกต่อได้ทางแก้ไขอาจใช้วิธีตั้งค่า data access time out ให้สั้นที่สุด

5.2.7 ปัญหาซอฟต์แวร์ที่สถานีแม่ข่ายที่อาจมีฟังก์ชันการใช้งานไม่ตรงกับความต้องการใช้งานหรือมากเกินไปจนทำให้เกิดความสับสนกับผู้ใช้งานเป็นผลทำให้เครื่องไม่เป็นที่สนใจเพราะการใช้งานที่ยาก ทางแก้ไขโปรแกรมเมอร์ต้องปรับแก้ไขให้ใช้งานได้ง่ายและสวยงาม

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการทดสอบแบบจำลองคลองอัตโนมัติ ระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน ระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และปัญหาในการใช้งาน สรุปตามหัวข้อได้ดังนี้

#### 1. สรุปผลการทดสอบ algorithm สำหรับประตูยนต์(RTU)

การทดสอบ algorithm สำหรับประตูยนต์(RTU) กรณี  $U/S > TL$  การปรับระดับน้ำเข้าหาเป้าหมายใช้เวลาอยู่ระหว่าง 120 – 745 วินาที จำนวนครั้งการปรับบานประตูระหว่าง 1 – 6 ครั้ง และกรณี  $U/S < TL$  การปรับระดับน้ำเข้าหาเป้าหมายใช้เวลาอยู่ระหว่าง 110 – 795 วินาที จำนวนครั้งการปรับบานประตูระหว่าง 1 – 6 ครั้ง ทั้งสองกรณีแสดงให้เห็นว่า algorithm สำหรับประตูยนต์ เพื่อควบคุมระดับน้ำเฉพาะจุดด้านเหนือหน้าประตูให้อยู่ที่ระดับน้ำเป้าหมาย

#### 2. สรุปการทำงานของ แบบจำลองระบบคลองอัตโนมัติ

ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมน้ำโดยใช้ประตูยนต์ และคอมพิวเตอร์ในแบบจำลองระบบคลองอัตโนมัติระหว่างเดือนธันวาคม 2548 และ เดือนเมษายน 2549 โดยกำหนดระดับน้ำเป้าหมายหน้าประตูยนต์ (robogate) จากผลการทดสอบสรุปค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมระดับน้ำอยู่ระหว่าง 0.08 – 6.97 % ค่าเฉลี่ยรวม 2.04 %

#### 3. สรุปการทดสอบใช้งานของระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน

3.1 การทดสอบความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลผ่านระบบวิทยุให้คอมพิวเตอร์ส่วนกลาง โดยนำจำนวนครั้งของข้อมูลที่บันทึกอย่างต่อเนื่องทุกครั้งชั่วโมงมาตรวจนับทั้งกรณีที่ไม่มีและมี pc starter ร่วมทำงาน การส่งข้อมูลจากสถานีในสนามช่วงแรกที่ยังไม่ติดตั้ง pc starter จำนวนครั้งของการรับส่งข้อมูลเฉลี่ย 84.23 % และหลังจากที่ได้ติดตั้ง pc starter จำนวนครั้งของการรับส่งข้อมูลเฉลี่ย 88.67 % แสดงว่าจำนวนครั้งของการส่งข้อมูลให้คอมพิวเตอร์ส่วนกลางมีความน่าเชื่อถือได้ดี

3.2 การทดสอบการทำงานของ sensor ตรวจวัดระดับน้ำและระยะการเปิดบานด้วยมือ ทุกๆ ครั้งชั่วโมง จำนวน 66 ครั้ง ระหว่างวันที่ 10 ตุลาคม 2549 – 30 พฤศจิกายน 2550 และ คำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน RMSE ผลการสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำในทุกสถานีได้ค่า  $R^2$  มากกว่า 0.95 และได้ค่า RMSE ต่ำกว่า 0.001 ม. แสดงว่า sensor ที่ใช้ตรวจวัดระดับน้ำทำงานได้ดีมีความคลาดเคลื่อนต่ำ และการทดสอบการเปิด – ปิดประตูระบายน้ำระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุที่ สถานี 901 สถานี 9021 สถานี 9022 และสถานี 903 ซึ่งผลการส่งคำสั่งควบคุมการเปิด-ปิดบานประตูใน ระยะไกล (remote) เทียบจากผลการอ่านค่าจากแผ่นตรวจวัดระยะการเปิดบานที่อุปกรณ์ทำได้จริง ได้ค่า  $R^2$  สูงกว่า 0.99 และค่า RMSE ต่ำกว่า 0.001ม. แสดงว่าการควบคุมปรับบานประตูระบายน้ำ ในระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุ ทำงานได้ดีผลการปรับบานประตูได้ระยะตำแหน่งตรงตามที่ต้องการมีความคลาดเคลื่อนต่ำ

3.3 การทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบค่า RMSE ของการ ควบคุมระดับน้ำในคลองให้อยู่ที่ระดับเป้าหมาย ผลการเปรียบเทียบการทำงานแบบอัตโนมัติค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.009 – 0.029 ม. ซึ่งต่ำกว่าการทำงานด้วยมือในทุกสถานีที่มีค่า RMSE อยู่ ระหว่าง 0.118 – 0.295 ม.

#### 4. สรุปการทดสอบใช้งานของระบบคลองอัตโนมัติสองพี่น้อง

4.1 การทดสอบความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูลผ่านระบบวิทยุ VHF ให้คอมพิวเตอร์ ส่วนกลางโดยนำจำนวนครั้งของข้อมูลที่บันทึกอย่างต่อเนื่องทุกครั้งชั่วโมงมาตรวจนับทั้งกรณีที่ไม่ มี และมี pc starter ร่วมทำงานด้วย ผลการตรวจนับจำนวนข้อมูลที่รับได้ที่คอมพิวเตอร์ส่วนกลาง การส่งข้อมูลจากสถานีในสนามช่วงแรกที่ยังไม่ได้ติดตั้ง pc starter จำนวนครั้งของการรับส่งข้อมูล เฉลี่ย 77.97 % และหลังจากที่ได้ติดตั้ง pc starter จำนวนครั้งของการรับส่งข้อมูลเฉลี่ย 88.66 % แสดงว่าจำนวนครั้งของการส่งข้อมูลให้คอมพิวเตอร์ส่วนกลางมีความน่าเชื่อถือได้ดี

4.2 การทดสอบการทำงานของ sensor ตรวจวัดระดับน้ำและระยะการเปิดบานด้วยมือทุกๆ ครั้งชั่วโมง จำนวน 80 ครั้งระหว่างเดือน ตุลาคม 2550 และเดือนมกราคม 2551 และคำนวณหาค่า ความคลาดเคลื่อน RMSE ผลสอบเทียบ sensor วัดระดับน้ำหน้า - ท้ายประตูระบายน้ำทุกสถานีได้ ค่า  $R^2$  มากกว่า 0.98 และได้ค่า RMSE ต่ำกว่า 0.01 แสดงว่าการตรวจวัดระดับน้ำทำงานได้ดีมีความคลาดเคลื่อนต่ำ



4.3 การทดสอบการเปิด – ปิดประตูระบายน้ำระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุที่ กม. 3+650 กม. 9+813 และกม. 20+300 ซึ่งผลการส่งคำสั่งควบคุมการเปิด-ปิดบานประตูในระยะไกล (remote) เทียบจากผลการอ่านค่าโดยตรวจวัดระยะการเปิดบานที่อุปกรณ์ทำได้จริงได้ค่า  $R^2$  สูงกว่า 0.99 และค่า RMSE ต่ำกว่า 0.003ม.

4.4 ผลการทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติมีค่า RMSE ระหว่าง 0.178 – 0.319 ม. ซึ่งต่ำกว่าการควบคุมด้วยมือที่มีค่า RMSE ระหว่าง 0.427 – 0.551 ม.ในทุกสถานี

## 5. การวิเคราะห์ค่าการลงทุนและปัญหาใช้งานในสนาม

5.1 ค่าลงทุนโดยใช้ประตูชนิดที่พัฒนาขึ้นมีค่าใช้จ่าย 345,600 บาท ซึ่งสามารถใช้งานได้ 5 ปี อัตราค่าบันทึกข้อมูลต่อหน่วยที่มีจำนวนการส่งข้อมูลได้ 87 % (บันทึกข้อมูลในทุกๆ 30 นาที อัตโนมัติ ความน่าเชื่อถือได้ของการส่งข้อมูล 87 % ประมาณ 76,212 records) มีค่า 4.53 บาท / record ข้อมูลที่บันทึกไว้สามารถนำมาใช้อ้างอิงหรือหาค่าประสิทธิภาพคลองส่งน้ำ หรือใช้วางแผนการส่งน้ำได้ละเอียดกว่าใช้คนทำงานดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมีความคุ้มค่าการลงทุน

5.2 ปัญหาการใช้งานของระบบคลองอัตโนมัติต้นทุนต่ำในสนาม จากการทดสอบใช้งาน ต้องคอยตรวจสอบในสนามว่าการควบคุมการเปิด-ปิดบานประตูระยะไกลให้ผลตามที่สั่งการ

5.2.1 ปัญหาการปรับตั้งค่าระดับน้ำเริ่มต้นที่คลาดเคลื่อน ทำให้การตรวจวัดระดับน้ำคลาดเคลื่อนตามไปด้วย ปัญหาเรื่องการใช้คลื่นวิทยุความถี่เดียวกันในเวลาพร้อมกัน ปัญหาเรื่องกระแสไฟฟ้าขัดข้อง ต้องจัดเตรียมระบบกระแสไฟฟ้าสำรองทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่ม

5.2.2 ปัญหาเรื่องฝนฟ้าคะนอง ทำความเสียหายกับอุปกรณ์รับ – ส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุทางแก้ไขต้องคัดเลือกตำแหน่งที่ตั้งเสาอากาศ การจัดทำสายดิน การจัดระยะเวลาการรับ-ส่งข้อมูลในแต่ละครั้งให้สั้นที่สุดหรือเท่าที่จำเป็น

5.2.3 ปัญหาการใช้งานคอมพิวเตอร์ที่แม่ข่ายที่ควรแยกจากการใช้งานปกติ การใช้งานข้อมูลควรดึงข้อมูลผ่านเครือข่ายภายในตามที่ได้จัดเตรียมไว้ อาจใช้วิธีคัดลอกไปใช้งานไม่ควรเปิดฐานข้อมูลค้างไว้เพราะข้อมูลใหม่จะไม่สามารถบันทึกต่อได้ทางแก้ไขอาจใช้วิธีตั้งค่า data access time out ให้สั้นที่สุด

## ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาระบบคลองอัตโนมัติต่อการทำวิจัยนี้คือ

### 1. การหาค่าสัมประสิทธิ์การปรับบานประตูแบบอัตโนมัติ ( $\phi$ )

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การปรับบานประตูแบบอัตโนมัติ ( $\phi$ ) สำหรับประตูยนต์เพื่อควบคุมระดับน้ำเป้าหมายเฉพาะจุดหน้าประตูระบายน้ำ  $\phi$  ที่หาไว้ได้จากสมการเชิงเส้น แต่ถ้าทำวิจัยต่อควรหาค่า  $\phi$  ที่ดีที่สุดซึ่งสมการที่หาได้อาจมีลักษณะเป็นสมการรูปแบบอื่นเพื่อให้การควบคุมระดับน้ำเป้าหมายใช้เวลาน้อยกว่าและจำนวนครั้งของการปรับบานประตูน้อยกว่า

### 2. การเปรียบเทียบระบบสื่อสารสำหรับระบบคลองอัตโนมัติ

ควรทดสอบเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของระบบสื่อสารด้วยวิทยุกับระบบ GPRS โดยนับจำนวนครั้งของการรับ-ส่งข้อมูลที่ได้

### 3. การเพิ่มความสามารถการรับ-ส่งข้อมูลของระบบวิทยุสื่อสาร

เนื่องจากการใช้วิทยุสื่อสารมีปัญหาเรื่องการขาดหายของข้อมูลเป็นบางครั้งการเพิ่มความสามารถการรับ-ส่งข้อมูลของระบบวิทยุสื่อสารโดยเพิ่มกำลังส่งของวิทยุหรือการปรับปรุงระบบแผงสายอากาศ สายนำสัญญาณและความสูงของเสาส่ง

### 4. การเพิ่มความสามารถในการควบคุมที่คอมพิวเตอร์ส่วนกลาง

การเพิ่มความสามารถในการควบคุมที่คอมพิวเตอร์ส่วนกลางเพื่อปรับบานประตูระบายน้ำปากคลองส่งน้ำโดยพัฒนาแบบจำลองการส่งน้ำและระบบการตัดสินใจ

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กาจ อาบบุญอิม. 2547. SCADA System. **SCADA System Introduction.**

แหล่งที่มา: <http://www.9engineer.com>, 31 มีนาคม 2548.

กฤษฎา ใจเย็น และคณะ. 2545. **เรียนรู้และปฏิบัติการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ตอนุกรม PC-Serial port interfacing text-lab manual.** บริษัท อินโนเวทีฟอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

เกษม จันทร์แก้ว. 2530. **วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.** อักษรสยามการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ณรงค์ ดันชีวะวงศ์. 2541. **ระบบ PLC (Programmable Logic Controller).** สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

ธนารักษ์ ชีระมั่นคง. 2546. **เทคโนโลยีสมองกลฝังตัว (Embedded Technology).** สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

ธีรบุลย์ หล่อวิเชียรรุ่ง และคณะ. 2545. **เรียนรู้และปฏิบัติการระบบดักข้อมูลอย่างง่าย Simple Data Acquisition Experiment text-lab manual.** บริษัท อินโนเวทีฟอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตั้งธรรม. 2549. **การจำลองแบบการจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม.** ศูนย์วิจัยป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

พจนานฎ สุวรรณมณี. 2544. **เซ็นเซอร์และทรานสดิวเซอร์เบื้องต้น.** สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ

วรารุช วุฒินิชย์ และวิษณุ ศรีวงษา. 2546. **ประตูนยนต์.** วันชูชาติ 4 มกราคม 2547. สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์, นนทบุรี.

วรารุช วุฒิวิณิชย์ และวิษณุ ศรีวงษา. 2547. **ต้นแบบประตุนันต์**. หนังสือ วันบูชาดี 4 มกราคม 2547. สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์, นนทบุรี.

\_\_\_\_\_. 2548. **ระบบคลองอัตโนมัติ**. หนังสือ วันบูชาดี 4 มกราคม 2548. สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์, นนทบุรี.

วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์. 2548. **เซ็นเซอร์และทรานสดิวเซอร์ ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ในระบบการวัดและระบบควบคุม**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ

วิษณุ ศรีวงษา และ วรารุช วุฒิวิณิชย์. 2546ก. **การพัฒนาระบบวัดระดับน้ำและควบคุมการเปิด-ปิดประตูระบายน้ำระยะไกล**. การประชุมวิชาการประจำปี 2546. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

\_\_\_\_\_. 2546ข. **การพัฒนาระบบวัดระดับน้ำและควบคุมการเปิด – ปิดประตูระบายน้ำระยะไกล**. วิศวกรรมเกษตรและเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

สุทธิพงษ์ เสนาดี. 2549. **เรียนรู้การสร้างระบบ SCADA ด้วย iconics GENESIS 32 AUTOMATION SUITE**. บริษัท อีดีเอ อินสทรูเมนต์ แอนด์ ซิสเต็ม จำกัด, กรุงเทพฯ

สำนักคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2547. **พื้นฐานการสื่อสารโทรคมนาคม**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. แหล่งที่มา: <http://kmitnb05.kmitnb.ac.th/~mte98012.htm/>, 27 มีนาคม 2547.

อนุชา หิรัญวัฒน์. 2548. **ระบบนิเวศกับการควบคุมอัตโนมัติในอุตสาหกรรม**. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน). กรุงเทพฯ

Ankum, P. 1992a. **Desired behaviour of irrigation systems**. Advances in planning, design and management of irrigation systems as related to sustainable land use, ed. Jan Feyen, Emmanuel Mwendera, and Moussa Badji.

- Ankum, P. 1992b. **Classification of flow control systems for irrigation.** Advances in planning, design and management of irrigation systems as related to sustainable land use, ed. Jan Feyen, Emmanuel Mwendera, and Moussa.
- \_\_\_\_\_. 1994. **Automation of Flow Control in Irrigation Systems.** Delft University of technology. Delft. Netherland.
- Barillere, R. 1999. **Results of the OPC Evaluation done within the JCOP for the Control of the LHC Experiments.** International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. USA.
- Barton, C.V.M. 1988. **SIRWIN.** a Prolog program for representing and reasoning with influence relationships. Univ. of Edinburgh. Edinburgh. UK
- Burt, C. M. 1987. **Overview of canal control concepts.** In Planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems, Proceedings of a Symposium sponsored by the Irrigation. USA.
- Burt, C.M. 1983. **Regulation of sloping canals by automatic downstream control.** Ph.D Thesis, Utah State University, Logan, Utah. USA.
- Celmmons,A.J., Bautista, E. and R.J.Strand. 1997. **Implementation of Canal Automation in Central Arizona.** SSVII IAHR Congress. San Francisco, CA, USA.
- Chevereau, G. and Benezeth, S.S. 1987. **BIVAL system for downstream control.** Planing, operation, rehabilitation and automation of irrigation water deliverysystem. Zimbelman, ed., ASCE, New York.
- Chuchman, C.W. 1971. The Design of Inquiring Systems : **Basic Concepts of Systems and Organization.** New York.

- Clemmens, A. J. 1987. **Delivery system schedules and required capacities.** In Planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems. Proceedings of a Symposium. USA.
- \_\_\_\_\_, Bautista, E. and R.J. Strand. 1997. **Implementation of Canal Automation in Central Arizona.** SSVII IAHR Congress, San Francisco.
- Daneels A. and W. Salter. 1999. **Selection and Evaluation of Commercial SCADA Systems for the Control of the CERN LHC Experiments.** International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, USA.
- Goussard, J. 1987. **Neyrtec automatic equipment for irrigation canals.** In Planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems Proceedings of a Symposium, USA.
- Hansen, R. *et al.* 1999. **Monitoring and Operating a Watershed Using Low-Cost Automation and the Internet: The Sevier River Experience.** USCID Workshop: Modernization of Irrigation Water Delivery Systems, October, USA.
- Hansen, R. *et al.* 2001. **Solar-Powering Water Resource Automation Projects.** Proceedings Asia Regional Conference of ICID: Agriculture, Water and Environment, September, USA.
- Johnson, S.H. 1997. **Irrigation management transfer: Decentralizing public irrigation in Mexico.** In Deregulation, decentralization and privatization in irrigation: State functions move to the free market. Eleventh International Irrigation Symposium. DVWK Bulletin.
- Kosuth, P. 1996. **Remote control and management of irrigation delivery systems.** In Sustainability of irrigated agriculture, Pereira, Netherland.

Malaterre, P.O. 1995. **Regulation of irrigation canals.** characterization and classification.

Irrigation and Drainage Systems, USA.

Manz, D. H. 1987a. **Terminology for describing irrigation conveyance systems.** Journal of

Irrigation and Drainage Engineering, USA.

\_\_\_\_\_. 1987b. **Classification of irrigation water conveyance system components.**

Journal of Irrigation and Drainage Engineering, USA.

O'Mara, G. T. 1988. **The efficient use of surface water and groundwater in irrigation An**

**overview of the issues In Efficiency in irrigation.** The conjunctive use of surface and groundwater resources. A World Bank Symposium, USA.

Ploss, L. 1987. **Canal automation using the electronic filter level offset (EL-FLO)method.**

Planing, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery system.

Zimbelman, ed., ASCE, New York, USA.

Plusquellec, H. 1988. **Improving the operation of canal irrigation systems.** An audiovisual

presentation. The World Bank. USA.

Plusquellec, H. L., C. M. Burt, and W.H. Wolter. 1994. **Modern water control in irrigation.**

Concepts, issues, and applications. World Bank Technical, USA.

Pongput, K. 1994. **Unsteady hydraulic simulation for evaluating canal gate automation**

**schemes.** Ph.D. Thesis, Utah State university, USA.

Plusquellec, H. 1988. **Improving the Operation of Canal Irrigation Systems.** The Economic

Development Institute of the World Bank. Washington, D.C., USA.

Renault, D. and G.G.A. Godaliyadda. 1999a. **Generic Typology for Irrigation Systems**

**Operation.** International Water Management Institute, Columbo, Sri Lanka.

\_\_\_\_\_. 1999b. **Generic Typology for Irrigation.** International Water Management Institute, USA.

Renault, Daniel, and H.M. Hemakumara. 1997. **Irrigation offtakes sensitivity.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering: ASCE (In press), USA.

Rogier, *et al.* 1987. **Dynamic regulation on the Canal De Provence.** In Planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems. the Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers and the Oregon Section. USA.

Rousset, P. 1990. **Majalgaon Irrigation Project (Maharashtra).** Implementation of volumetric allocation and rotational delivery. Washington D.C. The World Bank. Duplicated, USA.

Sagardoy, J. A., Botrall, A. and Uittenbogaard, G.O. 1982. **Organization, operation and maintenance of irrigationschemes.** FAO Irrigation & Drainage Paper 40. Rome, FAO, USA.

Seckler, D. 1996. **The new area of water resources management: From dry to wet water savings.** Research Report 1. Sri Lanka International Irrigation Management Institute, Sri Lanka.

Shanan L., B. K. Uppal and B. Albinson. 1986. **Guideline Layout and design.** In Design and operating guidelines for structured irrigation networks. Fourth Draft. Irrigation II Division, South Asia Projects Department, USA.



Sharifi, M.A. 2002. **Integrated Planning and Decision Support Systems for Sustainable Watershed Development.** Resource Paper presented at Study Meeting on Watershed Development, organized by Asian Productivity Organization. The Iranian Ministry of Agriculture, 12-17 Oct., 2002, Tehran, Islamic Republic of Iran.

Skogerboe, G. V. and P.M. Gary. 1996. **Irrigation maintenance and operations learning process.** Highlands Ranch, Water Resources Publications, Colorado. USA.

Zimbelman, D.D. and D.D. Bedworth. 1983. **Computer control for irrigation-canal system.** J. Irrigation Drain Eng., ASCE, USA.

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**  
**อุปกรณ์แบบจำลองคลองอัตโนมัติ**

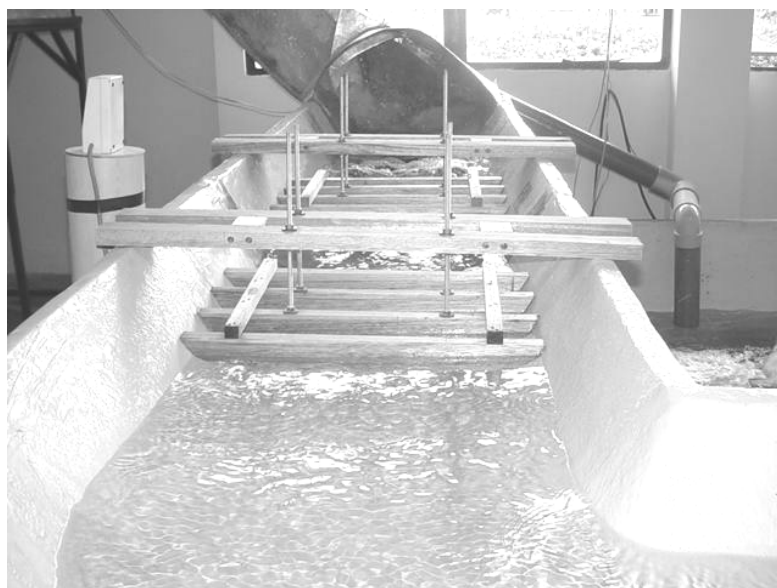
## 1. อุปกรณ์แบบจำลองคลองอัตโนมัติ

1.1 อุปกรณ์แบบจำลองคลองอัตโนมัติประกอบด้วยอ่างเก็บน้ำขนาด 1 ลบ.ม. เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งน้ำของระบบคลองอัตโนมัติ (ภาพผนวกที่ ก1)



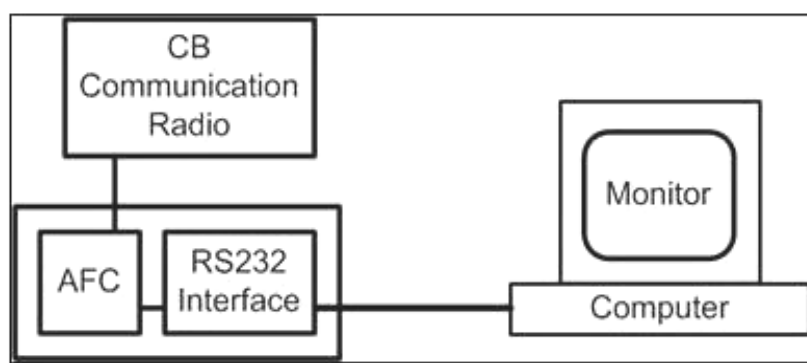
ภาพผนวกที่ ก1 คลองส่งน้ำจำลอง อ่างเก็บน้ำและเครื่องสูบน้ำ

1.2 คลองส่งน้ำจำลอง แบบสี่เหลี่ยมคางหมู ขนาดท้องคลองกว้าง 20 ซม. ลาดด้านข้าง 1:1 ลาดก้นคลอง 1:200 ยาวประมาณ 13 ม. ติดตั้งเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง ขนาดท่อ 4 นิ้ว อัตราสูบสูงสุด 15 ลิตร/วินาที ติดตั้งอุปกรณ์ลดคลื่น (ภาพผนวกที่ ก2 )



ภาพผนวกที่ ก2 อุปกรณ์ลดคลื่นน้ำ

1.3 สถานีควบคุมหลัก (Master Station) ทำหน้าที่แสดงผลข้อมูลการตรวจวัดน้ำ การเปิด-ปิดบานประตู ติดต่อกับระบบโทรมาตรและควบคุมการทำงานของประตูยนต์ สถานีควบคุมหลักประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ 1 ชุด Canal Automation Interface 1 ชุด ทำหน้าที่ติดต่อกับระบบโทรมาตร (วิษณุ และ วราวุธ 2546) และประตูยนต์ ผ่านวิทยุสื่อสารย่าน CB ดังภาพผนวกที่ ก3



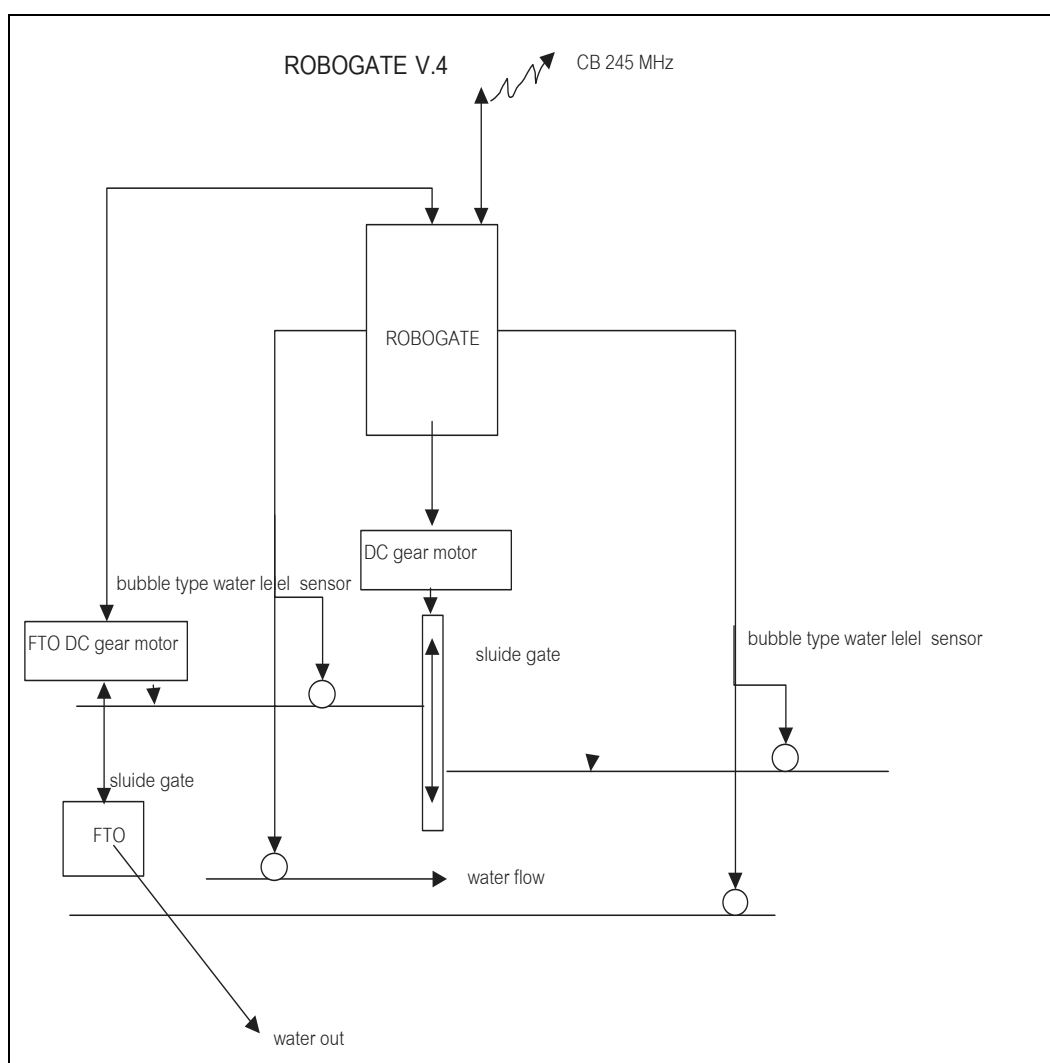
ภาพผนวกที่ ก3ผังรายละเอียด Canal Automation Interface

1.4 ประตูนยนต์ (Robogate) วราวุธ และวิษญ์ (2546, 2547, 2548) พัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมระดับน้ำหน้าประตูระบายน้ำให้อยู่ที่ FSL(Full Supply Level) ทำงานด้วยชุดคำสั่งที่เขียนขึ้นเอง ควบคุมการปรับประตูระบายน้ำด้วย DC เกียร์มอเตอร์ (ภาพผนวกที่ ก4) และส่งข้อมูลระดับน้ำและระยะเปิดประตูให้สถานีควบคุมหลัก

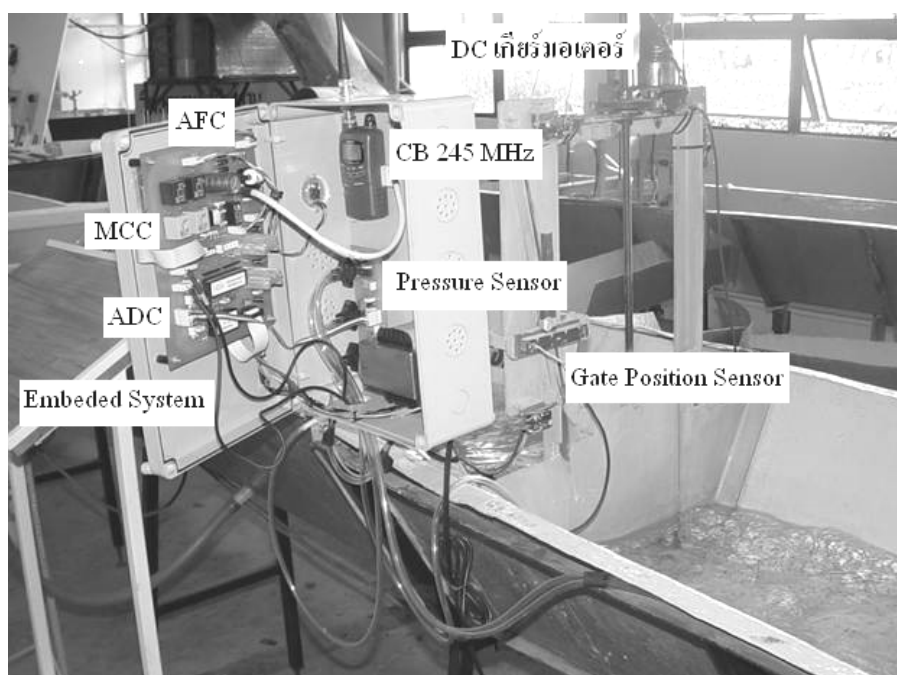


ภาพผนวกที่ ก4 DC เกียร์มอเตอร์สำหรับเปิด – ปิด ประตูระบายน้ำ

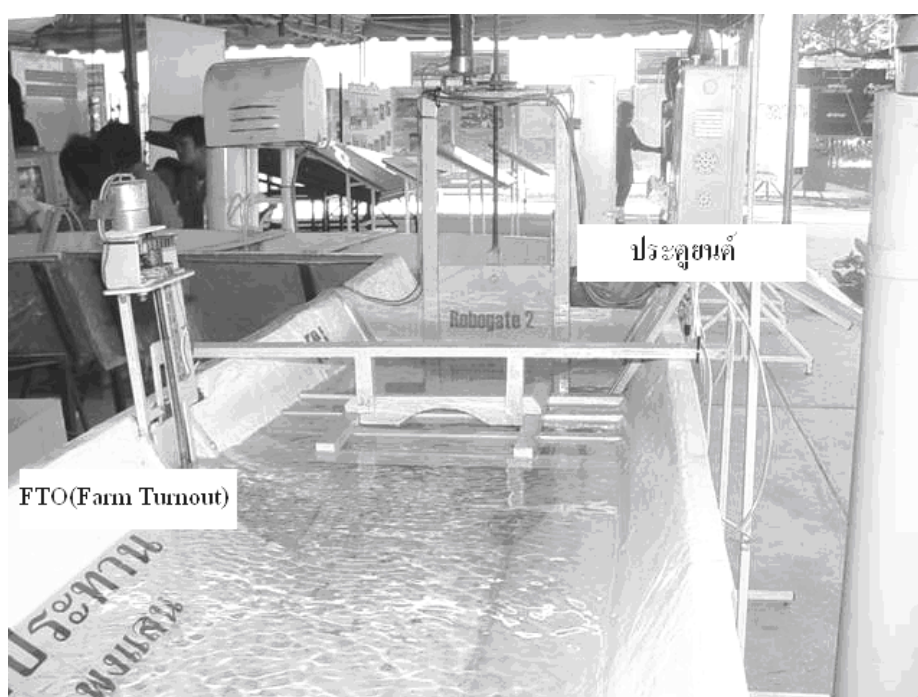
แบบจำลองคลองอัตโนมัติติดตั้งประตูนยนต์ (Robogate) รุ่น 4.0 ในภาพผนวกที่ ก5 -ก7 ซึ่งพัฒนาต่อจากรุ่น 3.0 จำนวน 4 ตัว ทำหน้าที่ควบคุมน้ำระดับน้ำในคลองส่งน้ำจำลอง ส่วนประกอบหลักของประตูนยนต์ ประกอบไปด้วย ประตูระบายน้ำขนาดกว้าง 15 ซม. กล้องระบบควบคุม ซึ่งประกอบด้วย Embedded System ที่ใช้ชิพชนิด 14 bit-core มี ADC(Analog to Digital Converter) พอร์ต MCC (Motor Control Circuit) 2 พอร์ต พร้อม Sensor วัดระดับน้ำแบบวัดความดันน้ำ (Pressure Transducer) และวิทยุสื่อสารย่าน CB (Citizen Band) กำลังส่ง 0.5 วัตต์ จำนวน 1 เครื่อง สำหรับสื่อสารข้อมูลกับสถานีควบคุมหลัก (Master Station)



ภาพผนวกที่ ก5 ประตูนันที่ 4



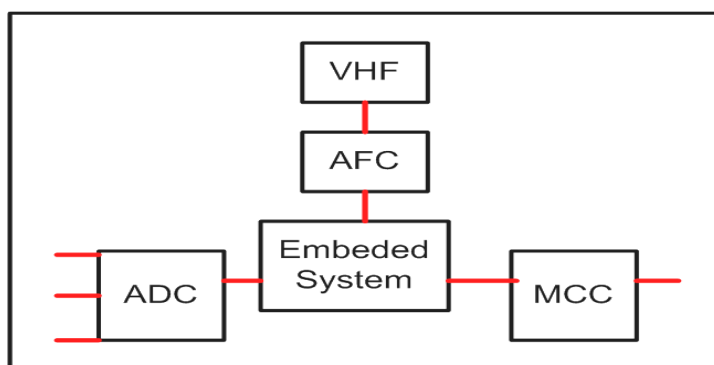
ภาพผนวกที่ ก6 ภายในประตุน้ำรุ่นที่ 4



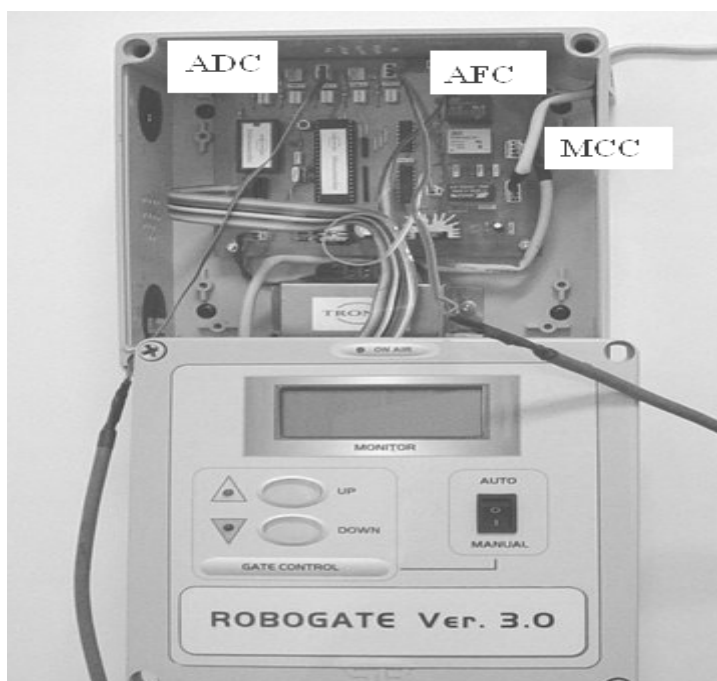
ภาพผนวกที่ ก7 ประตูน้ำรุ่น 4.0 ขณะทดลอง



1.5 ประตูนต์ (Robogate) รุ่น 3.0 จำนวน 1 ตัว เพื่อควบคุมการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำเข้าสู่คลองส่งน้ำจำลอง ประตูนต์รุ่น 3 ใช้ระบบควบคุมแบบ Embedded System แบบ 14 bit-core มี ADC 3 พอร์ต และ MCC 1 พอร์ต ประตูนต์รุ่น 3.0 จะมี Analog to Frequency Converter (AFC) เพื่อเชื่อมต่อกับวิทยุสื่อสารย่าน CB ซึ่งวิทยุสื่อสารเครื่องนี้จะใช้งานร่วมกันกับระบบโทรมาตรรุ่น 3.0 ที่สถานีลูกข่าย (Remote Terminal Unit หรือ RTU) ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก8 - ก9

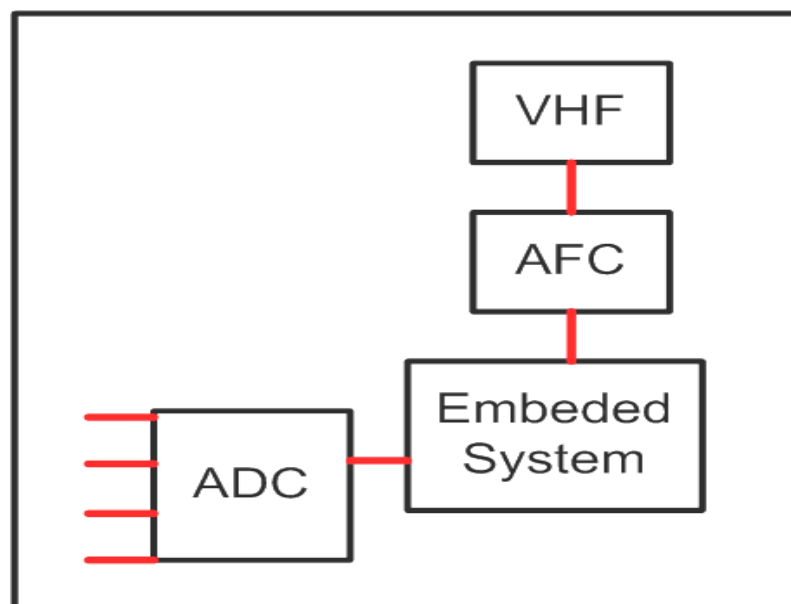


ภาพผนวกที่ ก8 รายละเอียดผังระบบควบคุมประตูนต์รุ่น 3.0



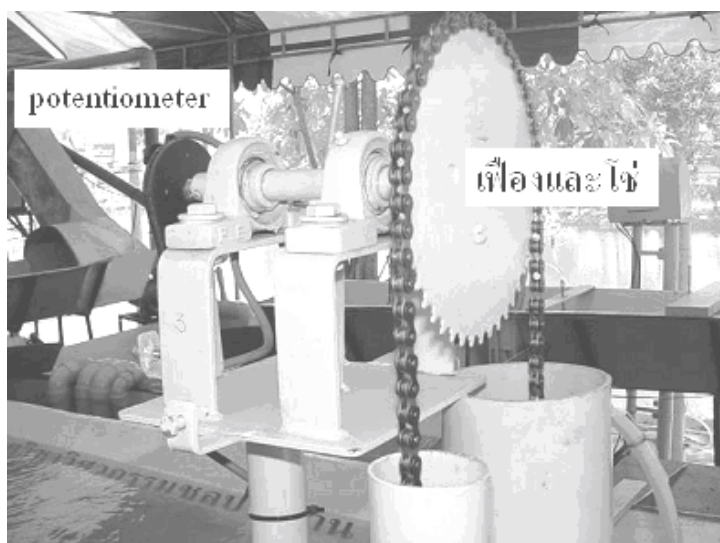
ภาพผนวกที่ ก9 รายละเอียดภายในประตูนต์รุ่น 3.0

1.6 ระบบโทรมาตร (Telemetry) รุ่น 3.0 จำนวน 2 ชุด ระบบโทรมาตรรุ่นนี้ใช้ระบบควบคุมแบบ Embedded System แบบ 14 bit-core มี ADC 4 พอร์ต ดังภาพผนวกที่ ก10 ซึ่งรองรับ Sensor วัดระดับน้ำแบบลูกลอย 4 ตัว ระบบโทรมาตรรุ่นนี้จะมี AFC เพื่อต่อกับวิทยุสื่อสารย่าน CB



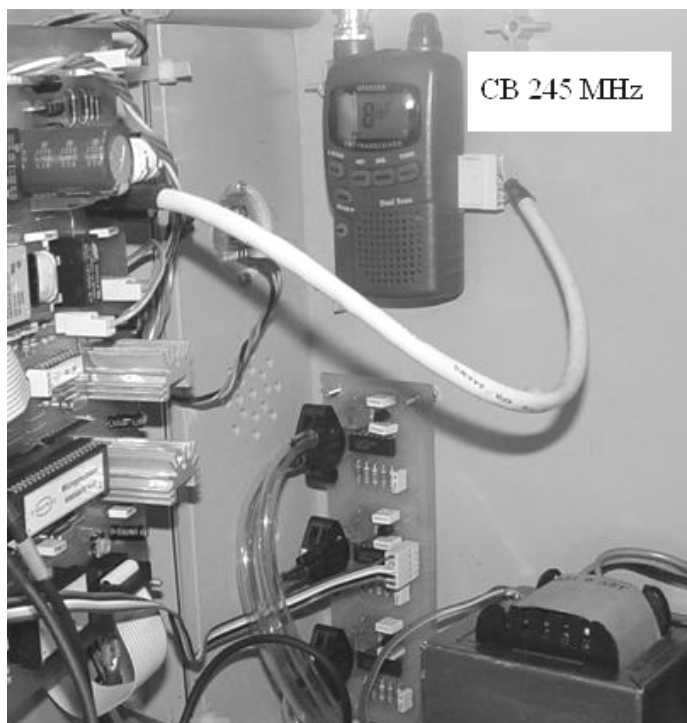
ภาพผนวกที่ ก10 รายละเอียดผังระบบโทรมาตร 3.0

1.7 Sensor วัดระดับน้ำแบบลูกลอย ซึ่งใช้ Potentiometer ขนาด  $10\text{ K}\Omega$  เชื่อมต่อกับ แกนเพลลา ซึ่งปลายอีกด้านหนึ่งของแกนเพลลาจะมีเฟืองสำหรับคล้องโซ่ ซึ่งต่อไปยังลูกลอยอีกทีหนึ่ง ดังภาพผนวกที่ ก11 ในแบบจำลองระบบคลองอัตโนมัติ ประกอบด้วย Sensor จำนวน 5 ชุด



ภาพผนวกที่ ก11 ระบบเฟืองและโซ่ซึ่งเชื่อมต่อลูกลอยกับ Potentiometer

1.8 วิทูลสื่อสาร ย่าน CB (Citizen Band) (ภาพผนวกที่ ก12) กำลังส่ง 0.5 วัตต์ จำนวน 6 ตัว เพื่อใช้สื่อสารระหว่างสถานีควบคุมหลัก (Master Station) กับ ประตูนยนต์และระบบโทรมาตร



ภาพผนวกที่ ก12 วิทูลสื่อสาร ย่าน CB(Citizen Band) 245 MHz

1.9 ขั้นตอนการ Operate ระบบคลองอัตโนมัติ การ Operate ระบบคลองอัตโนมัติ มีขั้นตอนที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.9.1 เปิดสวิตช์สถานีลูกข่าย (Remote Terminal Unit) ประตุนต์และระบบโทรมาตร ตั้งประตุนต์ที่โหมดควบคุมด้วยมือ (Manual) เปิดสวิตช์สถานีหลัก (Master Station) และเปิดคอมพิวเตอร์

1.9.2 Run โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สถานีหลัก เข้าสู่โหมด Manual โปรแกรมควบคุมระบบคลองอัตโนมัติสามารถเลือกโหมดการทำงานได้ 4 โหมดคือ โหมด 0 (Telemetry) สามารถเรียกข้อมูล  $G_0$  (Gate Opening) ของ FTO และ Robogate 4 โหมด 1 (Auto) ตั้งประตุนต์รุ่น 4.0 ให้ทำงานในโหมด Auto เพื่อรักษาระดับน้ำหน้าบานประตู ตามหลักการควบคุมแบบระดับน้ำ (Water Level) หรือ แบบ Volume Control โหมด 2 ว่าง (ยังไม่ได้โปรแกรม) โหมด 3 (Remote Control) ตั้งปรับบานประตุนต์ และ FTO โดยการกด Adjustment ป้อน  $Q_{FTO}$  (อัตราการระบายน้ำผ่านท่อส่งน้ำเข้าบาน) โปรแกรมจะคำนวณหา  $G_0$  (Gate Opening) ให้อัตโนมัติ กดปุ่ม Adjustment เพื่อส่งคำสั่งควบคุมให้ประตุนต์ทุกตัว

1.9.3 เปิดเครื่องสูบน้ำในครั้งแรกระบบจะทำงานในโหมด Manual แต่สามารถปรับเป็นระบบอัตโนมัติได้ทันทีที่ระดับน้ำเข้าใกล้ระดับเป้าหมายที่ตั้งไว้ โดยการปรับสวิตช์บนประตุนต์ หรือปรับโหมดในโปรแกรมควบคุมประตุนต์มาที่โหมด 1 (Auto Mode)

1.9.4 การตรวจสอบข้อมูลระดับน้ำและการเปิดบาน หลังจากเริ่ม Operate ทำได้โดยดูข้อมูลประตุนต์ในคลอง และ FTO โดยการเปลี่ยนเป็นโหมด 0 แล้วกด Adjustment ดูข้อมูลประตุนต์รุ่นที่ควบคุมการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำ (Reservoir) โดยการกด Gate Check กด Auto ระบบการทำงานจะตรวจวัดระดับน้ำทุก 30 วินาที

**ภาคผนวก ข**

อุปกรณ์คลองอัตโนมัติกำแพงแสน

## 2. อุปกรณ์คลองอัตโนมัติกำแพงแสน

การออกแบบอุปกรณ์เลือกวัสดุใช้งานที่ซื้อได้ภายในประเทศ ระหว่างใช้งานถ้าอุปกรณ์ชำรุดเสียหายสามารถซื้ออะไหล่ทดแทนได้ทันที การออกแบบอุปกรณ์ประกอบด้วย

2.1 RTU(remote terminal unit) ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์ควบคุมระดับน้ำภายในคลองส่งน้ำ (robogate) สามารถ รับ-ส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ CB 245 MHz โดยใช้ประตุนต์รุ่น 5 (robogate ver.5) ที่พัฒนาแทนประตุนต์รุ่นที่ 4 ใช้ Chip 2 ตัวช่วยกันทำงาน สื่อสารด้วยระบบวิทยุสื่อสารย่าน CB 245 MHz กำลังส่งออกอากาศ 0.5W. ใช้สายนำสัญญาณ 50 โอห์มร่วมกับสายอากาศแบบ Yagi 5E ติดตั้งบนเสาสูง 6 เมตร ภายใน robogate v.5 ใช้ Chip ตัวแรกทำหน้าที่แปลงข้อมูลการตรวจวัดของ Sensor เป็นดิจิทัล และควบคุมการปรับบานประตูระบายน้ำด้วย DC Gear Motor ส่วนตัวที่สองใช้สำหรับควบคุมการสื่อสารผ่านระบบวิทยุ CB ปรับการทำงานได้ทั้งโหมด Auto และ Manual ใช้พลังงานไฟฟ้าภายในมหาวิทยาลัย และบริเวณที่ไม่มีไฟฟ้าใช้แบตเตอรี่รถยนต์ 12 V 55 A. และใช้ Solar Cell ชาร์จแบตเตอรี่

2.1.1 การทำงานของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ภาษาระดับสูง (basic) เขียนควบคุมให้ทำงานตามต้องการโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวแรก ทำหน้าที่รับและแปลงสัญญาณตรวจวัดแบบ ADC (analog-to-digital converter) ของระดับน้ำหน้า-ท้ายประตูระบายน้ำจาก sensor ชนิด potentiometer ที่ต่อกับเฟืองโซ่เบอร์ 25 และลูกกลอย การตรวจวัดระยะเปิดบานประตูระบายน้ำใช้ sensor แบบเดียวกันต่อกับแกนเครื่องกว้านบาน ใช้ IC เบอร์ DS1307 เป็นฐานเวลาจริงเพื่อกำหนดระยะเวลาทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้ IC เบอร์ 24LC128 เป็น data logger สํารองข้อมูลภายในเครื่องเฉพาะกรณีฉุกเฉินแม้ขาดไฟก็ยังคงเก็บข้อมูลไว้เพราะเวลาปกติเครื่องจะส่งข้อมูลให้แม่ข่ายทุก ½ ชม. มีสวิทช์เลือกโหมดการทำงานแบบ auto หรือ manual สวิทช์และรีเลย์เปิด-ปิดประตูระบายน้ำได้ 2 บาน ใช้ LCD 4 บรรทัด 20 ตัวอักษร แสดงผลการตรวจวัดระดับน้ำมีหน่วยเป็น เมตร รทก. ระยะเปิดประตูมีหน่วยเป็น เมตร แสดงเวลาจริงของเครื่อง แสดงโหมดการทำงานของเครื่องขณะนั้น

2.1.2 การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่สองคือทำหน้าที่ รับ-ส่งข้อมูลการตรวจวัด ข้อมูลพักไว้ที่หน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อรอส่งข้อมูลแบบ DTMF encoder ให้แม่ข่ายผ่านโมด็มของวิทยุรับ-ส่ง และการรับข้อมูลจากวิทยุสื่อสารแม่ข่ายใช้ IC เบอร์ 8870 ทำหน้าที่ DTMF decoder ส่งข้อมูลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่สองรอตรวจหาค่าจะเป็นเลขฐาน

16 ที่มีค่าระหว่าง 0 – F จากนั้นนำมา จัดใหม่เป็นกลุ่มคำสั่งควบคุม หรืออักษรพิเศษแสดงในตารางที่ 5 การคัดแยกช่องความถี่ของ CB radio ใช้ CTCSS (Continuous Tone Coded Squelch System) ช่องที่ 1 (67Hz)

**ตารางผนวกที่ ข1** แสดงค่ารหัสที่ถอดได้จาก IC 8870 และไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่สอง

| Low frequency | High frequency | Hex | binary         |                |                |                | Format  |
|---------------|----------------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|
|               |                |     | D <sub>3</sub> | D <sub>2</sub> | D <sub>1</sub> | D <sub>0</sub> |         |
| 697           | 1209           | 1   | 0              | 0              | 0              | 1              | 1       |
| 697           | 1336           | 2   | 0              | 0              | 1              | 0              | 2       |
| 697           | 1477           | 3   | 0              | 0              | 1              | 1              | 3       |
| 770           | 1209           | 4   | 0              | 1              | 0              | 0              | 4       |
| 770           | 1336           | 5   | 0              | 1              | 0              | 1              | 5       |
| 770           | 1447           | 6   | 0              | 1              | 1              | 0              | 6       |
| 852           | 1209           | 7   | 0              | 1              | 1              | 1              | 7       |
| 852           | 1336           | 8   | 1              | 0              | 0              | 0              | 8       |
| 852           | 1447           | 9   | 1              | 0              | 0              | 1              | 9       |
| 941           | 1336           | 0   | 1              | 0              | 1              | 0              | 0       |
| 941           | 1209           | A   | 1              | 0              | 1              | 1              | stop    |
| 941           | 1477           | B   | 1              | 1              | 0              | 0              | call    |
| 697           | 1633           | C   | 1              | 1              | 0              | 1              | station |
| 770           | 1633           | D   | 1              | 1              | 1              | 0              | end     |
| 852           | 1633           | E   | 1              | 1              | 1              | 1              | :       |
| 941           | 1633           | F   | 0              | 0              | 0              | 0              | .       |

การจัดวางอุปกรณ์ภายใน robogate v.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานร่วมกัน แลกเปลี่ยนข้อมูลไปมาตลอดเวลา มีลักษณะการทำงานแบบระบบฝังตัว (embedded system) วิทยุสื่อสาร ไม่มีการแก้ไขหรือคัดแปลงใด ๆ สามารถปรับเปลี่ยนยี่ห้อหรือรุ่นได้ทั้งกำลังส่งและคลื่นตามที่ได้รับอนุญาตใช้คลื่นความถี่วิทยุจากกรมไปรษณีย์ โดยต้องใช้รุ่นที่สามารถแยกความถี่เสียงได้ดี ตัดคลื่นรบกวนดี ในขั้นแรกนี้เลือกใช้วิทยุสื่อสารความถี่ย่าน CB รุ่นที่มีกำลังส่งออกอากาศน้อยที่สุดเพียงครึ่งวัตต์

2.1.3 การตรวจวัดระดับน้ำ ใช้การทำงานของลูกลอยโดยใช้ potentiometer sensor ต่อพ่วงกับแกนหมุนที่ติดตั้งงานเฟืองโซ่เบอร์ 25 ที่ปลายโซ่ติดตั้งลูกลอยสำหรับวัดระดับน้ำ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันแบบเชิงเส้นกับระดับน้ำที่ตรวจวัดส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวแรก แปลงเป็นดิจิทัล

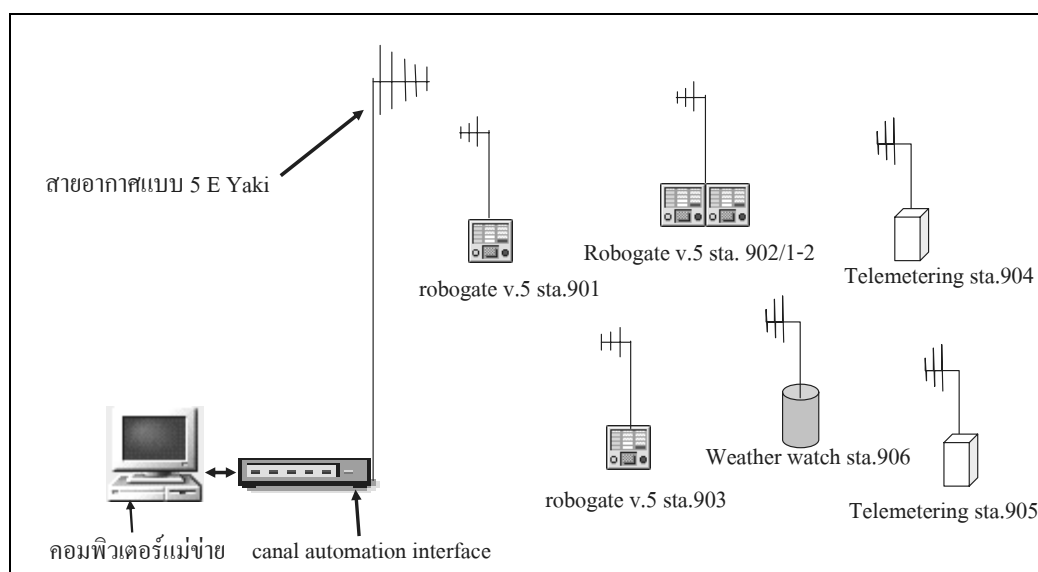
2.1.4 การตรวจวัดระยะการเปิดประตูระบายน้ำ มีหลักการวัดระยะการเคลื่อนที่ของประตูระบายน้ำโดยใช้ potentiometer sensor ต่อพ่วงกับแกนหมุนเครื่องกว้านยกบานประตู แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันแบบเชิงเส้นกับระยะเปิดบานประตูและใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวแรก แปลงสัญญาณเป็นดิจิทัล

2.1.5 การใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ เนื่องจากบริเวณติดตั้ง remote terminal unit ไม่มีกระแสไฟฟ้าต้องใช้ solar cell เปลี่ยนพลังงานแสงแดดเป็นไฟฟ้าอัดประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ โดยเลือกใช้แบตเตอรี่รถยนต์แบบชนิดไม่ต้องเติมน้ำกลั่น ขนาด 12 V. 55Ah การใช้อุปกรณ์ solar cell ที่จ่ายกระแสสูงที่ค่อนข้างมีราคาแพง ในวันที่มีแสงแดดเต็มที่ การแผงโซลาร์เซลล์มีขนาดใหญ่ จ่ายกระแสไฟประจุชาร์จะใช้เวลาประมาณ 4 – 6 ชม. แบตเตอรี่จึงเต็ม robogate สามารถใช้พลังงานได้ต่อเนื่อง 5- 7 วัน รวมการใช้งานเปิด-ปิดประตูระบายน้ำด้วยโดยทั่วไปในวันที่ฝนตกหรือท้องฟ้ามีเมฆมากต่อเนื่องกันจะไม่เกิน 3 – 4 วันจากนั้นท้องฟ้าจะเปิดมีแสงแดดส่องแรงพอสำหรับชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มและใช้งานต่อไปได้อีก

2.2 master station ประกอบด้วย Canal Automation Interface และ PC (personal computer) การทำหน้าที่ของ Canal Automation Interface คือเชื่อมต่อ PC สถานีแม่ข่ายกับ remote terminal unit ผ่านระบบวิทยุสื่อสารย่าน CB 245 MHz กำลังส่ง 0.5W ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 80 ช่องสัญญาณย่อย โดยใช้ระบบ CTSS กำหนดให้การรับส่งข้อมูลใช้ ช่องที่ 1 ที่ 67Hz แบบ Analog เพื่อลดการรบกวนเนื่องจากวิทยุสื่อสารเครื่องอื่นๆ ที่ใช้ความถี่เดียวกันและส่งคลื่นมาในช่วงเวลาเดียวกัน สายอากาศ (antenna) ใช้แบบ 5E Yagi ซึ่งเป็นสายอากาศแบบทิศทางลดการรบกวนจากวิทยุสื่อสาร CB เครื่องอื่นที่ใช้ช่องสัญญาณเดียวกัน สำหรับการใช้คือ ความถี่วิทยุย่าน CB 245 MHz นั้นเป็นย่านความถี่ที่เปิดให้ประชาชนทั่วไปได้เข้ามาใช้งาน โดยมีช่องใช้งาน 80 ช่อง ซึ่งมีมากพอควร การใช้งานนั้นต้องใช้ที่จำเป็นเท่านั้น เพื่อคนอื่นๆจะได้ใช้บ้าง ไม่ควรจองช่อง หรือใช้กันทั้งวัน การใช้พยายามลดกำลังส่งออกอากาศให้ต่ำที่สุด เท่าที่จะสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ เพื่อให้สถานีอื่นที่อยู่ในช่องเดียวกันสามารถใช้งานได้พร้อมๆ กันในหลายพื้นที่ เป็นการ reused ความถี่



CB เป็นข่ายสื่อสาร secondary ที่ไม่ได้รับการคุ้มครอง หากไปรบกวนข่ายสื่อสารหลักต้องหยุดใช้งาน การใช้คลื่นวิทยุ CB ของ KPS CAS (ภาพผนวกที่ ข1) มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบใช้งานเท่านั้น การสื่อสารติดต่ออาจขาดช่วงเป็นบางครั้งเนื่องจากการใช้งานของวิทยุ CB เครื่องอื่น ดังนั้น เมื่อการทดลองใช้งานได้รับผลพวงที่จะนำไปใช้งานจริงในโครงการชลประทาน การเลือกใช้คลื่นวิทยุสำหรับการสื่อสารต้องใช้คลื่นวิทยุที่หน่วยงานนั้นได้รับอนุญาตจากกรมไปรษณีย์ฯ แล้วเท่านั้น เช่นกรมชลประทานได้รับอนุญาตใช้คลื่นวิทยุย่าน VHF 139 MHz เป็นต้น



ภาพผนวกที่ ข1 หลักการทำงานของสถานีแม่ข่ายและการใช้งานคลื่นวิทยุ CB 245 MHz

2.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมระบบคลองอัตโนมัติ ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมระบบ Canal Automation โดยตั้งชื่อว่า KPS CAS มีโปรแกรมย่อยส่งข้อมูลผ่านระบบ internet ของเครือข่าย pirun server ซอฟต์แวร์โดยรวมของระบบคลองอัตโนมัติแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

2.3.1 ซอฟต์แวร์ควบคุมประตุน้ำ ซึ่งกำหนดให้อ่านข้อมูลระดับน้ำทางด้านเหนือหน้าท้ายน้ำและขนาดการเปิดบานแบบตลอดเวลา ทุกๆ 0.5 วินาที

2.3.2 ซอฟต์แวร์ที่คอมพิวเตอร์แม่ข่าย ซึ่งจะเรียกข้อมูลจากประตุน้ำ หรือ RTU แบบอัตโนมัติทุก 30 นาที แล้วเก็บบันทึกข้อมูล ลงใน Hard disk ใอย่างใดก็ตาม Operator สามารถเรียกดูข้อมูลแบบ Real Time ของแต่ละสถานีได้ตลอดเวลา ซอฟต์แวร์ที่คอมพิวเตอร์แม่ข่ายสามารถแสดงผลได้ 3 ลักษณะ คือ

ก. ข้อมูลระดับน้ำ ขนาดการเปิดบานและ อัตราการไหลของน้ำผ่าน ประตู ของแต่ละสถานีการคำนวณปริมาณน้ำในบ่อ 1 ปริมาณน้ำไหลผ่านประตูระบายน้ำสถานี 901 สถานี 902/1 – 2 และสถานี 903

ข.ฐานข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้ใน data logger

ค. กราฟระดับน้ำ ขนาดการเปิดบานและ อัตราการไหลของน้ำผ่าน ประตู ของแต่ละสถานี ดูรายละเอียดการแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

**ภาคผนวก ค**  
**อุปกรณ์คลองอัตโนมัติสองพี่น้อง**

### 3. อุปกรณ์คลองอัตโนมัติสองพี่น้อง

แนวความคิดการออกแบบ SPN CAS ใกล้เคียงกับระบบคลองอัตโนมัติกำแพงแสน ลักษณะที่ต่างกันคือมีขนาดคลองที่ใหญ่กว่าปริมาณน้ำไหลในคลองมากกว่า ระยะทางระหว่าง master station กับ rtu (remote terminal unit) ประมาณ 4 – 30 กิโลเมตร ใช้คลื่นวิทยุ VHF ย่านความถี่ 139 MHz ซึ่งกรมชลประทานได้รับอนุญาตใช้จากกรมไปรษณีย์ การนำเสนอข้อมูลผ่าน internet เลือกใช้การสื่อสารผ่านดาวเทียม ipSTAR รองรับผู้ใช้งาน internet ความเร็วสูงครอบคลุมการใช้งานได้ทั่วประเทศ เจ้าหน้าที่ ภายในโครงการฯ สามารถร่วมใช้งาน internet และ IP-Phone พร้อมกันได้ ช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย การออกแบบอุปกรณ์ เลือกวัสดุใช้งานที่ซื้อได้ภายในประเทศ ระหว่างใช้งานถ้าอุปกรณ์ชำรุดเสียหายสามารถซื้ออะไหล่ทดแทนได้ทันที การออกแบบอุปกรณ์แบ่งได้ 3 ชนิด คือ

3.1 remote terminal unit ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์ควบคุมระดับน้ำภายในคลองส่งน้ำ (robogate) สามารถ รับ-ส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุโดยใช้โปรต็อกคัลรุ่น 5 (robogate ver.5) ซึ่งพัฒนาขึ้นในช่วงปี 2549 เพื่อใช้งานที่ระบบคลองอัตโนมัติของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สื่อสารด้วยระบบวิทยุสื่อสาร VHF 139 MHz กำลังส่งออกอากาศ 5W. ใช้สายอากาศแบบยาคิ (Yaki) แบบ 5E ติดตั้งสูง 9 เมตร ภายใน robogate v.5 ใช้ Chip 2 ตัวช่วยกันทำงาน ตัวแรกทำหน้าที่ในการตรวจวัดของ Sensor และควบคุม DC Gear Motor ส่วนตัวที่สองใช้สำหรับควบคุมการสื่อสารผ่านระบบวิทยุ VHF ปรับการทำงานได้ทั้งโหมด Auto และ Manual ใช้ แบตเตอรี่ 12 V การชาร์จแบตเตอรี่โดยใช้ Solar Cell การแสดงผลตรวจวัดระดับน้ำมีหน่วยเป็น รทก. ระยะเปิดบานประตูระบายน้ำมีหน่วยเป็นเมตร การทำงานของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งสองเป็นอิสระต่อกัน ใช้ภาษาระดับสูงคือภาษาเบสิกเขียนควบคุมให้ทำงานตามต้องการ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวแรกทำหน้าที่รับและแปลงสัญญาณตรวจวัดแบบ ADC(analog-to-digital converter) ของระดับน้ำหน้าท้ายประตูระบายน้ำจาก sensor ชนิด potentiometer ที่ต่อกับเฟืองโซ่เบอร์ 25 และลูกกลอย การตรวจวัดระยะเปิดบานประตูระบายน้ำใช้ sensor แบบเดียวกันต่อกับแกนเครื่องกว้านบาน ใช้ IC เบอร์ DS1307 เป็นฐานเวลาจริงเพื่อกำหนดระยะเวลาทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้ IC เบอร์ 24LC128 เป็น data logger สํารองข้อมูลภายในเครื่องเฉพาะกรณีฉุกเฉินแม้ขั้วเกิดขัดข้อง มีสวิทช์เลือกโหมดการทำงานแบบ auto หรือ manual สวิทช์และรีเลย์เปิด-ปิดประตูระบายน้ำ ได้ 2 บาน

3.1.1 การตรวจวัดระดับน้ำใช้ potentiometer sensor ต่อพ่วงกับแกนหมุนที่ติดตั้งงานเฟืองโซ่เบอร์ 25 ที่ปลายโซ่ติดตั้งลูกกลอยสำหรับวัดระดับน้ำ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันแบบเชิง

เส้นกับระดับน้ำที่ตรวจวัดส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวแรกแปลงเป็นดิจิทัล โดยติดตั้ง Sensor วัดระดับน้ำแบบใช้ลูกลอยในตู้เหล็ก

3.1.2 การตรวจวัดระยะการเปิดประตูระบายน้ำใช้ potentiometer sensor ต่อพ่วงกับ แกนหมุนเครื่องกังหันขบายนประตูแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันแบบเชิงเส้นกับระยะเปิดบานประตู และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวแรกแปลงสัญญาณเป็นดิจิทัลแสดง

3.1.3 การใช้พลังงานจากแสงแดด เนื่องจากบริเวณติดตั้ง remote terminal unit ไม่มี กระแสไฟฟ้าต้องใช้ solar cell เปลี่ยนพลังงานแสงแดดเป็นไฟฟ้าชาร์จแบตเตอรี่ โดยเลือกใช้ แบตเตอรี่รถยนต์แบบไม่ต้องเติมน้ำกลั่น ขนาด 12 V. 55Ah

3.2 master station ประกอบด้วย Canal Automation Interface และ PC (personal computer) การทำหน้าที่ของ Canal Automation Interface คือเชื่อมต่อ PC สถานีแม่ข่ายกับ remote terminal unit ผ่านระบบวิทยุสื่อสารย่าน VHF โดยใช้ความถี่ 139.00MHz ของกรมชลประทาน ซึ่งสามารถ แบ่งออกได้เป็น 50 ช่องสัญญาณย่อย โดยใช้ระบบ CTSS (Continuous Tone Coded Squelch System) กำหนดให้การรับส่งข้อมูลใช้ ช่องที่ 1 ที่ 67Hz แบบ Analog เพื่อลดการรบกวน เนื่องจากวิทยุสื่อสาร เครื่องอื่นๆ ที่ใช้ความถี่เดียวกันและส่งคลื่นมาในช่วงเวลาเดียวกัน วิทยุสื่อสารที่ใช้ที่โครงการส่งน้ำ และบำรุงรักษาสองพี่น้องเป็นวิทยุสื่อสารกำลังส่ง 5W. สายอากาศ (antenna) ที่แม่ข่ายถูกออกแบบ เป็นแบบ Folded Dipole 4 Steks โดยติดตั้งที่เสาอากาศ (tower) เดิมของโครงการ นอกจากนี้ Canal Automation Interface ภาพที่ 148 การจัดวางอุปกรณ์ภายใน Canal Automation Interface

3.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมระบบคลองอัตโนมัติ เขียนชุดคำสั่งควบคุมระบบ Canal Automation โดยตั้งชื่อว่า SPN CAS ซึ่งมีโปรแกรมย่อยแสดงผลข้อมูลเป็นกราฟระดับน้ำ ปริมาณ น้ำ ระยะเปิดประตูระบายน้ำ ย้อนหลัง 1 วัน 7 วัน 1 เดือน และของข้อมูลทั้งหมด มีโปรแกรมย่อย ส่งข้อมูลผ่านดาวเทียม ipSTAR ซอฟต์แวร์โดยรวมของระบบคลองอัตโนมัติแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

3.3.1 ซอฟต์แวร์ควบคุมประตูยนต์ ซึ่งกำหนดให้อ่านข้อมูลระดับน้ำทางด้านเหนือ น้ำ ทำน้ำและขนาดการเปิดบานประตูระบายน้ำแบบตลอดเวลา สามารถรับคำสั่งปรับบานประตูใน ระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุ

3.3.2 ซอฟต์แวร์ที่คอมพิวเตอร์แม่ข่าย ซึ่งจะเรียกข้อมูลจากประตูยนต์ หรือ RTU แบบอัตโนมัติทุก 30 นาที แล้วเก็บบันทึกข้อมูลในภาพแบบฐานข้อมูล Access ลงใน Harddisk และ Operator สามารถเรียกดูข้อมูลแบบ Real Time ของแต่ละสถานีได้ตลอดเวลา ซอฟต์แวร์ที่คอมพิวเตอร์แม่ข่ายสามารถแสดงผลได้ 3 ลักษณะ คือ

ก. ข้อมูลระดับน้ำ ขนาดการเปิดบานและ อัตราการไหลของน้ำผ่าน ประตู. ของแต่ละสถานี

ข. ฐานข้อมูลที่ถูกรวบรวมไว้ใน data logger

ค. กราฟระดับน้ำ ขนาดการเปิดบานและ อัตราการไหลของน้ำผ่าน ประตู. ของแต่ละสถานี ดูรายละเอียดการแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้

#### ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบแบบจำลองคลองอัตโนมัติในห้องปฏิบัติการ

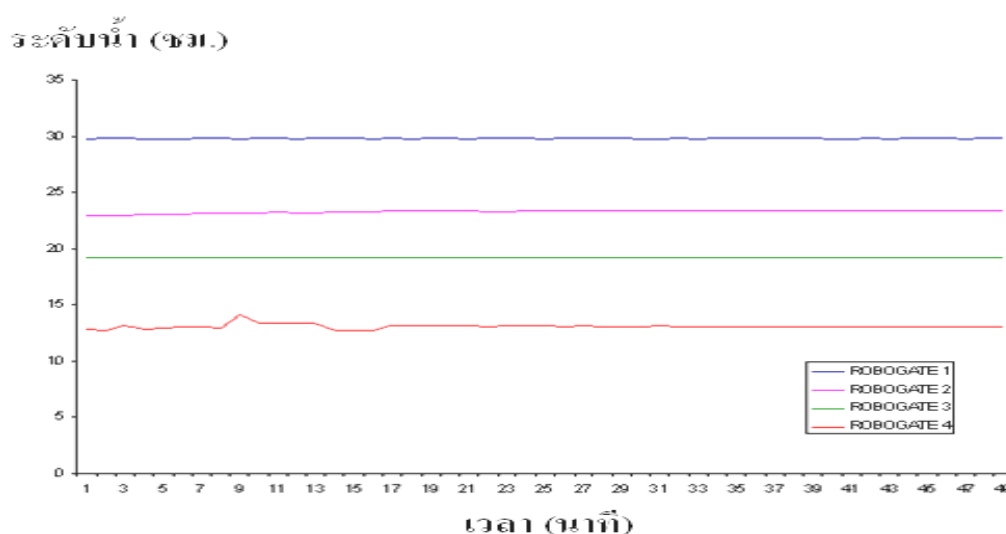
#### 4. ภาพรวมผลการทดสอบแบบจำลองคลองอัตโนมัติในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมน้ำโดยใช้ประตูยนต์ และระบบโทรมาตร ในแบบจำลองระบบคลองอัตโนมัติ ซึ่งติดตั้งที่ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในช่วงเดือนธันวาคม 2548 และ เดือนเมษายน 2549 โดยกำหนดระดับน้ำ ระดับน้ำเป้าหมายหน้าประตูยนต์ (Robogate) ในแบบจำลองคลองในตาราง ภาพผนวกที่ ง1

ตารางผนวกที่ ง1 ระดับน้ำเป้าหมายแบบจำลองคลองอัตโนมัติ

| ตำแหน่ง                | ระดับน้ำ FSL. หน้าประตูยนต์ (ซม.) |
|------------------------|-----------------------------------|
| หน้าประตูยนต์ ตัวที่ 1 | 32                                |
| หน้าประตูยนต์ ตัวที่ 2 | 25                                |
| หน้าประตูยนต์ ตัวที่ 3 | 19                                |
| หน้าประตูยนต์ ตัวที่ 4 | 13                                |

จากภาพผนวกที่ ก1 ถึงภาพผนวกที่ ก9 แสดงว่าประตูยนต์ทั้ง 4 ตัว ในแบบจำลองสามารถควบคุมระดับน้ำในระดับที่น่าพอใจ สภาวะการเปลี่ยนแปลงการใช้น้ำในคลองจำลองเนื่องจากการทดลองโดยปิด-เปิดบานประตู FTO. ประตูยนต์สามารถปรับระดับน้ำเข้าสู่สภาวะ Steady State ได้อย่างรวดเร็ว

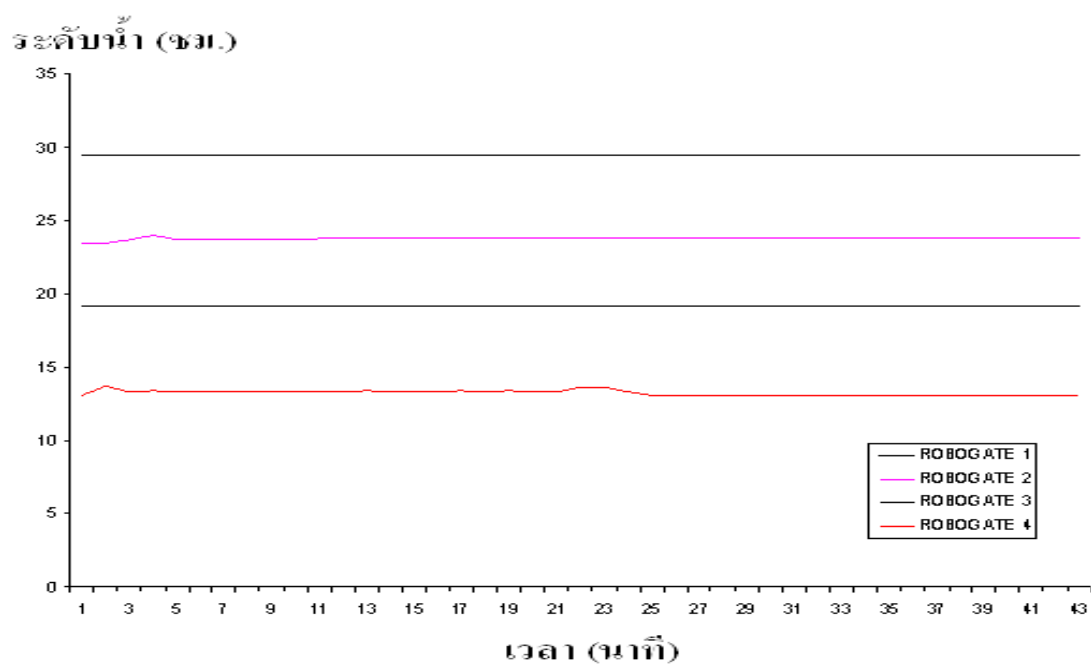


ภาพผนวกที่ ง1 ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากผลการทดสอบแบบจำลองวันที่ 4 ธันวาคม 2548



ตารางผนวกที่ ง2 การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2548

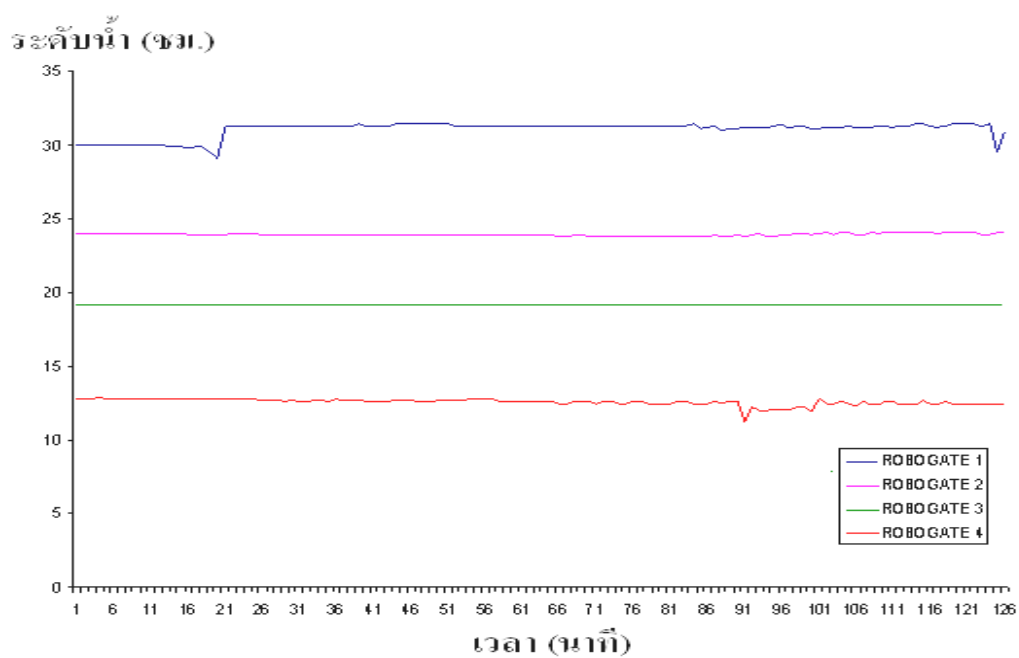
| ประตูยนต์ | ระดับน้ำ<br>สูงสุด<br>(ซม.) | ระดับน้ำ<br>ต่ำสุด<br>(ซม.) | ระดับน้ำ<br>เฉลี่ย<br>(ซม.) | FSL.<br>(ซม.) | ค่าเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน<br>(ซม.) | เปอร์เซ็นต์<br>ความคลาด<br>เคลื่อน |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1         | 29.8                        | 29.7                        | 29.77                       | 32            | 0.05                             | 6.97                               |
| 2         | 23.4                        | 22.9                        | 23.22                       | 25            | 0.13                             | 7.12                               |
| 3         | 19.2                        | 19.2                        | 19.2                        | 19            | 0                                | 1.05                               |
| 4         | 14.2                        | 12.7                        | 13.05                       | 13            | 0.23                             | 0.38                               |



ภาพผนวกที่ ง2 ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากการทดสอบแบบจำลองวันที่ 5 ธันวาคม 2548

ตารางผนวกที่ ง3 การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 5 ธันวาคม 2548

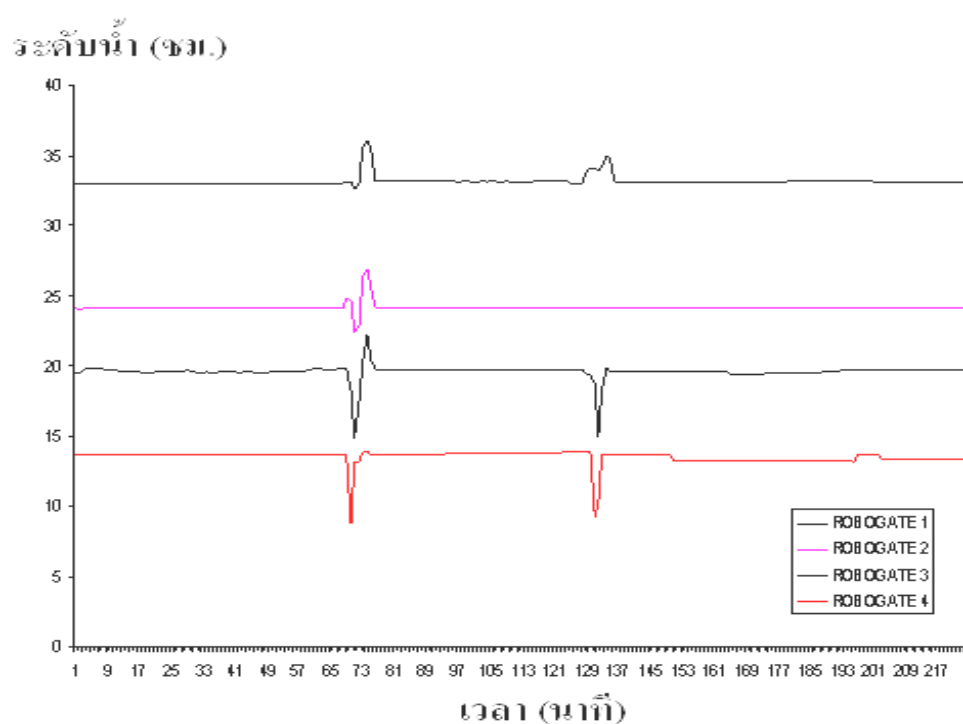
| ประตู<br>ยนต์ | ระดับน้ำ<br>สูงสุด (ซม.) | ระดับน้ำ<br>ต่ำสุด (ซม.) | ระดับน้ำเฉลี่ย<br>(ซม.) | FSL.<br>(ซม.) | ค่าเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน<br>(ซม.) | เปอร์เซ็นต์<br>ความคลาด<br>เคลื่อน |
|---------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1             | 29.5                     | 29.4                     | 29.42                   | 32            | 0.04                             | 8.06                               |
| 2             | 24                       | 23.5                     | 23.77                   | 25            | 0.08                             | 4.92                               |
| 3             | 19.2                     | 19.2                     | 19.2                    | 19            | 0                                | 1.05                               |
| 4             | 13.7                     | 13.1                     | 13.24                   | 13            | 0.16                             | 1.85                               |



ภาพผนวกที่ ง3 ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากผลการทดสอบแบบจำลองวันที่ 7 ธันวาคม 2548

ตารางผนวกที่ ๔4 การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 7 ธันวาคม 2548

| ประตู<br>ยนต์ | ระดับน้ำ<br>สูงสุด (ซม.) | ระดับน้ำ<br>ต่ำสุด (ซม.) | ระดับน้ำ<br>เฉลี่ย<br>(ซม.) | FSL.<br>(ซม.) | ค่าเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน<br>(ซม.) | เปอร์เซ็นต์<br>ความคลาด<br>เคลื่อน |
|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1             | 31.4                     | 29.1                     | 31.05                       | 32            | 0.54                             | 2.97                               |
| 2             | 24.1                     | 23.8                     | 23.93                       | 25            | 0.09                             | 4.28                               |
| 3             | 19.2                     | 19.2                     | 19.2                        | 19            | 0                                | 1.05                               |
| 4             | 12.9                     | 11.2                     | 12.58                       | 13            | 0.23                             | 3.23                               |

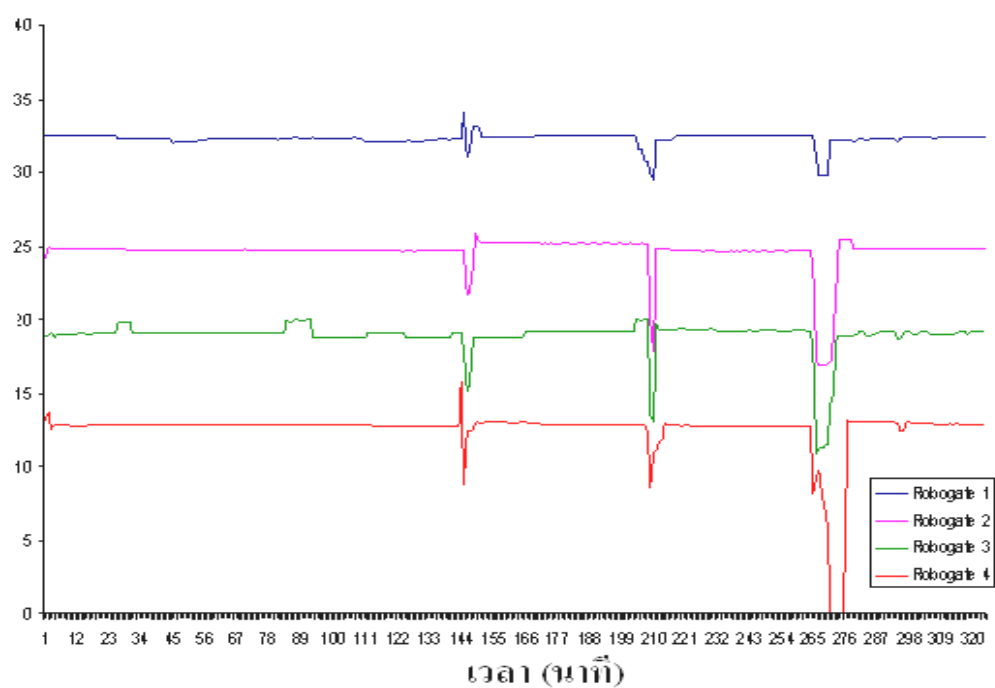


ภาพผนวกที่ ๔4 ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากการทดสอบแบบจำลองวันที่ 25 เมษายน 2549

ตารางผนวกที่ ๕ การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 25 เมษายน 2549

| ประตู<br>ยนต์ | ระดับน้ำ<br>สูงสุด (ซม.) | ระดับน้ำ<br>ต่ำสุด (ซม.) | ระดับน้ำ<br>เฉลี่ย<br>(ซม.) | FSL.<br>(ซม.) | ค่าเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน<br>(ซม.) | เปอร์เซ็นต์<br>ความคลาด<br>เคลื่อน |
|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1             | 36                       | 32.6                     | 33.14                       | 32            | 0.39                             | 3.56                               |
| 2             | 26.9                     | 22.4                     | 24.19                       | 25            | 0.3                              | 3.23                               |
| 3             | 22.2                     | 14.9                     | 19.58                       | 19            | 0.53                             | 3.06                               |
| 4             | 13.9                     | 8.8                      | 13.48                       | 13            | 0.51                             | 3.72                               |

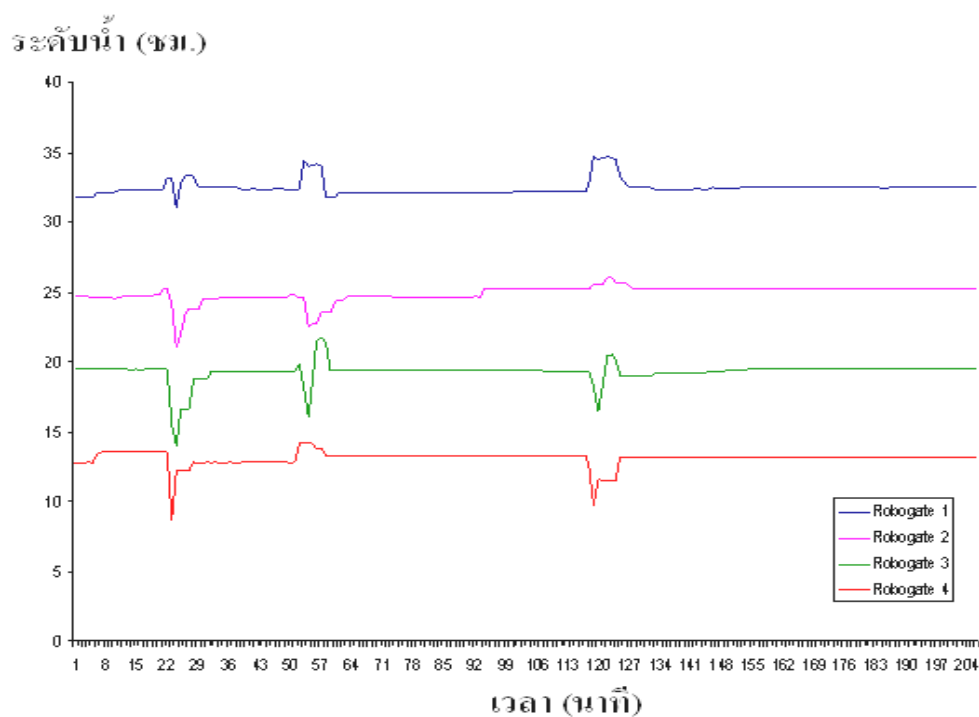
ระดับน้ำ (ซม.)



ภาพผนวกที่ ๕ ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากการทดสอบแบบจำลองวันที่ 26 เมษายน 2549

ตารางผนวกที่ ๖ การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 26 เมษายน 2549

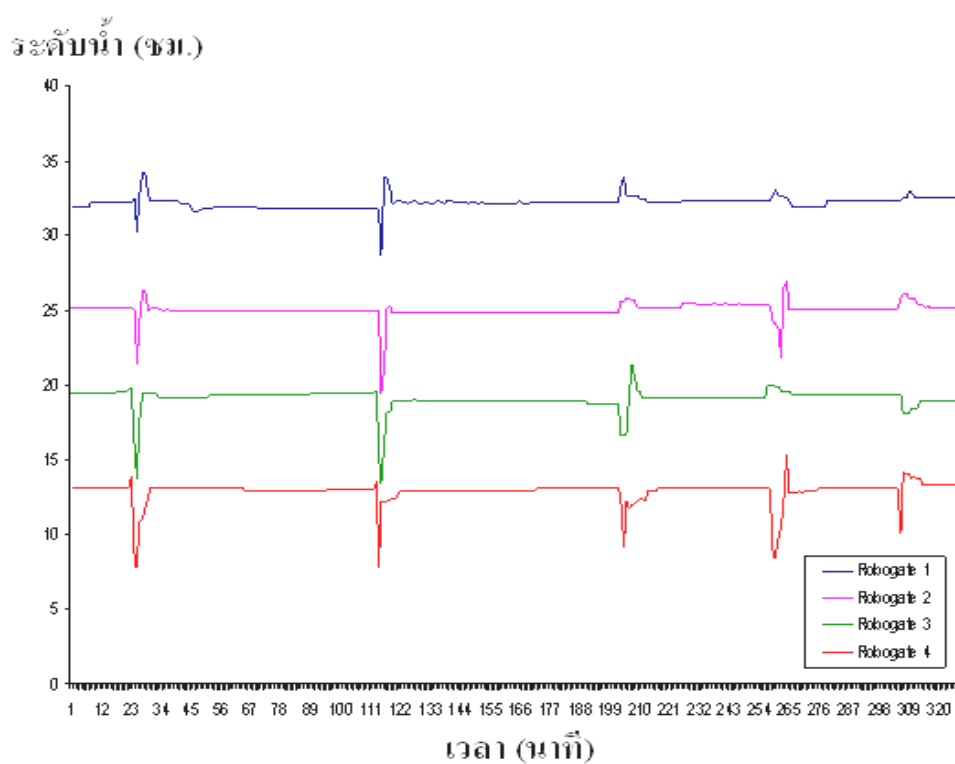
| ประตู<br>ยนต์ | ระดับน้ำ<br>สูงสุด<br>(ซม.) | ระดับน้ำ<br>ต่ำสุด<br>(ซม.) | ระดับน้ำ<br>เฉลี่ย<br>(ซม.) | FSL.<br>(ซม.) | ค่าเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน<br>(ซม.) | เปอร์เซ็นต์<br>ความคลาด<br>เคลื่อน |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1             | 34.1                        | 29.5                        | 32.31                       | 32            | 0.44                             | 0.97                               |
| 2             | 25.8                        | 16.9                        | 24.59                       | 25            | 1.24                             | 1.64                               |
| 3             | 20.1                        | 10.9                        | 18.91                       | 19            | 1.19                             | 0.47                               |
| 4             | 15.8                        | 0                           | 12.46                       | 13            | 1.8                              | 4.15                               |



ภาพผนวกที่ ๖ ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากการทดสอบแบบจำลองวันที่ 27 เมษายน 2549

ตารางผนวกที่ 7 การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 27 เมษายน 2549

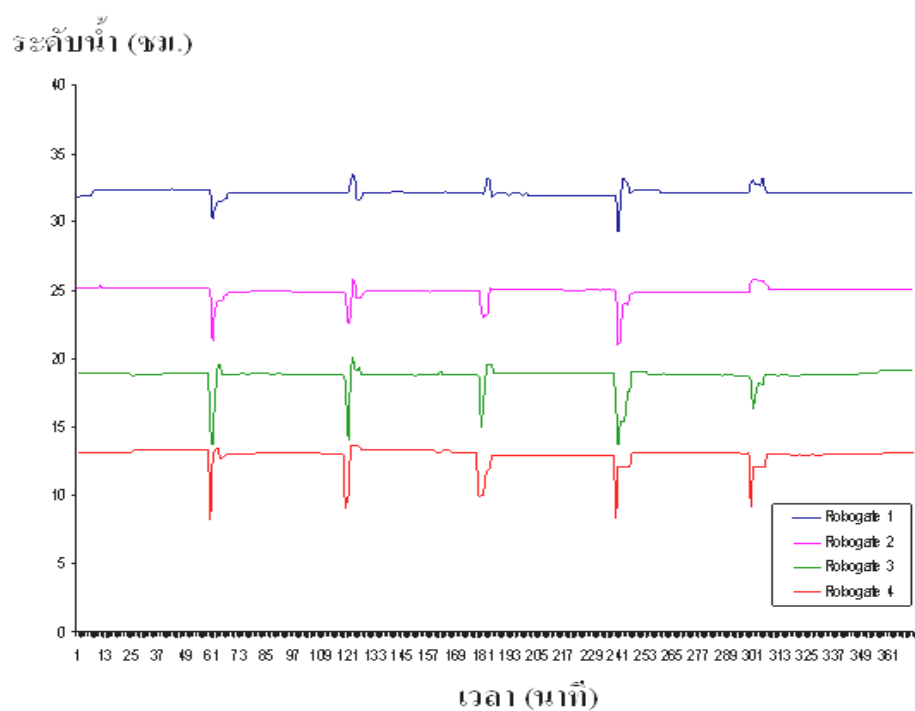
| ประตูลำดับ | ระดับน้ำสูงสุด (ซม.) | ระดับน้ำต่ำสุด (ซม.) | ระดับน้ำเฉลี่ย (ซม.) | FSL. (ซม.) | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ซม.) | เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|---------------------------|----------------------------|
| 1          | 34.7                 | 31.1                 | 32.45                | 32         | 0.54                      | 1.41                       |
| 2          | 26                   | 21.1                 | 24.87                | 25         | 0.59                      | 0.52                       |
| 3          | 21.8                 | 14                   | 19.29                | 19         | 0.74                      | 1.53                       |
| 4          | 14.2                 | 8.7                  | 13.11                | 13         | 0.55                      | 0.85                       |



ภาพผนวกที่ 7 ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากการทดสอบแบบจำลองวันที่ 28 เมษายน 2549

ตารางผนวกที่ ๙8 การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 28 เมษายน 2549

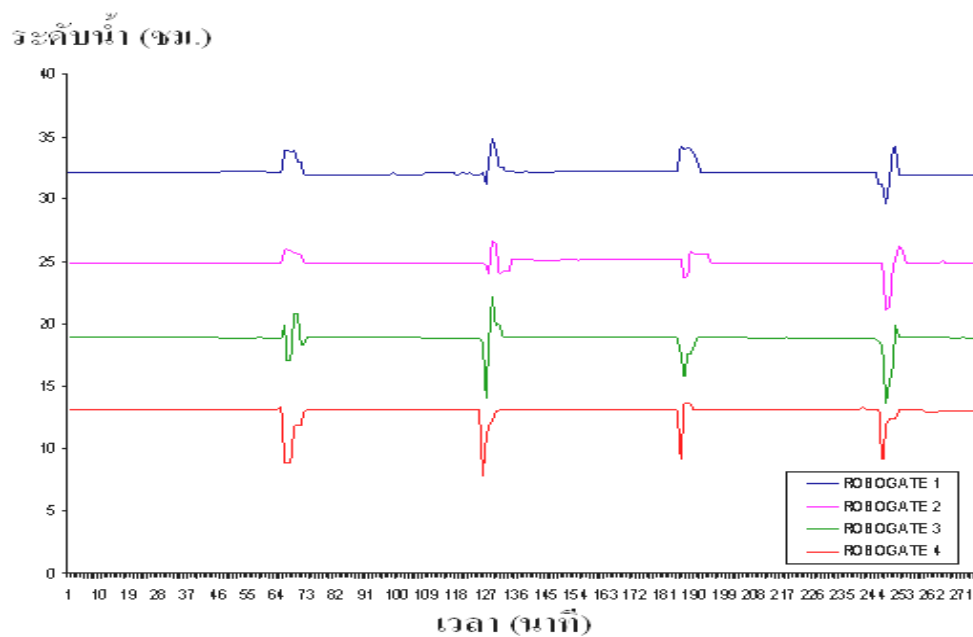
| ประตูลำดับ | ระดับน้ำสูงสุด (ซม.) | ระดับน้ำต่ำสุด (ซม.) | ระดับน้ำเฉลี่ย (ซม.) | FSL. (ซม.) | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ซม.) | เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|---------------------------|----------------------------|
| 1          | 34.3                 | 28.7                 | 32.18                | 32         | 0.41                      | 0.56                       |
| 2          | 26.9                 | 19.4                 | 25.02                | 25         | 0.55                      | 0.08                       |
| 3          | 21.4                 | 13.4                 | 19.08                | 19         | 0.68                      | 0.42                       |
| 4          | 15.3                 | 7.9                  | 12.92                | 13         | 0.77                      | 0.62                       |



ภาพผนวกที่ ๙8 ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากผลการทดสอบแบบจำลองวันที่ 29 เมษายน 2549

ตารางผนวกที่ ๙ การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 29 เมษายน 2549

| ประตูลำดับ | ระดับน้ำสูงสุด (ซม.) | ระดับน้ำต่ำสุด (ซม.) | ระดับน้ำเฉลี่ย (ซม.) | FSL. (ซม.) | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ซม.) | เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|---------------------------|----------------------------|
| 1          | 33.5                 | 29.3                 | 32.13                | 32         | 0.29                      | 0.41                       |
| 2          | 25.8                 | 21                   | 24.95                | 25         | 0.48                      | 0.2                        |
| 3          | 20.1                 | 13.7                 | 18.75                | 19         | 0.69                      | 1.32                       |
| 4          | 13.7                 | 8.2                  | 12.98                | 13         | 0.61                      | 0.15                       |



ภาพผนวกที่ ๙ ระดับน้ำหน้าประตูยนต์จากการทดสอบแบบจำลองวันที่ 30 เมษายน 2549



ตารางผนวกที่ 10 การควบคุมระดับน้ำในแบบจำลองคลองอัตโนมัติวันที่ 30 เมษายน 2549

| ประตูลำ | ระดับน้ำ<br>สูงสุด (ซม.) | ระดับน้ำ<br>ต่ำสุด (ซม.) | ระดับน้ำ<br>เฉลี่ย<br>(ซม.) | FSL.<br>(ซม.) | ค่าเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน<br>(ซม.) | เปอร์เซ็นต์<br>ความคลาด<br>เคลื่อน |
|---------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1       | 34.9                     | 29.6                     | 32.18                       | 32            | 0.48                             | 0.56                               |
| 2       | 26.7                     | 21.1                     | 24.96                       | 25            | 0.44                             | 0.16                               |
| 3       | 22.2                     | 13.6                     | 18.81                       | 19            | 0.65                             | 1                                  |
| 4       | 13.6                     | 7.9                      | 13.01                       | 13            | 0.7                              | 0.08                               |

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

|                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ –นามสกุล                  | นายวิษณุ ศรีวงษา                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด           | วันที่ 18 กันยายน 2506                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| สถานที่เกิด                    | สระบุรี                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| ประวัติการศึกษา                | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ประกาศนียบัตรการชลประทาน (อนุปริญญา)<br/>สาขาวิศวกรรมชลประทาน วิทยาลัยการชลประทาน</li> <li>2. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมชลประทาน<br/>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์</li> <li>3. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรม<br/>ชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์</li> </ol>                                                                                                      |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน   | นายช่างชลประทาน และอาจารย์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน           | วิทยาลัยการชลประทาน อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. รางวัลคุณภาพงานวิจัยระดับชมเชย ปี 2549<br/>สาขาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์<br/>วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม</li> <li>2. รางวัลชมเชยการประกวดนวัตกรรม<br/>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี 2550 เรื่อง " ตู้แช่บ่มน้ำ<br/>เพื่อใช้หาค่า BOD "</li> </ol>                                                                                                               |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ           | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ทุนสนับสนุนงานวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย<br/>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี 2549</li> <li>2. ทุนสนับสนุนงานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์<br/>กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต<br/>กำแพงแสน จ.นครปฐม ปี 2549</li> <li>3. ทุนการศึกษาค่าลงทะเบียน สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรม<br/>ชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปี 2547 - 50</li> <li>4. ทุนอุดหนุนงานวิจัย มก. ปี 2549 - 51</li> </ol> |