



วิทยานิพนธ์

การออกแบบและการสร้างตัวต้นแบบระบบควบคุมระดับของเหลว

Level Control System Prototype Design and Implementation

นายธรณินทร์ พันทา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบและการสร้างตัวต้นแบบระบบควบคุมระดับของเหลว

Level Control System Prototype Design and Implementation

นามผู้วิจัย นายธรณินทร์ พันทา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พีระยศ แสนโกชณ์, D.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์จันทน์ รุ่งเรืองพิทยกุล, D.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ยศวีร์ วีระกำแหง, Ph.D)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงศ์, Ph.D)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบและการสร้างตัวต้นแบบระบบควบคุมระดับของเหลว

Level Control System Prototype Design and Implementation

โดย

นายธรณินทร์ พันทา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อขอความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2551

ธรณินทร์ พันทา 2551: การออกแบบและการสร้างตัวต้นแบบระบบควบคุมระดับของเหลว
ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิระยศ แสนโกชณ์,
D.Sc. 142 หน้า

ในกระบวนการผลิตอาจมีข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากหลายปัจจัย เช่นการควบคุมด้วยผู้ปฏิบัติการ ความเสื่อมสภาพของเครื่องจักร อุปกรณ์ในการตรวจวัด เป็นต้น ดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพ งานวิทยานิพนธ์นี้สนใจที่จะทำการศึกษถึงวิธีการควบคุมเพื่อนำมาแก้ปัญหาในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการค้นคว้าหาวิธีการออกแบบตัวควบคุมระดับของเหลว โดยการหาแบบจำลองของระบบและออกแบบวิธีการควบคุมเพื่อนำไปประยุกต์ให้เข้ากับอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริง

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการหาแบบจำลองระบบของกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง 3 ถึง เพื่อนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการและทำการออกแบบตัวควบคุมฟีดโ เพื่อทดสอบความสามารถของตัวควบคุมจากตัวควบคุม งานวิจัยนี้ทดสอบบนเครื่องคอมพิวเตอร์และบนตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7

Thoranin Panta 2008: Level Control System Prototype Design and Implementation. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Peerayot Sanposh, D.Sc. 142 pages.

In manufacturing process, there are several errors due to human, machine, instrumentation, etc. Therefore, arising problems can be solved by using high efficient controller. This thesis is to study control method to solve manufacturing problem by designing liquid level controller. This work includes finding the system model and design control method in order to applied to the real process.

This thesis proposes a method of finding the model of 2 – tank and 3 – tank level process. In order to analyze the relationship among process variables. Then, the PI controller method is present. To the controller ability this research implement the controller on a personal computer and on microcontroller ARM7.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. พีระยศ แสนโกชณ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา เป็นอย่างสูงที่ให้คำปรึกษาและช่วยชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ รวมถึงการให้ความสนับสนุนงบประมาณในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้ผลงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ธงไชย ศรีนพคุณ รศ.ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ ดร.ชนินทร์ ปัญจพร ผล และอาจารย์กาญจน์พันธุ์ สุขวิชชัย ที่ให้คำปรึกษาและตรวจสอบเพื่อให้คำชี้แนะและชี้ให้เห็นถึงปัญหาเพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขในการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ นิสิตปริญญาโททั้งในห้องปฏิบัติการควบคุมภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในการทำงานวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้าย ต้องขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา เป็นอย่างสูงที่ให้ความสนับสนุนและเป็นที่กำลังใจที่สำคัญซึ่งทำให้การศึกษาระดับปริญญาโทของข้าพเจ้าประสบผลสำเร็จล่วงได้ด้วยดี

ธรณินทร์ พันทา
พฤษภาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	6
อุปกรณ์	6
วิธีการ	6
ผลและวิจารณ์	66
ผล	66
วิจารณ์	77
สรุปและข้อเสนอแนะ	80
สรุป	80
ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	80
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก การใช้งานโปรแกรม LabVIEW 8.2	83
ภาคผนวก ข การใช้งานการ์ด Multi-Function DAQ Module ของบริษัท ADLINK รุ่น PCI-9112 ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW 8.2	90
ภาคผนวก ค การใช้งานโปรแกรม Keil uVision3	100
ภาคผนวก ง การเขียนโปรแกรมภาษา C สำหรับการควบคุมแบบ PI บนตัว ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 สำหรับกระบวนการ 2 ถึง	108
ภาคผนวก จ การเขียนโปรแกรมภาษา C สำหรับการควบคุมแบบ PI บนตัว ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 สำหรับกระบวนการ 3 ถึง	117

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก จ การสร้างกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถึง	128
ภาคผนวก ญ การควบคุม Servo Motor	135
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	139

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลการปรับเปลี่ยนค่า K_p และ K_I กรณีที่ 1 $h_1 > h_2$	39
2	ผลการปรับเปลี่ยนค่า K_p และ K_I กรณีที่ 1 $h_1 > h_2 > h_3$	50
3	วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองกับตัวควบคุมบน โปรแกรม LabVIEW 8.2	77
4	วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองกับตัวควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7	77
5	วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองกับตัวควบคุมบน โปรแกรม LabVIEW 8.2	78
6	วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการระดับที่สร้างขึ้นกับตัวควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7	78

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1	แผนภาพขั้นตอนการดำเนินการ
2	แผนภาพขั้นตอนการหาแบบจำลองของระบบ
3	ภาพรวมการควบคุมกระบวนการระดับ
4	แผนภาพการทำงานของระบบของไหล
5	ความสัมพันธ์อัตราการไหลที่ของเหลวไหลออกจากถังผ่านท่อ
6	ความสัมพันธ์ของระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 2
7	ความสัมพันธ์ของระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 2
8	ความสัมพันธ์ของระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3
9	ความสัมพันธ์ของระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3
10	ความสัมพันธ์ของระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3
11	ความสัมพันธ์ของระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3
12	แผนภาพการออกแบบตัวควบคุม
13	แผนภาพระบบเปิด
14	แผนภาพระบบควบคุมแบบปิดที่มีตัวควบคุมพีไอ
15	แผนภาพการทำงานของโปรแกรม

สารบัญภาพ (ต่อ)

(5)

ภาพที่	หน้า	
16	แผนภาพวิธีการควบคุม	56
17	แผนภาพวิธีการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถัง	57
18	แผนภาพวิธีการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์	58
19	แผนภาพวิธีการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์กับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7	59
20	แผนภาพวิธีการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถัง	61
21	แผนภาพการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์	62
22	แผนภาพวิธีการควบคุมกระบวนการระดับที่สร้างขึ้นกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7	63
23	แผนภาพผลการทดลอง	66
24	การเขียนแบบจำลองของระบบบนโปรแกรม LabVIEW 8.2	67
25	หน้าจอแสดงผลของกระบวนการบนโปรแกรม LabVIEW 8.2	67
26	ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 1 ด้วยการควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2	68
27	ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 2 ด้วยการควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2	68
28	หน้าจอแสดงผลบนโปรแกรม LabVIEW 8.2	69
29	ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 1 ด้วยการควบคุมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7	69
30	ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 2 ด้วยการควบคุมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
31 หน้าจอแสดงผลบนโปรแกรม LabVIEW 8.2	70
32 การเขียนแบบจำลองของระบบบนโปรแกรม LabVIEW 8.2	71
33 หน้าจอแสดงผลของกระบวนการบนโปรแกรม LabVIEW 8.2	71
34 ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 1 ด้วยการควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2	72
35 ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 2 ด้วยการควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2	72
36 ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 3 ด้วยการควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2	73
37 หน้าจอแสดงผลบนโปรแกรม LabVIEW 8.2	73
38 ตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7	74
39 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 กับกระบวนการที่สร้างขึ้น	74
40 ผลการควบคุมระดับของเหลวในถังที่ 1	75
41 ผลการควบคุมระดับของเหลวในถังที่ 3	75
42 การทดลองในกรณีศึกษาที่ 1	76

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$ a $	=	ค่าสัมบูรณ์ของ a
e	=	ค่าผลลัพธ์ของความผิดพลาด
K_p	=	ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน
K_I	=	ค่าอัตราขยายแบบปริพันธ์
$r(\cdot)$	=	ฟังก์ชันของอินพุตอ้างอิง
u	=	ค่าอินพุตของตัวควบคุม
x	=	ค่าสถานะของตัวแปรในระบบ
x_{ss}	=	ค่าสถานะของตัวแปรในระบบที่สถานะคงตัว
$\mathbf{x}$	=	ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ x
$\text{sgn}(\cdot)$	=	ฟังก์ชันแสดงเครื่องหมาย
y	=	ค่าเอาต์พุต
$\frac{\partial f}{\partial x}$	=	Jacobian matrix
Σ	=	ค่าผลรวม

การออกแบบและการสร้างตัวต้นแบบระบบควบคุมระดับของเหลว

Level Control System Prototype Design and Implementation

คำนำ

ลักษณะของกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมทุกประเภทไม่ว่าจะเป็นโรงงานขนาดเล็ก ขนาดกลาง หรือขนาดใหญ่ก็ตาม สิ่งสำคัญที่สุดของผู้ผลิตคือผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ และได้มาตรฐาน ดังนั้นการที่จะได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ และได้มาตรฐานนั้นก็ควรจะต้องมีวิธีการในการควบคุมการผลิตที่ดี โดยเริ่มต้นตั้งแต่การคัดสรรวัตถุดิบ กระบวนการผลิตที่ดี คุณภาพและการใช้วัตถุดิบที่มีให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดและสิ่งสำคัญที่สุดคือของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตก็ควรมีกระบวนการควบคุมในการกำจัดของเสียที่มีประสิทธิภาพก่อนส่งออกสู่ภายนอกเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายนอก

จะเห็นได้ว่าจากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นสิ่งที่มีบทบาทสำคัญของกระบวนการผลิตนั้นคือ กระบวนการควบคุม ซึ่งในการควบคุมนั้นทางผู้ผลิตก็สามารถเลือกได้ว่าควรจะใช้วิธีการใดในการควบคุมการผลิตของตนโดยมีปัจจัยในการเลือกหลักๆคือ ราคาในการลงทุนและประสิทธิภาพในการควบคุม ฯลฯ จะเห็นได้ว่าสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ นั้นย่อมจะมีสมรรถนะมากพอที่จะเลือกใช้ระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดซึ่งต่างจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง และขนาดเล็ก ดังนั้นการควบคุมการผลิตในปัจจุบันนั้นจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้คือ

1. การควบคุมด้วยผู้ปฏิบัติงานเพียงอย่างเดียว (Manual Control)
2. การควบคุมด้วยผู้ปฏิบัติงานและอุปกรณ์ควบคุมแบบอัตโนมัติ (Semi automatic Control)
3. การควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมแบบอัตโนมัติเพียงอย่างเดียว (Automatic Control)

จากวิธีการควบคุมทั้งสามลักษณะนั้นจะเห็นว่าการควบคุมในลักษณะที่สามนั้นจะมีต้นทุนในการติดตั้งระบบที่สูงมากเนื่องจากต้องใช้ทั้งระบบควบคุมกับตัวตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพ และมีความแม่นยำสูง แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของระบบ การควบคุมแบบที่สองนั้นจะมีต้นทุนในการติดตั้งที่รองลงมาเนื่องจากการควบคุมจะมีลักษณะเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติสามารถใช้ผู้

ปฏิบัติการเข้าไปปฏิบัติการได้ในบางบริเวณของกระบวนการผลิต ทำให้การควบคุมลักษณะนี้ส่งผลต่อกระบวนการผลิตและขาดประสิทธิภาพในการผลิต สุดท้ายคือลักษณะของการควบคุมการผลิตแบบแรก ไม่มีต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ใช้ผู้ปฏิบัติการเป็นผู้ควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งผู้ปฏิบัติงานสามารถตัดสินใจแนวทางการควบคุมได้โดยตรงส่งผลให้กระบวนการผลิตขาดประสิทธิภาพสูงและผู้ปฏิบัติงานก็อยู่ในสถานะที่จะทำให้เกิดความเสี่ยงสูงจากกระบวนการที่กำลังดำเนินการอยู่

ด้วยสาเหตุข้างต้นงานวิทยานิพนธ์นี้ให้ความสำคัญในด้านความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานและกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพเป็นหลัก จึงได้ศึกษาออกแบบและวิเคราะห์การควบคุมระดับของเหลวในกระบวนการแบบ interacting 2 ถึง และ 3 ถึง ตลอดจนทดลองสร้างโมเดลต้นแบบขนาดเล็กเพื่อทดสอบ สำหรับเป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก

วัตถุประสงค์

1. หาแบบจำลองของกระบวนการระดับที่มีผลกระทบต่อกันแบบ 2 ถึง และ 3 ถึง
2. ออกแบบและวิเคราะห์วิธีการควบคุมชนิด PI สำหรับกระบวนการระดับที่มีผลกระทบต่อกันแบบ 2 ถึง และ 3 ถึง
3. ทดสอบการควบคุมด้วยแบบจำลองของระบบบนเครื่องคอมพิวเตอร์และตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7
4. ทำการสร้างกระบวนการระดับที่มีผลกระทบต่อกันแบบ 3 ถึง เพื่อทดสอบการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7
5. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองจากแบบจำลองกับกระบวนการจริงที่ได้จากการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7

การตรวจเอกสาร

รายงานผลงานวิจัยที่ผ่านมา

จากการค้นคว้าและศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการควบคุมแบบอัตโนมัติสำหรับกระบวนการผลิตแบบต่างๆ พบว่ามีวิธีการควบคุม หลายวิธี เช่น PID controller, Fuzzy logic, Model Predictive หรือ Model Based control และ Error Based Control เป็นต้น แต่ในทางปฏิบัติจริงวิธีที่นิยมกันมากที่สุดคือ PID controller เพราะเป็นวิธีที่ใช้ได้ดี และไม่ซับซ้อน แต่ยังมีปัญหาในการปรับตั้งค่า parameter ต่างๆ จึงมีผู้คิดค้นและทำวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมอัตโนมัติสำหรับการควบคุมในกระบวนการผลิตแบบต่างๆ ดังนี้ เช่น

Satean Tunyasirirut, Tianchai Suksri, Arjin Numsomran, Supan Gulpanich, และ Kitti Tirasest (2006) ได้เสนอวิธีการควบคุมกระบวนการระดับน้ำแบบ interacting 2 ถัง ด้วยวิธี Auto-Tuning PID Controller ด้วยการใช้วิธีการ Integral Step Response (ISR) เพื่อทำให้ระบบที่เป็น Dynamic สามารถออกแบบทำได้ง่ายขึ้น โดยใช้วิธีการของ root locus ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อชนิด PID

Ching An-Lin และ A.N. Gundes (2000) ได้เสนอวิธีการออกแบบการควบคุมด้วย PI สำหรับระบบที่มีหลายอินพุตและเอาต์พุต ด้วยการใช้วิธีการ LQR ในการแก้ปัญหของผลกระทบที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่าในการควบคุมแบบ PI

Doe Gyoong Koo, Jietae Lee, Dong Kwon Lee, Chonghun Han, Lyu Sung Gyu, Jae Hak Jung และ Moonyong Lee (2000) ได้เสนอวิธีการปรับค่าของตัวควบคุมแบบ PI สำหรับระบบ nonlinear และทดสอบกับกระบวนการจริง โดยการนำเสนอแนวคิดสำหรับรูปแบบของ error square ของตัวควบคุมชนิด PI ซึ่งวิธีการควบคุมนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้หลายกระบวนการทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น โดยโครงสร้างในการควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลง

M.Hou, Y.S.Xiong, and R.J.Patton (2005) ได้เสนอวิธีการตรวจสอบสถานะระบบสามถังเป็นการวิเคราะห์และสังเคราะห์กระบวนการระดับน้ำแบบสามถัง เพื่อพิจารณาภายใต้สมมติฐานการ

เปลี่ยนแปลงของกระบวนการจากการตรวจวัดค่าโดยการเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการ
สังเกตผลการเทียบกับค่าที่สามารถวัดได้

อุปกรณ์และวิธีการ

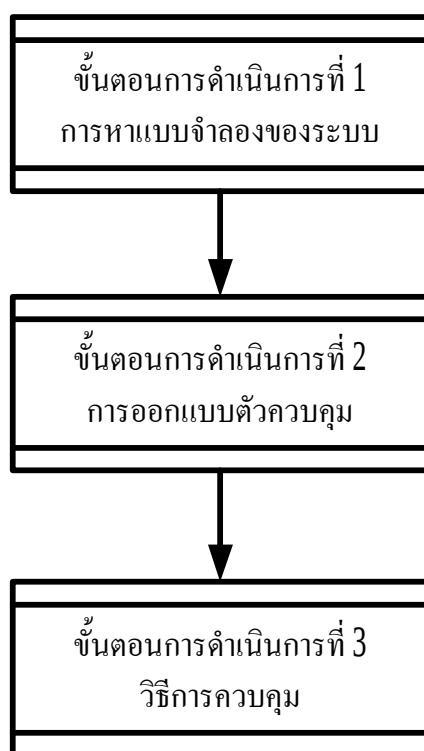
อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ
2. โปรแกรม LabVIEW 8.2
3. การ์ดแปลงสัญญาณพร้อมอุปกรณ์ต่อพ่วงภายนอกของบริษัท ADLINK รุ่น PCI-9112
4. Microcontroller board ตระกูล ARM7TDMI-S รุ่น LPC2148
5. บอร์ดแปลงสัญญาณ D/A MPC 4922
6. บอร์ดแปลงระดับแรงดันจาก 3.3 Vdc. เป็น 5 Vdc.
7. ชุดกระบวนการระดับที่มีผลกระทบต่อกันแบบ 3 ถึง
8. มัลติมิเตอร์ดิจิทัล
9. แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงและสายสัญญาณต่อพ่วง

วิธีการ

ในวิทยานิพนธ์ได้มีการการศึกษาและค้นคว้าตามแนวทางที่วางไว้ในวัตถุประสงค์ โดยทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง และ 3 ถึง ด้วยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง และ 3 ถึง เพื่อนำแบบจำลองที่สามารถหาได้มาวิเคราะห์ด้วยการตั้งสมมติฐานการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นของระบบ เพื่อนำผลที่ได้มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อนำค่าตัวควบคุมที่ได้มาดำเนินการทดสอบความสามารถในการควบคุมระดับของเหลวในกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง และ 3 ถึง สำหรับกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง วิธีการแรกเป็นการทดสอบบนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยนำแบบจำลองของระบบที่หาได้มาสร้างส่วนแสดงผลและส่วนควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW 8.2 และวิธีการที่สองทำการสร้างส่วนแสดงผลด้วยแบบจำลองของระบบบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 ในเครื่องคอมพิวเตอร์และทำการเชื่อมต่อสายสัญญาณกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ซึ่งสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 เปรียบเสมือนการเชื่อมต่อระหว่างกระบวนการกับตัวควบคุมที่ใช้งาน

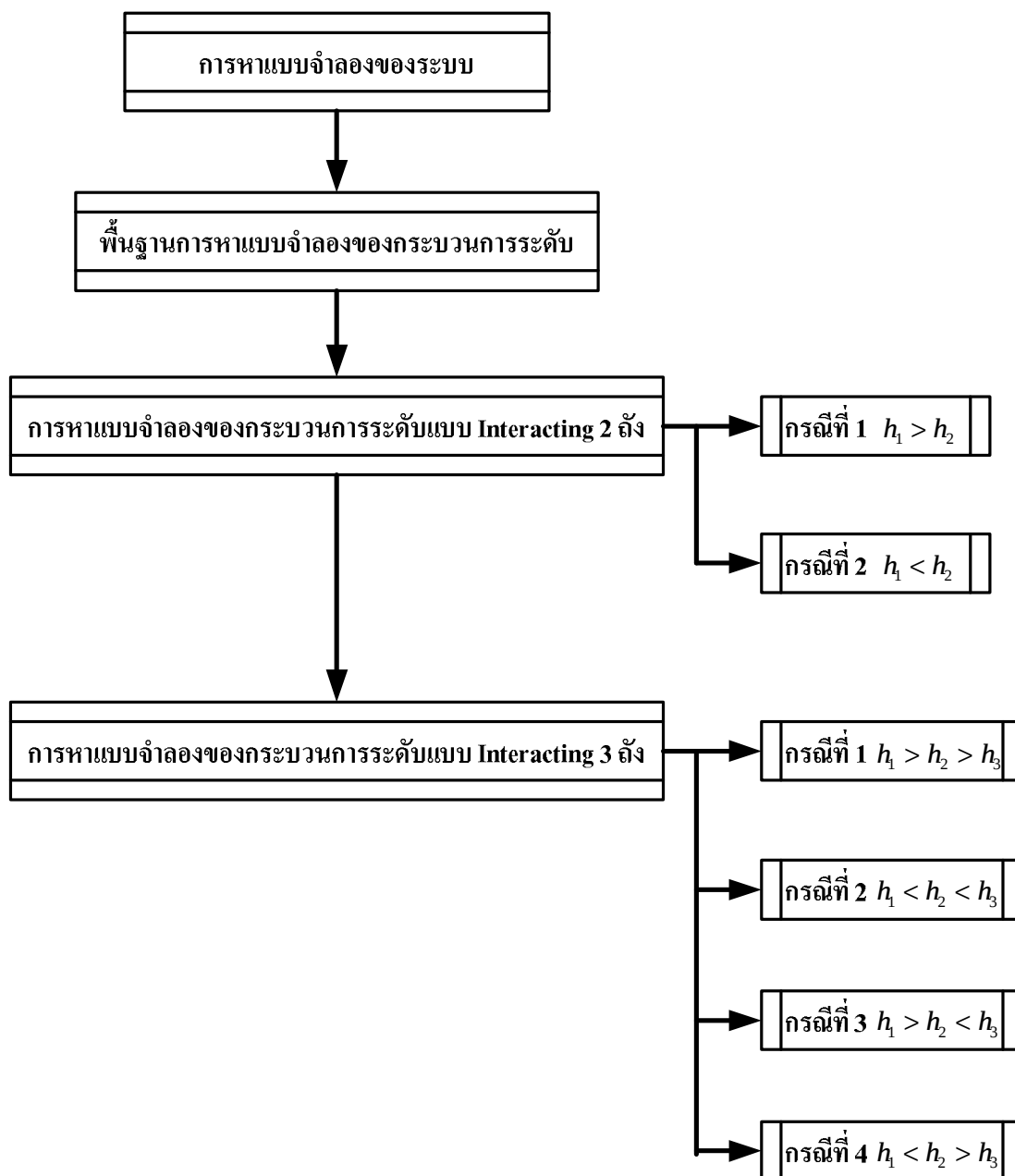
จริง และสำหรับกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถึง วิธีการแรกเป็นส่วนแสดงผลด้วยแบบจำลองของระบบบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 ในเครื่องคอมพิวเตอร์และทำการเชื่อมต่อสายสัญญาณกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ซึ่งสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 เปรียบเสมือนการเชื่อมต่อระหว่างกระบวนการกับตัวควบคุมที่ใช้งานจริงเช่นเดียวกับในวิธีการที่สองของการทดลองการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง และวิธีการที่สองทำการสร้างกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถึง ที่เป็นไปตามการออกแบบและทำการเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างกระบวนการระดับที่สร้างขึ้นกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ขั้นตอนสุดท้ายทำการศึกษาผลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นเพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหา



ภาพที่ 1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินการ

จากภาพที่ 1 เป็นโครงสร้างของขั้นตอนในการดำเนินการ ซึ่งสามารถดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

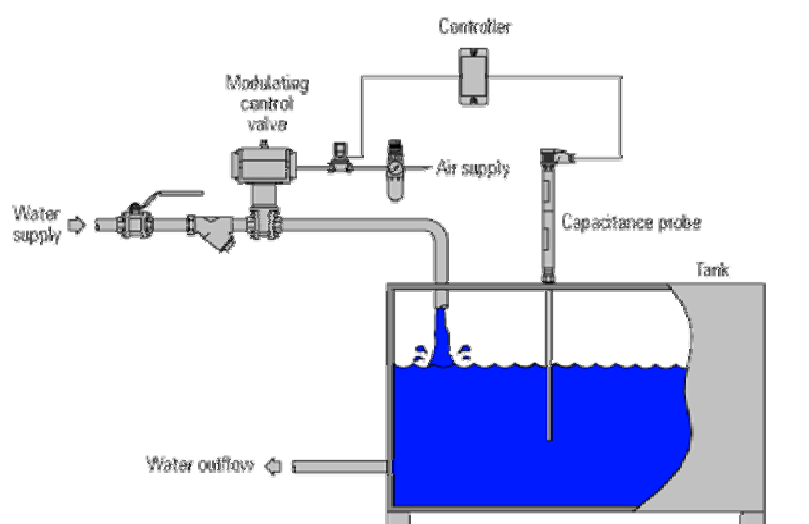
การดำเนินการขั้นตอนที่ 1 การหาแบบจำลองของระบบ



ภาพที่ 2 แผนภาพขั้นตอนการหาแบบจำลองของระบบ

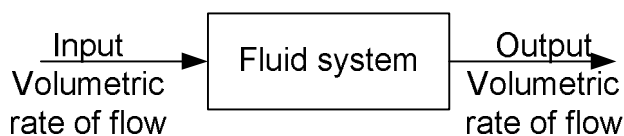
1. พื้นฐานการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับ

จากแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับวิธีที่ใช้ในการควบคุมที่ได้กล่าวมานั้นทำให้ทราบว่าในกระบวนการผลิตต่างๆ ทางอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ อุตสาหกรรมขนาดกลาง หรืออุตสาหกรรมขนาดเล็ก สิ่งสำคัญคือต้องอาศัยอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากในสายการผลิตอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ ดังนั้นในกระบวนการผลิตจึงควรมีการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสมและปลอดภัยก่อนการดำเนินการ ฉะนั้นก่อนที่จะเริ่มทำการวิเคราะห์และออกแบบนั้น ควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับแนวความคิดและสิ่งที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการในขั้นต้นดังนี้



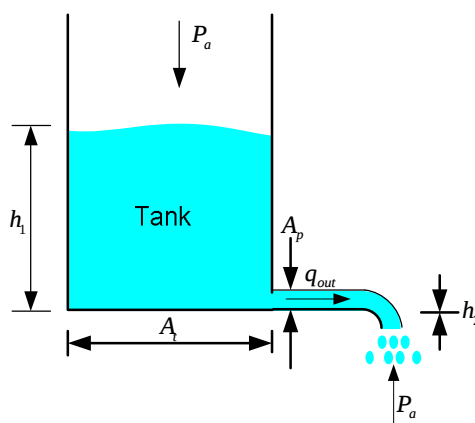
ภาพที่ 3 ภาพรวมการการควบคุมกระบวนการระดับ

จากภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างภาพรวมการทำงานของระบบในการควบคุมกระบวนการระดับแบบฝาถังปิด 1 ถัง ที่ใช้งานในกระบวนการทางอุตสาหกรรม ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ ถังบรรจุของเหลว อุปกรณ์ตรวจวัดระดับ ตัวควบคุมระดับของเหลว วาล์วควบคุมปริมาณการจ่ายของเหลวสำหรับกระบวนการ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นกระบวนการระดับที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ทำการพิจารณากระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถัง และ 3 ถัง ที่เป็นถังฝาเปิด โดยใช้พื้นฐานในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเพื่อนำไปวิเคราะห์ดังนี้



ภาพที่ 4 แผนภาพการทำงานของระบบของไหล

ภาพที่ 4 แสดงลักษณะการทำงานของระบบของไหล มีองค์ประกอบสามส่วนคือ ปริมาตรที่จ่ายให้กับระบบ ตัวดำเนินการหรือกระบวนการของระบบของไหล และปริมาตรหรือผลลัพธ์ที่ได้จากระบบ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพิจารณากระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง 3 ถึง ได้โดยเริ่มต้นการพิจารณาจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรภายในถังในสถานะที่มีการถ่ายเทของเหลวออกจากถังโดยมีปริมาตรของเหลวบรรจุอยู่ภายในถังดังนี้



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์อัตราการไหลที่ของเหลวไหลออกจากถังผ่านท่อ

เมื่อกำหนดตัวแปรดังนี้

q_{in}	คืออัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตร	(m^3/s)
q_{out}	คืออัตราการไหลออกเชิงปริมาตร	(m^3/s)
V	คือปริมาตรของของเหลว	(m^3)
r	คือความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ในถัง	(kg/m^3)
g	คือแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.81	(m/s^2)
P_a	คือแรงดันบรรยากาศ	
P	คือแรงดันที่พิจารณา	

v_1	คือความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลว ณ ตำแหน่งที่ 1	(m/s)
v_2	คือความเร็วในการเคลื่อนที่ของของเหลว ณ ตำแหน่งที่ 2	(m/s)
A	คือพื้นที่หน้าตัด	(m ²)
A_t	คือพื้นที่หน้าตัดที่กั้นถัง	(m ²)
A_p	คือพื้นที่หน้าตัดของท่อ	(m ²)
h_1	คือระดับความสูงของของเหลวตำแหน่งที่พิจารณา	(m)
h_2	คือระดับความสูงของของเหลวตำแหน่งที่พิจารณา	(m)
m	คือมวลที่สะสมอยู่ในถัง	
m_{in}	คือมวลที่จ่ายเข้าภายในถัง	
m_{out}	คือมวลที่จ่ายออกจากถัง	

ภาพที่ 5 แสดงสถานะที่มีของเหลวบรรจุอยู่ในถังแบบฝาเปิดที่ระดับ h_1 โดยกำหนดให้อัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์สำหรับกระบวนการระดับภายในถังแบบเปิดหนึ่งถังตามสมการดังนี้

$$m = m_{in} - m_{out} \quad (1)$$

เมื่อเทียบต่อหน่วยเวลาได้

$$\dot{m} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (2)$$

กำหนดให้ความสัมพันธ์ของมวลที่สะสมอยู่ในถังดังนี้

$$m = rV \quad (3)$$

แทนค่าสมการที่ (3) ลงในสมการที่ (2) เมื่อกำหนดให้ r เป็นค่าคงตัว และ $\dot{V} = q$

$$\begin{aligned} \frac{d(rV)}{dt} &= r\dot{V}_{in} - r\dot{V}_{out} \\ \frac{dV}{dt} &= q_{in} - q_{out} \end{aligned} \quad (4)$$

นอกจากนี้เราต้องใช้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความเร็วในการไหล บริเวณที่มีการไหลของมวลคงที่และบีบอัดไม่ได้ ซึ่งเรียกว่า Bernoulli Equation

กำหนดให้	e_{mech}	คือพลังงานเชิงกลของของไหล
	$\frac{P}{\rho}$	คือพลังงานจากการไหล
	$\frac{v^2}{2}$	คือพลังงานจล
	gh	คือพลังงานศักย์

พลังงานเชิงกลของของไหลเป็นไปตามสมการดังนี้

$$e_{mech} = \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gh \quad (5)$$

ที่สภาวะคงที่พลังงานเชิงกลของของไหลเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\text{ค่าคงที่ของการไหล} = \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gh \quad (6)$$

ในสภาวะที่พิจารณาของเหลวภายในถังที่ระดับ h_1 และระดับ h_2 พลังงานเชิงกลของของไหลมีค่าเท่ากันจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{P_a}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาวะของของไหล เรียกว่า Bernoulli Equation โดยที่ v_1 มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ระดับเริ่มต้น h_1 และ h_2 มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ระดับอ้างอิงกันถึง ดังนั้นความเร็วของของเหลวที่ไหลออกผ่านท่อที่ก้นถังคือ

$$\begin{aligned} v_2^2 &= 2gh_1 \\ v_2 &= \sqrt{2gh_1} \end{aligned} \quad (8)$$

อัตราการไหลถูกกำหนดโดยสมการดังต่อไปนี้

$$q = vA \quad (9)$$

แทนสมการที่ (8) ในสมการที่ (9) ได้สมการอัตราการไหลออกเชิงปริมาตรสำหรับสมการที่ (4) ของการพิจารณากระบวนการระดับในภาพที่ (5) ดังนี้

$$q_{out} = A_p \sqrt{2gh_1} \quad (10)$$

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนำแนวทางที่ได้มาใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวในกระบวนการ interacting 2 ถัง และ 3 ถัง

2. การหาแบบจำลองของกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถัง

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถัง สามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงได้สองกรณีคือ

กรณีที่ 1 ระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 2

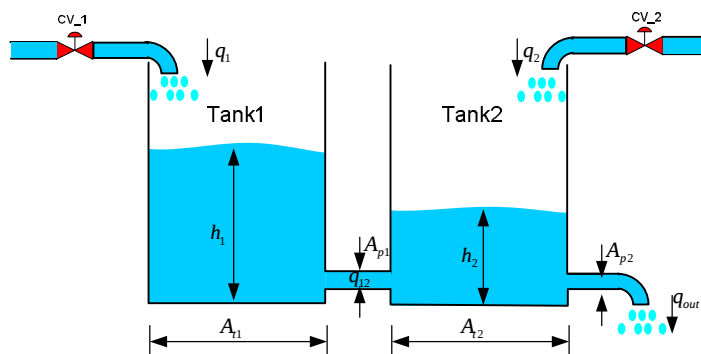
กรณีที่ 2 ระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 2

กำหนดให้ CV1 คือวาล์วที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของถังที่ 1 และ CV2 คือวาล์วที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของถังที่ 2 โดย

A_{t1}	คือพื้นที่หน้าตัดที่กั้นถังที่ 1	(m^2)
A_{t2}	คือพื้นที่หน้าตัดที่กั้นถังที่ 2	(m^2)
A_{p1}	คือพื้นที่หน้าตัดของท่อระหว่างถังที่ 1 กับถังที่ 2	(m^2)
A_{p2}	คือพื้นที่หน้าตัดของท่อขาออกของถังที่ 2	(m^2)
h_1	คือระดับความสูงของเหลวในถังที่ 1	(m)
h_2	คือระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2	(m)
q_1	คืออัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของถังที่ 1	(m^3/Sec)
q_2	คืออัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของถังที่ 2	(m^3/Sec)
q_{12}	คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรจากถังที่ 1 ไปถังที่ 2	(m^3/Sec)
q_{out}	คืออัตราการไหลออกเชิงปริมาตรของถังที่ 2	(m^3/Sec)

สามารถพิจารณาแยกเป็นกรณีได้ดังนี้

2.1. กรณีที่ 1 ระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 2



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 2

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายในถังที่ 1 ดังนี้

$$\frac{dV_1}{dt} = q_1 - q_{12}$$

กำหนดให้ $V_1 = A_1 h_1$ ได้

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = q_1 - q_{12}$$

แทนค่า q_{12} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$\begin{aligned} A_1 \frac{dh_1}{dt} &= q_1 - A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} \\ \frac{dh_1}{dt} &= \frac{q_1 - A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|}}{A_1} \end{aligned} \quad (11)$$

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายในถังที่ 2 ดังนี้

$$\frac{dV_2}{dt} = q_2 + q_{12} - q_{out}$$

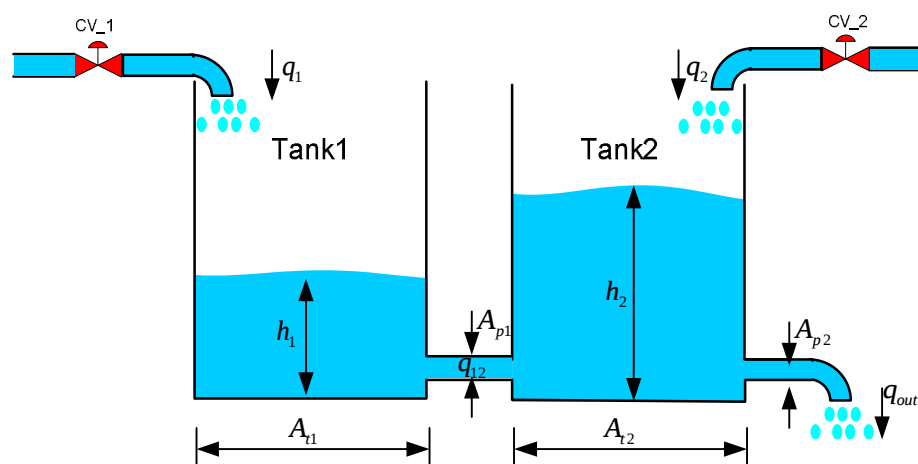
กำหนดให้ $V_2 = A_{t2} h_2$ ได้

$$A_{t2} \frac{dh_2}{dt} = q_2 + q_{12} - q_{out}$$

แทนค่า q_{out} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$\begin{aligned} A_{t2} \frac{dh_2}{dt} &= q_2 + A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} - A_{p2} \sqrt{2gh_2} \\ h_2 &= \frac{q_2 + A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} - A_{p2} \sqrt{2gh_2}}{A_{t2}} \end{aligned} \quad (12)$$

2.2. กรณีที่ 2 ระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 2 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ของระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 2

จากสมการที่ (4) เมื่อนำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายในถังที่ 1 ดังนี้

$$\frac{dV_1}{dt} = q_1 + q_{12}$$

กำหนดให้ $V_1 = A_{t1}h_1$ ได้

$$A_{t1} \frac{dh_1}{dt} = q_1 + q_{12}$$

แทนค่า q_{12} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$\begin{aligned} A_{t1} \frac{dh_1}{dt} &= q_1 + A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} \\ h_1 &= \frac{q_1 + A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|}}{A_{t1}} \end{aligned} \quad (13)$$

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายในถังที่ 2 ดังนี้

$$\frac{dV_2}{dt} = q_2 - q_{12} - q_{out}$$

กำหนดให้ $V_2 = A_{t2}h_2$ ได้

$$A_{t2} \frac{dh_2}{dt} = q_2 - q_{12} - q_{out}$$

แทนค่า q_{out} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$A_{t2} \frac{dh_2}{dt} = q_2 - A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} - A_{p2} \sqrt{2gh_2}$$

$$h_2 = \frac{q_2 - A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} - A_{p2} \sqrt{2gh_2}}{A_{t2}} \quad (14)$$

ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวใน
กระบวนการ interacting 2 ถึง เป็นไปตามสมการที่ (11) – (14) ดังนี้
กำหนดให้

$$\text{sgn}(f) = \begin{cases} 1 & ; f > 0 \\ 0 & ; f = 0 \\ -1 & ; f < 0 \end{cases}$$

$$S(f) = \text{sgn}(f) \sqrt{f}$$

$$C = \sqrt{2g}$$

เมื่อนำมาจัดรูปใหม่ได้

$$h_1 = \frac{q_1 - A_{p1} CS(h_1 - h_2)}{A_{t1}}$$

$$h_2 = \frac{q_2 + A_{p1} CS(h_1 - h_2) - A_{p2} C \sqrt{h_2}}{A_{t2}}$$

3. การหาแบบจำลองของกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถึง

ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถึง
สามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงได้เป็นสี่กรณีคือ

กรณีที่ 1 ระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2
และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3

กรณีที่ 2 ระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2
และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3

กรณีที่ 3 ระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2
และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3

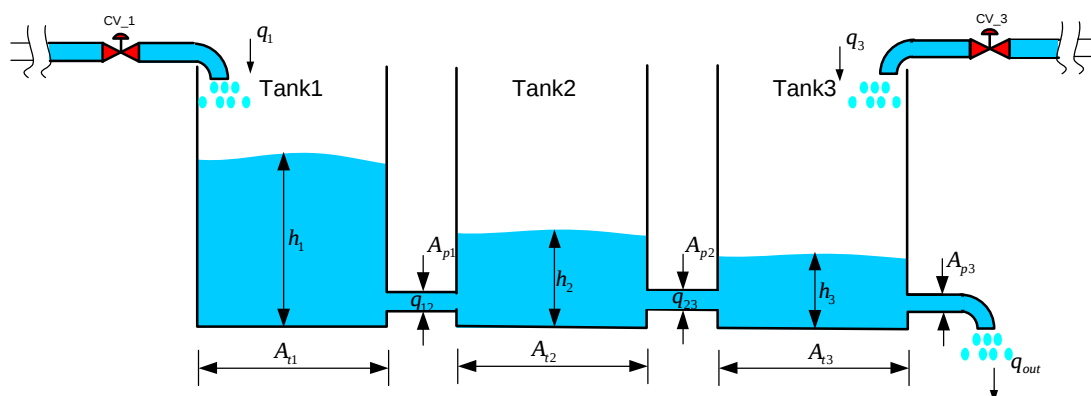
กรณีที่ 4 ระดับความสูงของเหลวในถังที่ 1 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และ
ระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3

สามารถพิจารณาตามกรณีดังนี้

กำหนดให้ CV1 คือวาล์วที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของถังที่ 1 และ CV2 คือวาล์วที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของถังที่ 2 โดย

A_{t1}	คือพื้นที่หน้าตัดที่ก้นถังที่ 1	(m^2)
A_{t2}	คือพื้นที่หน้าตัดที่ก้นถังที่ 2	(m^2)
A_{t3}	คือพื้นที่หน้าตัดที่ก้นถังที่ 3	(m^2)
A_{p1}	คือพื้นที่หน้าตัดของท่อระหว่างถังที่ 1 กับถังที่ 2	(m^2)
A_{p2}	คือพื้นที่หน้าตัดของท่อระหว่างถังที่ 2 กับถังที่ 3	(m^2)
A_{p3}	คือพื้นที่หน้าตัดของท่อขาออกของถังที่ 3	(m^2)
h_1	คือระดับความสูง ณ ตำแหน่งที่พิจารณาในถังที่ 1	(m)
h_2	คือระดับความสูง ณ ตำแหน่งที่พิจารณาในถังที่ 2	(m)
h_3	คือระดับความสูง ณ ตำแหน่งที่พิจารณาในถังที่ 3	(m)
q_1	คืออัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของถังที่ 1	(m^3/Sec)
q_{12}	คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรจากถังที่ 1 ไปถังที่ 2	(m^3/Sec)
q_{23}	คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรจากถังที่ 2 ไปถังที่ 3	(m^3/Sec)
q_{out}	คืออัตราการไหลออกเชิงปริมาตรของถังที่ 3	(m^3/Sec)

3.1 กรณีที่ 1 ระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ของระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายใน
ถังที่ 1 ดังนี้

$$\frac{dV_1}{dt} = q_1 - q_{12}$$

กำหนดให้ $V_1 = A_{t1} h_1$ ได้

$$A_{t1} \frac{dh_1}{dt} = q_1 - q_{12}$$

แทนค่า q_{12} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$\begin{aligned} A_{t1} \frac{dh_1}{dt} &= q_1 - A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} \\ h_1 &= \frac{q_1 - A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|}}{A_{t1}} \end{aligned} \quad (15)$$

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายใน
ถังที่ 2 ดังนี้

$$\frac{dV_2}{dt} = q_{12} - q_{23}$$

กำหนดให้ $V_2 = A_{t2} h_2$ ได้

$$A_{t2} \frac{dh_2}{dt} = q_{12} - q_{23}$$

แทนค่า q_{23} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$A_{t2} \frac{dh_2}{dt} = A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} - A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|}$$

$$h_2 = \frac{A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} - A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|}}{A_{t2}} \quad (16)$$

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายใน
ถังที่ 3 ดังนี้

$$\frac{dV_3}{dt} = q_3 + q_{23} - q_{out}$$

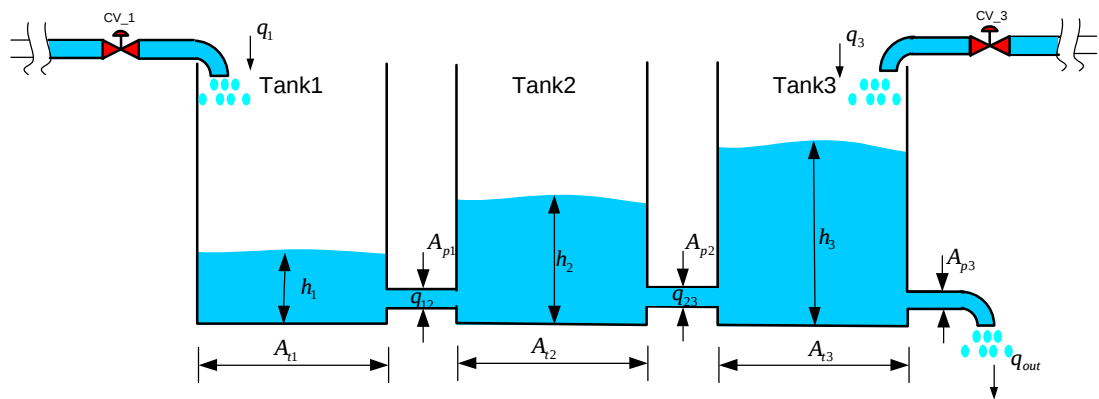
กำหนดให้ $V_3 = A_{t3} h_3$ ได้

$$A_{t3} \frac{dh_3}{dt} = q_3 + q_{23} - q_{out}$$

แทนค่า q_{out} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$\begin{aligned} A_{t3} \frac{dh_3}{dt} &= q_3 + A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|} - A_{p3} \sqrt{2gh_3} \\ h_3 &= \frac{q_3 + A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|} - A_{p3} \sqrt{2gh_3}}{A_{t3}} \end{aligned} \quad (17)$$

3.2 กรณีที่ 2 ระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ของระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายในถังที่ 1 ดังนี้

$$\frac{dV_1}{dt} = q_1 + q_{12}$$

กำหนดให้ $V_1 = A_{t1}h_1$ ได้

$$A_{t1} \frac{dh_1}{dt} = q_1 + q_{12}$$

แทนค่า q_{12} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$\begin{aligned} A_{t1} \frac{dh_1}{dt} &= q_1 + A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} \\ \dot{h}_1 &= \frac{q_1 + A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|}}{A_{t1}} \end{aligned} \quad (18)$$

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายใน
ถังที่ 2 ดังนี้

$$\frac{dV_2}{dt} = -q_{12} + q_{23}$$

กำหนดให้ $V_2 = A_{t2}h_2$ ได้

$$A_{t2} \frac{dh_2}{dt} = -q_{12} + q_{23}$$

แทนค่า q_{23} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$\begin{aligned} A_{t2} \frac{dh_2}{dt} &= -A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} + A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|} \\ h_2 &= \frac{-A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} + A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|}}{A_{t2}} \end{aligned} \quad (19)$$

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายใน
ถังที่ 3 ดังนี้

$$\frac{dV_3}{dt} = q_3 - q_{23} - q_{out}$$

กำหนดให้ $V_3 = A_{t3}h_3$ ได้

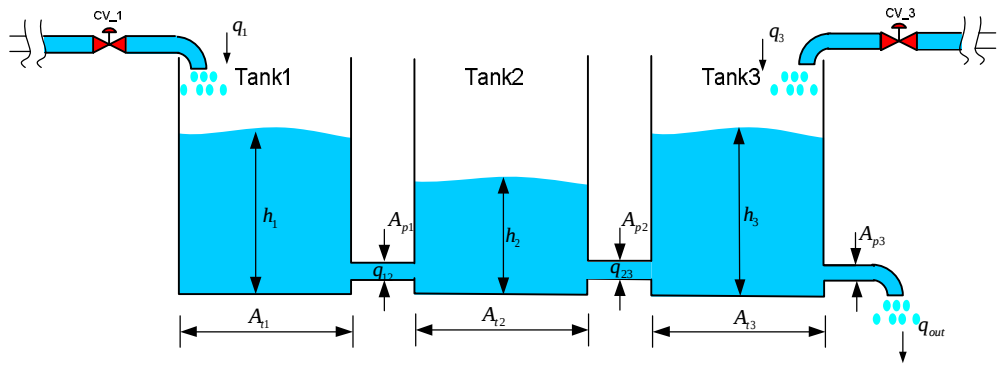
$$A_{t3} \frac{dh_3}{dt} = q_3 - q_{23} - q_{out}$$

แทนค่า q_{out} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$A_{t3} \frac{dh_3}{dt} = q_3 - A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|} - A_{p3} \sqrt{2gh_3}$$

$$h_3 = \frac{q_3 - A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|} - A_{p3} \sqrt{2gh_3}}{A_{t3}} \quad (20)$$

3.3 กรณีที่ 3 ระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ของระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายในถังที่ 1 ดังนี้

$$\frac{dV_1}{dt} = q_1 - q_{12}$$

กำหนดให้ $V_1 = A_{t1} h_1$ ได้

$$A_{t1} \frac{dh_1}{dt} = q_1 - q_{12}$$

แทนค่า q_{12} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$A_{t1} \frac{dh_1}{dt} = q_1 - A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|}$$

$$h_1 = \frac{q_1 - A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|}}{A_{t1}} \quad (21)$$

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายในถังที่ 2 ดังนี้

$$\frac{dV_2}{dt} = q_{12} + q_{23}$$

กำหนดให้ $V_2 = A_{t2} h_2$ ได้

$$A_{t2} \frac{dh_2}{dt} = q_{12} + q_{23}$$

แทนค่า q_{23} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$\begin{aligned} A_{t2} \frac{dh_2}{dt} &= A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} + A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|} \\ h_2 &= \frac{A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} + A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|}}{A_{t2}} \end{aligned} \quad (22)$$

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายในถังที่ 3 ดังนี้

$$\frac{dV_3}{dt} = q_3 - q_{23} - q_{out}$$

กำหนดให้ $V_3 = A_{t3} h_3$ ได้

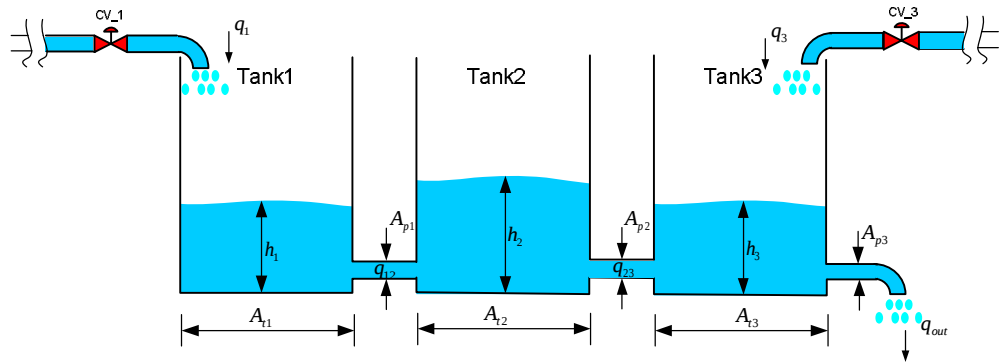
$$A_{t3} \frac{dh_3}{dt} = q_3 - q_{23} - q_{out}$$

แทนค่า q_{out} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$A_{t3} \frac{dh_3}{dt} = q_3 - A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|} - A_{p3} \sqrt{2gh_3}$$

$$\dot{h}_3 = \frac{q_3 - A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|} - A_{p3} \sqrt{2gh_3}}{A_{t3}} \quad (23)$$

3.4 กรณีที่ 4 ระดับความสูงของเหลวในถังที่ 1 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ของระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 ต่ำกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 และระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 สูงกว่าระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายในถังที่ 1 ดังนี้

$$\frac{dV_1}{dt} = q_1 + q_{12}$$

กำหนดให้ $V_1 = A_{t1} h_1$ ได้

$$A_{t1} \frac{dh_1}{dt} = q_1 + q_{12}$$

แทนค่า q_{12} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$\begin{aligned}
A_{t1} \frac{dh_1}{dt} &= q_1 + A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} \\
h_1 &= \frac{q_1 + A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|}}{A_{t1}}
\end{aligned} \tag{24}$$

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายใน
ถังที่ 2 ดังนี้

$$\frac{dV_2}{dt} = -q_{12} - q_{23}$$

กำหนดให้ $V_2 = A_{t2} h_2$ ได้

$$A_{t2} \frac{dh_2}{dt} = -q_{12} - q_{23}$$

แทนค่า q_{23} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$\begin{aligned}
A_{t2} \frac{dh_2}{dt} &= -A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} - A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|} \\
h_2 &= \frac{-A_{p1} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} - A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|}}{A_{t2}}
\end{aligned} \tag{25}$$

จากสมการที่ (4) นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวภายใน
ถังที่ 3 ดังนี้

$$\frac{dV_3}{dt} = q_3 + q_{23} - q_{out}$$

กำหนดให้ $V_3 = A_{t3} h_3$ ได้

$$A_{t3} \frac{dh_3}{dt} = q_3 + q_{23} - q_{out}$$

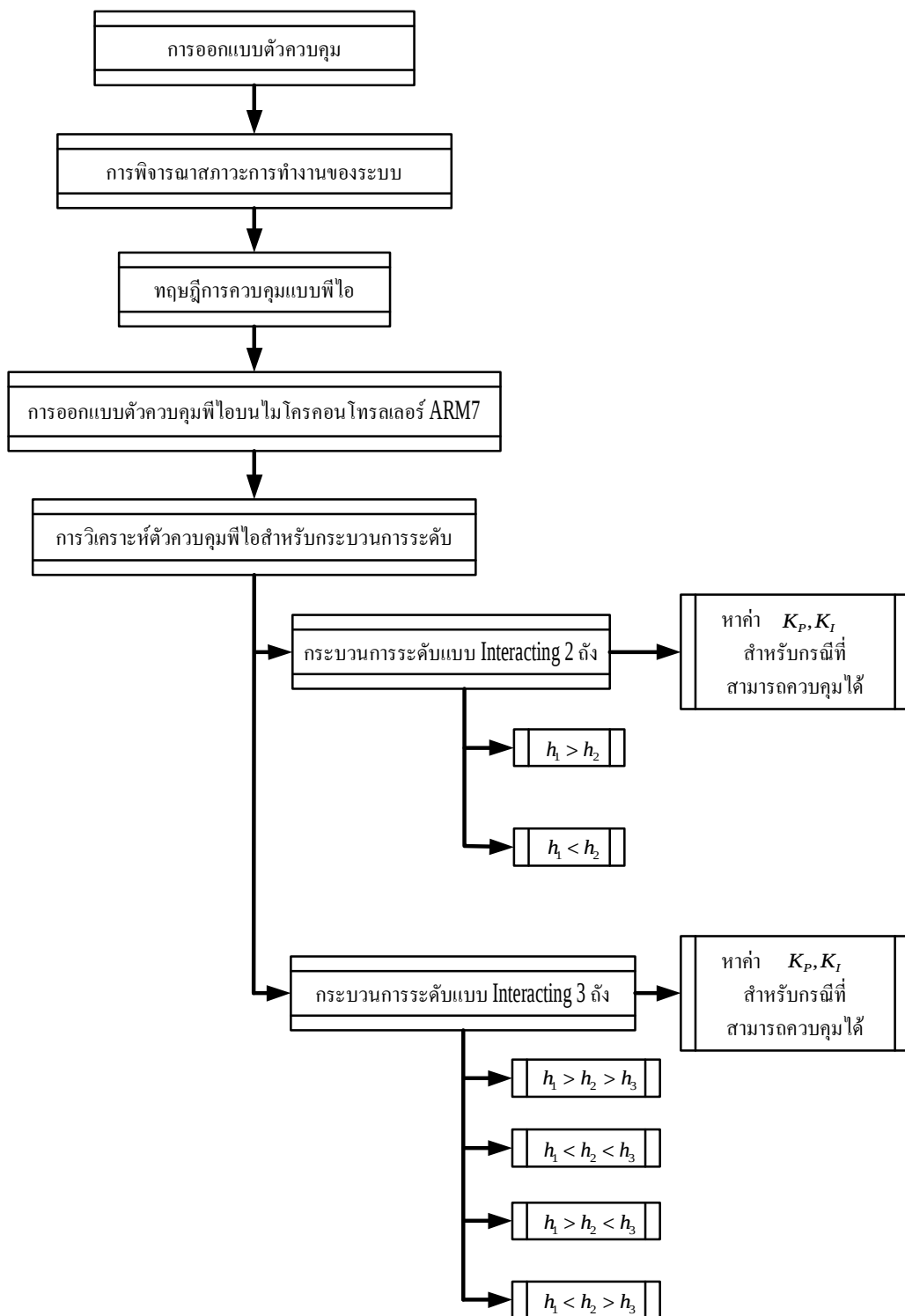
แทนค่า q_{out} ด้วยสมการที่ (10) ได้

$$\begin{aligned}
A_{t3} \frac{dh_3}{dt} &= q_3 + A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|} - A_{p3} \sqrt{2gh_3} \\
\dot{h}_3 &= \frac{q_3 + A_{p2} \sqrt{2g|h_2 - h_3|} - A_{p3} \sqrt{2gh_3}}{A_{t3}}
\end{aligned} \tag{26}$$

ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวใน
กระบวนการ interacting 3 ถัง เป็นไปตามสมการที่ (15) – (26) เมื่อนำมาจัดรูปใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned}
\dot{h}_1 &= \frac{q_1 - A_{p1} CS(h_1 - h_2)}{A_{t1}} \\
\dot{h}_2 &= \frac{A_{p1} CS(h_1 - h_2) - A_{p2} CS(h_2 - h_3)}{A_{t2}} \\
\dot{h}_3 &= \frac{q_3 + A_{p2} CS(h_2 - h_3) - A_{p3} C \sqrt{h_3}}{A_{t3}}
\end{aligned}$$

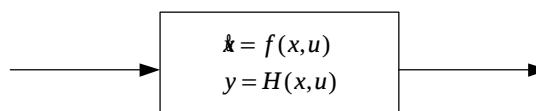
การดำเนินการขั้นตอนที่ 2 การออกแบบตัวควบคุม



ภาพที่ 12 แผนภาพการออกแบบตัวควบคุม

1. การพิจารณาสถานะการทำงานของระบบ

พิจารณาระบบ



ภาพที่ 13 แผนภาพระบบเปิด

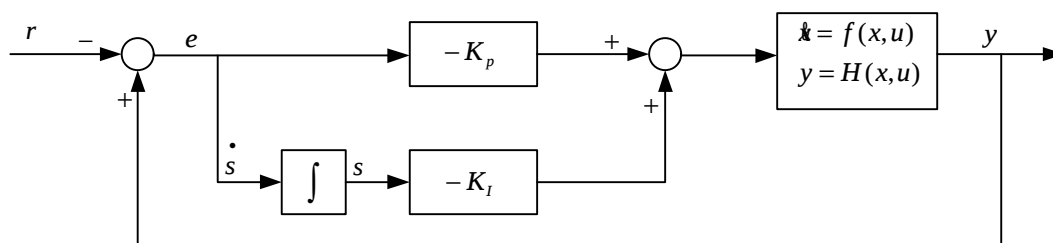
$$\dot{x} = f(x, u) \quad (27)$$

$$y = H(x, u) \quad (28)$$

จากระบบที่พิจารณาทำการหาค่าอินพุต u_{ss} ที่สามารถรักษาสถานะการทำงานของระบบให้เป็นไปตามค่าใดๆ ก็ตามที่สัมพันธ์กับ x_{ss} ที่กำหนด โดยการพิจารณาที่สถานะสมดุลของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อกำหนดให้ x_{ss} คือสถานะคงที่ของตัวแปรสแตตและ u_{ss} คือสถานะคงที่ของตัวแปรอินพุต พิจารณาตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= 0 \\ 0 &= f(x_{ss}, u_{ss}) \end{aligned} \quad (29)$$

2. ทฤษฎีการควบคุมฟีด



ภาพที่ 14 แผนภาพระบบควบคุมแบบปิดที่มีตัวควบคุมฟีด

ภาพที่ 14 มีการป้อนกลับของค่าที่สามารถตรวจวัดได้ในระบบ เพื่อให้ตัวควบคุมนำค่าที่ได้มาพิจารณาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการสั่งงานก่อนหน้านี้และทำการปรับปรุงค่าในการควบคุมใหม่ป้อนให้กับระบบ ซึ่งทำให้ระบบเกิดความสมบูรณ์มากขึ้น เราเรียกระบบนี้ว่า ระบบอัตโนมัติ

จากโครงสร้างของระบบปิดกำหนดให้ค่าความผิดพลาดคือ

$$e = y - r \quad (30)$$

และ

$$\dot{x} = e = y - r \quad (31)$$

กำหนดให้ค่าสำหรับการควบคุมเป็น

$$u = -K_p e - K_I s \quad (32)$$

เมื่อทำการเพิ่มตัวควบคุมเข้าไปในระบบทำให้ได้ระบบใหม่โดยแทนค่าจากสมการที่ (32) ลงในสมการที่ (27)

$$\dot{x} = f(x, [-K_p e - K_I s]) \quad (33)$$

$$\dot{x} = y - r \quad (34)$$

จัดรูปสมการที่ (33) และ (34) ทำให้ได้ระบบที่มีตัวแปรใหม่คือ

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(x, [-K_p e - K_I s]) \\ y - r \end{pmatrix} \equiv \bar{f}(x, r) \quad (35)$$

กำหนดให้

$$dx = \begin{bmatrix} dx \\ ds \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - x_{ss} \\ s - s_{ss} \end{bmatrix}$$

$$dr = r - r_{ss}$$

$$\bar{A} = \left. \frac{\partial \bar{f}(x, r)}{\partial x} \right|_{x=x_{ss}, r=r_{ss}}$$

$$\bar{B} = \left. \frac{\partial \bar{f}(x, r)}{\partial r} \right|_{x=x_{ss}, r=r_{ss}}$$

ทำการพิจารณาระบบ Nonlinear ในรูปแบบของระบบ linear โดยการทำให้ linearization ระบบที่เข้าใกล้บริเวณจุดพิจารณาทำให้ได้ Jacobian matrix เป็น

$$d\mathbf{x} = \bar{A}d\mathbf{x} + \bar{B}d\mathbf{r} \quad (36)$$

โดย

$$d\mathbf{x} = \left. \frac{\partial \bar{f}(x, r)}{\partial x} \right|_{x=x_{ss}, r=r_{ss}} d\mathbf{x} + \left. \frac{\partial \bar{f}(x, r)}{\partial r} \right|_{x=x_{ss}, r=r_{ss}} d\mathbf{r} \quad (37)$$

เมื่อหาค่าของเมตริกซ์ $\bar{A}$ ได้ก็สามารถทำการหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุม K_p และ K_I ที่ทำให้รากของระบบมีค่าอยู่ทางซ้ายมือของระนาบหรือทำให้เมตริกซ์ $\bar{A}$ Hurwitz

3. การออกแบบตัวควบคุมพีไอบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7

อัลกอริทึมที่ใช้ในการในการควบคุมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 เป็นลักษณะของ ดิจิตอล ดังนั้นทำการเปลี่ยนรูปแบบการควบคุมแบบแอนะล็อกให้อยู่ในรูปของการควบคุมแบบ ดิจิตอลโดย

กำหนดให้	v_n	คือค่าที่ใช้ในการควบคุม
	P	คือค่าอัตราขยายที่ใช้ในการควบคุม
	e_n	คือค่าความผิดพลาดที่ได้จากการสุ่มค่า
	Δt	คือเวลาในการสุ่มค่า
	I	คือค่าเวลาของอัตราขยายแบบปริพันธ์มีค่าเท่ากับ $I = \frac{K_I}{K_p}$

$$v_n = Pe_n + PI\Delta t \sum_{j=1}^{j=n} e_j \quad (38)$$

ดังนั้นค่าที่ใช้ในการควบคุมที่ได้จากการสุ่มค่าในแต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับค่าของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็น

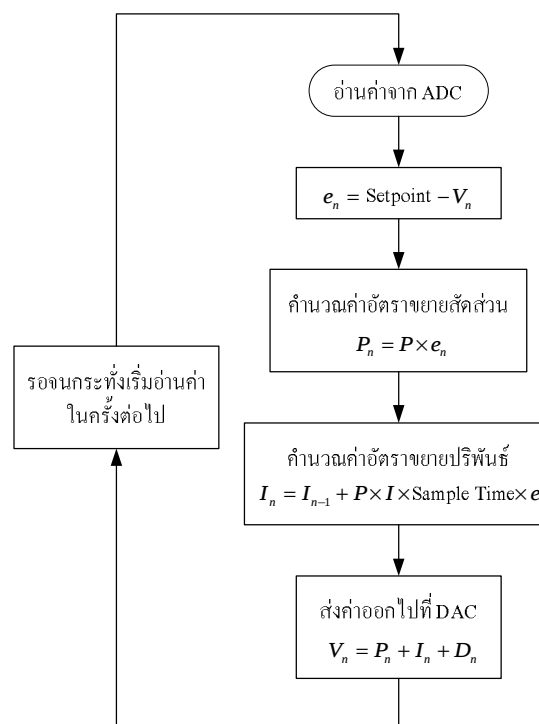
$$\Delta v_n = v_n - v_{n-1} \quad (39)$$

จากสมการที่ (38) และ (39) ได้

$$v_{n-1} = Pe_{n-1} + PI\Delta t \sum_{j=1}^{j=n-1} e_j$$

$$\Delta v_n = P\Delta e_n + PI\Delta t e_n$$

สามารถเขียนผังการทำงานของโปรแกรมได้ดังนี้



ภาพที่ 15 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม

จากแผนภาพการทำงานสามารถนำแนวทางที่ได้ไปเขียนลงบนตัวควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 โดยใช้ค่า K_p และ K_I ที่หาได้และกำหนดค่าเวลาในการสุ่มในแต่ละรอบของการประมวลผล ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบที่ทำการทดสอบ ดังนั้นเพื่อให้ได้การควบคุมที่มีประสิทธิภาพควรกำหนดค่าเวลาในการสุ่มให้เร็วพอที่จะสามารถควบคุมการทำงานของระบบนั้นได้

4. การวิเคราะห์ตัวควบคุมพีไอสำหรับกระบวนการระดับ

จากสมการที่ (27) กำหนดให้ $x = h$ และ $u = q$ สำหรับการนำมาพิจารณาระบบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับแบบ interacting 2 และ 3 ถัง ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ตัวควบคุมพีไอสำหรับกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถัง ในการพิจารณาสถานะการทำงานของระบบสำหรับกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถัง จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ q_{1SS} และ q_{2SS} มีค่ามากกว่าศูนย์เท่านั้น ซึ่งสามารถแยกพิจารณาสถานะการทำงานของระบบออกเป็นสองกรณีดังนี้

4.1.1 การพิจารณาสถานะการทำงานของระบบในกรณีที่ 1 ระบบที่พิจารณาเป็นไปตามสมการที่ (11) และ (12) ทำการหาค่า q_{1SS} และ q_{2SS} ที่สามารถรักษาสถานะที่ $h_{1SS} > h_{2SS}$ ดังนี้

จากสมการที่ (29) กำหนดให้ $\dot{h} = 0$ ได้

$$0 = \frac{q_{1SS} - A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}{A_{T1}}$$

$$0 = \frac{q_{2SS} + A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} - A_{P2} \sqrt{2gh_{2SS}}}{A_{T2}}$$

ดังนั้น q_{1SS} และ q_{2SS} สามารถหาได้ดังนี้

$$q_{1SS} = A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}$$

$$q_{2SS} = -A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} + A_{P2} \sqrt{2gh_{2SS}}$$

จากค่าของ q_{1SS} และ q_{2SS} ที่หาได้แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมระดับของเหลวภายในถังทั้งสองได้ตามสมมติฐานที่สถานะของ $h_{1SS} > h_{2SS}$ ได้
ซึ่งจะเป็นไปตามเงื่อนไขก็ต่อเมื่อ $A_{P2}\sqrt{2gh_{2SS}} > A_{P1}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}$

4.1.2 การพิจารณาสถานะการทำงานของระบบในกรณีที่ 2 ระบบที่พิจารณาเป็นไปตามสมการที่ (13) และ (14) ทำการหาค่า q_{1SS} และ q_{2SS} ที่สามารถรักษาสถานะที่ $h_{1SS} < h_{2SS}$ ดังนี้

จากสมการที่ (29) กำหนดให้ $\dot{h} = 0$ ได้

$$0 = \frac{q_{1SS} + A_{P1}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}{A_{t1}}$$

$$0 = \frac{q_{2SS} - A_{P1}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} - A_{P2}\sqrt{2gh_{2SS}}}{A_{t2}}$$

ดังนั้น q_{1SS} และ q_{2SS} สามารถหาได้ดังนี้

$$q_{1SS} = -A_{P1}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}$$

$$q_{2SS} = A_{P1}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} + A_{P2}\sqrt{2gh_{2SS}}$$

จากค่าของ q_{1SS} และ q_{2SS} ที่หาได้แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถควบคุมระดับของเหลวภายในถังทั้งสองได้ตามสมมติฐานที่สถานะของ $h_{1SS} < h_{2SS}$ เนื่องจาก q_{1SS} ที่หาได้มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะของ q_1 จะทำหน้าที่เป็นการดูดของเหลวออก ดังนั้นในการออกแบบระบบสามารถทำได้หลายวิธีที่ทำให้สถานะของ $h_{1SS} < h_{2SS}$ เป็นจริงเช่น การติดตั้งวาล์วควบคุมที่ระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 การติดตั้งเครื่องดูดของเหลวออกจากถังที่ 1 หรือการทำให้ถังเป็นระบบปิด เพื่อใช้แรงดันช่วยสร้างสถานะที่ต้องการได้ เป็นต้น จากตัวอย่างที่ได้กล่าวมาจึงสรุปได้ว่าในกรณีที่ 2 ไม่สามารถควบคุมได้โดยอ้างอิงจากลักษณะของกระบวนการที่ทำการศึกษา

4.1.3 การหาค่า K_p และ K_f สำหรับการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถัง จากการพิจารณาสถานะการทำงานของระบบพบว่าไม่มีเพียงกรณีที่ 1 ที่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นจึงทำการเลือกกรณีที่ 1 มาทำการวิเคราะห์โดยการเพิ่มตัวควบคุมฟีดไให้กับระบบดังนี้

กำหนดให้	A_{t1}	คือพื้นที่หน้าตัดที่กั้นถังที่ 1 มีค่าเท่ากับ 176.7146 cm^2
	A_{t2}	คือพื้นที่หน้าตัดที่กั้นถังที่ 2 มีค่าเท่ากับ 176.7146 cm^2
	A_{p1}	คือพื้นที่หน้าตัดของท่อระหว่างถังที่ 1 กับถังที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2.8353 cm^2
	A_{p2}	คือพื้นที่หน้าตัดของท่อขาออกของถังที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2.8353 cm^2
	h_1	คือระดับความสูงของเหลวในถังที่ 1 มีค่าเท่ากับ 15 cm
	h_2	คือระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2 มีค่าเท่ากับ 10 cm
	q_1	คืออัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของถังที่ 1 มีค่าเท่ากับ $433 \text{ cm}^3/\text{Sec}$
	q_2	คืออัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของถังที่ 2 มีค่าเท่ากับ $433 \text{ cm}^3/\text{Sec}$
	g	คือแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ $981 \text{ cm}/\text{Sec}^2$

เมื่อพิจารณาแบบจำลองของระบบกับสมการที่ (27) และ (28) ได้

$$\dot{h} = f(h, q)$$

$$y = H(h)$$

จากสมการที่ (32) กำหนดอินพุตที่ใช้ในการควบคุมเป็น

กำหนดให้	$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$
	$e = \begin{bmatrix} h_1 - r_1 \\ h_2 - r_2 \end{bmatrix}$
	$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}$

ดังนั้นค่าของตัวควบคุมที่ได้เป็น

$$q = -K_p e - K_I s$$

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{p11} & k_{p12} \\ k_{p21} & k_{p22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{I11} & k_{I12} \\ k_{I21} & k_{I22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{p11} & k_{p12} \\ k_{p21} & k_{p22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 - r_1 \\ h_2 - r_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{I11} & k_{I12} \\ k_{I21} & k_{I22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}$$

กำหนดให้ $k_{p12}, k_{p21}, k_{I12}, k_{I21} = 0$ เพื่อให้ได้ค่า q_1 ไม่ส่งผลกระทบต่อ e_1, s_1 และ q_2 ไม่ส่งผลกระทบต่อ e_2, s_2 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{p11} & 0 \\ 0 & k_{p22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 - r_1 \\ h_2 - r_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{I11} & 0 \\ 0 & k_{I22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} k_{p11}h_1 & - & k_{p11}r_1 & & 0 \\ & & & & \\ & 0 & & k_{p22}h_2 & - & k_{p22}r_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} k_{I11}s_1 & & 0 \\ & & \\ 0 & & k_{I22}s_2 \end{pmatrix}$$

จากสมการที่ (33) และ (34) ได้

$$\begin{aligned} \dot{h} &= f(h, [-K_p e - K_I s]) \\ \dot{s} &= h - r \end{aligned}$$

ทำการ Linearization ระบบปิดที่ $(h, s) = (h_{ss}, s_{ss})$ ตามสมการที่ (36) ดังนี้

$$dx = \bar{A}dx + \bar{B}dr$$

โดยที่

$$dx = \begin{bmatrix} dh_1 \\ dh_2 \\ ds_1 \\ ds_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 - h_{1ss} \\ h_2 - h_{2ss} \\ s_1 - s_{1ss} \\ s_2 - s_{2ss} \end{bmatrix}, \quad dr = \begin{bmatrix} r_1 - r_{1ss} \\ r_2 - r_{2ss} \end{bmatrix}$$

แทนค่า q_1 และ q_2 ที่กำหนดไว้ลงในสมการของระบบดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{h}_1 &= - \left(\frac{k_{p11}h_1 - k_{p11}r_1}{A_{t1}} \right) - \left(\frac{k_{I11}s_1}{A_{t1}} \right) - \left(\frac{A_{p1}}{A_{t1}} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} \right) \\ \dot{h}_2 &= - \left(\frac{k_{p22}h_2 - k_{p22}r_2}{A_{t2}} \right) - \left(\frac{k_{I22}s_2}{A_{t2}} \right) + \left(\frac{A_{p1}}{A_{t2}} \sqrt{2g|h_1 - h_2|} \right) - \left(\frac{A_{p2}}{A_{t2}} \sqrt{2gh_2} \right) \end{aligned}$$

ทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $\mathcal{H}_1$ ได้

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial h_1} \right|_{h_{1SS}, h_{2SS}} &= -\left(\frac{k_{P11}}{A_{t1}} \right) - \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}} \right), \quad \left. \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial h_2} \right|_{h_{1SS}, h_{2SS}} = \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}} \right) \\ \left. \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial s_1} \right|_{s_{1SS}, s_{2SS}} &= -\left(\frac{k_{I11}}{A_{t1}} \right), \quad \left. \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial s_2} \right|_{s_{1SS}, s_{2SS}} = 0 \end{aligned}$$

ทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $\mathcal{H}_2$ ได้

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial h_1} \right|_{h_{1SS}, h_{2SS}} &= \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t2} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}} \right) \\ \left. \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial h_2} \right|_{h_{1SS}, h_{2SS}} &= -\left(\frac{k_{P22}}{A_{t2}} \right) - \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t2} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}} \right) - \left(\frac{gA_{p2}}{A_{t2} \sqrt{2gh_{2SS}}} \right) \\ \left. \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial s_1} \right|_{s_{1SS}, s_{2SS}} &= 0, \quad \left. \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial s_2} \right|_{s_{1SS}, s_{2SS}} = -\left(\frac{k_{I22}}{A_{t2}} \right) \end{aligned}$$

ทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $\mathcal{H}$ คือ

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_1 &= h_1 - r_1 \\ \mathcal{H}_2 &= h_2 - r_2 \end{aligned}$$

ค่าที่ได้จากการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $\mathcal{H}$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial h_1} &= 1, & \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial h_2} &= 0, & \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial s_1} &= 0, & \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial s_2} &= 0 \\ \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial h_1} &= 0, & \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial h_2} &= 1, & \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial s_1} &= 0, & \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial s_2} &= 0 \end{aligned}$$

เมตริกซ์ $\bar{A}$ มีค่าส่วนต่างๆ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} d\dot{h}_1 \\ d\dot{h}_2 \\ d\dot{s}_1 \\ d\dot{s}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 - h_{1SS} \\ h_2 - h_{2SS} \\ s_1 - s_{1SS} \\ s_2 - s_{2SS} \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\left(\frac{k_{11}^1}{A_{t1}}\right) - \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t1}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right), & a_{12} &= \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t1}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right) \\ a_{13} &= -\left(\frac{k_{11}^2}{A_{t1}}\right), & a_{14} &= 0 \\ a_{21} &= \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t2}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right), & a_{22} &= -\left(\frac{k_{22}^1}{A_{t2}}\right) - \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t2}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right) - \left(\frac{gA_{p2}}{A_{t2}\sqrt{2gh_{2SS}}}\right) \\ a_{23} &= 0, & a_{24} &= -\left(\frac{k_{22}^2}{A_{t2}}\right), \\ a_{31} &= 1, & a_{32} &= 0, & a_{33} &= 0, & a_{34} &= 0 \\ a_{41} &= 0, & a_{42} &= 1, & a_{43} &= 0, & a_{44} &= 0 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ระบบที่มีจุดสมดุลที่เข้าใกล้จุด (h_{SS}, s_{SS}) จากการทำให้ Linearization ระบบรอบๆ จุด $(h, s) = (h_{SS}, s_{SS})$ ดังนี้

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ทำการหาค่ารากของระบบดังนี้

$$\text{Eigenvalues} = \det(sI - A)$$

$$\det \left(\begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right)$$

ฉะนั้นได้สมการคุณลักษณะของระบบคือ

$$\begin{aligned} \det(sI - A) &= 0 \\ 0 &= s^4 + (-a_{22} - a_{11})s^3 + (-a_{24} + a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12} - a_{13})s^2 \\ &\quad + (a_{11}a_{24} + a_{13}a_{22})s + (a_{13}a_{24}) \end{aligned}$$

ทำการปรับเปลี่ยนค่า K_p และ K_I เพื่อให้หาค่าของระบบอยู่ทางซ้ายมือของระนาบ ดังนั้นผลที่ได้จากการปรับเปลี่ยนค่าทำให้ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการปรับเปลี่ยนค่า K_p และ K_I กรณีที่ 1 $h_1 > h_2$

k_{P11}	k_{P22}	k_{I11}	k_{I11}	Pole
1	1	0.01	0.01	-0.3892
				-0.0511
				-0.0011
				-0.0001
1	1	0.1	0.1	-0.3878
				-0.0368
				-0.0154
				-0.0015
10	1	0.1	0.1	-0.4067
				-0.0770
				-0.0073
				-0.0014

ตารางที่ 1 (ต่อ)

k_{P11}	k_{P22}	k_{I11}	k_{I11}	Pole
1	10	0.1	0.1	-0.4235
				-0.0578
				-0.0098
				-0.0013
1	1	1	0.1	-0.3835
				$-0.0280 + 0.0584i$
				$-0.0280 - 0.0584i$
				-0.002
1	1	0.1	1	-0.379
				$-0.0297 + 0.0422i$
				$-0.0297 - 0.0422i$
				-0.0032
0.1	1	1	1	-0.3724
				$-0.0244 + 0.0712i$
				$-0.0244 - 0.0712i$
				-0.0152
0.1	1	10	1	-0.3334
				$-0.0408 + 0.2084i$
				$-0.0408 - 0.2084i$
				-0.0213
0.1	1	1	10	-0.2634
				$-0.0664 + 0.1608i$
				$-0.0664 - 0.1608i$
				-0.0402
1	0.1	1	1	-0.3707
				$-0.0252 + 0.0709i$
				$-0.0252 - 0.0709i$
				-0.0153

ตารางที่ 1 (ต่อ)

k_{P11}	k_{P22}	k_{I11}	k_{I11}	Pole
1	0.1	10	1	-0.3297
				-0.0425 + 0.2071i
				-0.0425 - 0.2071i
				-0.0217
1	0.1	1	10	-0.2654
				-0.0662 + 0.1638i
				-0.0662 - 0.1638i
				-0.0386
5	2	0.1	0.02	-0.4001
				-0.0625
				-0.0068
				-0.0004
100	100	10	10	-0.8856
				-0.499
				-0.0639
				-0.1134
100	100	100	100	-0.3062 + 0.6871i
				-0.3062 - 0.6871i
				-0.4748 + 0.5835i
				-0.4748 - 0.5835i
1000	1000	100	100	-5.9473
				-5.6044
				-0.1010
				-0.0951
1000	1000	1000	1000	-4.8838
				-4.4272
				-1.2782
				-1.1587

4.2 การวิเคราะห์ตัวควบคุมฟิโอสสำหรับกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถัง ในการพิจารณาสถานะการทำงานของระบบสำหรับกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถัง จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ q_{1SS} และ q_{3SS} มีค่ามากกว่าศูนย์และสมการของระบบสำหรับถังที่ 2 เป็นจริงเท่านั้น ซึ่งสามารถแยกพิจารณาสถานะการทำงานของระบบออกเป็นสี่กรณีดังนี้

4.2.1 การพิจารณาสถานะการทำงานของระบบในกรณีที่ 1 ระบบที่พิจารณาเป็นไปตามสมการที่ (15) และ (17) ทำการหาค่า q_{1SS} และ q_{3SS} ที่สามารถรักษาสถานะที่ $h_{1SS} > h_{2SS} > h_{3SS}$ ดังนี้

จากสมการที่ (29) กำหนดให้ $\dot{h} = 0$ ได้

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{q_{1SS} - A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}{A_{T1}} \\ 0 &= A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} - A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} \\ 0 &= \frac{q_{3SS} + A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} - A_{P3} \sqrt{2gh_{3SS}}}{A_{T3}} \end{aligned}$$

ดังนั้น q_{1SS} และ q_{3SS} สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} q_{1SS} &= A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} \\ A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} &= A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} \\ q_{3SS} &= -A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} + A_{P3} \sqrt{2gh_{3SS}} \end{aligned}$$

จากค่าของ q_{1SS} และ q_{3SS} ที่หาได้แสดงให้เห็นให้ทราบว่าสามารถควบคุมระดับของเหลวภายในถังทั้งสองได้ตามสมมติฐานที่สถานะของ $h_{1SS} > h_{2SS} > h_{3SS}$ ได้ก็ต่อเมื่อ $A_{P3} \sqrt{2gh_{3SS}} > A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|}$ ซึ่งเป็นลักษณะของการถ่ายเทของเหลวส่งผ่านไปยังฝั่งที่มีการถ่ายเทของเหลวออก

4.2.2 การพิจารณาสถานะการทำงานของระบบในกรณีที่ 2 ระบบที่พิจารณาเป็นไปตามสมการที่ (18) และ (20) ทำการหาค่า q_{1SS} และ q_{3SS} ที่สามารถรักษาสถานะที่ $h_{1SS} < h_{2SS} < h_{3SS}$ ดังนี้

จากสมการที่ (29) กำหนดให้ $\dot{h} = 0$ ได้

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{q_{1SS} + A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}{A_{T1}} \\ 0 &= -A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} + A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} \\ 0 &= \frac{q_{3SS} - A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} - A_{P3} \sqrt{2gh_{3SS}}}{A_{T3}} \end{aligned}$$

ดังนั้น q_{1SS} และ q_{3SS} สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} q_{1SS} &= -A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} \\ A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} &= A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} \\ q_{3SS} &= A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} + A_{P3} \sqrt{2gh_{3SS}} \end{aligned}$$

จากค่าของ q_{1SS} และ q_{2SS} ที่หาได้แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถควบคุมระดับของเหลวภายในถังทั้งสองได้ตามสมมติฐานที่สถานะของ $h_{1SS} < h_{2SS} < h_{3SS}$ เนื่องจาก q_{1SS} ที่หาได้มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะของ q_1 จะทำหน้าที่เป็นการดูดของเหลวออก ดังนั้นในการออกแบบระบบสามารถทำได้หลายวิธีที่ทำให้สถานะของ $h_{1SS} < h_{2SS} < h_{3SS}$ เป็นจริงเช่น การติดตั้งวาล์วควบคุมที่ระหว่างถังที่ 1 กับถังที่ 2 และถังที่ 2 กับถังที่ 3 การติดตั้งเครื่องดูดของเหลวออกจากถังที่ 1 หรือการทำให้ถังเป็นระบบปิดเพื่อใช้แรงดันช่วยในการสร้างสถานะที่ต้องการ เป็นต้น จากตัวอย่างที่ได้กล่าวมาจึงสรุปได้ว่าในกรณีที่ 2 ไม่สามารถควบคุมได้โดยอ้างอิงจากลักษณะของกระบวนการที่ทำการศึกษา

4.2.3 การพิจารณาสถานะการทำงานของระบบในกรณีที่ 3 ระบบที่พิจารณาเป็นไปตามสมการที่ (21) และ (23) ทำการหาค่า q_{1SS} และ q_{3SS} ที่สามารถรักษาสถานะที่ $h_{1SS} > h_{2SS} < h_{3SS}$ ดังนี้

จากสมการที่ (29) กำหนดให้ $\dot{h} = 0$ ได้

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{q_{1SS} - A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}{A_{t1}} \\ 0 &= +A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} + A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} \\ 0 &= \frac{q_{3SS} - A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} - A_{P3} \sqrt{2gh_{3SS}}}{A_{t3}} \end{aligned}$$

ดังนั้น q_{1SS} และ q_{3SS} สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} q_{1SS} &= A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} \\ A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} &= -A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} \\ q_{3SS} &= A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} + A_{P3} \sqrt{2gh_{3SS}} \end{aligned}$$

จากค่าของ q_{1SS} และ q_{3SS} ที่หาได้แสดงให้เห็นให้ทราบว่าไม่สามารถควบคุมระดับของเหลวภายในถังทั้งสองได้ตามสมมติฐานที่สถานะของ $h_{1SS} > h_{2SS} < h_{3SS}$ ได้ โดยมีข้อสังเกตสำหรับสมการของถังที่ 2 จะมีเครื่องหมายของสมการที่ตรงข้ามกัน

4.2.4 การพิจารณาสถานะการทำงานของระบบในกรณีที่ 4 ระบบที่พิจารณาเป็นไปตามสมการที่ (24) และ (26) ทำการหาค่า q_{1SS} และ q_{3SS} ที่สามารถรักษาสถานะที่ $h_{1SS} < h_{2SS} > h_{3SS}$ ดังนี้

จากสมการที่ (29) กำหนดให้ $\dot{h} = 0$ ได้

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{q_{1SS} + A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}{A_{t1}} \\ 0 &= -A_{P1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} - A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} \\ 0 &= \frac{q_{3SS} + A_{P2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} - A_{P3} \sqrt{2gh_{3SS}}}{A_{t3}} \end{aligned}$$

ดังนั้น q_{1SS} และ q_{3SS} สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} q_{1SS} &= -A_{p1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} \\ A_{p1} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|} &= -A_{p2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} \\ q_{3SS} &= -A_{p2} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|} + A_{p3} \sqrt{2gh_{3SS}} \end{aligned}$$

จากค่าของ q_{1SS} และ q_{3SS} ที่หาได้แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถควบคุมระดับของเหลวภายในถังทั้งสองถังได้ตามสมมติฐานที่สถานะของ $h_{1SS} < h_{2SS} > h_{3SS}$ ได้เช่นเดียวกับกรณีที่ 2

4.2.5 การหาค่า K_p และ K_I สำหรับการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting

3 ถัง จากการพิจารณาสถานะการทำงานของระบบพบว่ามีเพียงกรณีที่ 1 ที่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นจึงทำการเลือกกรณีที่ 1 มาทำการวิเคราะห์โดยการเพิ่มตัวควบคุมพีไอให้กับระบบดังนี้

เมื่อ	A_{t1}	คือพื้นที่หน้าตัดที่ก้นถังที่ 1 มีค่าเท่ากับ 176.7146 cm ²
	A_{t2}	คือพื้นที่หน้าตัดที่ก้นถังที่ 2 มีค่าเท่ากับ 176.7146 cm ²
	A_{t3}	คือพื้นที่หน้าตัดที่ก้นถังที่ 3 มีค่าเท่ากับ 176.7146 cm ²
	A_{p1}	คือพื้นที่หน้าตัดของท่อระหว่างถังที่ 1 กับถังที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2.8353 cm ²
	A_{p2}	คือพื้นที่หน้าตัดของท่อระหว่างถังที่ 2 กับถังที่ 3 มีค่าเท่ากับ 2.8353 cm ²
	A_{p3}	คือพื้นที่หน้าตัดของท่อขาออกของถังที่ 3 มีค่าเท่ากับ 2.8353 cm ²
	h_1	คือระดับความสูงของเหลวในถังที่ 1
	h_2	คือระดับความสูงของเหลวในถังที่ 2
	h_3	คือระดับความสูงของเหลวในถังที่ 3
	q_1	คืออัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของถังที่ 1 ค่าเท่ากับ 433 cm ³ /Sec
	q_3	คืออัตราการไหลเข้าเชิงปริมาตรของถังที่ 3 ค่าเท่ากับ 433 cm ³ /Sec
	g	คือแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 981 cm/Sec ²

เมื่อพิจารณาแบบจำลองของระบบกับสมการที่ (27) และ (28) ได้

$$\dot{h} = f(h, q)$$

$$y = H(h)$$

จากสมการที่ (32) เรากำหนดอินพุตที่ใช้ในการควบคุมเป็น

กำหนดให้

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

$$e = \begin{bmatrix} h_1 - r_1 \\ h_3 - r_3 \end{bmatrix}$$

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_3 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นค่าของตัวควบคุมที่ได้เป็น

$$q = -K_p e - K_I s$$

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{p11} & k_{p12} \\ k_{p31} & k_{p32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{I11} & k_{I12} \\ k_{I31} & k_{I32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{p11} & k_{p12} \\ k_{p31} & k_{p32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 - r_1 \\ h_3 - r_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{I11} & k_{I12} \\ k_{I31} & k_{I32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_3 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (33) และ (34) ได้

$$\dot{h} = f(h, [-K_p e - K_I s])$$

$$\dot{s} = h - r$$

ทำการ Linearization ระบบปิดที่ $(h, s) = (h_{ss}, s_{ss})$ ตามสมการที่ (36) ดังนี้

$$dx = \bar{A}dx + \bar{B}dr$$

โดยที่

$$dx = \begin{bmatrix} dh_1 \\ dh_2 \\ dh_3 \\ ds_1 \\ ds_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 - h_{1ss} \\ h_2 - h_{2ss} \\ h_3 - h_{3ss} \\ s_1 - s_{1ss} \\ s_3 - s_{3ss} \end{bmatrix}, \quad dr = \begin{bmatrix} r_1 - r_{1ss} \\ r_3 - r_{3ss} \end{bmatrix}$$

การหาค่า K_p และ K_I สำหรับการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถึง สำหรับกรณีที่ 1 $h_{1SS} > h_{2SS} > h_{3SS}$ กำหนดให้ h_{1SS} มีค่าเท่ากับ 15 cm h_{2SS} มีค่าเท่ากับ 10 cm และ h_{3SS} มีค่าเท่ากับ 5 cm โดยทำการแทนค่า q_1 และ q_3 ที่กำหนดไว้ลงในสมการของระบบ

$$\begin{aligned}\dot{h}_1 &= -\left(\frac{k_{p11}h_1 - k_{p11}r_1 + k_{p12}h_3 - k_{p12}r}{A_{t1}}\right) - \left(\frac{k_{I11}s_1 + k_{I12}s_3}{A_{t1}}\right) \\ &\quad - \left(\frac{A_{p1}}{A_{t1}}\sqrt{2g|h_1 - h_2|}\right) \\ \dot{h}_2 &= \left(\frac{A_{p1}}{A_{t2}}\sqrt{2g|h_1 - h_2|}\right) - \left(\frac{A_{p2}}{A_{t2}}\sqrt{2g|h_2 - h_3|}\right) \\ \dot{h}_3 &= -\left(\frac{k_{p31}h_1 - k_{p31}r_1 + k_{p32}h_3 - k_{p32}r}{A_{t3}}\right) - \left(\frac{k_{I31}s_1 + k_{I32}s_3}{A_{t3}}\right) \\ &\quad + \left(\frac{A_{p2}}{A_{t3}}\sqrt{2g|h_2 - h_3|}\right) - \left(\frac{A_{p3}}{A_{t3}}\sqrt{2gh_3}\right)\end{aligned}$$

ทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $\dot{h}_1$ จะได้

$$\begin{aligned}\left.\frac{\partial \dot{h}_1}{\partial h_1}\right|_{h_{1SS}, h_{2SS}, h_{3SS}} &= -\left(\frac{k_{p11}}{A_{t1}}\right) - \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t1}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right) \\ \left.\frac{\partial \dot{h}_1}{\partial h_2}\right|_{h_{1SS}, h_{2SS}, h_{3SS}} &= \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t1}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right), \quad \left.\frac{\partial \dot{h}_1}{\partial h_3}\right|_{h_{1SS}, h_{2SS}, h_{3SS}} = -\left(\frac{k_{p12}}{A_{t1}}\right) \\ \left.\frac{\partial \dot{h}_1}{\partial s_1}\right|_{s_{1SS}, s_{3SS}} &= -\left(\frac{k_{I11}}{A_{t1}}\right), \quad \left.\frac{\partial \dot{h}_1}{\partial s_3}\right|_{s_{1SS}, s_{3SS}} = -\left(\frac{k_{I12}}{A_{t1}}\right)\end{aligned}$$

ทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $\dot{h}_2$ จะได้

$$\begin{aligned}\left.\frac{\partial \dot{h}_2}{\partial h_1}\right|_{h_{1SS}, h_{2SS}, h_{3SS}} &= \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t2}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right) \\ \left.\frac{\partial \dot{h}_2}{\partial h_2}\right|_{h_{1SS}, h_{2SS}, h_{3SS}} &= -\left(\frac{gA_{p1}}{A_{t2}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right) - \left(\frac{gA_{p2}}{A_{t2}\sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|}}\right)\end{aligned}$$

$$\left. \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial h_3} \right|_{h_{1SS}, h_{2SS}, h_{3SS}} = \left(\frac{gA_{p2}}{A_{t2} \sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}} \right), \quad \left. \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial s_1} \right|_{s_{1SS}, s_{3SS}} = 0, \quad \left. \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial s_3} \right|_{s_{1SS}, s_{3SS}} = 0$$

ทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $\mathcal{H}_3$ จะได้

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \mathcal{H}_3}{\partial h_1} \right|_{h_{1SS}, h_{2SS}, h_{3SS}} &= -\left(\frac{k_{p31}}{A_{t3}} \right), \quad \left. \frac{\partial \mathcal{H}_3}{\partial h_2} \right|_{h_{1SS}, h_{2SS}, h_{3SS}} = \left(\frac{gA_{p2}}{A_{t3} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|}} \right) \\ \left. \frac{\partial \mathcal{H}_3}{\partial h_3} \right|_{h_{1SS}, h_{2SS}, h_{3SS}} &= -\left(\frac{k_{p32}}{A_{t3}} \right) - \left(\frac{gA_{p2}}{A_{t3} \sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|}} \right) - \left(\frac{gA_{p3}}{A_{t3} \sqrt{2gh_{3SS}}} \right) \\ \left. \frac{\partial \mathcal{H}_3}{\partial s_1} \right|_{s_{1SS}, s_{3SS}} &= -\left(\frac{k_{I31}}{A_{t3}} \right), \quad \left. \frac{\partial \mathcal{H}_3}{\partial s_3} \right|_{s_{1SS}, s_{3SS}} = -\left(\frac{k_{I32}}{A_{t3}} \right) \end{aligned}$$

ทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $\mathcal{H}$ คือ

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_1 &= h_1 - r_1 \\ \mathcal{H}_3 &= h_3 - r_3 \end{aligned}$$

ซึ่งค่าต่างๆ ที่ได้มีดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial h_1} &= 1, & \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial h_2} &= 0, & \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial h_3} &= 0, & \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial s_1} &= 0, & \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial s_3} &= 0 \\ \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial h_1} &= 0, & \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial h_2} &= 0, & \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial h_3} &= 1, & \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial s_1} &= 0, & \frac{\partial \mathcal{H}_2}{\partial s_3} &= 0 \end{aligned}$$

จากค่าต่างๆ เมตริกซ์ $\bar{A}$ มีค่าของส่วนต่างๆ ดังนี้

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= -\left(\frac{k_{p11}}{A_{t1}}\right) - \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t1}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right), & a_{12} &= \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t1}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right) \\
 a_{13} &= -\left(\frac{k_{p12}}{A_{t1}}\right), & a_{14} &= -\left(\frac{k_{I11}}{A_{t1}}\right), & a_{15} &= -\left(\frac{k_{I12}}{A_{t1}}\right) \\
 a_{21} &= \left(\frac{gA_{p1}}{A_{t2}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right), & a_{22} &= -\left(\frac{gA_{p1}}{A_{t2}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right) - \left(\frac{gA_{p2}}{A_{t2}\sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|}}\right) \\
 a_{23} &= \left(\frac{gA_{p2}}{A_{t2}\sqrt{2g|h_{1SS} - h_{2SS}|}}\right), & a_{24} &= 0, & a_{25} &= 0, \\
 a_{31} &= -\left(\frac{k_{p31}}{A_{t3}}\right), & a_{32} &= \left(\frac{gA_{p2}}{A_{t3}\sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|}}\right), \\
 a_{33} &= -\left(\frac{k_{p32}}{A_{t3}}\right) - \left(\frac{gA_{p2}}{A_{t3}\sqrt{2g|h_{2SS} - h_{3SS}|}}\right) - \left(\frac{gA_{p3}}{A_{t3}\sqrt{2gh_{3SS}}}\right), \\
 a_{34} &= -\left(\frac{k_{I31}}{A_{t3}}\right), & a_{35} &= -\left(\frac{k_{I32}}{A_{t3}}\right) \\
 a_{41} &= 1, & a_{42} &= 0, & a_{43} &= 0, & a_{44} &= 0, & a_{45} &= 0 \\
 a_{51} &= 0, & a_{52} &= 0, & a_{53} &= 1, & a_{54} &= 0, & a_{55} &= 0
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ระบบที่มีจุดสมดุลที่เข้าใกล้จุด (h_{ss}, s_{ss}) จากการทำให้ระบบ
รอบๆ จุด $(h, s) = (h_{ss}, s_{ss})$ คือ

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ทำการหาค่ารากของระบบได้

$$\text{Eigenvalues} = \det(sI - A)$$

$$\det \left(\begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right)$$

ตารางที่ 2 (ต่อ)

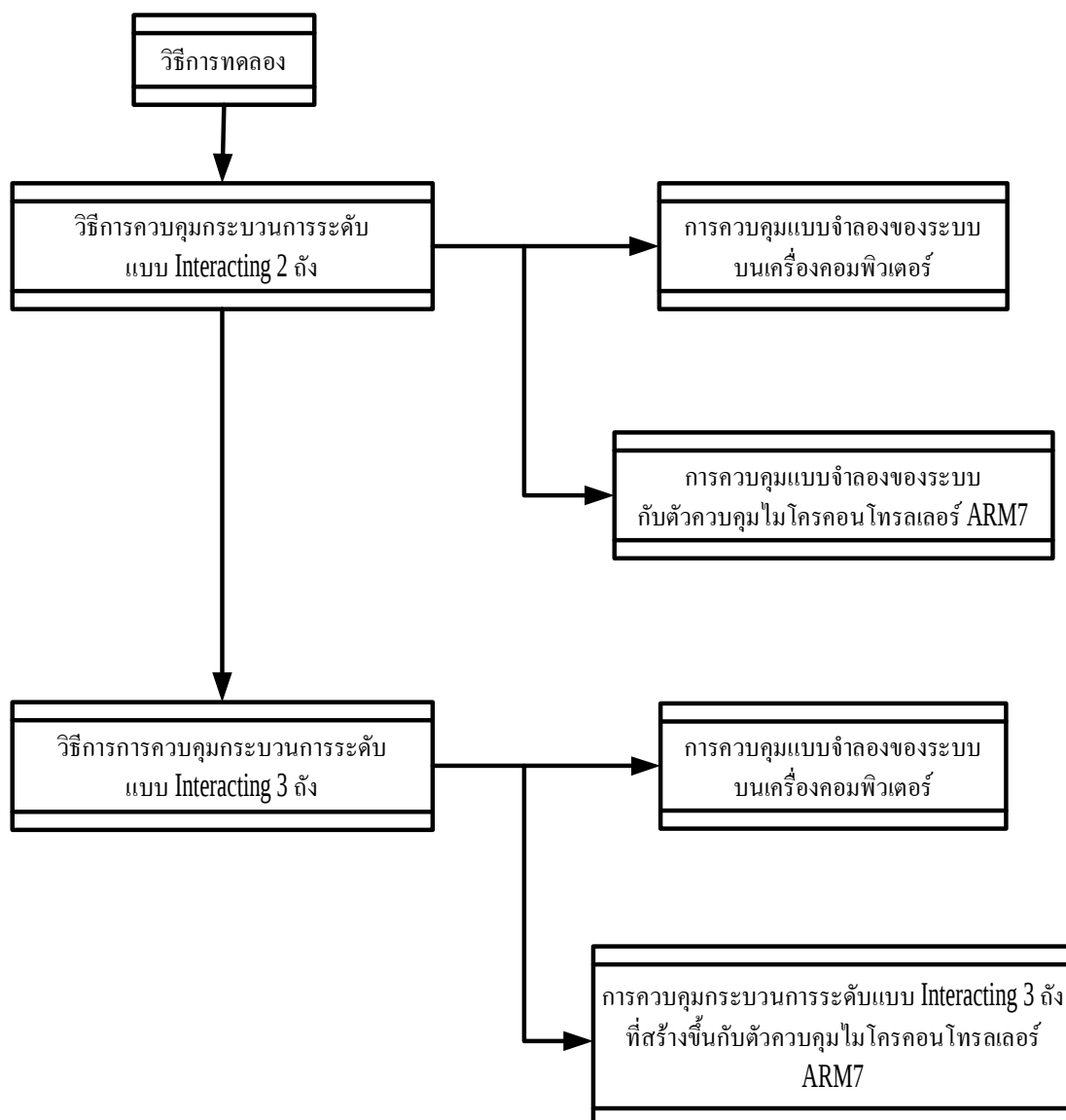
ตารางที่ 2 (ต่อ)

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ตารางที่ 2 (ต่อ)

การดำเนินการขั้นตอนที่ 3 วิธีการควบคุม



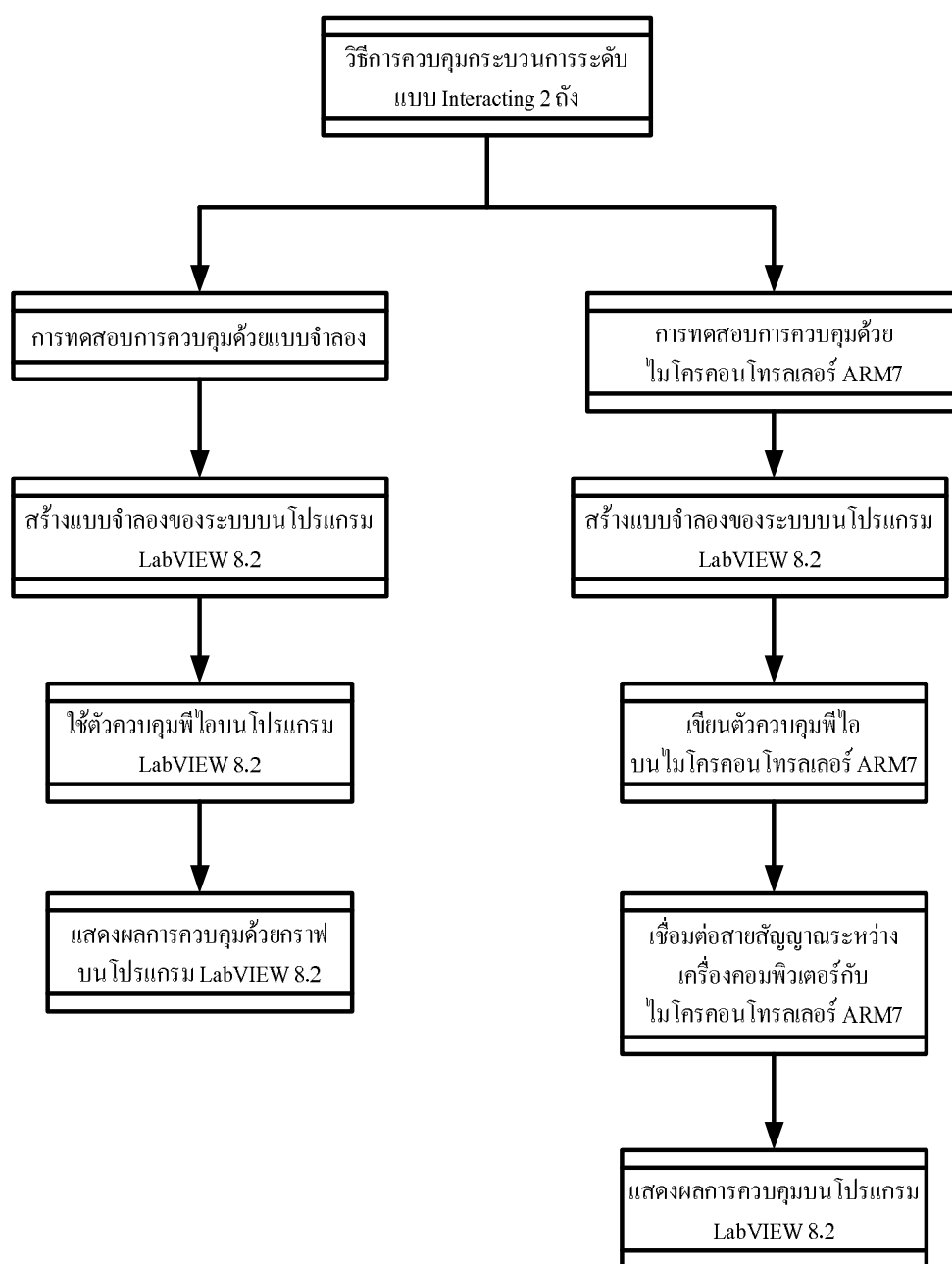
ภาพที่ 16 แผนภาพวิธีการควบคุม

จากภาพที่ 16 ภาพแผนผังการดำเนินการในส่วนของวิธีการควบคุมสำหรับกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง และ 3 ถึง ที่ทำการตรวจสอบสถานะการทำงานแล้วเป็นจริงตามเงื่อนไข ซึ่งสรุปได้ดังนี้

สำหรับกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง มีสถานะที่สามารถควบคุมได้คือ $h_1 > h_2$

สำหรับกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถึง มีสถานะที่สามารถควบคุมได้คือ $h_1 > h_2 > h_3$
จากทั้งสองกระบวนการที่ได้จะนำมาดำเนินการตามโครงสร้างในภาพที่ 16 ดังนี้

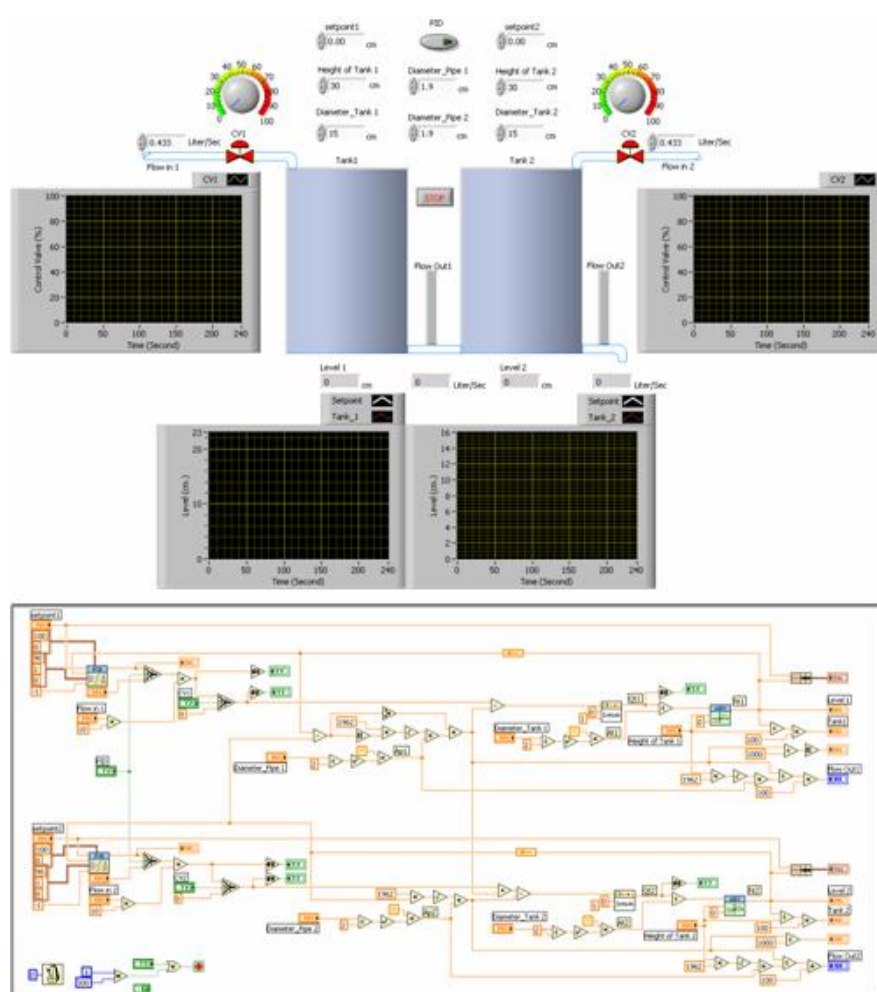
1 วิธีการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง



ภาพที่ 17 แผนภาพวิธีการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง

จากตารางที่ 1 นำค่า K_p , K_I ที่ทำให้รากของระบบอยู่ทางซ้ายมือของระนาบมาทำการทดสอบการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW 8.2 เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของระบบที่ให้ค่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วที่สุดจากการทดสอบเลือกใช้ค่า $k_{p11} = 5$, $k_{p22} = 2$, $k_{i11} = 0.1$, $k_{i22} = 0.02$ เนื่องจากค่าอื่นที่ทำการทดสอบผลการตอบสนองที่ได้มีค่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ช้าและเกิดการแกว่งที่บริเวณเข้าใกล้สภาวะคงตัว จึงนำค่าที่เลือกมาใช้ในการทดสอบการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์และการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์กับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 สามารถดำเนินการได้ดังนี้

1.1 การควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 18 แผนภาพวิธีการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์

แผนภาพที่ 18 แสดงวิธีการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง บนเครื่องคอมพิวเตอร์ มีวิธีการตามขั้นตอนต่างๆ ตามภาพที่ 17 โดยมีรายละเอียดดังนี้

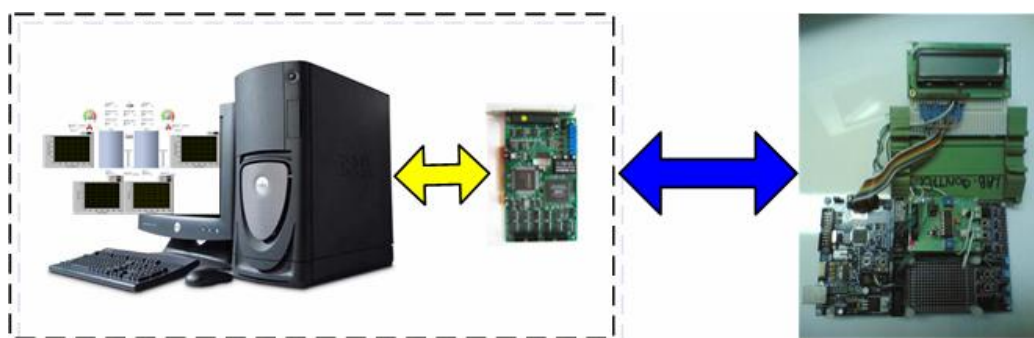
1.1.1 นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง และตัวควบคุมพีไอที่หาได้มาเขียนลงบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 ในหน้าต่างของฟังก์ชันการทำงานดังแสดงไว้ในส่วนล่างของภาพที่ 18

1.1.2 สร้างส่วนแสดงผลการทำงานและส่วนรับค่าสำหรับการใช้งานบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 ในเครื่องคอมพิวเตอร์แสดงไว้ในส่วนบนของภาพที่ 18

1.1.3 ทำการทดลองการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 สำหรับกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง ในกรณีที่ 1 คือ $h_1 > h_2$ โดยใช้ค่าของตัวควบคุมที่หาได้มาทำการทดสอบ

1.1.4 เริ่มโปรแกรม LabVIEW 8.2 พร้อมสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของกราฟบนหน้าจอของโปรแกรม

1.2 การควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์กับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7



ภาพที่ 19 แผนภาพวิธีการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์กับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7

แผนภาพที่ 19 แสดงโครงสร้างในการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง บน เครื่องคอมพิวเตอร์กับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ซึ่งมีวิธีการตามขั้นตอนต่างๆ ตาม ภาพที่ 17 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.2.1 นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง ที่ หาได้มาสร้างลงบนโปรแกรม LabVIEW 8.2

1.2.2 สร้างส่วนแสดงผลการทำงานและส่วนรับค่าสำหรับการใช้งานบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 ในเครื่องคอมพิวเตอร์

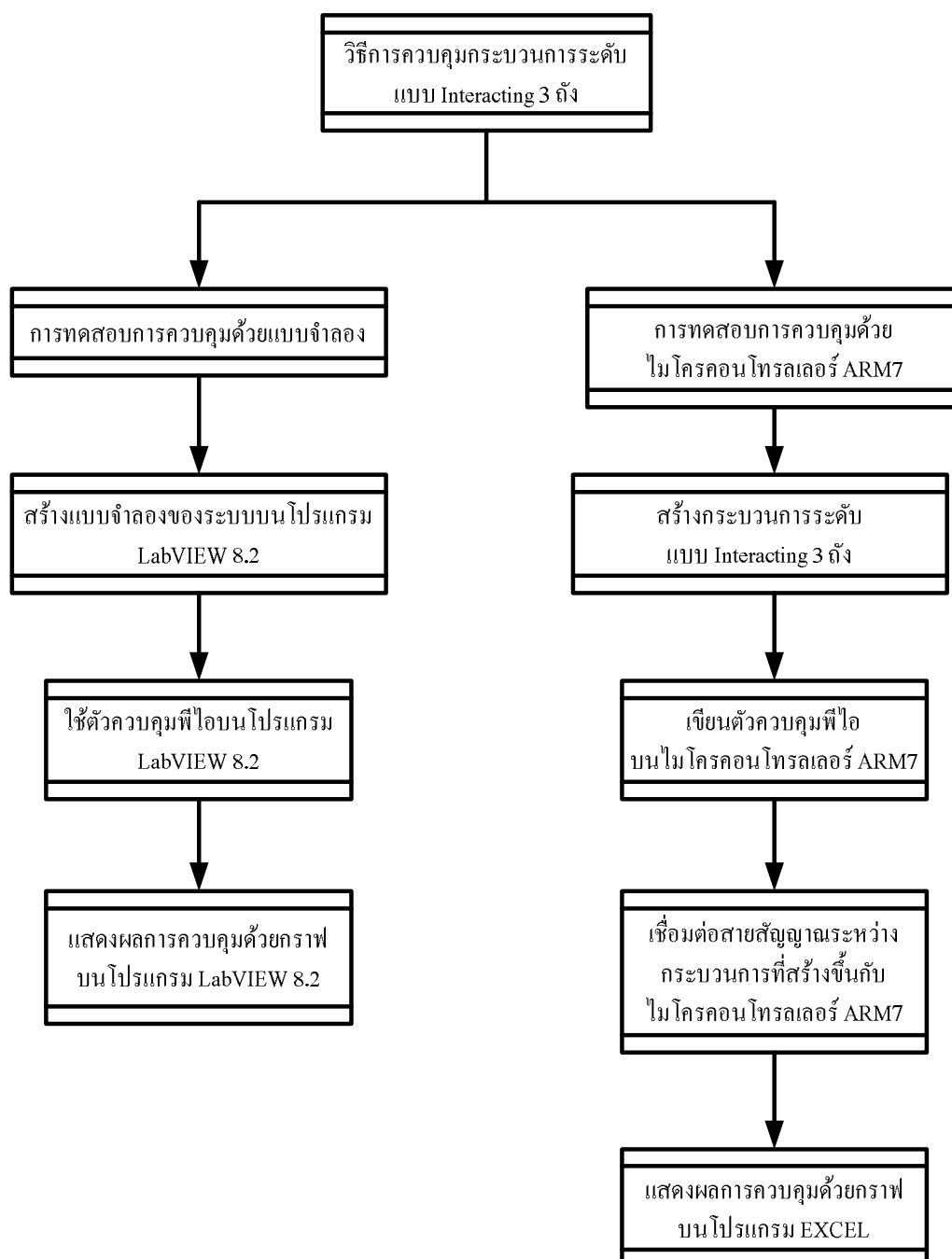
1.2.3 เรียกใช้โมดูลการติดต่อสื่อสารระหว่างตัวโปรแกรมกับการ์ด PCI 9112 ในโปรแกรม LabVIEW 8.2 เพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารสำหรับการรับค่าในการควบคุมและส่งค่าระดับของเหลวที่สร้างด้วยแบบจำลองของระบบบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 ผ่านการ์ด PCI 9112 ซึ่งทำหน้าที่แปลงค่าสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกขนาด 10 บิต ที่ระดับสัญญาณ 0–5 VDC จำนวน 2 ช่องสัญญาณ สำหรับส่งค่าระดับความสูงของเหลวภายในถังให้กับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 และแปลงค่าสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต ที่ระดับสัญญาณ 0–5 VDC จำนวน 2 ช่องสัญญาณสำหรับการรับค่าที่ใช้ในการควบคุมวาล์วในการจ่ายของเหลวเข้าถังทั้งสองจากตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 เพื่อส่งให้โปรแกรม LabVIEW 8.2 บนเครื่องคอมพิวเตอร์แสดงผลในการทำงาน

1.2.4 ทำการเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างการ์ด PCI 9112 บนเครื่องคอมพิวเตอร์กับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7

1.2.5 นำสมการที่ (38) มาเขียนลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 โดยใช้ค่าตัวควบคุมพีไอที่หาได้และตั้งค่าของระดับที่ต้องการตามกรณีที่ 1 คือ $h_1 > h_2$ และกำหนดค่าเวลาในการสุ่มรับผลการเปลี่ยนแปลงที่ 500 mSec สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 มีค่าความละเอียดในการแปลงระดับสัญญาณแอนะล็อกขนาด 10 บิต ที่ระดับสัญญาณ 0–3.3 VDC จำนวน 2 ช่องสัญญาณในการใช้งานและบอร์ดแปลงสัญญาณภายนอก MPC 4922 ขนาด 10 บิต ที่ระดับสัญญาณ 0–5 VDC จำนวน 2 ช่องสัญญาณ

1.2.6 ทำการทดสอบโดยการเริ่มโปรแกรม LabVIEW 8.2 และเริ่มการทำงานของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 พร้อมสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของกราฟที่แสดงบนหน้าจอ

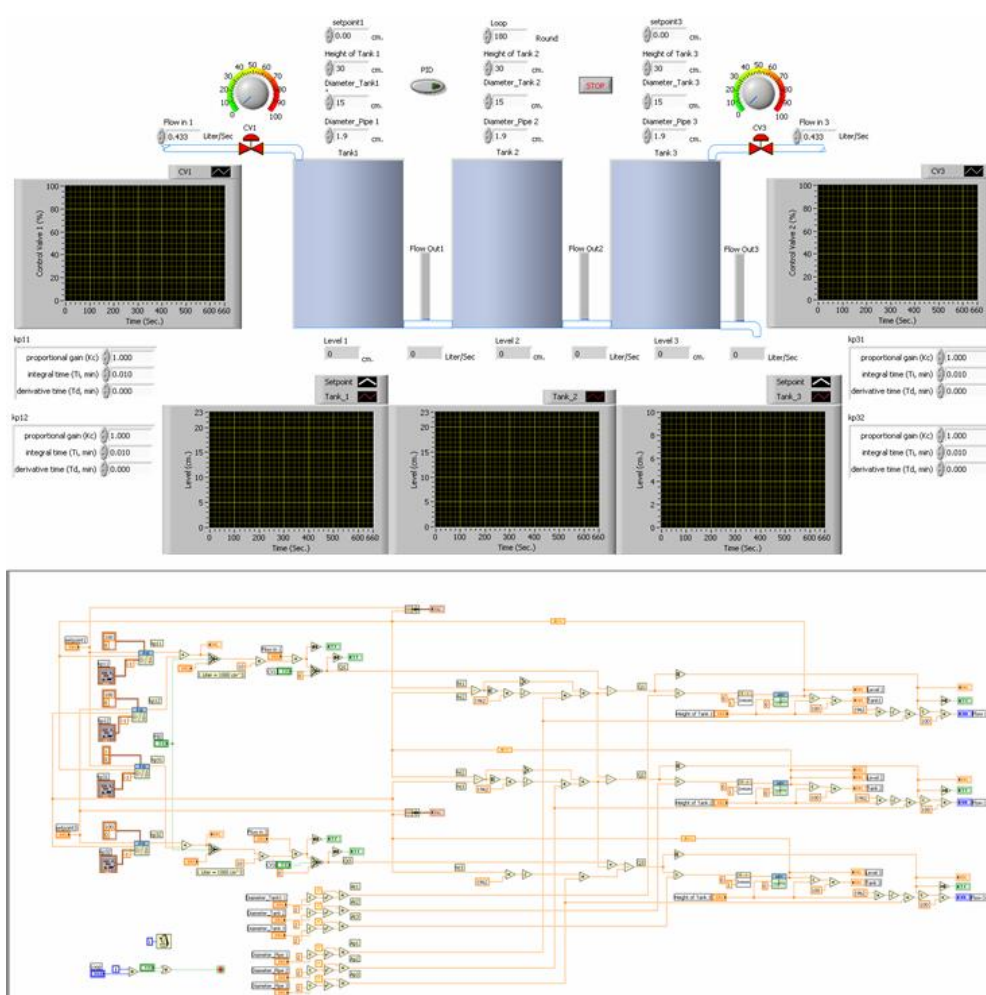
2. วิธีการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถึง



ภาพที่ 20 แผนภาพวิธีการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถึง

จากตารางที่ 2 เลือกค่า K_P , K_I ที่ทำให้รากของระบบอยู่ทางซ้ายมือของระนาบมาทำการทดสอบการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW 8.2 เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของระบบที่ให้ค่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วที่สุดจากการทดสอบเลือกค่า $k_{p11} = 1$, $k_{p12} = 1$, $k_{p31} = 1$, $k_{p32} = 1$, $k_{i11} = 0.1$, $k_{i12} = 0.1$, $k_{i31} = 0.01$, $k_{i32} = 0.1$ เนื่องจากค่าอื่นที่ทำการทดสอบผลการตอบสนองที่ได้มีค่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ช้าและเกิดการแกว่งที่บริเวณเข้าใกล้สภาวะคงตัว จึงนำค่าที่เลือกมาใช้ในการทดสอบการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์และการควบคุมกระบวนการระดับที่สร้างขึ้นกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 สามารถดำเนินการได้ดังนี้

2.1 การควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 21 แผนภาพการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์

แผนภาพที่ 21 แสดงโครงสร้างในการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถัง บน เครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีวิธีการตามขั้นตอนต่างๆ ตามภาพที่ 20 โดยมีรายละเอียดดังนี้

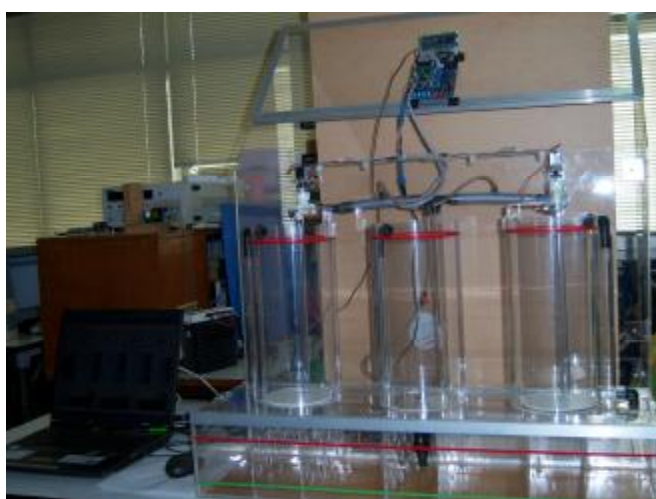
2.1.1 นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถัง และตัวควบคุมพีไอที่หาได้มาเขียนลงบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 ในหน้าต่างฟังก์ชันการทำงาน ดังแสดงไว้ในส่วนล่างของภาพที่ 21

2.1.2 สร้างส่วนแสดงผลการทำงานและส่วนรับค่าสำหรับการใช้งานบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 ในเครื่องคอมพิวเตอร์แสดงไว้ในส่วนบนของภาพที่ 21

2.1.3 ทำการทดลองการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 สำหรับกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถัง ในกรณีที่ 1 คือ $h_1 > h_2 > h_3$ โดยใช้ค่าของตัวควบคุมที่หาได้มาทำการทดสอบ

2.1.4 เริ่มโปรแกรม LabVIEW 8.2 พร้อมสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของกราฟบน หน้าจอของโปรแกรม

2.2 การควบคุมกระบวนการระดับที่สร้างขึ้นกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7



ภาพที่ 22 แผนภาพวิธีการควบคุมกระบวนการระดับที่สร้างขึ้นกับตัวควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7

แผนภาพที่ 22 แสดงรูปแบบการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถัง ที่สร้างขึ้นกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ซึ่งมีวิธีการตามขั้นตอนต่างๆ ตามภาพที่ 20 โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ออกแบบและสร้างกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถัง โดยใช้ค่าต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ดังนี้

- ถัง Reservoir มีขนาด กว้าง x สูง x ลึก มีค่าเท่ากับ 80 x 15 x 25 cm.
- ถังกระบวนการระดับทั้ง 3 ถัง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 15 cm. และมีขนาดความสูงเท่ากับ 33 cm.
- ท่อที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างถังที่ 1 กับ ถังที่ 2 และถังที่ 2 กับถังที่ 3 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.9 cm.
- ท่อสำหรับการถ่ายเทของเหลวออกจากถังที่ 3 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.25 cm. ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กกว่าที่ได้ทำการออกแบบไว้โดยมีค่าเล็กกว่าเท่ากับ 0.65 cm.
- ป้อนน้ำสำหรับจ่ายของเหลวให้กับกระบวนการมีอัตราการสูบน้ำเท่ากับ 866 cm³/min
- อุปกรณ์ควบคุมวาล์วใช้ DC Servo Motor และอุปกรณ์ตรวจวัดระดับของเหลวภายในถังเป็นลักษณะการส่งสะท้อนด้วยแสงอินฟราเรด โดยใช้แผ่นโฟมบางทำหน้าที่เป็นแผ่นสะท้อนแสง

2.2.2 นำสมการที่ (38) มาเขียนลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 โดยใช้ค่าตัวควบคุมพีไอที่ได้และตั้งค่าของระดับที่ต้องการตามกรณีที่ 1 คือ $h_1 > h_2 > h_3$ และกำหนดค่าเวลาในการสุ่มรับผลการเปลี่ยนแปลงที่ 500 mSec ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 มีค่าความละเอียดในการแปลงระดับสัญญาณแอนะล็อกขนาด 10 บิต ที่ระดับสัญญาณ 0 – 3.3 VDC จำนวน 2 ช่องสัญญาณสำหรับการรับค่าสัญญาณจากตัวตรวจวัดระดับของกระบวนการที่สร้างขึ้นและสั่งการควบคุมอัตราการไหลเข้าเชิงปริมาณของถังที่ 1 และถังที่ 3 ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 เป็นสัญญาณดิจิทัลให้กับ DC Servo Motor

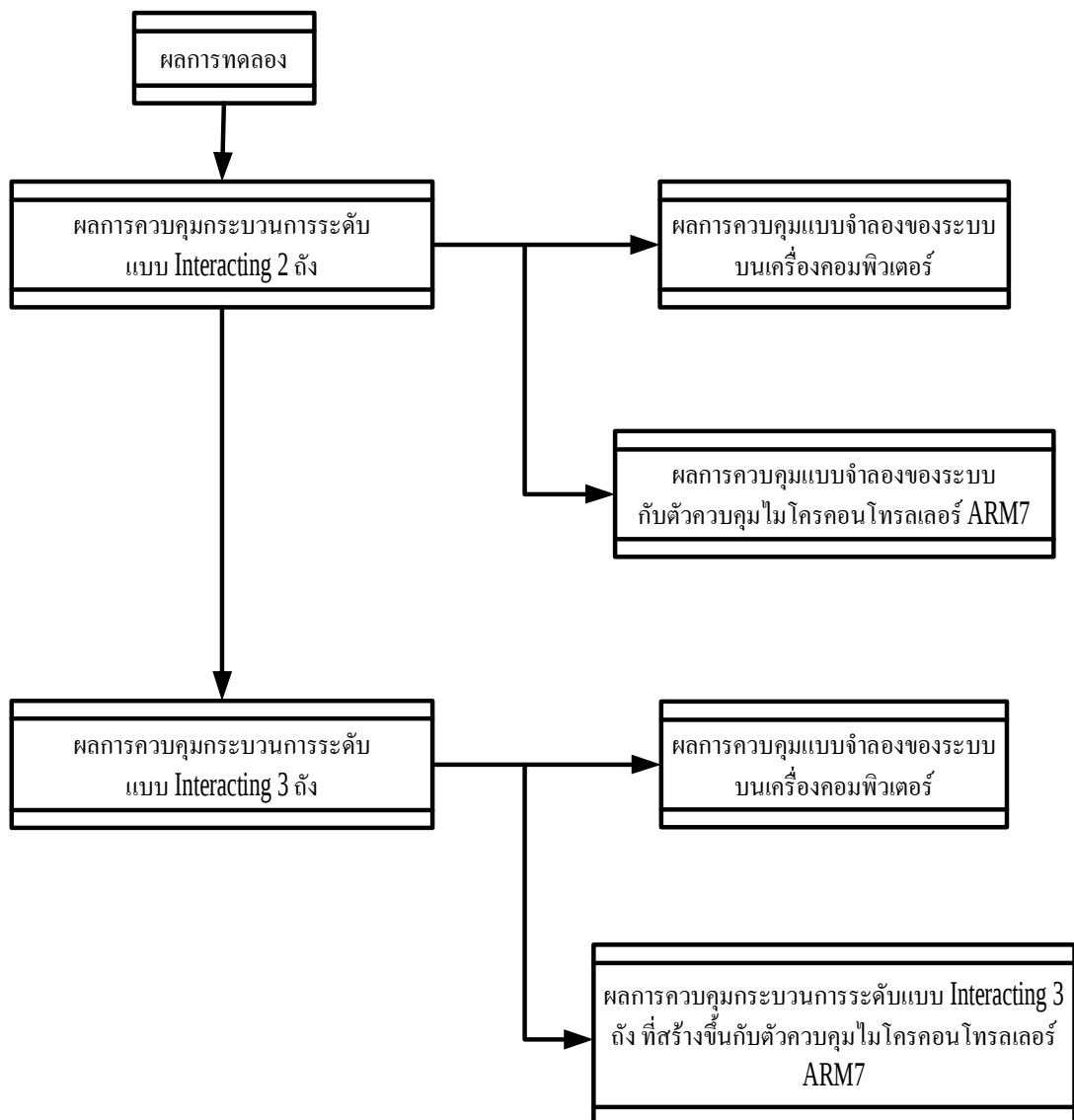
2.2.3 ทำการเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างกระบวนการระดับที่สร้างขึ้นกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7

2.2.4 ทำการทดสอบโดยเริ่มการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 พร้อมสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของระดับความสูงของเหลวภายในถังจากค่าที่อ่านด้วยตัวตรวจวัดระดับซึ่งแสดงผลบนหน้าจอ LCD

2.2.5 นำผลที่ได้จากการควบคุมด้วยตัวไมโครคอนโทรลเลอร์มาสร้างกราฟด้วยโปรแกรม Microsoft Excel.

ผลและวิจารณ์

ผล



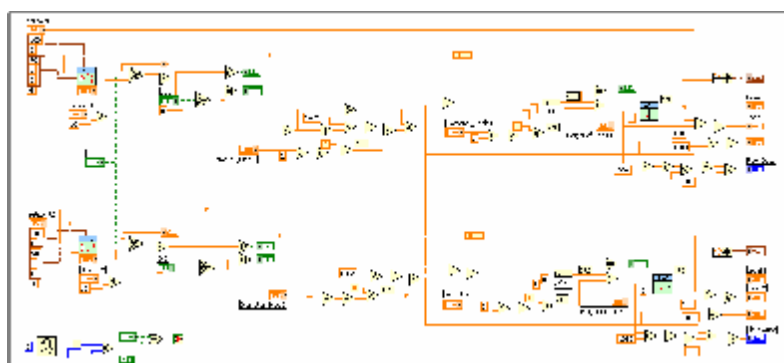
ภาพที่ 23 แผนภาพผลการทดลอง

ภาพที่ 23 เป็นแผนภาพแสดงผลการทดลองที่ได้จากวิธีการควบคุม สามารถแยกผลการทดลองที่ได้ออกเป็น 2 การทดลองดังนี้

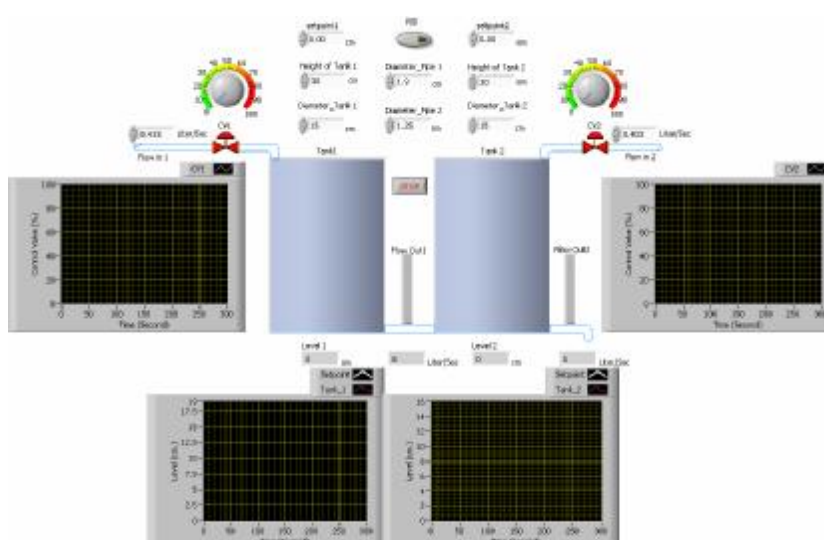
ผลการทดลองที่ 1 ผลการทดลองการควบคุมกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง

ผลการทดลองที่ 1 ทำการทดสอบผลการตอบสนองของกระบวนการระดับแบบ interacting 2 ถึง ในกรณีที่ 1 $h_1 > h_2$ ค่าระดับความสูงที่ทำการทดลองในถังที่ 1 มีค่าเท่ากับ 15 cm. และระดับความสูงที่ทำการทดลองในถังที่ 2 มีค่าเท่ากับ 10 cm. ด้วยวิธีการควบคุมพีไอสามารถแยกผลการทดลองได้ดังนี้

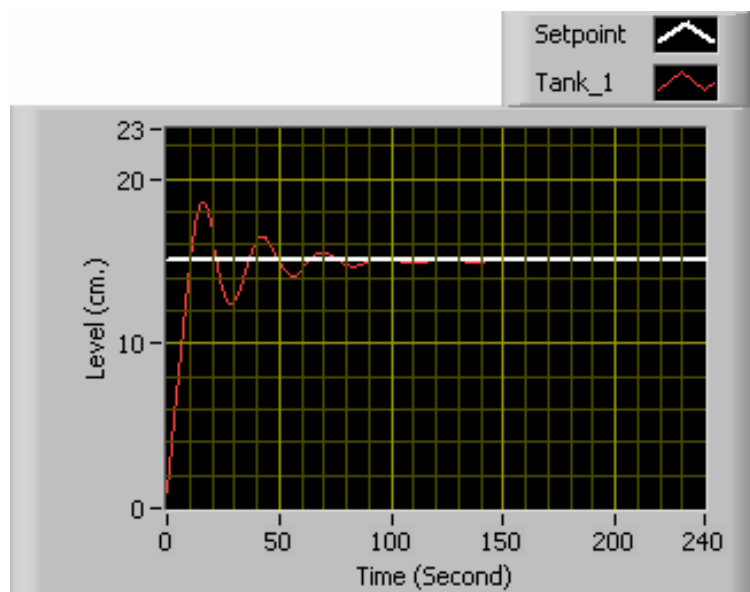
1. ผลการตอบสนองของกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองกับตัวควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2



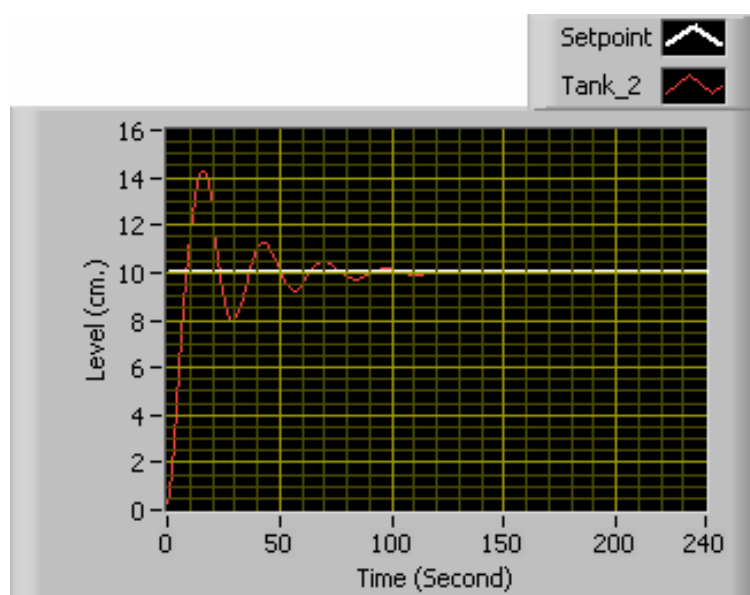
ภาพที่ 24 การเขียนแบบจำลองของระบบบนโปรแกรม LabVIEW 8.2



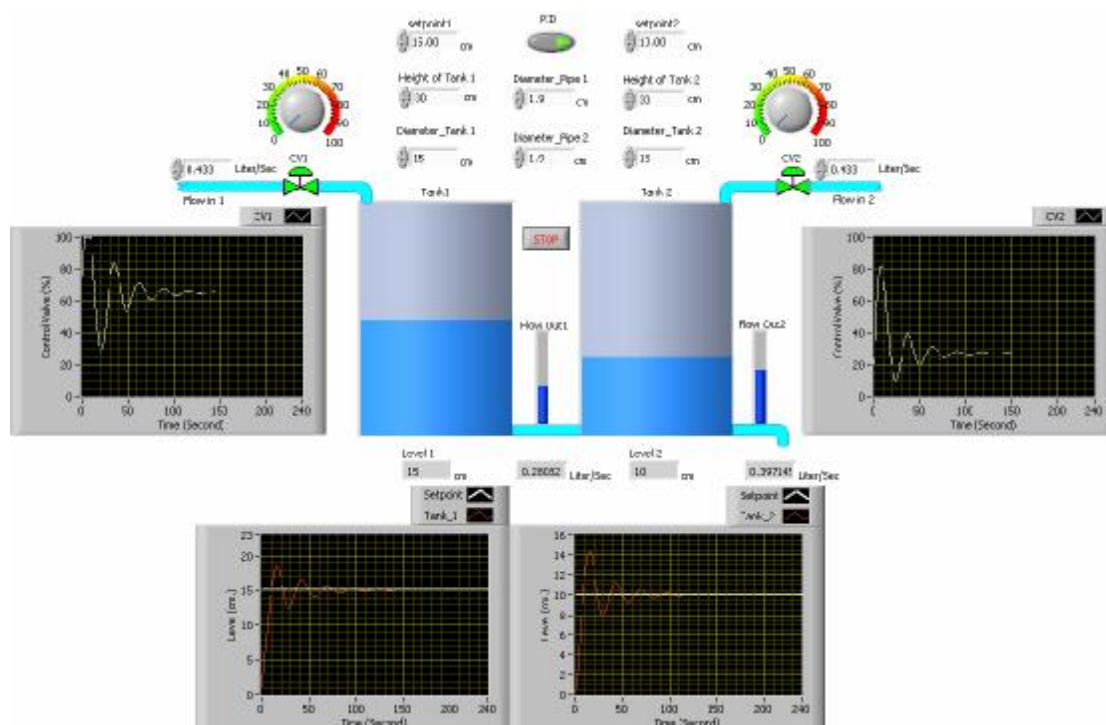
ภาพที่ 25 หน้าจอแสดงผลของกระบวนการบนโปรแกรม LabVIEW 8.2



ภาพที่ 26 ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 1 ด้วยการควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2

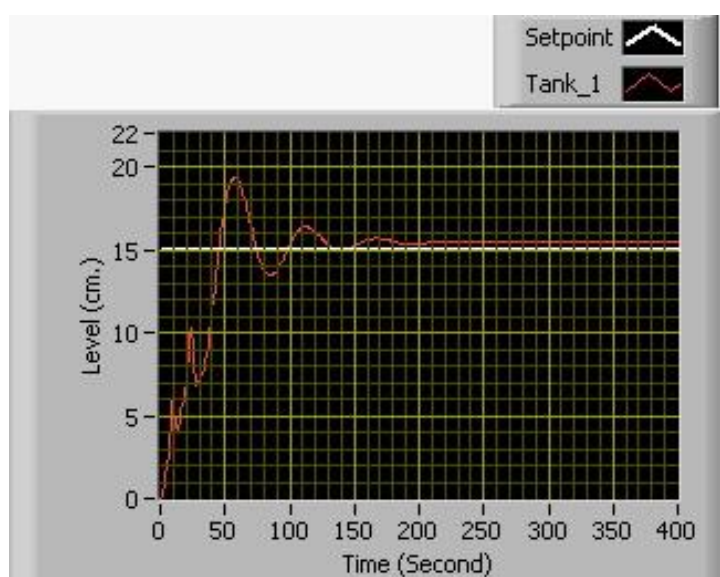


ภาพที่ 27 ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 2 ด้วยการควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2

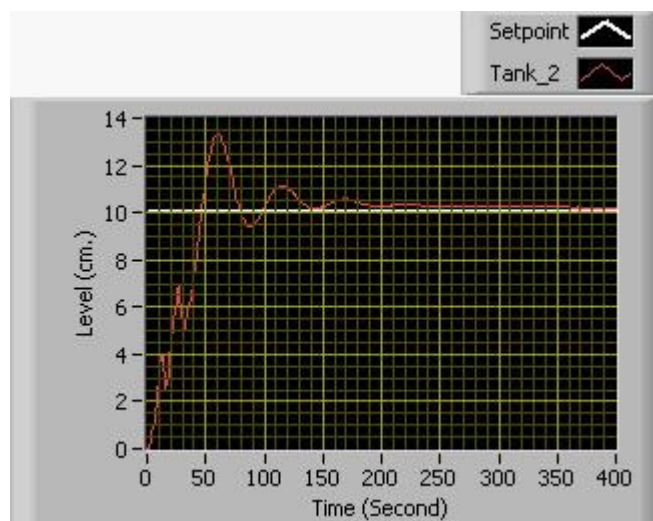


ภาพที่ 28 หน้าจอแสดงผลบนโปรแกรม LabVIEW 8.2

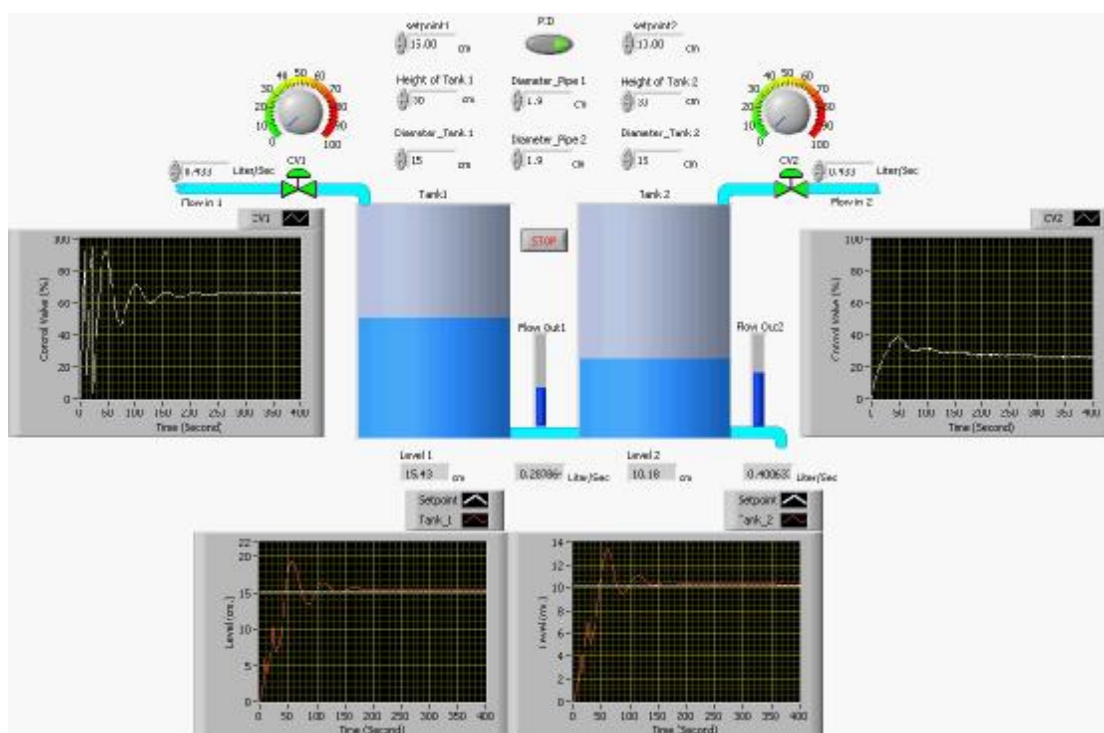
2. ผลการตอบสนองของกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7



ภาพที่ 29 ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 1 ด้วยการควบคุมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7



ภาพที่ 30 ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 2 ด้วยการควบคุมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7

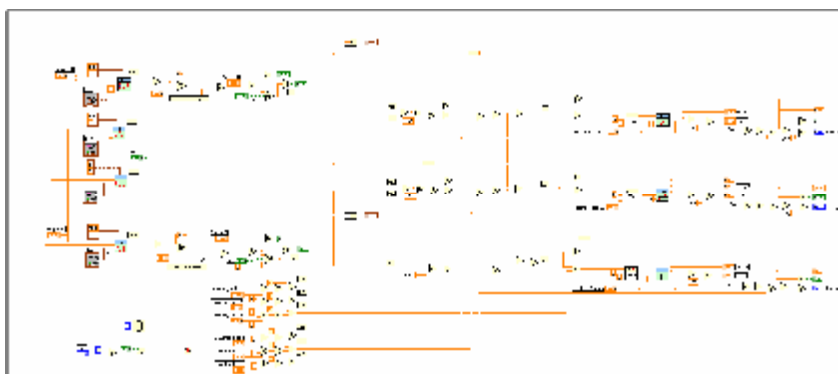


ภาพที่ 31 หน้าจอแสดงผลบนโปรแกรม LabVIEW 8.2

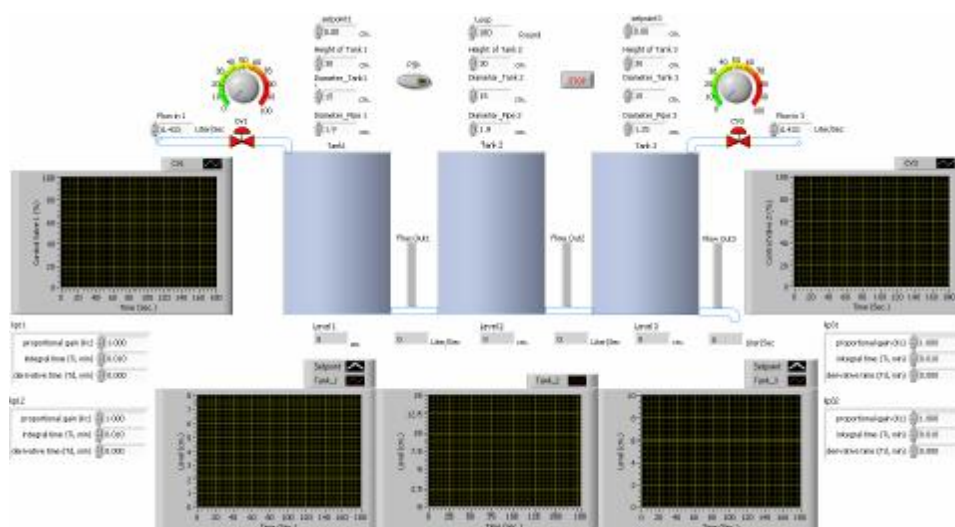
ผลการทดลองที่ 2 ผลการทดลองการควบคุมกระบวนการณ์ระดับแบบ interacting 3 ถัง

ผลการทดลองที่ 2 ทำการทดสอบผลการตอบสนองของกระบวนการณ์ระดับแบบ interacting 3 ถัง ในกรณีที่ $h_1 > h_2 > h_3$ ค่าระดับความสูงที่ทำการทดลองในถังที่ 1 มีค่าเท่ากับ 15 cm. และระดับความสูงที่ทำการทดลองในถังที่ 3 มีค่าเท่ากับ 5 cm. ด้วยวิธีการควบคุมพีไอ สามารถแยกผลการทดลองได้ดังนี้

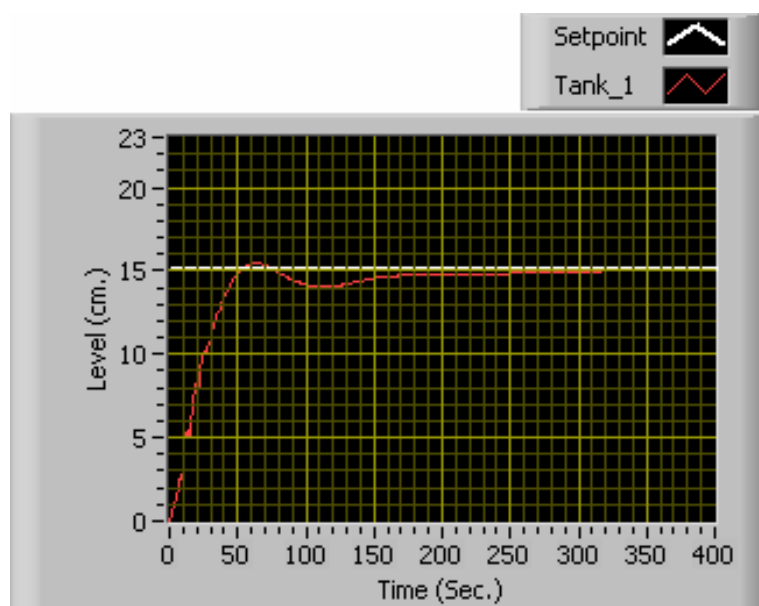
1. ผลการตอบสนองของกระบวนการณ์ระดับด้วยแบบจำลองกับตัวควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2



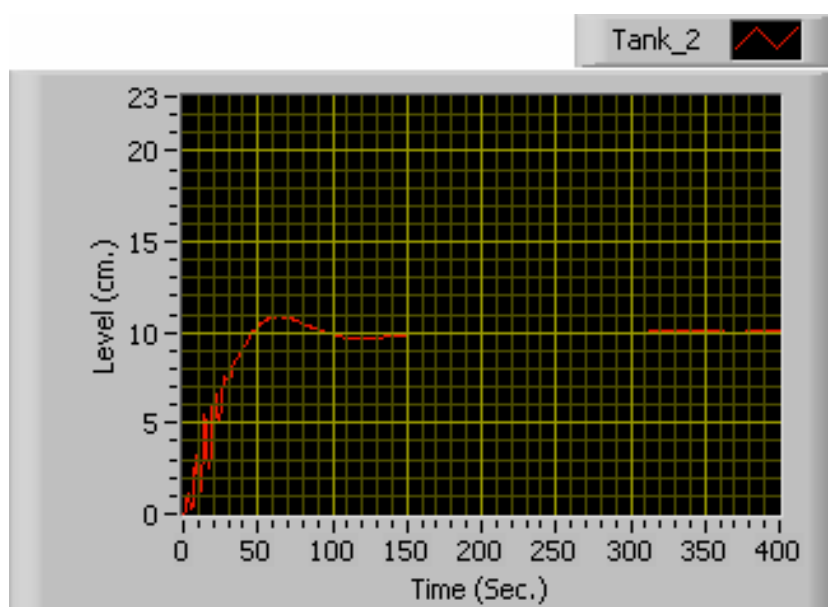
ภาพที่ 32 การเขียนแบบจำลองของระบบบนโปรแกรม LabVIEW 8.2



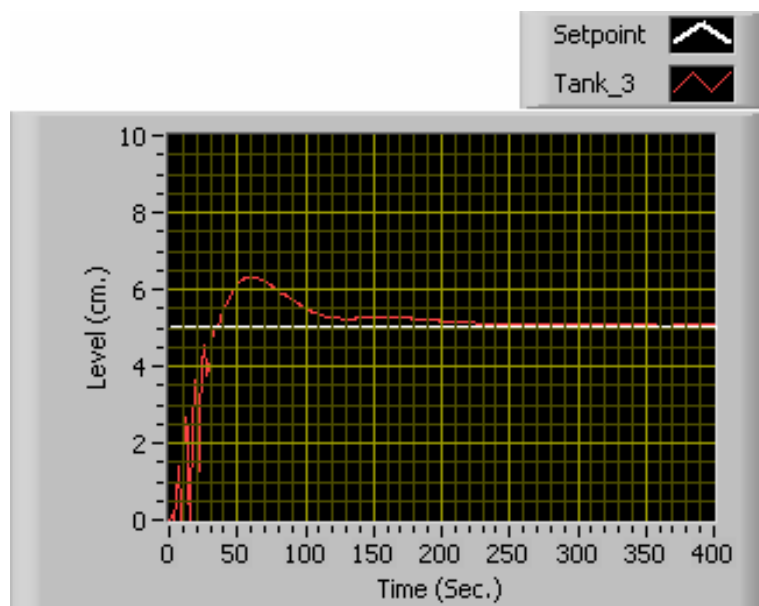
ภาพที่ 33 หน้าจอแสดงผลของกระบวนการณ์บนโปรแกรม LabVIEW 8.2



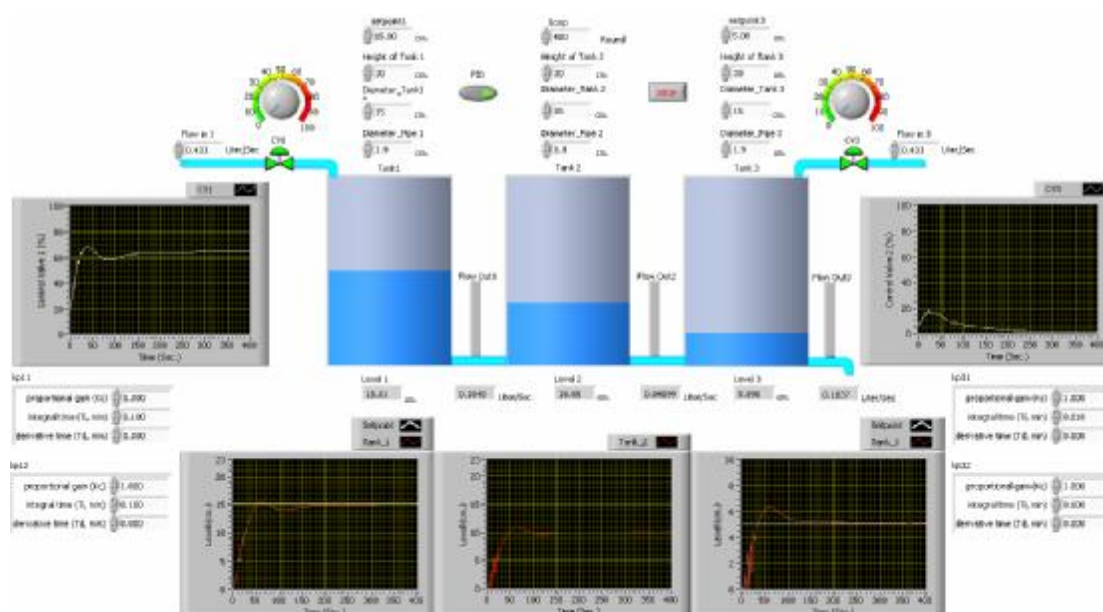
ภาพที่ 34 ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 1 ด้วยการควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2



ภาพที่ 35 ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 2 ด้วยการควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2

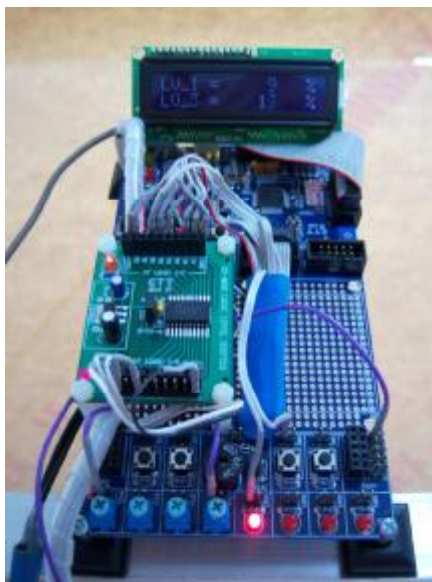


ภาพที่ 36 ผลการตอบสนองของระดับในถังที่ 3 ด้วยการควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2

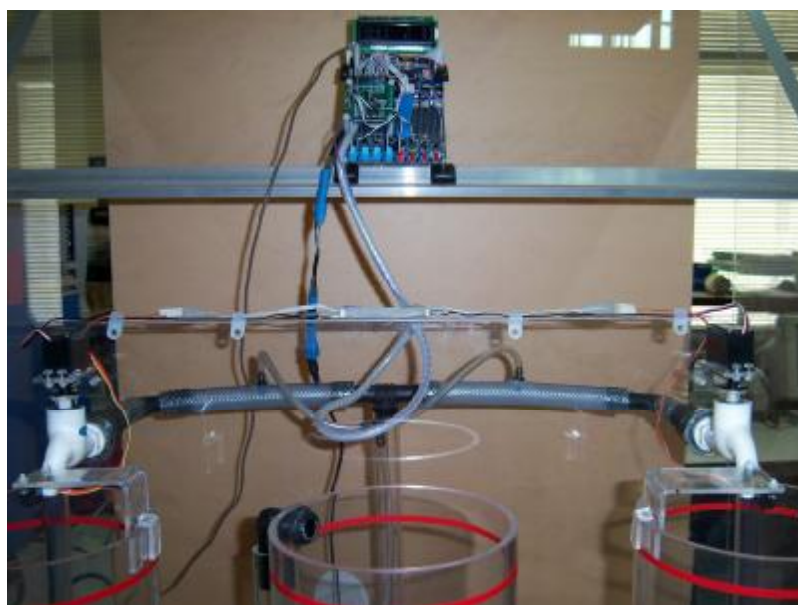


ภาพที่ 37 หน้าจอแสดงผลบนโปรแกรม LabVIEW 8.2

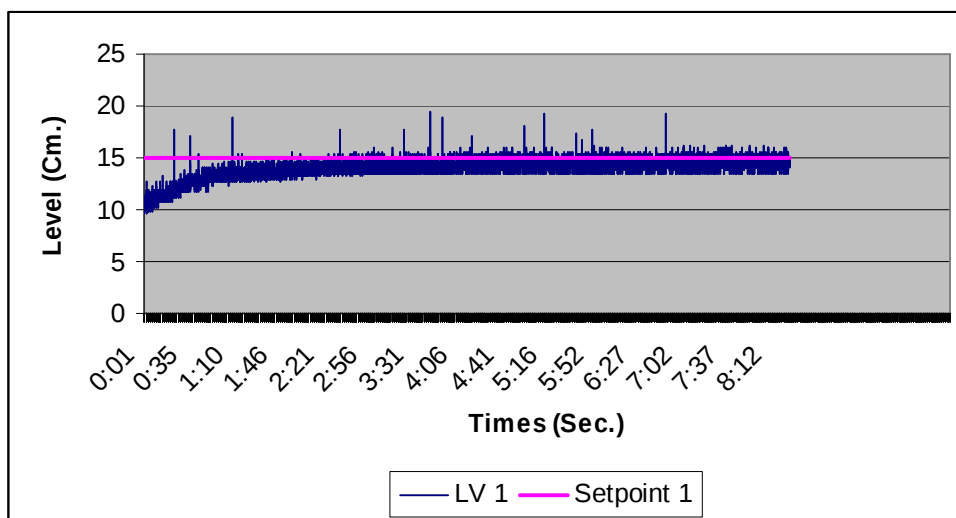
2. ผลการตอบสนองของกระบวนการระดับที่สร้างขึ้นกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7



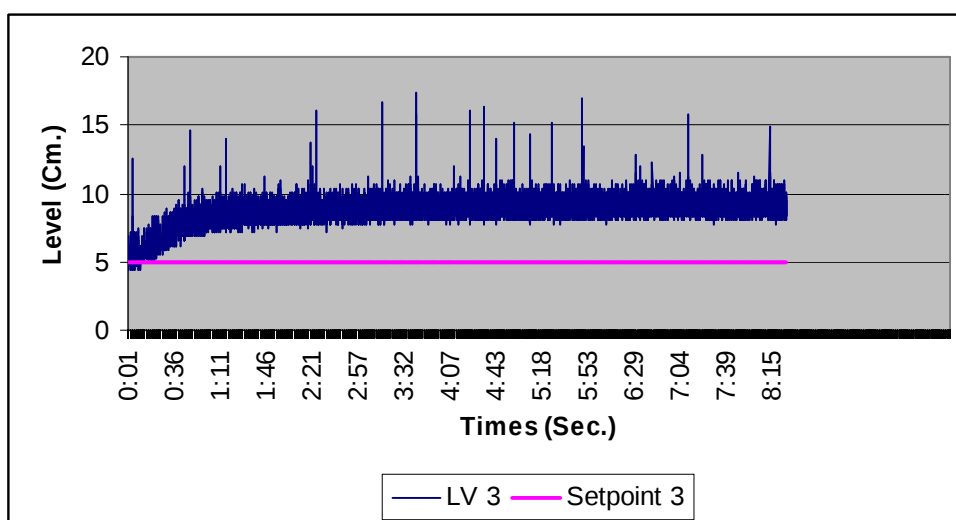
ภาพที่ 38 ตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7



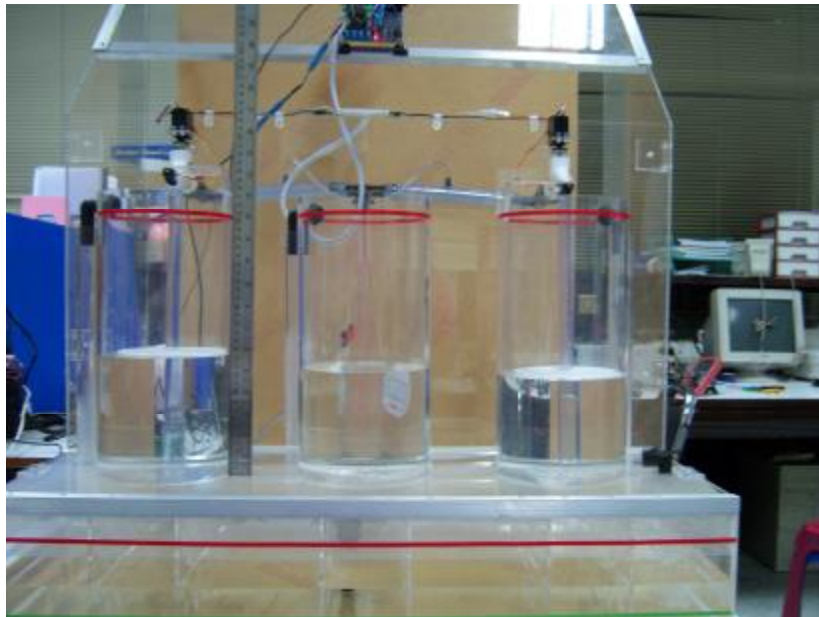
ภาพที่ 39 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 กับกระบวนการที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 40 ผลการควบคุมระดับของเหลวในถังที่ 1



ภาพที่ 41 ผลการควบคุมระดับของเหลวในถังที่ 3



ภาพที่ 42 การทดลองในกรณีที่ 1

วิจารณ์

ผลการทดลองที่ 1 การทดลองตัวควบคุมพีไอบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 และบนตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 โดยใช้ค่า $k_{p11} = 5$, $k_{p22} = 2$, $k_{i11} = 0.1$, $k_{i22} = 0.02$ เมื่อทำการทดลองพบว่า

กรณีที่ 1 $h_1 > h_2$

1. ผลการตอบสนองของกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองกับตัวควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 แสดงให้ทราบว่าสามารถควบคุมการรักษาระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 และถังที่ 2 ได้ และสามารถวิเคราะห์ผลดังนี้

ตารางที่ 3 วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองกับตัวควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2

ตัวแปร	Set point (Cm.)	% Overshoot (%)	T_s (Second)	Error (Cm.)
h_1	15	23.3	85	0
h_2	10	42.5	87	0

2. ผลการตอบสนองของกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 แสดงให้ทราบว่าสามารถควบคุมการรักษาระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 และถังที่ 2 ได้ และสามารถวิเคราะห์ผลดังนี้

ตารางที่ 4 วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7

ตัวแปร	Set point (Cm.)	% Overshoot (%)	T_s (Second)	Error (Cm.)
h_1	15	30	190	0.25
h_2	10	32.5	190	0.1

ผลการทดลองที่ 2 การทดลองตัวควบคุมพีไอบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 และบนตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้ค่า $k_{p11} = 1$, $k_{p12} = 1$, $k_{p31} = 1$, $k_{p32} = 1$, $k_{i11} = 0.1$, $k_{i12} = 0.1$, $k_{i31} = 0.01$, $k_{i32} = 0.1$ เมื่อทำการทดลองพบว่า

กรณีที่ 1 $h_1 > h_2 > h_3$

1. ผลการตอบสนองของกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองกับตัวควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2 แสดงให้ทราบว่าสามารถควบคุมการรักษาระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 และถังที่ 3 ได้และสามารถวิเคราะห์ผลดังนี้

ตารางที่ 5 วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการระดับด้วยแบบจำลองกับตัวควบคุมบนโปรแกรม LabVIEW 8.2

ตัวแปร	Set point (Cm.)	% Overshoot (%)	T_s (Second)	Error (Cm.)
h_1	15	18.7	165	0
h_3	5	25	200	0

2. ผลการตอบสนองของกระบวนการระดับที่สร้างขึ้นกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 แสดงให้ทราบว่าสามารถควบคุมการรักษาระดับความสูงของเหลวภายในถังที่ 1 ได้แต่ในถังที่ 3 ไม่สามารถควบคุมได้และสามารถวิเคราะห์ผลดังนี้

ตารางที่ 6 วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการระดับที่สร้างขึ้นกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7

ตัวแปร	Set point (Cm.)	% Overshoot (%)	T_s (Second)	Error (Cm.)
h_1	15	0	213	0.5
h_3	5	0	247	4

ผลที่ได้จากการปรับเปลี่ยนค่า K_p และค่า K_I ที่ทำให้รากของระบบอยู่ทางซ้ายมือของระนาบแสดงให้ทราบว่ามิได้หลายค่า จึงเป็นสิ่งที่ยากที่จะทำการสุ่มค่ามาได้ทั้งหมด แต่ค่าที่หาได้เป็นเพียงค่าที่นำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาผลการตอบสนองของระบบก่อนนำค่าที่ได้ไปใช้งาน และผลที่ได้จากการทดลองอาจมีข้อผิดพลาดได้หลายประการ เช่น ค่าที่อ่านได้จากตัวตรวจวัดระดับ การกระเพื่อมของของเหลว หรือสภาวะแวดล้อมในการทดลอง ฯลฯ จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะนำมาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงและแก้ไขในทดลองต่อไป

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. สามารถหาแบบจำลองของกระบวนการระดับที่มีผลกระทบต่อกันได้
2. สามารถออกแบบและวิเคราะห์วิธีการควบคุมพีไอ สำหรับกระบวนการระดับที่มีผลกระทบต่อกันได้
3. สามารถทดสอบการควบคุมด้วยแบบจำลองของระบบบนเครื่องคอมพิวเตอร์และตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ได้
4. สามารถทำการสร้างกระบวนการระดับที่มีผลกระทบต่อกันแบบ 3 ถึง เพื่อทดสอบการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ได้
5. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยแบบจำลองกับกระบวนการจริงด้วยการควบคุมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ซึ่งผลตอบสนองของระบบที่ได้มีค่า Settling time $\pm 2\%$ และทำการทดสอบปรับเปลี่ยนค่าเพื่อให้ได้ค่าของ T_s ที่ทำให้เข้าสู่สภาวะคงตัวด้วยเวลาที่รวดเร็วได้
6. การทดลองที่ 2 ในการทดลองควบคุมกระบวนการระดับที่สร้างขึ้นกับตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ไม่สามารถควบคุมระดับในถังที่ 3 ได้เนื่องจากขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อทางขาออกของถังที่ 3 มีขนาดเล็กกว่าที่ได้ออกแบบไว้ส่งผลให้อัตราการไหลออกเชิงปริมาตรของถังที่ 3 มีค่าที่ลดลง
7. ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายใต้การควบคุมด้วยตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 สำหรับการทดลองที่ 1 อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ และสำหรับการทดลองที่ 2 ต้องดำเนินการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สมบูรณ์ขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบตัวควบคุมกระบวนการที่สามารถหาได้นั้นยังคงมีข้อจำกัดในบางประการ เนื่องจากวิธีในการปรับเปลี่ยนค่าของ K_p และ K_I สามารถปรับเปลี่ยนได้ในหลายรูปแบบ ซึ่งค่าที่หาได้จะเป็นเพียงค่าที่หาได้จากเงื่อนไขที่ทำการพิจารณาเท่านั้น ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

เงื่อนไขในการทำงานของระบบก็จำเป็นที่จะต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าของ K_p และ K_I ใหม่ทำให้การควบคุมด้วยวิธีพีไออาจยังไม่สามารถควบคุมได้อย่างครอบคลุม

ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมเป็นไปอย่างต่อเนื่องและสามารถทำงานได้ในทุกสภาวะเงื่อนไขจึงควรทำการศึกษาและหาวิธีในการควบคุมที่ทำให้การทำงานในทุกเงื่อนไขนั้นสามารถทำงานได้หรือสามารถคาดเดาแนวทางในการเปลี่ยนแปลงระบบได้อาทิเช่น การออกแบบตัวควบคุมแบบ Model Predictive, การออกแบบตัวควบคุมแบบ Gain Scheduling, การออกแบบตัวควบคุมแบบ Auto tuning PID เป็นต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

พระยศ แสนโกชน์ และธรณินทร์ พันทา. 2551. การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอบน ARM7 สำหรับถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล, น. 215. การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

พระยศ แสนโกชน์ และธรณินทร์ พันทา. 2551. การสร้างตัวต้นแบบการควบคุมด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ในกระบวนการระดับ, น. 158 - 165. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

โอภาส ศิริกรรชิตถาวร. 2549. เรียนรู้และพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 LPC2148 ด้วย ภาษาซี. โรงพิมพ์วชิรวิทย์สาส์น รัชดา. กรุงเทพมหานคร.

A.Yunus. 2003. Heat Transfer. Mc Graw – Hill, Singapore.

A.Yunnus, C and H.Tuner, R. 2005. Fundamentals of Thermal – Fluid Sciences. 2nd. Mc Graw – Hill, Singapore.

B.Dabney, J and L.Harman, T. 2001. Mastering Simulink4. Prentice Hall
Prentice – Hall , Inc. The United States of America.

C.Goodwin, G, F.Grebes, S and E.Salgado, M. 2001. Control System Design.
Prentice – Hall , inc., The United States of America.

D.Johnson, C. 2006. Process Control Instrumentation Technology. 8th. Pearson Education.
Inc., The United States of America.

- D.Roy, C. 2006. Modern Control Engineer. Prentice – Hall of India Private Limited, Jay Print Private Limited., New Delhi.
- D.Subbaram, N. 2002. Optimal Control Systems. CRC Press LLC, The United States of America.
- E. Seborg, D, F.Edgar, T and Duncan, A. Mellichamp. 2004. Process Dynamics and Control. John Wiley & Sons, Inc., The United State of America.
- F. Shinskey, G. 1988. Process Control System Application Design and Adjustment. 3rd. McGraw-Hill,inc., Singapore.
- G.Sanjay and J.John. 2005. Virtual Instrumentation Using Lab VIEW. Tata McGraw – Hill Publishing Company Limited, New Delhi.
- G.Stephanopoulos. 1984. Chemical Process Control an Introduction to Theory and Practice. Prentice – Hall ,inc., The United States of America.
- G.Sudhir. 2002. Elements of Control Systems. Prentice – Hall, inc., The United State of America.
- K.Khalil, H. 2002. NonlinearSystem. 3rd edition. Prentice – Hall, Inc. The United States of America.
- K.Nasser and K.Namjin. 2005. Digital Signal Processing System – Level Design Using Lab VIEW. Elsevier Inc, The United States of America.
- N.Bateson, R. 2002. Introduction to Control System Technology. Prentice Hall. The United States of America.

- P.Hunter, R. 1982. Automated Process Control Systems Concept and Hardware. Prentice – Hall International, Inc. The United States of America.
- R.Munson, B, F.Young, D and H.Okishi, T. 1994. Fundamentals of Fluid Mechanics. 2nd. John Wiley & Sons, Inc., Lehigh Press.
- S.Norman, N. 2004. Control Systems Engineering. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc. The India.
- W.Bolton. 1992. Control Engineer. Longman Scientific & Technical., Malaysia.
- W.Johnson, G and J.Richard. 2001. Lab VIEW Graphical Programming Practical Applications in Instrumentation and Control. 3th. McGraw – Hill Companies, The United.
- Y.Beyon, J. 2001. Lab VIEW Programming Data Acquisition and Analysis. Prentice – Hall, Inc., The United State of America.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การใช้งานโปรแกรม LabVIEW 8.2

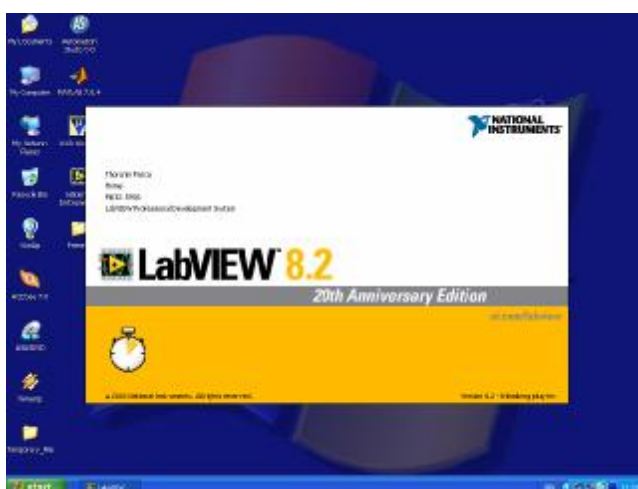
การใช้งานโปรแกรม LabVIEW 8.2

1. ทำการติดตั้งโปรแกรม LabVIEW 8.2
2. บนหน้าจอ Desktop จะมีไอคอนของโปรแกรมให้ทำการเรียกโปรแกรมขึ้นมาใช้งาน



ภาพผนวกที่ ก1 ไอคอนของโปรแกรม LabVIEW 8.2 หน้าจอหลัก

3. รอการการทำงานของโปรแกรมในการเรียกค่าพารามิเตอร์ในการใช้งาน



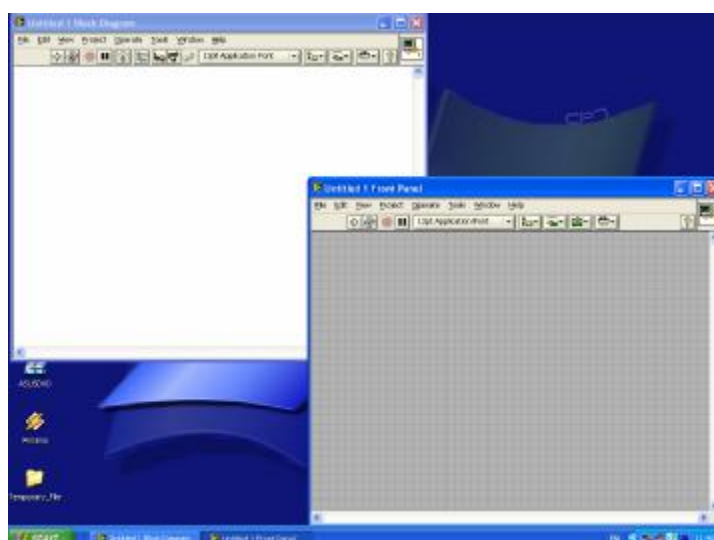
ภาพผนวกที่ ก2 การเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรม

4. ปรากฏหน้าต่างในการเลือกรูปแบบของไฟล์ที่ต้องการใช้งานให้เลือกไปที่ Blank VI



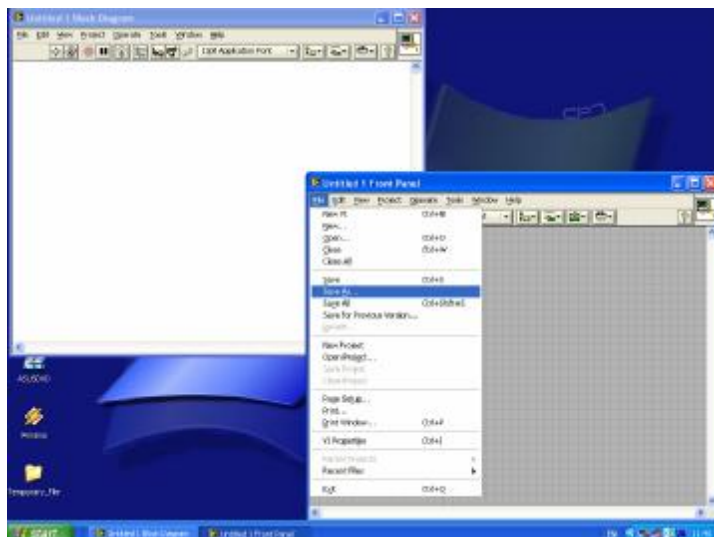
ภาพผนวกที่ ก3 การเลือกรูปแบบของไฟล์ที่จะใช้งาน

5. ปรากฏหน้าต่างของการใช้งานสองส่วนคือส่วนแรกจะเป็นหน้าต่างของ Front Panel และหน้าต่างของ Block Diagram



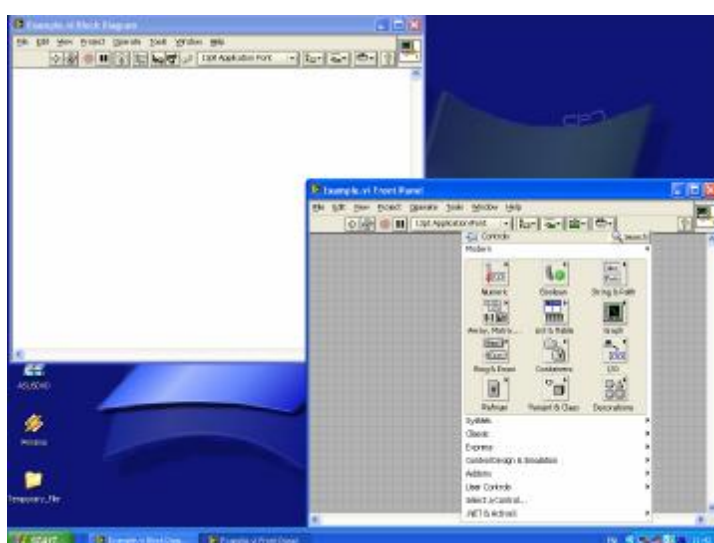
ภาพผนวกที่ ก4 หน้าต่างสำหรับใช้งาน

6. ให้ไปที่หน้าต่างของ Front Panel เพื่อทำการบันทึกงานที่สร้างขึ้น

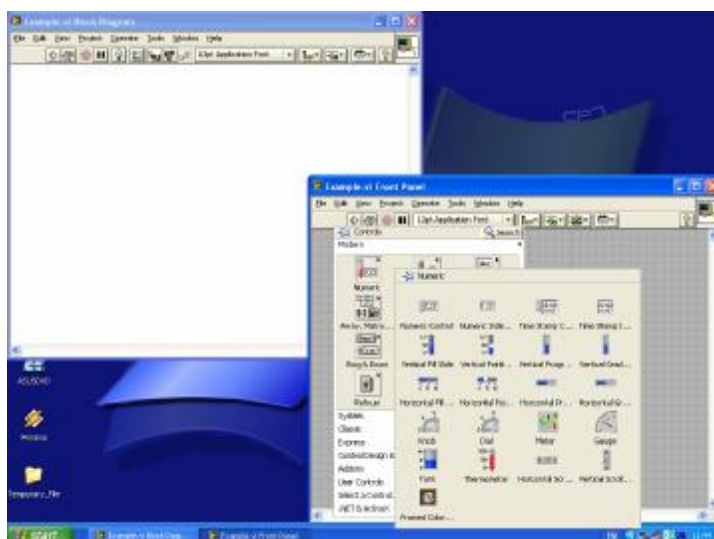


ภาพผนวกที่ ๕ การบันทึกงานที่สร้างขึ้น

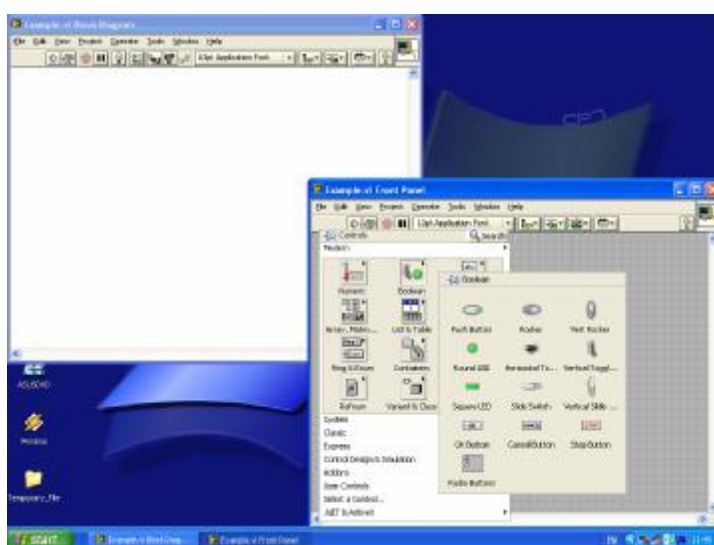
7. บนหน้าต่างของ Front Panel จะทำหน้าที่ในการสร้างส่วนแสดงผลและรับค่าจาก
ผู้ใช้งาน ซึ่งผู้ใช้สามารถทำการเลือกสัญลักษณ์ในการทำงานต่างๆ ได้โดยการคลิก
ขวาที่เมาส์ จะปรากฏเมนูช่วยขึ้นมาให้ผู้ใช้ได้ทำการเลือกสัญลักษณ์ที่ต้องการสร้าง
มาวางลงบนหน้าต่างของ Front Panel



ภาพผนวกที่ ๖ การใช้งานบนหน้าต่าง Front Panel

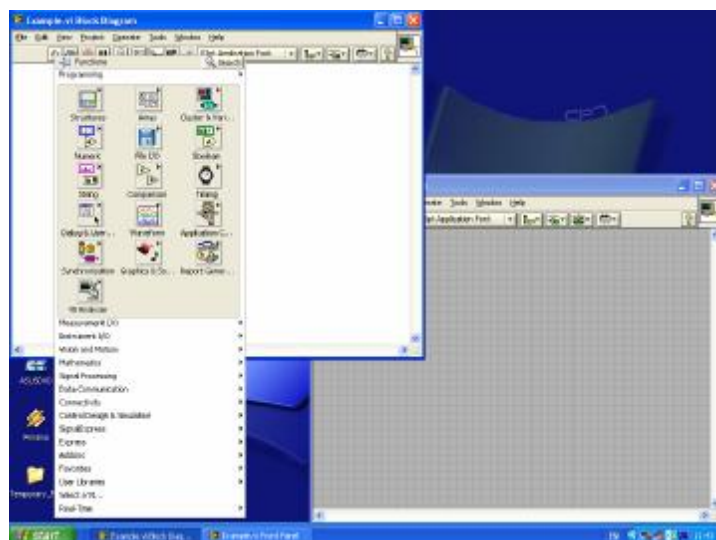


ภาพผนวกที่ ก7 การเลือกสัญลักษณ์ในการใช้งานที่เป็นตัวแสดงผลบนหน้าต่างของ Front Panel

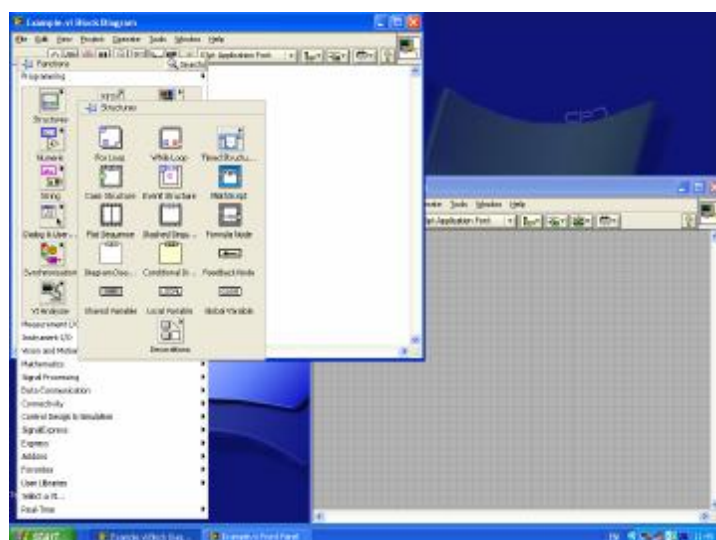


ภาพผนวกที่ ก8 การเลือกสัญลักษณ์ในการใช้งานที่เป็นตัวรับค่าและควบคุมผลบนหน้าต่างของ Front panel

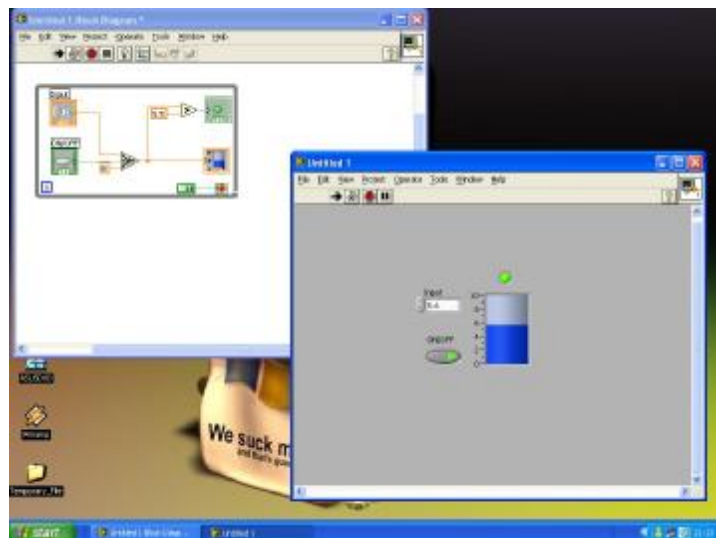
8. บนหน้าต่างของ Block Diagram จะทำหน้าที่ในการสร้างฟังก์ชันการทำงานต่างๆ เพื่อให้เกิดความสัมพันธ์กับการแสดงผลและรับค่าจากผู้ใช้งาน ซึ่งผู้ใช้สามารถทำการเลือกสัญลักษณ์ในการทำงานต่างๆ ได้โดยการคลิกขวาที่เมาส์บนหน้าต่าง Block Diagram จะปรากฏเมนูช่วยขึ้นมาให้ผู้ใช้ได้ทำการเลือกสัญลักษณ์ที่ต้องการเพื่อสร้างฟังก์ชันการทำงานให้กับโปรแกรม



ภาพผนวกที่ ๑๑ หน้าต่าง Block Diagram



ภาพผนวกที่ ๑๒ สัญลักษณ์การสร้างฟังก์ชัน



ภาพผนวกที่ ก11 ตัวอย่างของโปรแกรมการทำงานบน LabVIEW 8.2

ภาคผนวก ข

การใช้งานการ์ด Multi-Function DAQ Module ของบริษัท ADLINK รุ่น PCI-9112 ร่วมกับ
โปรแกรม LabVIEW 8.2

- 1 สิ่งที่ต้องใช้ในการติดตั้งการ์ด PCI-9112 มีดังนี้
 - 1.1 คอมพิวเตอร์ที่มีช่องเสียบการ์ดชนิด PCI
 - 1.2 การ์ด PCI-9112 (ได้มาตอนซื้อการ์ด)
 - 1.3 All In One CD (ได้มาตอนซื้อการ์ด)
 - 1.4 Software Installation Guide หรือเรียกว่าคู่มือการติดตั้งโปรแกรม (ได้มาตอนซื้อการ์ด)
 - 1.5 NuDAQ / NulPC 9112 Series Multi-function DAS Cards For PCI/3U CompactPCI User's Guide หรือเรียกว่าคู่มือการใช้งาน (ได้มาตอนซื้อการ์ด)



ภาพผนวกที่ ข1 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีช่องเสียบการ์ดชนิด PCI



ภาพผนวกที่ ข2 คู่มือพร้อมด้วย CD และการ์ด PCI-9112

2 สิ่งที่ต้องใช้เพิ่มเติมในการใช้งานการ์ด PCI-9112 มีดังนี้

เมื่อเราทำการติดตั้งการ์ด PCI-9112 เข้ากับคอมพิวเตอร์แล้วจะทำให้การต่อสัญญาณภายนอกให้กับการ์ด PCI-9112 ทำได้ไม่สะดวกจึงต้องมีสายสัญญาณเชื่อมต่อจากการ์ด PCI-9112 ที่ติดตั้งอยู่ในคอมพิวเตอร์ออกมาต่อเข้ากับเทอร์มินอล จากนั้นเราจะทำการต่อสัญญาณภายนอกเข้ากับตัวเทอร์มินอลแทน ดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มเติมดังนี้

1. สายสัญญาณ DB-37 ใช้สำหรับต่อเชื่อมระหว่างการ์ด PCI-9112 กับ เทอร์มินอล
2. เทอร์มินอล รุ่น DIN-37D ใช้เป็นตัวกลางสำหรับต่อเชื่อมระหว่างสัญญาณภายนอกกับการ์ด PCI-9112



ภาพผนวกที่ ข4 สายสัญญาณในการเชื่อมต่อระหว่างการ์ดกับหัวต่อ



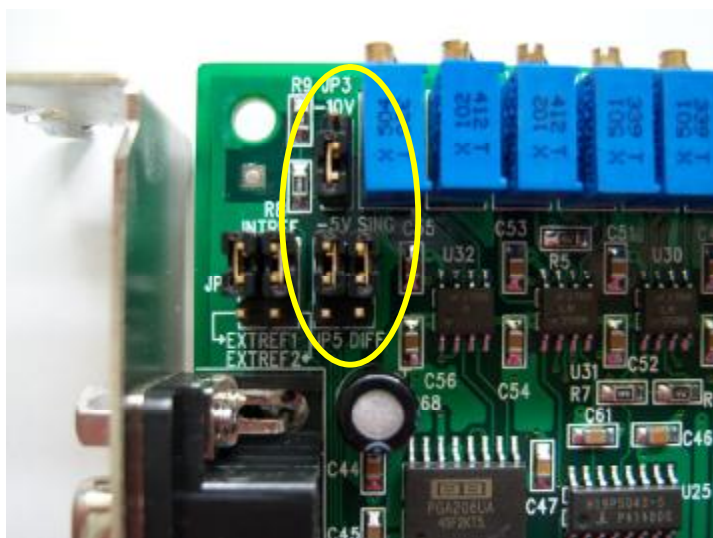
ภาพผนวกที่ ข5 หัวต่อใช้งาน

3 การติดตั้งการ์ด PCI-9112 เพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW 8.2 มีดังนี้

การ์ด PCI-9112 สามารถติดตั้งได้ง่าย และสามารถใช้งานร่วมกันกับโปรแกรมได้หลายโปรแกรม ซึ่งทำได้โดยการติดตั้ง Driver เพิ่มเติมเข้าไป สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้

การ์ด PCI-9112 ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW 8.2 ซึ่งมีขั้นตอนการติดตั้งดังนี้

- 3.1 เนื่องจากเราจะใช้การ์ด PCI-9112 สำหรับเป็นตัวรับและเป็นตัวส่งสัญญาณสัญญาณอนาล็อกแบบ Single – ended Mode โดยใช้ระดับแรงดันอ้างอิงภายในที่ระดับแรงดัน 0-5 Vdc จึงต้องกำหนด Jumper JP3, JP1 และ JP5



ภาพผนวกที่ ข6 การติดตั้ง Jumper JP5 และ JP3



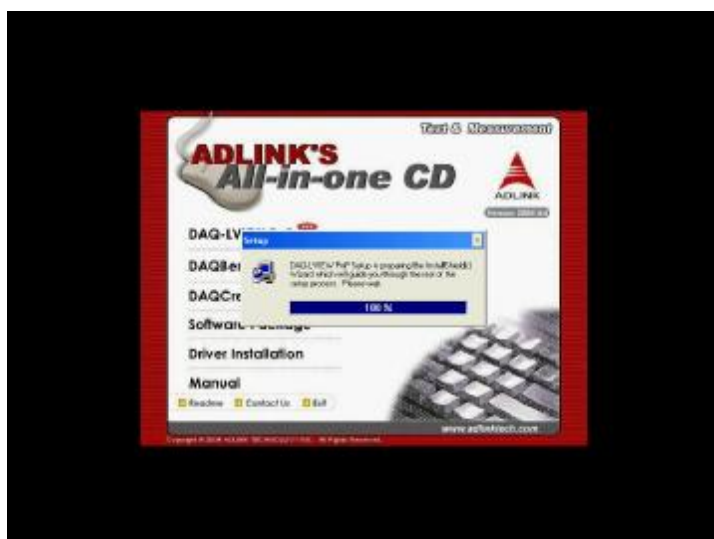
ภาพผนวกที่ ข7 การติดตั้ง Jumper JP1

- 3.2 ทำการตัดสัญญาณไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จะสามารถเข้ามาในคอมพิวเตอร์ เช่น ดึงเต้าเสียบออก ดึงสาย LAN ออก ฯลฯ เพื่อไม่ให้สัญญาณไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟฟ้าทำความเสียหายให้กับการ์ด PCI-9112 ระหว่างการติดตั้ง
- 3.3 ติดตั้งการ์ด PCI-9112 เข้ากับช่องเสียบชนิด PCI ของคอมพิวเตอร์ และต่อสายสัญญาณจากการ์ด PCI-9112 เข้าสู่เทอร์มินอลให้เรียบร้อย
- 3.4 เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อที่จะทำการติดตั้ง Driver โดยนำแผ่น CD All-in-one CD เครื่องคอมพิวเตอร์จะแสดงหน้าต่างเมนูให้เลือกที่ DAQ-LAVIEW PnP เครื่องจะทำการติดตั้งไฟล์ข้อมูล



ภาพผนวกที่ ข8 หน้าต่างเมนูติดตั้ง

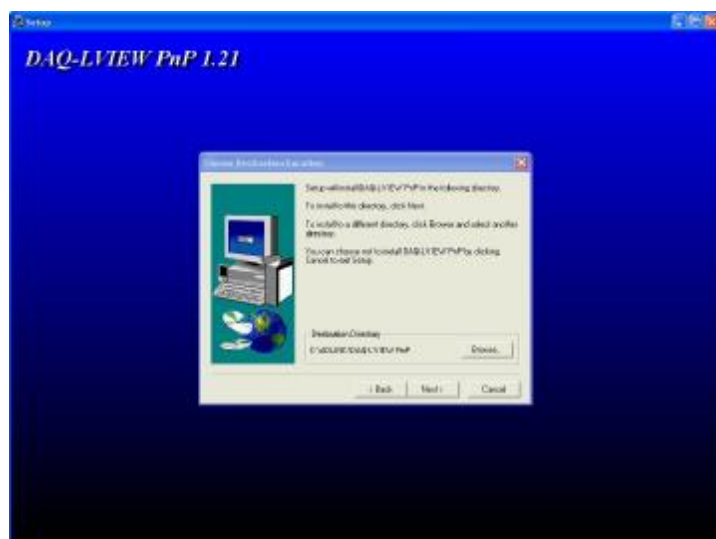
- 3.5 เครื่องคอมพิวเตอร์จะแสดงหน้าต่างแจ้งรายละเอียดเงื่อนไขของโปรแกรมให้เลือก Next และทำการเลือกตำแหน่งในการติดตั้งไฟล์แล้วเลือก Next
- 3.6 เครื่องคอมพิวเตอร์จะแสดงหน้าต่างเลือกโฟลเดอร์โปรแกรมให้เลือก Next
- 3.7 เครื่องคอมพิวเตอร์จะแสดงหน้าต่างการติดตั้งโปรแกรมให้รอนกว่าจะครบ 100 % และเครื่องจะแสดงหน้าต่างให้เลือกุ่นของการ์ดที่จะใช้งานโดยเลือกไปที่ Pci9112



ภาพผนวกที่ ข9 โปรแกรมดำเนินการติดตั้งไฟล์ข้อมูล



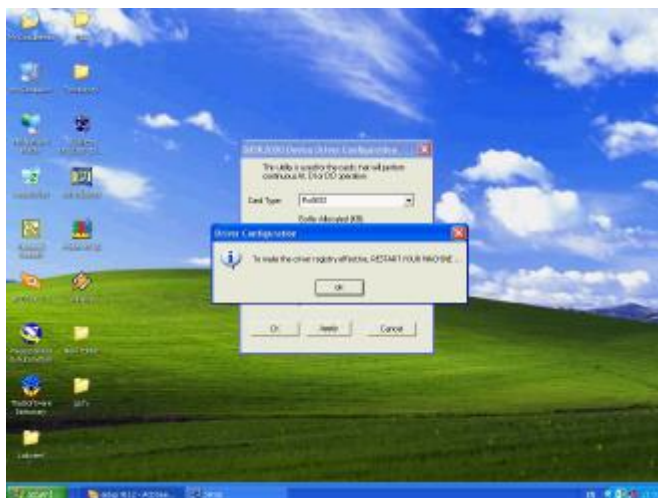
ภาพผนวกที่ ข10 หน้าต่างรายละเอียดข้อมูล



ภาพผนวกที่ ข11 หน้าต่างเลือกตำแหน่งติดตั้งไฟล์ข้อมูล

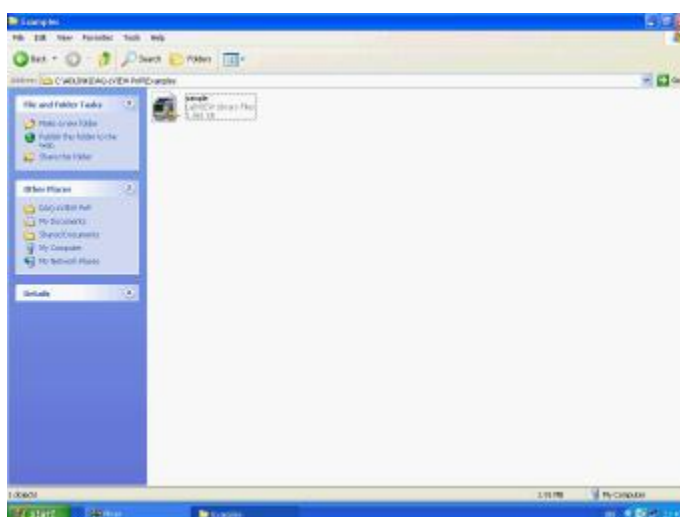


ภาพผนวกที่ ข12 เลือกโปรแกรมโฟลเดอร์



ภาพผนวกที่ ข15 ทำการรีบูตเครื่องคอมพิวเตอร์

3.10 เมื่อเครื่องพร้อมใช้งานให้ทำการตรวจสอบผลที่ได้จากการติดตั้งโดยเข้าไปตามตำแหน่งที่ทำการติดตั้งโปรแกรมไว้แล้วเข้าไปที่โฟลเดอร์ Examples จะเห็นไฟล์ตัวอย่างไว้



ภาพผนวกที่ ข16 ไฟล์โปรแกรมตัวอย่างของ ADLINK PCI9112

3.11 ทำการตรวจสอบความพร้อมในการใช้งานโมดูลจากตัวโปรแกรมเพื่อใช้ในโปรแกรม LabVIEW 8.2 โดยทำการเรียกโปรแกรมโปรแกรม LabVIEW 8.2 ขึ้นมา

3.12 ทำการเลือก NEW ไปที่ Blank VI

3.13 ไปที่หน้าต่างของ Block Diagram คลิกขวาแล้วไปที่ User Libraries บนเมนูการโปรแกรมแล้วไปที่ Palette Menu พบไอคอนของฟังก์ชันการทำงานที่ใช้ในการติดต่อกับการ์ด PCI – 9112



ภาพผนวกที่ ข17 ไอคอนของโปรแกรมที่ใช้ในการติดต่อกับการ์ด PCI-9112

ภาคผนวก ค

การใช้งานโปรแกรม Keil uVision3

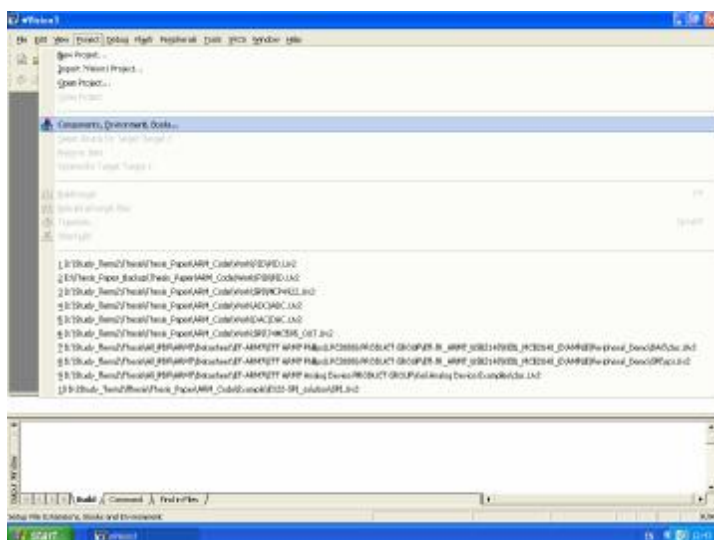
การใช้งานโปรแกรม Keil uVision3

1. เรียกโปรแกรม Keil uVision3 จากไอคอนบนหน้าต่างของ Desktop

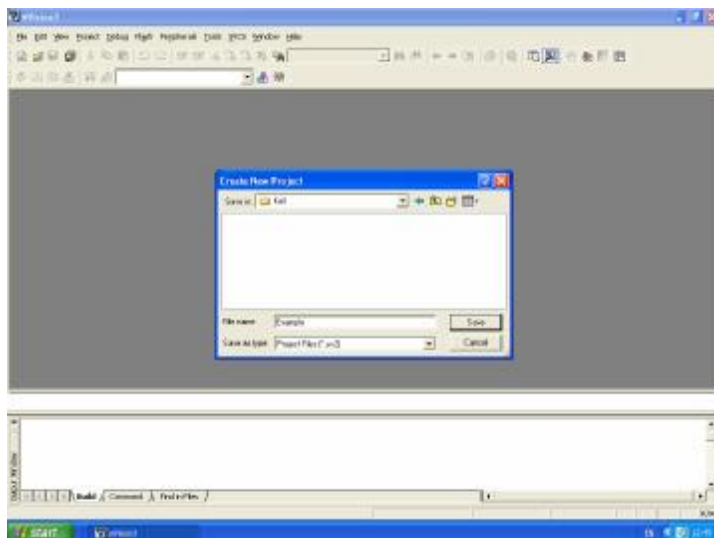


ภาพผนวกที่ ค1 ไอคอนของตัวโปรแกรม Keil uVision3

2. ปรากฏหน้าต่างของโปรแกรมให้ไปที่แถบเครื่องมือ Project เลือก Components
3. ให้ทำเครื่องหมายถูกที่ช่อง Use Keil CARM Compiler แล้วคลิก OK

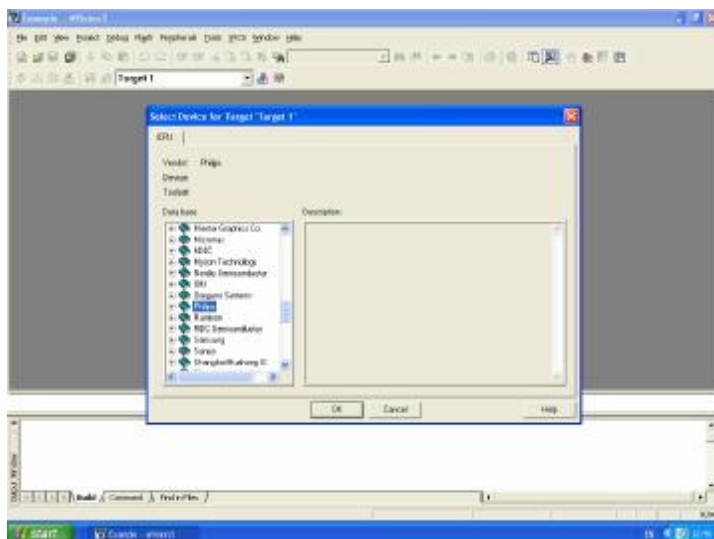


ภาพผนวกที่ ค2 การกำหนดชนิดของตัว Compiler



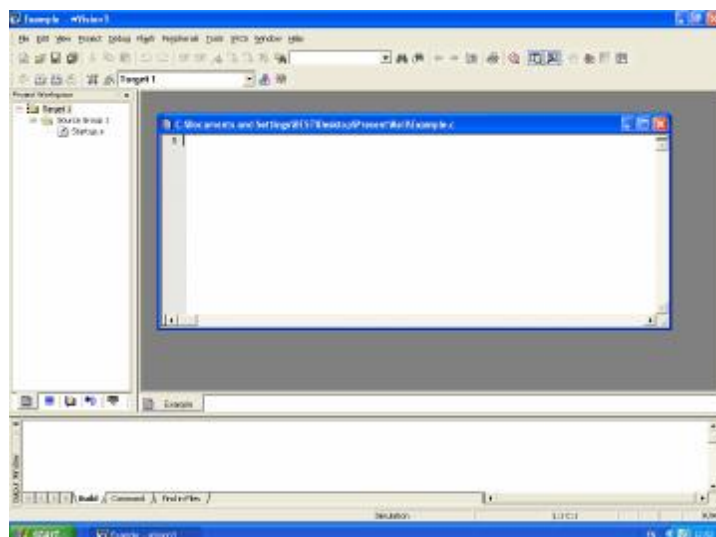
ภาพผนวกที่ ค5 การบันทึก Project

5. ปรากฏหน้าต่างให้เลือกตัวอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ทำการเลือก
บริษัทผู้ผลิตไปที่ Philips แล้วทำการเลือกรุ่นของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เป็น
PLC2148 แล้วคลิก OK



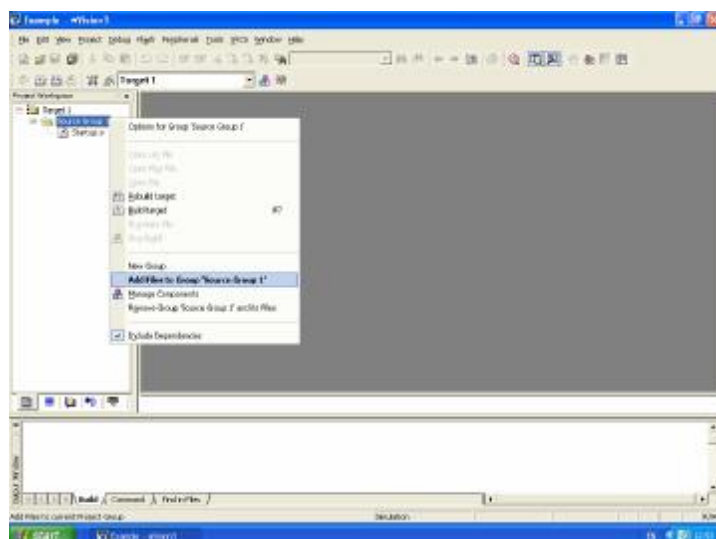
ภาพผนวกที่ ค6 การเลือกบริษัทผู้ผลิตคอนโทรลเลอร์

7. ไปที่ File แล้วไปที่ New ทำการสร้างไฟล์สำหรับเขียนโปรแกรมที่เป็นภาษา C โดยทำการบันทึกไฟล์ให้มีนามสกุลเป็น ชื่อไฟล์.C



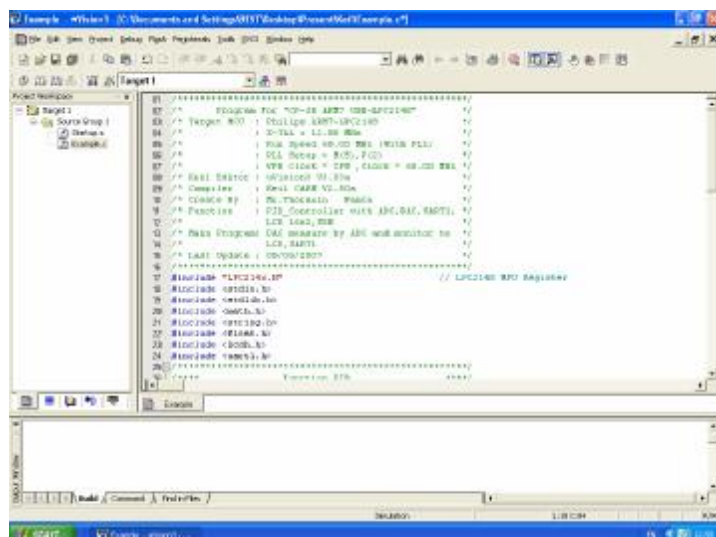
ภาพผนวกที่ ค9 การสร้างไฟล์สำหรับเขียนโปรแกรม

8. ไปที่โฟลเดอร์ Source Group1 บนพื้นที่ของหน้าต่างทางซ้ายมือแล้วคลิกขวา เพื่อทำการเพิ่มไฟล์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมหลัก



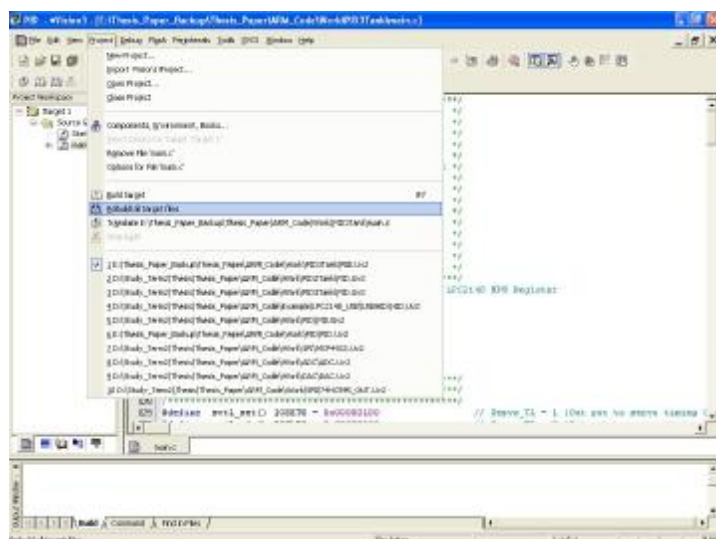
ภาพผนวกที่ ค10 การเพิ่มไฟล์ที่สร้างขึ้นใน Project

9. ทำการเขียนโปรแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์บนไฟล์โปรแกรมหลักที่ได้บันทึกไว้



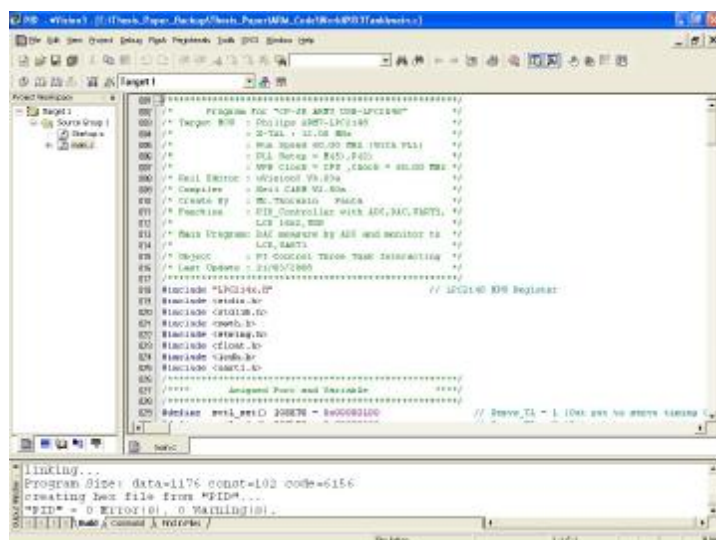
ภาพผนวกที่ ๑1 การเขียนโปรแกรมบนไฟล์ที่สร้างขึ้น

10. เมื่อทำการเขียนโปรแกรมเสร็จให้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของการเขียนโปรแกรมโดยไปที่แถบเครื่องมือ Project เลือก Rebuild all Target file



ภาพผนวกที่ ๑2 การ Compiler ไฟล์โปรแกรมที่เขียนขึ้น

11. สังเกตความถูกต้องของการเขียนโปรแกรมที่แถบแสดงผลด้านล่างของหน้าต่างโปรแกรม ถ้าการเขียนโปรแกรมมีความถูกต้องจะแสดง 0 Error (S), 0 Warning(S). แต่ถ้าไม่ถูกต้องโปรแกรมจะแจ้งบรรทัดและสิ่งผิดพลาดให้ทราบ



ภาพผนวกที่ ค13 ผลลัพธ์ที่ได้จากการ Compiler

ภาคผนวก ง

การเขียนโปรแกรมภาษา C สำหรับการควบคุมแบบ PI บนตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7
สำหรับกระบวนการระดับ 2 ถึง

```

/*****/
/*      Program for "CP-JR ARM7 USB-LPC2148"      */
/*      Target MCU : Philips ARM7-LPC2148          */
/*      Crystal : 12.00 MHz                        */
/*      Run Speed 60.00 MHz (With PLL)             */
/*      PLL Setup = M(5),P(2)                     */
/*      VPB Clock = CPU ,Clock = 60.00 MHz         */
/*      Keil Editor : uVision3 V3.03a             */
/*      Compiler      : Keil CARM V2.50a           */
/*      Create By     : Mr.Thoranin  Panta         */
/*      Function:PID_Controller with ADC,DAC,UART1, */
/*      LCD 16x2                                           */
/*      Main Program: DAC measure by ADC             */
/*      and monitor to LCD,UART1                       */
/*      Object  : PI Control Two Tank Interacting    */
/*      Last Update : 09/08/2007                     */
/*****/

// LPC2148  <-----> 74HC595
// MOSI(P0.6) -----> DIN(14)
// SCK(P0.4) -----> Shift(11)
// MISO(P0.5) ----- NC
// GPIO0.2  -----> Latch(12)
// LPC2148 SS(P0.7) = "1"(SPI Master Mode)
// 74HC595 OE(13)  = "0"(Output Enable)
// 74HC595 MCLR(10) = "1"(Not Reset)

/* Warning Pull-Up 10K on SPI Pin
-> Pin GPIO0.2 (Latch)
-> Pin GPIO0.4 (SCK)
-> Pin GPIO0.6 (SDI)

```

```

        -> Pin GPIO0.7 (CS)*/
#include "LPC214x.H"                // LPC2148 MPU Register
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <float.h>
#include <lcdh.h>
#include <uart1.h>
float Io1,Io2;                      // Initial Gobal Value
/*****
**** Function ADC monitor by LCD 16x2 and UART1 ****
*****/
float AI1(void)                     // Select AD0.1 Pin0.28
{
    unsigned int value;
    float volt1;
        AD0INTEN = 0;               // Disable ADC Interrupt
        AD0CR = 0x01210602;         // Initial ADC0 (ADCR=0x01210602)
        do{value = AD0DR1;}
        while((value & 0x80000000) == 0);
        value = (value >> 6) & 0x03FF; // Read Value from ADC
        volt1 = (value/102.3);        // Change Value to Real Data for High Level Tank 1
        return(volt1);
    }
float AI2(void)                     // Select AD0.2 Pin0.29
{
    unsigned int value;
    float volt2;
        AD0INTEN = 0;               // Disable ADC Interrupt

```

```

    AD0CR = 0x01210604;          // Initial ADC0 (ADCR=0x01210604)
    do{value = AD0DR2;}
    while((value & 0x80000000) == 0);
    value = (value >> 6) & 0x03FF; // Read Value from ADC
    volt2 = (value/102.3);         // Change Value to Real Data for High Level Tank 2
    return(volt2);
}

/*****/
/**   Function DAC MCP4922DAC for SPI   ***/
/*****/

void DAC(unsigned char ch,unsigned short value)
{
    unsigned char i;
    unsigned short buffer,shr;
    i=16;
    shr = 0x00008000;             // Compare Select Bit
    buffer = value;               // Load initial Value
    IOCLR0 = 0x00000080;         // Chip select Active (Start Chips Select)
    while(i)
    {
        buffer &= 0x0000FFF;     // Clear Configuration MSB
        if(ch==1){buffer |= 0x00007000;} // Load Configuration MSB for Channel A Output
        else{buffer |= 0x0000F000;} // Load Configuration MSB for Channel B Output
        buffer &= shr;
        if(buffer==shr){IOSET0 |= 0x00000040;} // SPI Bit Output Active High
        else{IOCLR0 |= 0x00000040;} // SPI Bit Output Active Low
        IOSET0 |= 0x00000010; // Clock toggle
        IOCLR0 |= 0x00000010;
        shr>>=1; // Shift Righth Bit for Compare
        buffer = value; // Load Value
    }
}

```

```

        i--;                                // Decrease Loop
    }
    IOSET0 = 0x00000080;                    // Chip select Unactive (Stop Chips Select)
    IOCLR0 |= 0x00000004;                   // Falling Edge Latch
    delay(1);
    IOSET0 |= 0x00000004;                   // Rising Edge Latch
}

/*****
Function PID
*****/

P:Controller Gain
I:Integral action rate(1/s) = ki/kp
D:Derivative action time constant(s)
sp1: Setpoint in unit Process
Td:Sample time used to compute the derivative mode action(S)
ero:Previous error
PB:Proportional Band = ((Umax - Umin)/K) X 100%
*****

ern = sp-input;                           // New error
Pn = P*ern;                               // New Proportional Gain
In = Io+P*I*Td*ern;                       // New Integral action rate(1/s)
Del_er = ern-ero;                         // Current Different Error
Dn = (P*D*Del_er)/Td;                    // New Derivative action time constant(s)
Vn = (Pn+In+Dn);                          // New Value process
Io = In;                                  // Load New Integral action rate for use next time
ero = ern;                                // Load New Error for use next time
/*****

P1:Controller Gain = 5
I1:Integral action rate(1/s) = 0.02
D1:Derivative action time constant(s) = 0

```

sp1: Setpoint in unit Process = 15 Centimeter

Td:Sample time used to compute the derivative mode action = 500 mSec

*****/

```
float PID1(float LV1)          // Configuration PID1
{
float ern,Vn1,Pn,In,sp;
sp = 50;          // Calculate set point by set point(unit)/maxprocess(unit) give percentage
ern = sp-LV1;      // ero:New error in percentage
    Pn = 5*ern;      // New Proportional Gain
    In = Io1+(0.1*ern); // New Integral action rate(1/s)
    Vn1 = Pn+In;      // New Value process
    Io1 = In;          // Load New Integral action rate for use next time
return(Vn1);        // Return New Value process
}
```

/*****/

P2:Controller Gain = 2

I1:Integral action rate(1/s) = 0.01

D2:Derivative action time constant(s) = 0

sp2: Setpoint in unit Process = 10 Centimeter

Td:Sample time used to compute the derivative mode action = 500 mSec

*****/

```
float PID2(float LV2)          // Configuration PID2
{
float ern,Vn2,Pn,In,sp;
sp = 33.3;          // Calculate setpoint by setpoint(unit)/maxprocess(unit) give percentage
ern = sp-LV2;      // ero:New error in percentage
    Pn = 2*ern;      // New Proportional Gain
    In = Io2+(0.05*ern); // New Integral action rate(1/s)
    Vn2 = Pn+In;      // New Value process
    Io2 = In;          // Load New Integral action rate for use next time
```

```

return(Vn2);                // Return New Value process
}

/*****
****          Initial Program before start Program          ****
*****/

void init(void)
{
    unsigned char i;
        Io1=0;Io2=0;
// Initial AD0.1,AD0.2 (GPIO-0.28,0.29) By Set PINSEL1[25:24=01],PINSEL1[27:26=01]
        PINSEL1 &=0xF0FFFFFF;    // Select AD0.1 Pin0.28 & AD0.2 Pin0.29
        PINSEL1 |=0x05000000;

// Initial SPI0 Pin Connect is P0.4 to P0.7 & Initial P0.2 = Output Latch SPI(MPC4922)
        PINSEL0 &= 0xFFFF000F;    // Reset P0.0,P0.1 Pin Config
        IODIR0 = 0x000000D4;    // P0.2 is Latch Output Port
                                // P0.4 is SCK(SPI0)
                                // P0.6 is SDI(SPI0)
                                // P0.7 is CS(SPI0)
        IOSET0 = 0x000000C4;    // Normal Latch "0",Latch = 1
        IOCLR0 |= 0x00000010;    // Normal Clock "0",Active = "1"
                                // Master Out DATA SPI = "1"

// Initial DAC Channel 1,2 SPI(MPC4922)
        DAC(1,0x00);            // Send to Analog Channel_A which Output_1
        DAC(2,0x00);            // Send to Analog Channel_B which Output_2

// Initial LCD Display
        goto_cursor(0x00);
        lcd_print("LV_1 = ");
        for(i=0;i<10;i++){lcd_write_ascii(0x20);} // Clear Display Percentage on LCD

```

```

        goto_cursor(0x0F);
        lcd_print("%");
        goto_cursor(0x40);
        lcd_print("LV_3 = ");
        for(i=0;i<10;i++){lcd_write_ascii(0x20);} // Clear Display Percentage on LCD
        goto_cursor(0x4F);
        lcd_print("%");
    }

    /*****
    ****          Main Program Start Here          ****
    *****/

int main(void)
{
    float LV1, LV2, CV1, CV2;      // Control Valve in Percentage
    unsigned int U1, U2;
    char r1[7], r2[7];
    init_serial0();                // Initial UART0 = 9600, N, 8, 1
    lcd_init();                    // Initial LCD
    init();                        // Initial Program before start Program
    while(1)                      // Loop Program Continue
    {
        LV1 = AI1();               // Call ADC Function for value which is input1
        LV2 = AI2();               // Call ADC Function for value which is input2
        LV1 = LV1*10.1;
        LV2 = LV2*10.1;
        CV1 = PID1(LV1);           // Calculation for PID_1
        CV2 = PID2(LV2);           // Calculation for PID_2
        if(CV1<0){U1=0;}
        else{U1=CV1;}
        if(CV2<0){U2=0;}
    }
}

```

```

else{U2=CV2;}
DAC(1,U1);          // Send to Analog Channel_A which Output_1
DAC(2,U2);          // Send to Analog Channel_B which Output_2
CV1 = (CV1/40.95)*1;
CV2 = (CV2/40.95)*1;
if(CV1>4095){CV1=4095;}
if(CV2>4095){CV2=4095;}
sprintf(r1, "%4.0f",CV1);      // Print Value to Stiring Control Valve 1
sprintf(r2, "%4.0f",CV2);      // Print Value to Stiring Control Valve 2
goto_cursor(0x08);
lcd_print(r1);                // Display Value Control value 1 on LCD
goto_cursor(0x48);
lcd_print(r2);                // Display Value Control value 2 on LCD
printf("\rPercent CV1 = %1.2f %%",CV1);      // Display 3-Digit Result(0-3.3V) in
Percentage
printf("\t\tPercent CV2 = %1.2f %%",CV2);      // Display Percentage for Control
Valve on PC
    }
}

```

ภาคผนวก จ

การเขียนโปรแกรมภาษา C สำหรับการควบคุมแบบ PI บนตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7
สำหรับกระบวนการระดับ 3 ถึง

```

/*****/
/*    Program For "CP-JR ARM7 USB-LPC2148"    */
/*    Target MCU : Philips ARM7-LPC2148        */
/*    Crystal : X-TAL : 12.00 MHz              */
/*    Run Speed 60.00 MHz (With PLL)           */
/*    PLL Setup = M(5),P(2)                   */
/*    VPB Clock = CPU ,Clock = 60.00 MHz      */
/*    Keil Editor : uVision3 V3.03a           */
/*    Compiler : Keil CARM V2.50a             */
/*    Create By : Mr.Thoranin Panta           */
/*    Function : PI_Controller with ADC,DAC,UART1, */
/*              LCD 16x2                      */
/*    Main Program: Measure by ADC and monitor by */
/*              LCD,UART1                    */
/*    Object : PI Control Three Tank Interacting */
/*    Last Update : 18/04/2008                */
/*****/

#include "LPC214x.H"           // LPC2148 MPU Register
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <float.h>
#include <lcdh.h>
#include <uart1.h>

/*****/
/****          Assigned Port and Variable          *****/
/*****/

#define servo1_on() IOSET0 |= 0x00000100    // Servo1 = 1 (PIN 0.8)
#define servo1_off() IOCLR0 |= 0x00000100   // Servo1 = 0

```

```

#define servo3_on() IOSET0 |= 0x00000200    // Servo2 = 1 (PIN 0.9)
#define servo3_off() IOCLR0 |= 0x00000200    // Servo2 = 0
#define led_on()      IOCLR0 |= 0x00000400 // LED = 0 (PIN 0.10)
#define led_off()     IOSET0 |= 0x00000400 // LED = 1
#define sw_mode_set() IOSET0 |= 0x00000800 // Switch Mode = 1 (PINIO 0.11)
float Io11,Io12,Io31,Io32;                  // Initial Gobal Value
/*****/
/**** Function Delay ****/
/*****/
void delay_ms(long int ms)
{
    long int i,j;
    for(i=0;i<ms;i++)
        for(j=0;j<6666;j++);
}
/*****/
/**** Function ADC monitor by LCD 16x2 and UART1 ****/
/*****/
float Sensor1()                            // Select AD0.1 Pin 0.28
{
    unsigned int value;
    float volt;
        AD0INTEN = 0;                        // Disable ADC Interrupt
        AD0CR = 0x01210602;                  // Initial ADC0 (ADCR=0x01210602)
        do{value = AD0DR1;}
        while((value & 0x80000000) == 0);
        value = (value >> 6) & 0x03FF; // Read Value from ADC
        volt = (value/10.23);              // Convert to Percentage for sensor tank 1
        return(volt);
}

```



```

do{value = AD0DR4;}
while((value & 0x80000000) == 0);
value = (value >> 6) & 0x03FF; // Read Value from ADC
volt = (value/10.23);           // Convert to Percentage for VR_3
return(volt);
}

/*****
Function PID
*****/

P:Controller Gain
I:Integral action rate(1/s)=Ki/Kp
D:Derivative action time constant(s)
sp1: Setpoint in unit Process
Td:Sample time used to compute the derivative mode action(S)
ero:Previous error
PB:Proportional Band = ((Umax - Umin)/K) X 100%
*****

ern = sp-input;           // New error
Pn = P*ern;               // New Proportional Gain
In = Io+P*I*Td*ern;       // New Integral action rate(1/s)
Del_er = ern-ero;         // Current Different Error
Dn = (P*D*Del_er)/Td;    // New Derivative action time constant(s)
Vn = (Pn+In+Dn);          // New Value process
Io = In;                  // Load New Integral action rate for use next time
ero = ern;                // Load New Error for use next time
/*****

P11:Controller Gain = 7
I11:Integral action rate(1/s) = 0.01
P12:Controller Gain = 1
I12:Integral action rate(1/s) = 0.01

```

```

D1:Derivative action time constant(s) = 0
sp1: Set point in unit Process = 15 Centimeter
Td:Sample time used to compute the derivative mode action = 500 mSec
*****/

float PI1(float LV1,float LV3)          // Configuration PI1
{
float Vn,Vn11,Vn12,ern1,ern3,Pn11,Pn12,In11,In12;
ern1 = 50-LV1;                          // ero1:New error in percentage
ern3 = 16-LV3;                          // ero3:New error in percentage
    Pn11 = 7*ern1;                      // New Proportional Gain
    Pn12 = 1*ern3;                      // New Proportional Gain
    In11 = Io11+(0.035*ern1);           // New Integral action rate(1/s)
    In12 = Io12+(0.005*ern3);          // New Integral action rate(1/s)
    Vn11 = Pn11+In11;                  // New Value process
    Vn12 = Pn12+In12;                  // New Value process
    Vn = Vn11+Vn12;                    // New Value process
    Io11 = In11;                       // Load New Integral action rate for use next time
    Io12 = In12;                       // Load New Integral action rate for use next time
return(Vn);                            // Return New Value process
}

/*****

P31:Controller Gain = 1
I31:Integral action rate(1/s) = 0.01
P32:Controller Gain = 10
I32:Integral action rate(1/s) = 0.1
D2:Derivative action time constant(s) = 0
sp2: Setpoint in unit Process = 5 Centimeter
Td:Sample time used to compute the derivative mode action = 500 mSec
*****/

float PI3(float LV1,float LV3)          // Configuration PI1

```

```

{
float Vn,Vn31,Vn32,ern1,ern3,Pn31,Pn32,In31,In32;
ern1 = 50-LV1;           // ero1:New error in percentage
ern3 = 16-LV3;           // ero3:New error in percentage
    Pn31 = 1*ern1;        // New Proportional Gain
    Pn32 = 10*ern3;       // New Proportional Gain
    In31 = Io31+(0.005*ern1); // New Integral action rate(1/s)
    In32 = Io32+(0.5*ern3); // New Integral action rate(1/s)
    Vn31 = Pn31+In31;     // New Value process
    Vn32 = Pn32+In32;     // New Value process
    Vn = Vn31+Vn32;       // New Value process
    Io31 = In31;          // Load New Integral action rate for use next time
    Io32 = In32;          // Load New Integral action rate for use next time
return(Vn);              // Return New Value process
}

/*****/
/**** Servo Control ****/
/*****/

void servo(float sv1,float sv3)
{
unsigned int v1,v3;
unsigned short i,j;
    if(sv1<1){v1=180;}
    else{v1 = 200-sv1;}
    if(sv3<1){v3=180;}
    else{v3 = 200-sv3;}
    servo1_on();          // Servo start at origin by Ton is 20 ms
    for(i=0;i<v1;i++){for(j=0;j<65;j++);} // Servo active by Ton 0.1 ms to 20 ms
    servo1_off();
    servo3_on();
}

```

```

        for(i=0;i<v3;i++){for(j=0;j<65;j++){ // Servo active by Ton 0.1 ms to 20 ms
            servo3_off();
        }
    }
    /*****
    *****/
    /**** Initial Program before start Program *****/
    /****
    void init(void)
    {
    unsigned char i;
        Io11=0;Io12=0;
        Io31=0;Io32=0;
    // Initial AD0.1=Pin0.28, AD0.2=Pin0.29, AD0.3=Pin0.30, AD0.4=Pin0.25
    // PINSEL1[25:24=01],PINSEL1[27:26=01],PINSEL1[29:28=01],PINSEL1[19:18=01]
        PINSEL1 &=0xC0F3FFFF;
        PINSEL1 |=0x15040000; // Define GPIO is ADC
        PINSEL0 &= 0xFFFFF0FF;
        IODIR0 |= 0xFFFFF7FF; // Define GPIO is Output and Input
    // Initial LCD Display
        goto_cursor(0x00);
        lcd_print("LV_1 = ");
        for(i=0;i<10;i++){lcd_write_ascii(0x20);} // Clear Display Percentage on LCD
        goto_cursor(0x0F);
        lcd_print("%");
        goto_cursor(0x40);
        lcd_print("LV_3 = ");
        for(i=0;i<10;i++){lcd_write_ascii(0x20);} // Clear Display Percentage on LCD
        goto_cursor(0x4F);
        lcd_print("%");
    }

```

```

/*****
****          Main Program Start Here          ****
*****/

int main(void)
{
float CV1,CV3;
unsigned int Sen1,Sen3,VR_1,VR_3;
unsigned char mode;
char r1[7],r2[7];
init_serial0();           // Initial UART0 = 9600,N,8,1
lcd_init();               // Initial LCD
init();                   //PB1,PB3,Initial Program before start Program
mode=0;
while(1)                  // Loop Program Continue
{
    if((IOPIN0 & 0x00000800)==0)
    {
        while((IOPIN0 & 0x00000800)==0);
        delay_ms(10);
        mode=!mode;
    }
    switch (mode)
    {
        case 0:
            {
                led_off();
                VR_1 = VR1(); // Call ADC Function for value which is input1
                VR_3 = VR3(); // Call ADC Function for value which is input2
                servo(VR_1,VR_3);
                sprintf(r1,"%4.0d",VR_1); // Print Value to String Control Valve 1
            }
        case 1:
            {
                led_on();
                VR_2 = VR2(); // Call ADC Function for value which is input3
                VR_4 = VR4(); // Call ADC Function for value which is input4
                servo(VR_2,VR_4);
                sprintf(r2,"%4.0d",VR_2); // Print Value to String Control Valve 2
            }
    }
}
}

```

```

    sprintf(r2,"%4.0d",VR_3); // Print Value to String Control Valve 2
    goto_cursor(0x08);
    lcd_print(r1);           // Display Value Control value 1 on LCD
    goto_cursor(0x48);
    lcd_print(r2);           // Display Value Control value 2 on LCD
    printf("\rVR_1= %2d ",VR_1); // Display 3-Digit Result(0-3.3V) in
Percentage
    printf("\tVR_3= %2d ",VR_3); // Display Percentage for Control
Valve on PC

    }break;
case 1:
    {
    led_on();
    Sen1 = Sensor1();        // Call ADC Function for value which is
input1
    Sen3 = Sensor3();        // Call ADC Function for value which is
input2

    CV1 = PI1(Sen1,Sen3);
    CV3 = PI3(Sen1,Sen3);
    CV1 = CV1*100;
    CV3 = CV3*100;
    if(CV1>100)CV1=100;
    else if(CV1<0)CV1=0;
    if(CV3>100)CV3=100;
    else if(CV3<0)CV3=0;
    servo(CV1,CV3);
    sprintf(r1,"%4.0d",Sen1); // Print Value to String Control Valve 1
    sprintf(r2,"%4.0d",Sen3); // Print Value to String Control Valve 2
    goto_cursor(0x08);
    lcd_print(r1);           // Display Value Control value 1 on LCD

```

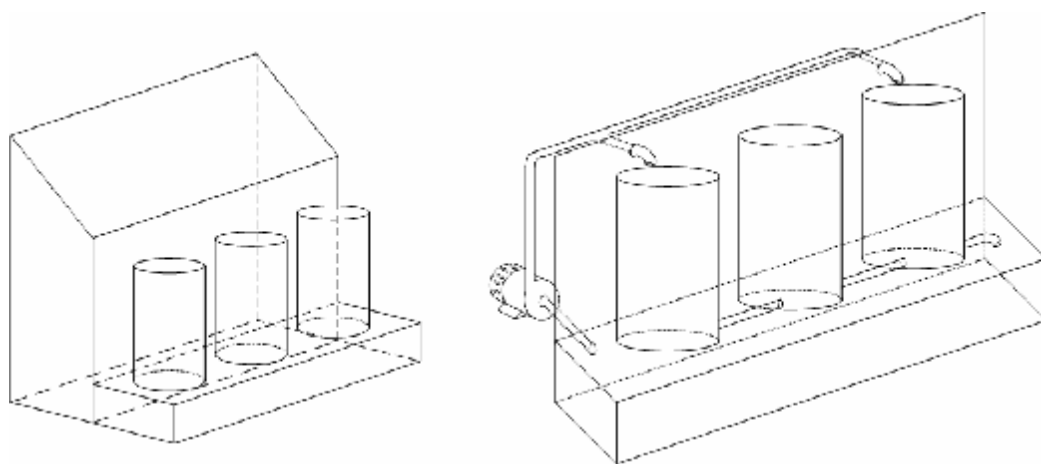
```
goto_cursor(0x48);  
lcd_print(r2);          // Display Value Control value 2 on LCD  
// Display Control Valve on PC  
printf("\r%2.0f\t%2.0f\t%2.0f\t%2.0f\t%d\t%d\t%d:%d",  
CV1,CV3,LV1,LV3,sp1,sp3,MIN,SEC);  
}break;  
}  
}  
}
```

ภาคผนวก จ

การสร้างกระบวนการระดับแบบ interacting ชนิด 3 ถึง

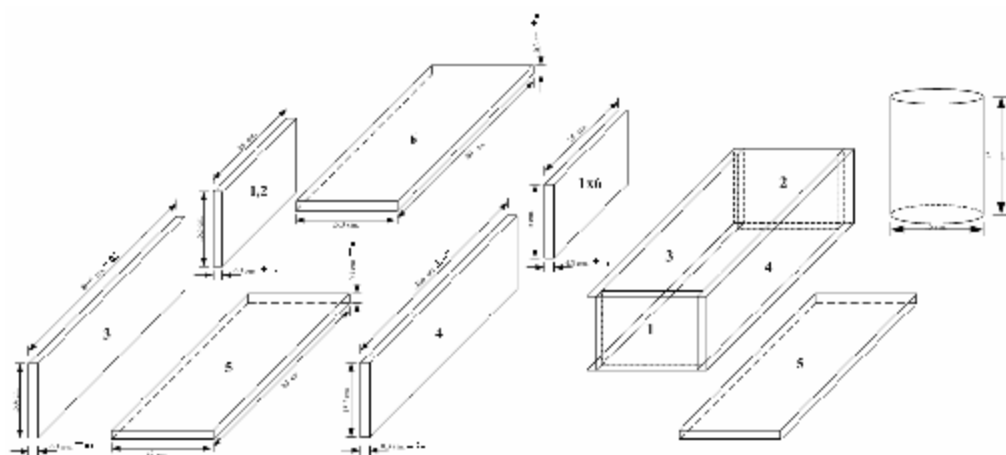
การสร้างกระบวนกระดืบแบบ interacting 3 ถัง

1. ในขั้นตอนแรกทำการร่างแบบของกระบวนกระดืบแบบ interacting 3 ถัง



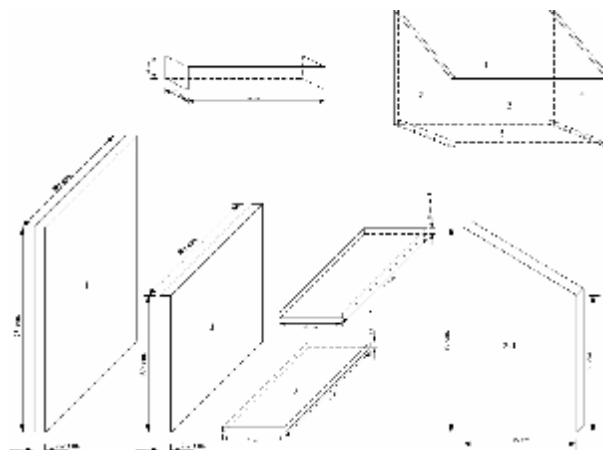
ภาพผนวกที่ ๑1 แบบร่างของกระบวนกระดืบแบบ interacting 3 ถัง

2. ทำการออกแบบส่วนประกอบของส่วนที่ทำหน้าที่เป็นถังของกระบวนและถึงลำรองของเหลว



ภาพผนวกที่ ๑2 การออกแบบถังกระบวนและถึงลำรองของเหลว

3. ทำการออกแบบส่วนประกอบของส่วนที่ทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมของ กระบวนการและถังสำรองของเหลว



ภาพผนวกที่ ๓ การออกแบบส่วนควบคุม



ภาพผนวกที่ ๔ ขนาดของถังกระบวนการ



ภาพผนวกที่ ๑๕ ขนาดของท่อที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างถัง



ภาพผนวกที่ ๑๖ ขนาดของวาล์วที่ใช้งาน



ภาพผนวกที่ ๗ ขนาดของข้อต่อที่ใช้งาน



ภาพผนวกที่ ๘ คุณสมบัติของปั๊ม

4. ทำการขึ้นโครงสร้างของส่วนประกอบต่างๆ ตามแบบ



ภาพผนวกที่ ๙ การขึ้นโครงสร้างส่วนประกอบต่างๆ

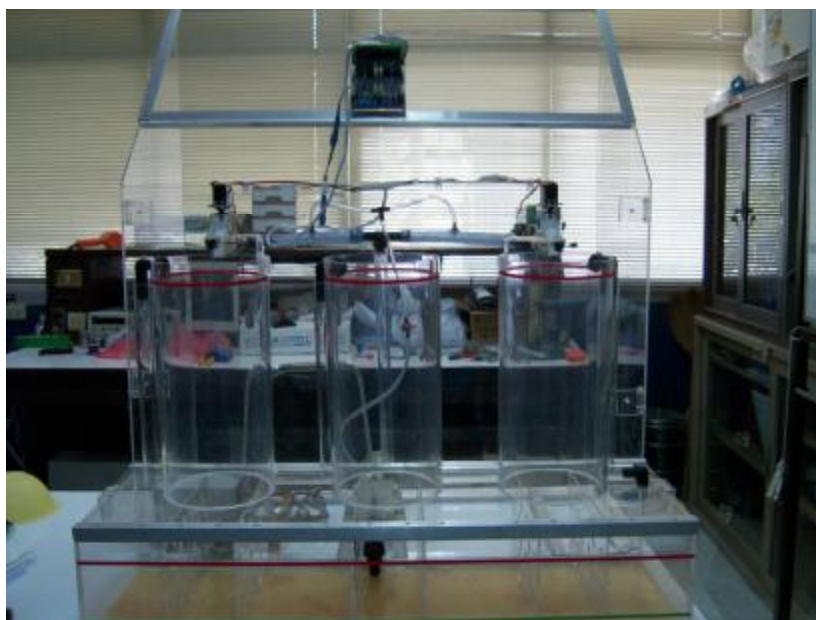
5. ทำการทดสอบการทำงานของกระบวนกรที่สร้างขึ้น



ภาพผนวกที่ ๑๐ การทดสอบการทำงานของกระบวนระดับแบบ interacting 3 ถึง ที่สร้างขึ้น



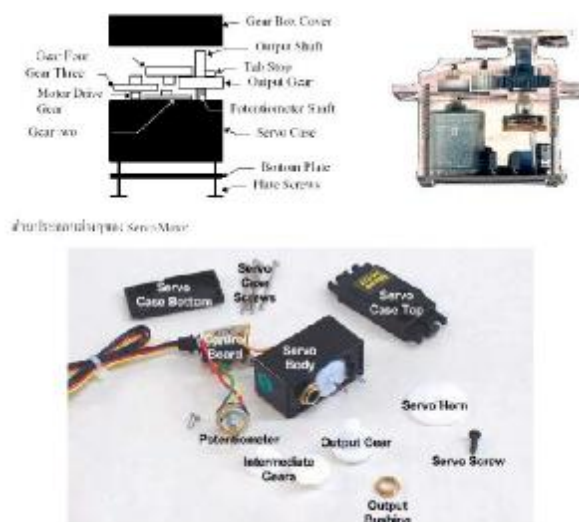
ภาพผนวกที่ จ11 ชุดกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถัง



ภาพผนวกที่ จ12 ชุดกระบวนการระดับแบบ interacting 3 ถังกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7

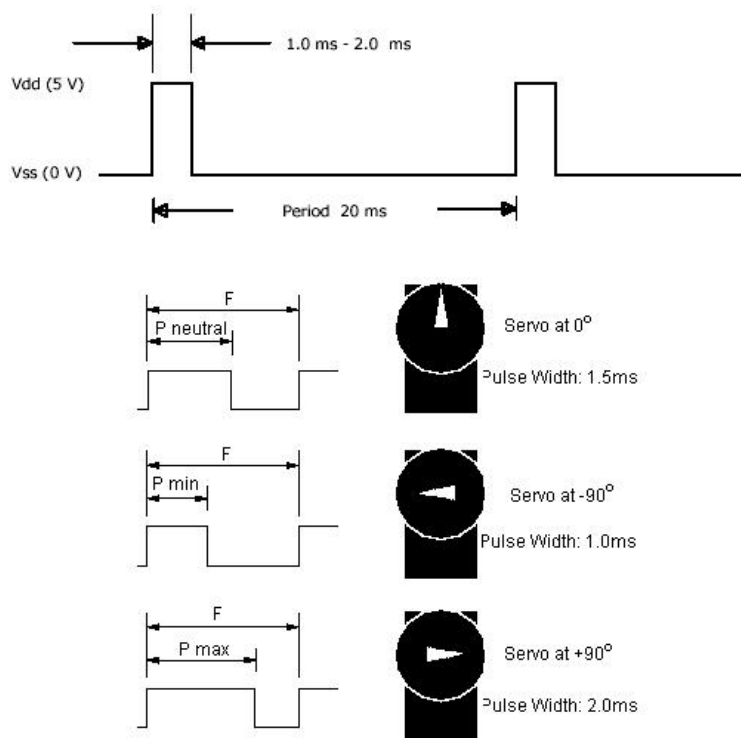
ภาคผนวก ๑
การควบคุม Servo Motor

DC Servo motor คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง(DC motor) ที่ถูกประกอบรวมกับ ชุดเกียร์ และส่วนควบคุมต่างๆ ไว้ในโมดูลเดียวกัน โดยมอเตอร์ชนิดนี้จะมีสายต่อใช้งานเพียง 3 เส้น คือ VCC,GND และ สายสัญญาณควบคุม(control line) ซึ่งสามารถควบคุมให้มอเตอร์หมุนซ้ายหรือขวาได้ด้วยสายสัญญาณเพียงเส้นเดียวโดยสัญญาณที่ใช้ควบคุมนี้จะเป็นสัญญาณ PWM แบบ TTL level ระดับแรงดันไฟเลี้ยงที่จ่ายให้มอเตอร์นี้จะอยู่ในช่วงประมาณ 4-6 โวลต์ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมอเตอร์แต่ละตัว ข้อดีของมอเตอร์ชนิดนี้คือ จะมีขนาดเล็กน้ำหนักเบา, ให้แรงบิดสูง, กินพลังงานน้อย และสามารถควบคุมด้วยสัญญาณลอจิกที่เป็น TTL ได้โดยตรงไม่จำเป็นต้องต่อวงจรขับเพิ่มเติม เพราะตัวมอเตอร์จะมีวงจรควบคุมอยู่ภายใน มอเตอร์ชนิดนี้สามารถควบคุมให้หมุนไปในตำแหน่งหรือทิศทางที่ต้องการได้ โดยอาศัยสัญญาณความกว้างพัลส์ที่ป้อนให้มอเตอร์ ซึ่งสามารถหมุนได้ตั้งแต่ 0 องศาถึง 180 องศา หรือครึ่งรอบเท่านั้น หรือบางรุ่นอาจหมุนได้ถึง 210 องศา แต่จะไม่สามารถหมุนเป็นวงรอบได้เนื่องจากโครงสร้างภายในจะประกอบด้วย ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ ที่ทำหน้าที่ตรวจสอบตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ และตัวต้านทานนี้จะถูกยึดติดกับแกนหมุนของมอเตอร์ ซึ่งจากการที่ตัวต้านทานปรับค่านี้ไม่สามารถหมุนเป็นวงรอบได้ ดังนั้น เซอร์โวมอเตอร์จึงถูกออกแบบให้หมุนได้เพียงแค่ประมาณ 180 องศาเท่านั้น



ภาพผนวกที่ ๑ ส่วนประกอบของเซอร์โวมอเตอร์

การควบคุมการทำงานของ DC Servo motor



ภาพผนวกที่ ๒ ฝั่งเวลาในการสั่งการเซอร์โวมอเตอร์

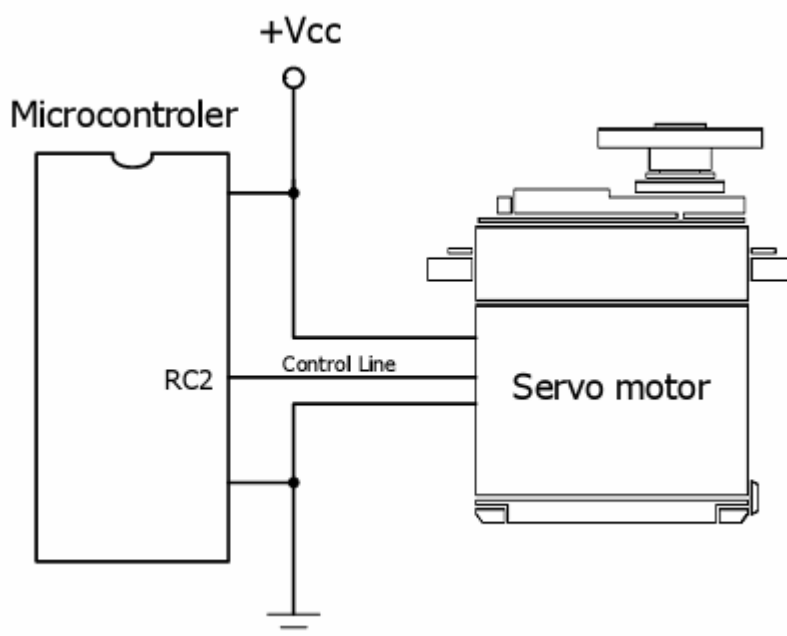
การควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ทำได้โดยการป้อนสัญญาณความกว้างพัลส์ให้กับมอเตอร์ซึ่งตำแหน่งและทิศทางการหมุนของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของพัลส์ ความกว้างของสัญญาณพัลส์จะมีจุดอ้างอิง 3 จุด ตามภาพที่ 54 ดังนี้

- สัญญาณความกว้างพัลส์ขนาด 1.5 mSec. จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์ไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม 0 องศาหรือจุด กึ่งกลางของมอเตอร์
- สัญญาณความกว้างพัลส์ขนาด 1 mSec จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์ไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม -90 องศาหรือในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา
- สัญญาณความกว้างพัลส์ขนาด 2 mSec จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม +90 องศา หรือในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ในการที่จะควบคุมให้มอเตอร์หมุนกวาดไปยังมุมอื่น สามารถทำได้โดยการป้อนสัญญาณความกว้างพัลส์ที่ต่างกัน โดยอ้างอิงจากจุด ทั้ง 3 จุดที่กล่าวมาข้างต้น ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการให้

มอเตอร์หมุนไปที่มุม -45 องศา จะต้องป้อนสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง 1.25 mSec เป็นต้น และสัญญาณพัลส์นี้จะต้องจ่ายให้มอเตอร์ทุกๆ 20 mSec./period เพื่อรักษาตำแหน่งของมอเตอร์ไว้

วิธีการคือ จะอาศัยการเปรียบเทียบช่วงเวลาของความกว้างพัลส์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ทางขาสัญญาณควบคุมกับค่าเวลาของวงจร RC ภายในตัวของมอเตอร์ ซึ่งค่าเวลาของวงจร RC นี้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามการหมุนของมอเตอร์ เนื่องจากตัวต้านทานปรับค่าได้จะถูกยึดติดอยู่กับแกนมอเตอร์ ซึ่งการหมุนของมอเตอร์จะทำให้ค่าความต้านทานของตัวต้านทานเปลี่ยนแปลงไป เป็นผลทำให้ค่าเวลาของวงจร RC เปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยในขณะที่ทำการป้อนสัญญาณความกว้างพัลส์ให้กับมอเตอร์ทางขาสัญญาณควบคุม สัญญาณนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าเวลาของวงจร RC หากค่าทั้ง 2 ไม่เท่ากันมอเตอร์ก็จะหมุนทำให้ค่าเวลาของวงจร RC เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งค่าเวลาความกว้างพัลส์ของวงจร RC เปลี่ยนแปลงเท่ากับสัญญาณพัลส์ทางขาควบคุม (control line) มอเตอร์จึงจะหยุดหมุน



ภาพผนวกที่ ๓ การเชื่อมต่อเซอร์โวมอเตอร์กับตัวอุปกรณ์ควบคุม

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายธรณินทร์ พันทา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	2 กุมภาพันธ์ 2525
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า-โทรคมนาคม) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล คลองหก รัชบุรี
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	- นักศึกษา - เป็นผู้ช่วยผู้เชี่ยวชาญด้านพลังงานให้กับบริษัทที่ปรึกษาด้านพลังงาน - รับออกแบบและสร้างตัวควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C51, AVR.
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ผลงานตีพิมพ์ทางวิชาการ	- พิระยศ แสนโกชน์ และธรณินทร์ พันทา. 2551. การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอบน ARM7 สำหรับถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล, น. 215. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ครั้งที่ 2 - พิระยศ แสนโกชน์ และธรณินทร์ พันทา. 2551. การสร้างตัวต้นแบบการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ในกระบวนการระดับ, น. 158 - 165. การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 46. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	- ได้รับทุนผู้ช่วยสอน วิชาไมโครโปรเซสเซอร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2549)