สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แบบจำลองการควบคุมกระบวนการ

ANALOG PROCESS SIMULATION

นายคำนึง ศักดา

นายทศพร โตพาณิชย์

นายอมรเทพ กาพย์แก้ว

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 42510
วัน, เดือน, ปี 24 พ.ค. 2545

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALOG PROCESS SIMULATION

KHAMNUNG SAKDA

THOSSAPORN TOPANICH

AMORNTHEP KARBKAEW

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OFF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL INSTRUMENTATION TECHNOLOGY

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์ แบบจำลองการควบคุมกระบวนการ

ANALOG PROCESS SIMULATION

นักศึกษาผู้จัดทำ

นายคำนึง	ศักดา	**รหัสประจำตัว**	41013403
นายทศพร	โตพาณิชย์	**รหัสประจำตัว**	41013411
นายอมรเทพ	กาพย์แก้ว	**รหัสประจำตัว**	41013436

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

ปีการศึกษา 2543

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.วิริยะ กองรัตน์	
อ.อาจินต์ น่วมสำราญ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 9 เมษายน พ.ศ. 2544

สถานที่สอบ ณ. ห้องสอบปริญญานิพนธ์ ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

ภาควิชารับรองแล้ว

(ผศ.ประสิทธ์ จุลเสรีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชา ฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ แบบจำลองการควบคุมกระบวนการ
ANALOG PROCESS SIMULATION

นักศึกษาผู้จัดทำ นายคำนึง ศักดา
นายทศพร โตพาณิชย์
นายอมรเทพ กาพย์แก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.วิริยะ กองรัตน์
อ.อาจินต์ น่วมสำราญ

ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ เสนอเกี่ยวกับการออกแบบและการสร้างแบบจำลองการควบคุมกระบวนการ เราสามารถใช้แบบจำลองการควบคุมกระบวนการในการทดลองควบคุมกระบวนการ เนื่องจากโรงงานส่วนใหญ่จะใช้วิธีการควบคุมแบบอัตโนมัติ เพื่อควบคุมกระบวนการผลิตสินค้า ดังนั้น เราจึงจำเป็นต้องมีความชำนาญในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์พีไอดีตัวควบคุมกระบวนการ กระบวนการส่วนใหญ่ในประเทศไทยปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในขณะที่เครื่องจักรหยุดทำงาน และใช้วิธีลองผิดลองถูก แบบจำลองการควบคุมกระบวนการได้ถูกสร้างขึ้นโดยให้ที่มีการทำงาน หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมือนกระบวนการควบคุมระดับจริง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดเนื่องจากออกแบบได้ง่าย ราคาถูก และมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับกระบวนการจริง สามารถสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดี โปรแกรมเขียนด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ Delphi สื่อสารผ่านพอร์ทอนุกรม RS – 232 และสามารถแสดงผลของการควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ในเวลาเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Analog Process Simulation
Authers	Mr.Khamnung Sakda
	Mr.Thossaporn Topanich
	Mr.Amornthep Karbkaew
Thesis Advisor	Asst.Prof.Viriya Kongratana
	Mr.Arjin Numsamran
Year	2000

ABSTRACT

This thesis is represent about design and building a Analog Process Simulation. We can use Analog Process Simulation to experiment controlling process. Because most of industrials are used automatic controller to controlled production process, so we should experienced to setting a parameter PID of controller for control process. Most of process in Thailand set controller parameter by OFF-Line setting and method of this is Trial and Error. Analog Process Simulation was built by same operating or same mathematics model with real level control process. The electronic devices are the best choice, because of it easy to design, low price and no large size by compare with devices in the production industrial. It can operate by a computer to control a process variable by tuning parameter PID controller. The computer program was built by Delphi, and communication by serial port RS – 232 and show a process parameter in the same time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับคำปรึกษาและความอนุเคราะห์จาก รศ.วิริยะ กองรัตน์ และ อ.อาจินต์ น่วมสำราญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ ผู้จัดทำขอบพระคุณอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนและคำปรึกษาในงานวิจัยจนสำเร็จตามจุดประสงค์

ขอขอบพระคุณอาจารย์แล้วเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง และทุกๆ ความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกท่านที่อยู่ร่วมกันทำงาน ให้กำลังใจ และความช่วยเหลือมาโดยตลอด ขอบคุณศุภวัฒน์ สุตันติราษฎร์ ในความช่วยเหลือเรื่องวงจร เนื้อหา และกำลังใจ ขอบคุณเทียนชัย สุขศรี กับคำแนะนำในการเขียนโปรแกรม ขอบคุณนัฐวุฒิ ทองไถ่ผา ที่ให้ยืม RAM และคำแนะนำการเขียนโปรแกรม ขอบคุณวีรวุฒิ แซ่ตั้งในการช่วยเหลือเรื่องโปรแกรม MCS – 51 ขอบคุณสมบูรณ์ วีระคำ สำหรับความช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรม ขอบคุณภาควิชาระบบควบคุมกับอุปกรณ์ทุกๆ ชิ้น

และที่มิเคยลืม ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ ที่ให้การสนับสนุนมาโดยตลอดจนปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VI

สารบัญรูป.....VII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของงานวิจัย.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....1

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....2

1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....2

บทที่ 2 ทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง.....3

2.1 กล่าวนำ.....3

2.2 AUTOMATIC CONTROL.....3

2.2.1 การควบคุมอัตโนมัติ.....3

2.2.2 การตอบสนองของระบบควบคุมอัตโนมัติ.....4

2.2.3 คุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติ.....5

2.2.4 ส่วนประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติ.....6

2.2.5 ประเภทของระบบควบคุมอัตโนมัติ.....10

2.3 ตัวควบคุมกระบวนการ.....13

2.3.1 ความเบื้องต้น.....13

2.3.2 แนวคิดและทฤษฎี.....14

2.3.3 ตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID (PID Controller).....15

2.3.4 องค์ประกอบของการควบคุม.....15

2.3.5 ระบบควบคุมทางอุตสาหกรรม.....16

2.3.6 ตัวควบคุมแบบ PID คืออะไร.....17

2.3.7 ผลของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ กับกระบวนการ.....19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.8 การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม.....22
2.4 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพอร์ทอนุกรม.....24
2.5 การสื่อสารแบบอนุกรม.....25
2.5.1 การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส.....25
2.5.2 มาตรฐานอนุกรมแบบ RS-232.....27
2.5.3 คอนเน็กเตอร์สำหรับพอร์ท RS-232 และการเชื่อมต่อ.....28
2.6 การเชื่อมต่อทางด้านฮาร์ดแวร์.....32
2.7 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอค และ อนาลอคเป็นดิจิตอล (A/D, D/A Converter).....35
2.7.1 A/D converter.....35
2.7.2 วงจร D/A converter.....37

บทที่ 3 การออกแบบ Hardware.....40
3.1 ออกแบบออปแอมป์.....40
3.2 วงจร แปลงกระแสเป็นแรงดัน.....41
3.3 วงจรขยาย Instrument Amplifier.....42
3.4 วงจร First Order.....45
3.5 User Interface.....48
3.6 หน่วยการติดต่อที่ใช้.....49
3.6.1 ส่วนของแบบจำลองกระบวนการ.....50
3.6.2 ส่วนของโปรแกรมควบคุมการทำงานและสต็กเปร์ท.....51
3.7 การเขียนโปรแกรม PID.....53

บทที่ 4 ผลการทดลอง.....56

บทที่ 5 บทสรุป และปัญหาที่เกิดขึ้น.....62
5.1 สรุป.....62
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....62

เอกสารอ้างอิง.....63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 การจัดขาสัญญาณของพอร์ทอนุกรมในแบบต่างๆ และหน้าที่การทำงาน.....30
2.2 การเลือกแชนแนลจากขาควบคุม.....36
2.3 สัญญาณที่ใช้ในการเลือกแชนแนลของไอซี.....38
5.1 การปรับตั้งค่าที่เหมาะสม.....62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 การตอบสนองของระบบเพิ่มความเร็วในยานพาหนะ.....5

2.2 ส่วนที่เป็นตัวควบคุมและส่วนประกอบต่าง ๆ.....7

2.3 ส่วนที่เป็นตัวควบคุมและระบบควบคุมทั่วไป.....8

2.4 สัญญาณที่เข้าหรือออก ของ Reference Input Element 8

2.5 สัญญาณที่เข้าและออกจากส่วนที่เป็นตัวควบคุม 8

2.6 สัญญาณที่เข้าและออกจากส่วนที่เป็นต้นกำลัง 9

2.7 ส่วนที่เป็นต้นกำลังของระบบควบคุมที่มีการรบกวนจากภายนอก 9

2.8 ตัวเปรียบเทียบค่าหรือ Comparator ของระบบควบคุม 10

2.9 ระบบควบคุมอัตโนมัติ ประเภทวงจรปิด หรือประเภทที่มีการป้อนกลับ 11

2.10 ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบวงจรเปิด หรือแบบไม่มีการป้อนกลับ 12

2.11 ระบบควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger).....15

2.12 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)....16

2.13 รูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID.....17

2.14 ผลของ Proportional Band ต่อกระบวนการ 19

2.15 แสดงผลของ Integral Time ที่มีต่อผลตอบสนองของกระบวนการในการควบคุมแบบPID....20

2.16 แสดงผลของ Derivative Action ที่มีแต่ผลตอบของกระบวนการในการควบคุมแบบ PD.....21

2.17 แสดงสัญญาณที่มีอัตราส่วนของแอมปลิจูดเท่ากับ 1 และคาบของสัญญาณ P_U 23

2.18 แสดงพารามิเตอร์ที่หาจาก Process Reaction Curve 24

2.19 ผลตอบสนองของระบบควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน.....25

2.20 ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน.....26

2.21 การเชื่อมต่อทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการจำลอง.....29

2.22 วงจร V/I Converter.....29

2.23 การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบ Null modem.....30

2.24 การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบ RS-232 31

2.25 การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบต่างๆ 31

2.26 การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบต่างๆ 31

2.27 วงจร Interface ประกอบด้วยวงจร A/D และ D/A.....35

3.1 วงจรจำลองกระบวนการ.....40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.2 วงจรแบบจำลองกระบวนการหลังจากที่สร้างเสร็จแล้ว.....40

3.3 วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน (I/V Converter).....41

3.4 แสดงวงจรขยาย Instrument Amplifier.....42

3.5 วงจร First's Order.....46

3.6 วงจร First's Order ชุดที่ 2 และชุดที่3.....46

3.7 วงจร Interface เมื่อสร้างเสร็จแล้ว.....48

3.8 การต่อสายสัญญาณภายในของแบบจำลองการควบคุมกระบวนการ.....49

3.9 รูปด้านหน้าของแบบจำลองการควบคุมกระบวนการ.....50

3.10 โปรแกรมการควบคุมการทำงานและแสดงผลส่วนที่ 1.....51

3.11 โปรแกรมการควบคุมการทำงานและแสดงผลส่วนที่ 2.....52

3.12 โปรแกรมการควบคุมการทำงานและแสดงผลส่วนที่ 3.....52

4.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรมควบคุมการทำงาน Analog Process Simulation.....56

4.2 กราฟแสดงผลตอบสนองเมื่อที่ค่าเป้าหมายเท่ากับ 50%.....57

4.3 ผลตอบสนองเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่กระบวนการจำลอง Gain เป็น 1.0.....58

4.4 ผลตอบสนองเมื่อ Gain ที่กระบวนการจำลอง มีค่า 1.0 แต่ SV เท่ากับ 25% 58

4.5 ค่า Gain ที่กระบวนการจำลองเท่ากับ 1.6 แต่ค่า SV เท่ากับ 80% ค่า τ เท่ากับ 10 วินาที.....59

4.6 ค่า Gain ที่กระบวนการจำลองเท่ากับ 1.6 ค่า SV เท่ากับ 50% แต่ค่า τ เท่ากับ 1 นาที.....59

4.7 ค่า Gain ของแบบจำลองฯ มีค่าเท่ากับ 1.6 SV มีค่า 50%และค่า τ เท่ากับ 5 นาที Kp = 2 Ti = 0.1, Td = 0.1.....60

4.8 ค่า Gain ของแบบจำลองฯ เท่ากับ 1.6 ค่า SV มีค่า 50% และค่า τ เท่ากับ 5 นาที Kp =1, Ti = 1, Td = 10 60

4.9 ค่า Gain ของแบบจำลองฯ เท่ากับ 1.6 ค่า SV เท่ากับ 50% τ เท่ากับ 5 นาที Kp = 1, Ti = 1, Td = 2.....61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของงานวิจัย

ในปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมมีความก้าวหน้าอย่างมาก ทำให้กระบวนการควบคุมต่างๆ ในกระบวนการผลิต เป็นกระบวนการที่มีความสลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ดังนั้น งานในการควบคุมกระบวนการมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งต่อผู้ควบคุมเครื่องจักร (Operator) การที่มีความเข้าใจในกระบวนการควบคุมจะทำได้มีประสิทธิภาพในการทำงานมากยิ่งขึ้น ส่วนมากเรามีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory) แต่ทว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในส่วนของห้องปฏิบัติการล้วนแล้วแต่มีขนาดใหญ่มีน้ำหนักมาก อีกทั้งยังมีราคาแพง และในการทำงานแต่ละครั้งยังใช้เวลามากและค่าใช้จ่ายสูง แบบจำลองการควบคุมกระบวนการ (Analog Process Simulation) ถูกสร้างขึ้นจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ความเหมือนกันของสมการทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากว่ากระบวนการทางกายภาพแต่ละอย่างมีสมการทางคณิตศาสตร์เทียบเท่าอยู่เสมอ เราจึงอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์นี้ ในการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหลักการทำงานและให้ผลของการตอบสนองที่เหมือนกัน การนำเอาแบบจำลองการควบคุมกระบวนการ มาใช้แทนกระบวนการ (Process) จริง เนื่องจากว่าแบบจำลองการควบคุมกระบวนการนั้นสามารถที่จะทำการทดลองแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยไม่ทำให้ระบบเสียหาย รวมถึงความสะดวกในการใช้เกี่ยวกับงานออกแบบได้ง่าย ราคาถูก และมีขนาดเล็ก สามารถนำกลับไปทำการทดลองที่บ้าน เพื่อที่จะเพิ่มความชำนาญได้เพียงแค่มีคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ ประกอบ

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษา และการออกแบบ รวมถึงการสร้างแบบจำลองการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับ (Level Control) โดยให้มีการควบคุมและการแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถปรับแต่ง (Tune) ค่าพารามิเตอร์พีไอดี ของตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) เพื่อให้เกิดความชำนาญในการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับยิ่งขึ้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาถึงทฤษฎี หลักการทำงาน และโครงสร้างของกระบวนการควบคุม
2. สามารถออกแบบวงจรเทียบเท่าทางอิเล็กทรอนิกส์จากกระบวนการจริงๆ ได้
3. เพื่อเพิ่มความชำนาญในการเรียนรู้กระบวนการทำงานของกระบวนการควบคุม
4. ศึกษาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา Delphi และสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมกระบวนการจำลองได้
5. แบบจำลองที่สำเร็จแล้ว สามารถนำไปทดลองแทนกระบวนการควบคุมระดับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้กล่าวถึงเรื่องการออกแบบ และการสร้างแบบจำลองการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับโดยให้สามารถสั่งงานจากคอมพิวเตอร์ได้ มีการใช้ภาษาคอมพิวเตอร์ Delphi เขียนโปรแกรมพีไอดี และแสดงผลของการควบคุมด้วยกราฟ ทั้งนี้เริ่มศึกษาจากศึกษาถึงทฤษฎี หลักการ และโครงสร้างของกระบวนควบคุมระดับ โดยการสร้างแบบจำลองโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสมการทางคณิตศาสตร์และการทำงานเหมือนกระบวนการจริง ศึกษาถึงวงจรเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และแบบจำลองการบวนการ (Interface), วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลและวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก (A/D–D/A Converter),วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน (I/V Converter) และวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส (V/I Converter) เพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์และแบบจำลองกระบวนการรวมทั้ง เขียนโปรแกรมติดต่อระหว่าง Computer กับแบบจำลองเพื่อสั่งงานและแสดงผลได้

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ในการศึกษาถึงโครงงานของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เริ่มจากการศึกษาถึงการทำงานของกระบวนการควบคุมจากกระบวนการจริงๆ โดยศึกษาหลักการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัว จากนั้นก็ศึกษาถึงทฤษฎีและหลักการทำงานของอุปกรณ์ที่จะนำมาสร้างแบบจำลอง โดยทางเราได้เลือกเอา Op – Amp ทำการต่อวงจรให้มีหลักการทำงานเหมือนกับกระบวนการจริงๆ โดยชุดทดลองที่จะออกแบบและสร้างได้แก่ชุด Integrated amp, วงจร V/I, วงจร I/V, ชุดปรับ Gain, และชุด Interface ที่กล่าวไปแล้วนั้น ซึ่งเป็นส่วนของ Hardware และในส่วนของ Solfware ก็ทำการศึกษาถึงส่วนของการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษา Delphi และสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมแบบพีไอดีที่ผู้ใช้สามารถปรับค่า ได้ด้วยตัวเอง เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการจำลองให้มีการทำงานและแสดงค่าให้เห็นผลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในโครงงานแบบจำลองการควบคุมกระบวนการ (Analog Process Simulation) จำเป็นต้องมีการศึกษาหลักการ ทฤษฎีต่างๆ ของอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- การควบคุมอัตโนมัติ
- ตัวควบคุมกระบวนการแบบพีไอดี (PID Controller)
- กระบวนการควบคุมระดับของเหลว (Level Control)
- การเชื่อมต่อทางด้านฮาร์ดแวร์
- วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส (V/I converter)
- วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลและดิจิตอลเป็นอนาลอก(A/D, D/A, Converter)

2.2 การควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control)

2.2.1 การควบคุมอัตโนมัติ

การควบคุมอัตโนมัติของระบบทางกายภาพใด ๆ คือการควบคุมหรือบังคับให้ระบบนั้นทำงานในลักษณะที่จะนำมาซึ่งผลงาน (Output) มีคุณสมบัติเป็นสอดคล้องหรือไปตามเป้าหมาย (Set Point) ด้วยตัวของมันเอง เช่นการควบคุมอัตโนมัติในระบบการทำความเย็น ซึ่งโดยทั่วไปหมายถึง การบังคับให้ระบบทำงานให้ผลงานคือ ความเย็น เป็นไปตามที่ต้องการ กล่าวคือ มีระดับความเย็นหรืออุณหภูมิเป็นไปตามที่ต้องการ ไม่ใช่เย็นไม่พอหรือเย็นเกินไป ด้วยอุปกรณ์หรือส่วนประกอบภายในระบบนั้นเอง แทนที่ผู้ใช้จะคอยเปิดหรือปิดเครื่องเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้พอเหมาะ หรือเช่นการควบคุมอัตโนมัติในระบบความดันซึ่งโดยทั่วไปได้แก่ การควบคุมความดันของระบบให้อยู่ในช่วงที่ต้องการตลอดเวลาด้วยอุปกรณ์ หรือส่วนประกอบภายในระบบแทนที่ผู้ใช้จะเป็นผู้เปิดหรือปิดเครื่องอัดอากาศหรือปั้มเอง เป็นต้น ในระบบควบคุมอัตโนมัติอย่างง่ายๆ ผลงานหรือสิ่งที่ระบบทำให้ (Output) และ เป้าหมายของระบบ (Set Point) หรือข้อกำหนดที่ส่งเข้าสู่ระบบ (Input) อาจเป็นปริมาณ หรือสัญญาณชนิดเดียวกัน เช่น เป็นอุณหภูมิเหมือนกันในระบบควบคุมความเย็น แต่ในระบบควบคุมอัตโนมัติทั่วไปเอาท์พุท และอินพุทอาจเป็นปริมาณหรือสัญญาณที่เหมือนกัน หรือไม่เหมือนกันก็ได้ เช่นในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat-Exchange) เอาท์พุทของระบบคือความร้อน ในขณะที่อินพุทเป็นอัตราการไหลของสารหล่อเย็น

เนื่องจากการควบคุมอัตโนมัติ เป็นการบังคับให้ระบบทำงานให้เอาท์พุทที่เป็นไปในลักษณะที่สอดคล้องกันกับอินพุทจึงอาจกล่าวได้ว่า การศึกษาการควบคุมอัตโนมัติเป็นการศึกษาถึง

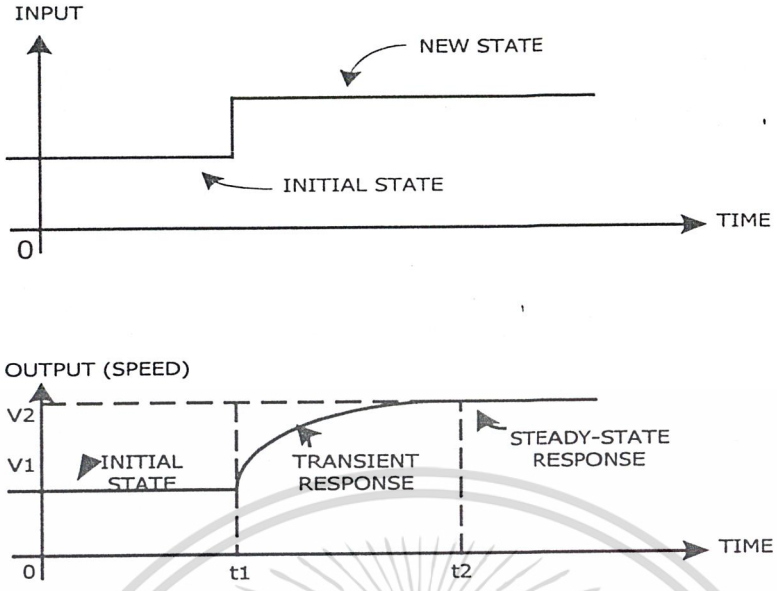
เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองของระบบ (System Response) ซึ่งจะได้แก่ ลักษณะของเอาท์พุทต่อเป้าหมาย หรือข้อกำหนด (Set Point) หรือต่ออินพุทที่เข้าสู่ระบบ การตอบสนองของระบบต่ออินพุทที่เข้ามาสู่ระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น การตอบสนองส่วนที่เปลี่ยนแปรตามเวลา (Transient Response) กับการตอบสนองส่วนที่ไม่เปลี่ยนแปรตามเวลา (Steady State Response) ซึ่งโดยทั่วไปการศึกษาระบบควบคุมอัตโนมัติจะเน้นไปที่ การตอบสนองส่วนที่เปลี่ยนแปรตามเวลา ทำให้การวิเคราะห์ วิจัย ระบบควบคุมอัตโนมัติเสมือนเป็นการวิเคราะห์ วิจัย ระบบพลศาสตร์ (Dynamics System) และในบางครั้งนั้นจะพบว่ามีทฤษฎี หรือหลักเกณฑ์ของการควบคุมอัตโนมัติบางอย่าง สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบทางพลศาสตร์อื่นๆ เช่นระบบสั่นสะเทือนหรือในทางกลับกันได้เป็นอย่างดี

2.2.2 การตอบสนองของระบบควบคุมอัตโนมัติ

ในระบบเพิ่มความเร็วของรถยนต์ หรือยานพาหนะอื่นๆ อินพุทของระบบคือ ตำแหน่งของคันเร่งน้ำมันเอาท์พุทของระบบคือ ความเร็วของรถยนต์ หรือ ยานพาหนะนั้นๆ เมื่อผู้ขับขี่ ซึ่งอาจถือเป็นส่วนหนึ่งของระบบได้ ต้องการจะเพิ่มความเร็วของรถยนต์ หรือ ยานพาหนะของเขา เขาจะส่งสัญญาณที่ต้องการอันนี้เข้าสู่ระบบ โดยการเหยียบคันเร่งน้ำมันให้มากขึ้น (Input ของระบบเปลี่ยนไป) ระบบจะทำงานด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ที่จะทำให้ล้อของรถยนต์หรือยานพาหนะนั้นๆ หมุนเร็วขึ้น อันจะทำให้ความเร็ว (Output) ของรถยนต์หรือยานพาหนะนั้นจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงจะเห็นว่า ความเร็วของยานพาหนะนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น การตอบสนองของระบบขณะนี้เรียกว่า เป็นการตอบสนองส่วนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient Response) และเมื่อเวลาผ่านไปชั่วขณะหนึ่ง ความเร็วของยานพาหนะ จะคงที่ไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอีกต่อไป การตอบสนองของระบบตั้งแต่นี้ไป เป็นการตอบสนองส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนค่าตามเวลา (Steady State Response) ยกเว้นเสียแต่อินพุทของระบบคือ ตำแหน่งของคันเร่งน้ำมันจะเปลี่ยนไปเป็นค่าใหม่ หรือระบบถูกรบกวนจากภายนอก เช่น รถขึ้นหรือลงเนินหรือถูกลมกระโชกแรงมากขึ้น ฯลฯ เหตุการณ์ในระบบตัวอย่างดังที่ได้กล่าวมานี้ อาจแสดงให้เข้าใจถึงการตอบสนองได้ดีขึ้นโดยรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่2.1 การตอบสนองของระบบเพิ่มความเร็วในยานพาหนะ

ในระบบอื่นๆ เช่น ระบบควบคุมความดัน, ระบบควบคุมความเย็น ฯลฯ ก็เช่นกัน ลักษณะของเอาท์พุท หรือการตอบสนองของระบบต่ออินพุทใหม่ของระบบจะไม่เป็นไปในลักษณะทันทีทันใด คือ จะต้องมีการค่อยๆ เพิ่มหรือค่อยๆ ลด กล่าวคือ ต้องใช้เวลาเสมอ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะระบบใดๆ ก็ย่อมมีความเฉื่อย หรือคุณสมบัติซึ่งเสมือนความเฉื่อยเสมอ และส่วนประกอบต่างๆ ภายในระบบนั้นๆ ย่อมไม่สามารถทำงานได้อย่างเครื่องจักรในอุดมคติคือ ให้แรง หรือโมเมนต์หรือ ผลกระทบได้อย่างมากมาย (Infinite) จนทำให้ระบบสามารถเปลี่ยนสภาวะ (State) ได้อย่างทันทีทันใด

2.2.3 คุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติ

ในการเปรียบเทียบคุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติที่เหมือนกัน 2 ระบบ ว่าระบบไหนดีกว่ากัน จะต้องดูที่การตอบสนอง (Response) ของแต่ละระบบแล้วมาเปรียบเทียบกัน ระบบที่ให้การตอบสนองที่มีความแม่นยำ (High Accuracy) ย่อมที่จะดีกว่าระบบที่ให้การตอบสนองที่มีการคลาดเคลื่อน (Low Accuracy), ระบบที่ให้การตอบสนองที่ฉับไว (Fast) ย่อมดีกว่าระบบที่ให้การตอบสนองอย่างเฉื่อยชา (Sluggish) และระบบที่ให้การตอบสนองที่เสถียร (Stable) ย่อมดีกว่าระบบที่ให้การตอบสนองที่รุนแรง หรือทำการควบคุมไม่ได้ (Violent or Unstable Response) จึงอาจกล่าวได้ว่า คุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติ หมายถึง

ก. ความแม่นยำ (Accuracy)

ข. ความรวดเร็ว (Speed)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ความเสถียร (Stability)

ของการตอบสนอง (Response) ของระบบนั้น ๆ

ระบบควบคุมที่ขาดความแม่นยำนั้นย่อมนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ และถือว่าเป็นระบบการควบคุมที่สร้างขึ้น หรือทำขึ้นโดยผิดวัตถุประสงค์ของการควบคุม และแน่นอนความแม่นยำในที่นี้ รวมถึงความสม่ำเสมอ คงเส้นคงวา (Consistency) ในเรื่องของการตอบสนองด้วย ความรวดเร็วในการตอบสนองก็เช่นกัน ระบบที่มีความตอบสนองที่แม่นยำไม่มีความคลาดเคลื่อนเลย แต่ใช้เวลานานมากกว่าจะถึงเสถียรภาพก็ย่อมเป็นระบบควบคุมที่นำไปใช้งานไม่ได้ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดได้แก่ ระบบเบรคในรถยนต์ เมื่อผู้ขับขี่ต้องการจะหยุดรถ คือเหยียบคันบังคับเบรค หากรถยนต์ไม่หยุดหรือชลอความเร็วลงตามลักษณะของการเคลื่อนที่ของคันบังคับเบรค ในกรณีฉุกเฉิน รถย่อมหยุดไม่ทันและเกิดอุบัติเหตุได้ การทำงานของระบบเบรคโดยทั่วไปรถจะต้องหยุดเมื่อสุดระยะเคลื่อนที่ของคันเหยียบบังคับเบรค ความเสถียรของการตอบสนองของระบบควบคุมอัตโนมัติก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะชี้ให้เห็นถึงคุณภาพของระบบควบคุมนั้นๆ ระบบควบคุมที่มีความเร็วและแม่นยำในการตอบสนอง แต่ในบางลักษณะของอินพุท ไม่สามารถที่จะให้การตอบสนองที่เสถียร ระบบการควบคุมนั้นก็จะใช้งานไม่ได้และชำรุดไป ตัวอย่างที่ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของความเสถียร. ได้แก่ การทำงานของเครื่องยนต์สันดาบภายใน แบบจุดระเบิดด้วยกำลังอัด (Compression Ignition หรือเครื่องยนต์ดีเซล) ซึ่งจะต้องมีตัวควบคุม คือ Governor สำหรับควบคุมรอบการทำงานของเครื่องยนต์นั้นเสมอ ถ้าหากการทำงานของ Governor ผิดพลาดหรือเสียไปในจังหวะที่ผู้ขับขี่เร่งเครื่องยนต์มากๆ เป็นระยะเวลานานเครื่องยนต์จะหมุนเร็วขึ้นทุกขณะจนตัวเครื่องยนต์เองพังเพราะชิ้นส่วนต่างๆ ไม่สามารถทนต่อแรงที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยไม่มีขีดจำกัดได้

จึงเห็นว่า ความแม่นยำ ความรวดเร็ว และความเสถียร นอกจากจะเป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงคุณภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติแล้วยังเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติทุกระบบจะขาดอันใดอันหนึ่งไปไม่ได้ จึงไม่ควรที่จะสรุปว่าความแม่นยำดีกว่าความรวดเร็ว ความรวดเร็วดีกว่าความเสถียรหรือกลับกันในระบบควบคุมอัตโนมัติหนึ่งๆ ผู้ออกแบบหรือผู้สร้างระบบควบคุมนั้นๆ จะต้องคำนึงถึงทั้ง 3 องค์ประกอบคือ พยายามที่จะทำให้ได้ระบบควบคุมที่ทำงานหรือให้การตอบสนองที่แม่นยำที่สุด รวดเร็วที่สุด และเสถียรที่สุด ซึ่งในทางปฏิบัติจะทำได้ลำบาก เพราะขณะที่พยายามให้ระบบควบคุมมีการตอบสนองที่รวดเร็ว โดยทั่วไปจะทำให้ระบบเสียความเสถียรไป หรือขณะที่พยายามให้ระบบนั้นมีการตอบสนองที่แม่นยำมากขึ้น โดยทั่วไปก็จะมีผลกระทบทำให้ การตอบสนองล่าช้าลง

2.2.4 ส่วนประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติ

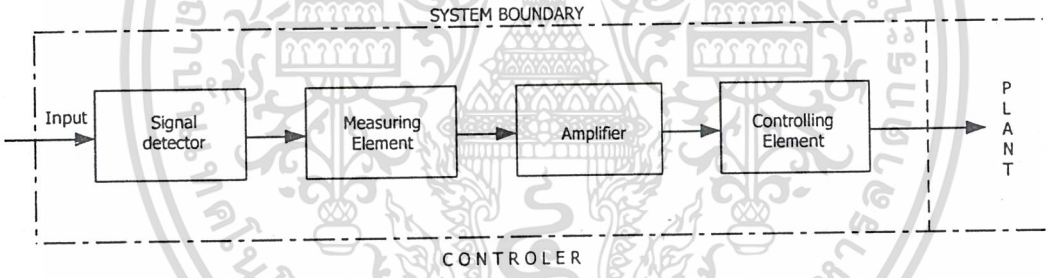
ระบบควบคุมอัตโนมัติ ประกอบด้วย ระบบย่อย หรือส่วนประกอบใหญ่ๆ 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นตัวควบคุม (Controller) และส่วนที่เป็นกระบวนการ (Process)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4.1 ส่วนที่เป็นตัวควบคุม (Controller)

ส่วนที่เป็นตัวควบคุมนั้น หมายถึง ส่วนที่ทำหน้าที่แปรสัญญาณจากภายนอก ที่ส่งเข้ามาสู่ระบบ หรือ อินพุทให้เป็นสัญญาณอื่นที่เหมาะสม และมีกำลังพอ เพื่อไปบังคับให้ส่วนที่เป็นต้นกำลังทำงาน เพื่อให้ระบบควบคุมทั้งระบบทำงาน ในระบบควบคุมความเร็วของรถยนต์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนที่เป็นตัวควบคุม จะเริ่มต้นจากคันเร่งน้ำมัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณ (Singnal Detector) จากภายนอก และตัววัดระดับสัญญาณ (Measuring Device) ไปในตัวด้วยแล้วส่งสัญญาณนั้นไปยังคาบูเรเตอร์ หรือหัวฉีดโดยอาศัยสายคันเร่ง หรือ Linkages ต่างๆ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณ (Signal Amplifier) คาบูเรเตอร์ หรือหัวฉีดก็จะทำงานโดยเปิดลิ้นให้ส่วนผสมของน้ำมันเชื่อเพลิงและอากาศไหลลงสู่ Intake Manifold หรือ ในกรณีของหัวฉีดก็จะฉีดน้ำมันเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้น คาบูเรเตอร์ หรือหัวฉีด จึงทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม (Controlling Element)

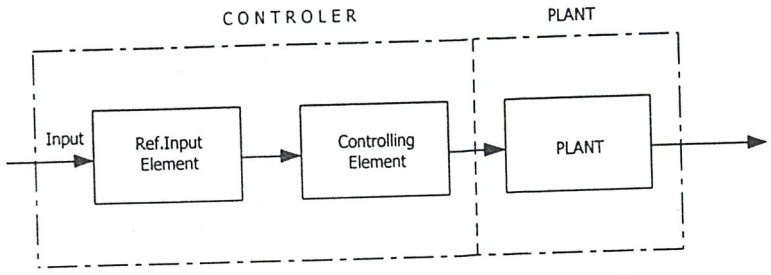
จึงอาจกล่าวได้ว่า โดยทั่วไปส่วนที่เป็นตัวควบคุมประกอบด้วย ตัวรับสัญญาณ หรือ Signal Detector หรือ Receiver ตัววัดระดับสัญญาณ หรือ Measuring Device และตัวขยายสัญญาณ หรือ Signal Amplifier หรือ Amplifier และตัวควบคุมหรือ Controlling Element ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนรูป หรือ ลักษณะของสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ส่วนที่เป็นตัวควบคุมและส่วนประกอบต่าง ๆ

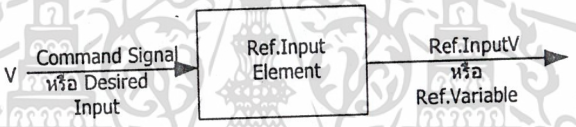
ในการแทนระบบควบคุมด้วยรูป (Diagram) ตัวรับสัญญาณหรือ Signal Detector ตัววัดระดับสัญญาณหรือ Measuring Device ตัวขยายสัญญาณหรือ Amplifier อาจแสดงได้โดยรวมเข้าด้วยกัน เรียกว่า Reference Input Element ฉะนั้น ส่วนที่เป็นตัวควบคุม หรือ Controller ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จึงนิยมแทนด้วยรูป 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



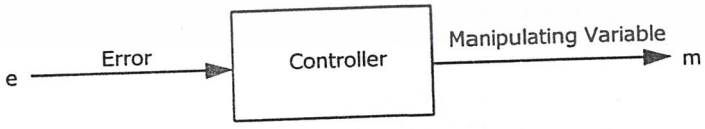
รูปที่ 2.3 ส่วนที่เป็นตัวควบคุมและระบบควบคุมทั่วไป

และเรียกสัญญาณที่เข้าสู่ระบบที่ Reference Input Element ว่า Command Signal หรือ Command-Variable หรือ Desired Input ซึ่งโดยทั่วไปใช้ V เป็นสัญลักษณ์ และเรียกสัญญาณที่ออกไปจาก Reference Input Element ว่า Reference Input หรือ Reference Variable ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ คือ r ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สัญญาณที่เข้าหรือออก ของ Reference Input Element

ส่วนสัญญาณที่ออกไปจาก Controlling Element และเข้าสู่ส่วนที่เป็นต้นกำลัง หรือ แพนท์ (Plant) ของระบบ ซึ่งในระบบควบคุมความเร็วได้แก่ น้ำมันที่ไหลออกจาก คาบูเรเตอร์ หรือหัวฉีดเข้าสู่เครื่องยนต์นั้น เรียกว่า Manipulating Variable ใช้สัญลักษณ์ คือ m ฉะนั้น สัญญาณที่เข้าและออกจากส่วนที่เป็นตัวควบคุม จึงอาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



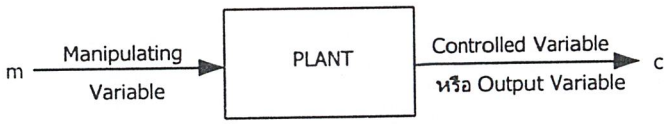
รูปที่ 2.5 สัญญาณที่เข้าและออกจากส่วนที่เป็นตัวควบคุม

2.2.4.2 ส่วนที่เป็นกระบวนการ (Process)

ส่วนที่เป็นกระบวนการ คือส่วนของระบบควบคุมอัตโนมัติที่รับสัญญาณ Manipulating-Variable (MV) จากส่วนที่เป็นตัวควบคุม หรือ ควบคุมแล้วทำงานให้ได้ เอาท์พุทหรือ Control

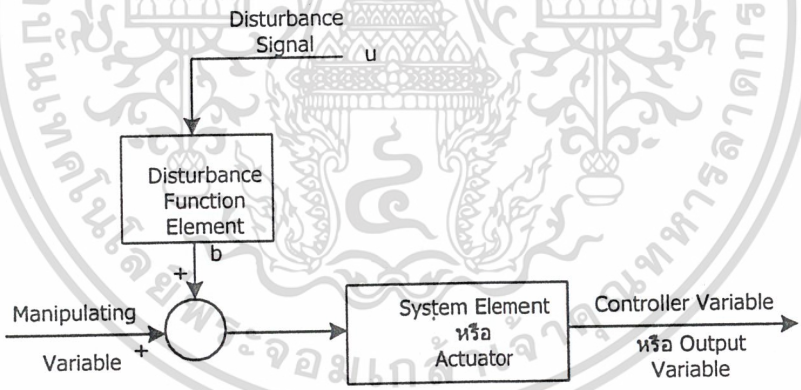
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Variable (C) ของทั้งระบบตามที่ต้องการ ในระบบควบคุมระดับของเหลว ส่วนที่เป็นกระบวนการต้นกำลังได้แก่ Control Valve ซึ่งเมื่อได้รับ Manipulating Variable คือสัญญาณมาตรฐาน 4–20 mA แล้วทำงานให้ระดับของของเหลว (Control Variable) เป็นไปตามที่ต้องการ อาจจะเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สัญญาณที่เข้าและออกจากส่วนที่เป็นต้นกำลัง

เนื่องจากในระบบควบคุมทั่วๆ ไป สัญญาณที่เข้าสู่ตัวทำงาน ซึ่งเรียกว่า System Element หรือ Actuator มักจะประกอบด้วยสัญญาณอื่น เนื่องมาจากการรบกวนจากภายนอกระบบซึ่งเรียกว่า External Disturbance ส่วนที่เป็นต้นกำลังจึงประกอบด้วย ตัวรวมสัญญาณ หรือ Singnal Summing-Element ซึ่งทำหน้าที่รวมสัญญาณจากภายนอกระบบ เข้ากับ Manipulating Variable แล้วจึงส่งต่อไปยัง Actuator ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ส่วนที่เป็นต้นกำลังของระบบควบคุมที่มีการรบกวนจากภายนอก

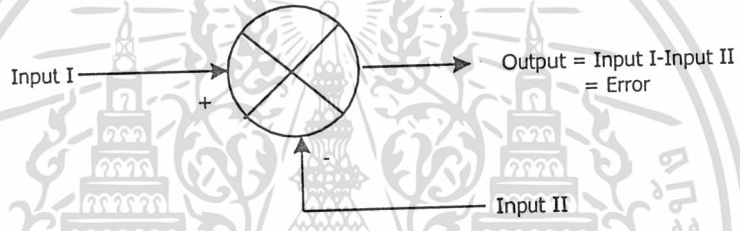
โดยที่ Disturbance Function Element หรือ Disturbance Element ทำหน้าที่เช่นเดียวกับ Reference-Input Element คือ ส่ง วัด และขยาย (หรือลด) ขนาด หรือ เปลี่ยนรูป ในระบบเพิ่มความเร็วของรถยนต์ Disturbance Signal ได้แก่ Vacuum Advance นั่นเอง ส่วนสัญญาณที่ออกจาก Disturbance Element ซึ่งจะรวมกับ Manipulating Variable (m) เรียกว่า Disturbance Variable ที่ใช้สัญลักษณ์ b

จะเห็นว่า ข้อแตกต่างของส่วนที่เป็นตัวควบคุม (Controller) กับส่วนที่เป็นต้นกำลัง (Plant) ก็คือ ส่วนที่เป็นตัวควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของทั้งระบบ ให้เป็นไปตามเป้าหมายของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุม แต่เอาท์พุทของส่วนนี้ คือ Manipulating Variable ไม่สามารถทำงานให้ระบบได้จึงต้องอาศัยส่วนที่เป็นต้นกำลังอีกต่อหนึ่งสำหรับส่วนที่เป็นต้นกำลังจะทำหน้าที่ผลิตกำลังให้เป็นไปตามระดับความแรงของสัญญาณ ManipulatingVariable จากส่วนตัวควบคุมเพื่อให้ได้เอาท์พุทของระบบ หรือ Controlled Variable กล่าวคือส่วนที่เป็นต้นกำลัง หรือ ต้นกำลัง (Plant) จะทำงานในลักษณะแปรรูป หรือส่งพลังงาน เช่น เครื่องยนต์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกล คือ รอบเครื่องยนต์และ แรงบิด (Speed and Torque)

อุปกรณ์อื่นที่ใช้ในระบบควบคุมที่พลเสมอและสำคัญมากได้แก่ ตัวเปรียบเทียบค่าหรือ Comparator ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณแล้วให้ความแตกต่างของสัญญาณ ที่มาเปรียบเทียบเป็นเอาท์พุท ซึ่งเรียกว่า ค่าผิดพลาด (Error) ตัวเปรียบเทียบสัญญาณทำงานโดยอาศัยหลักการ และใช้สัญลักษณ์ เป็นวงกลม เช่นเดียวกับตัวรวมสัญญาณ เพียงแต่ให้สัญญาณหลักเป็นบวก และให้สัญญาณที่มาเปรียบเทียบเป็นลบ และเขียนสัญลักษณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวเปรียบเทียบค่าหรือ Comparator ของระบบควบคุม

ตัวเปรียบเทียบค่า หรือ Comparator จะพบเสมอในเรื่องของระบบควบคุมประเภทวงจรปิด (Close-loop Control System) หรือที่เรียกๆ กันว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทที่มีการป้อนกลับ (Feed back Control System) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

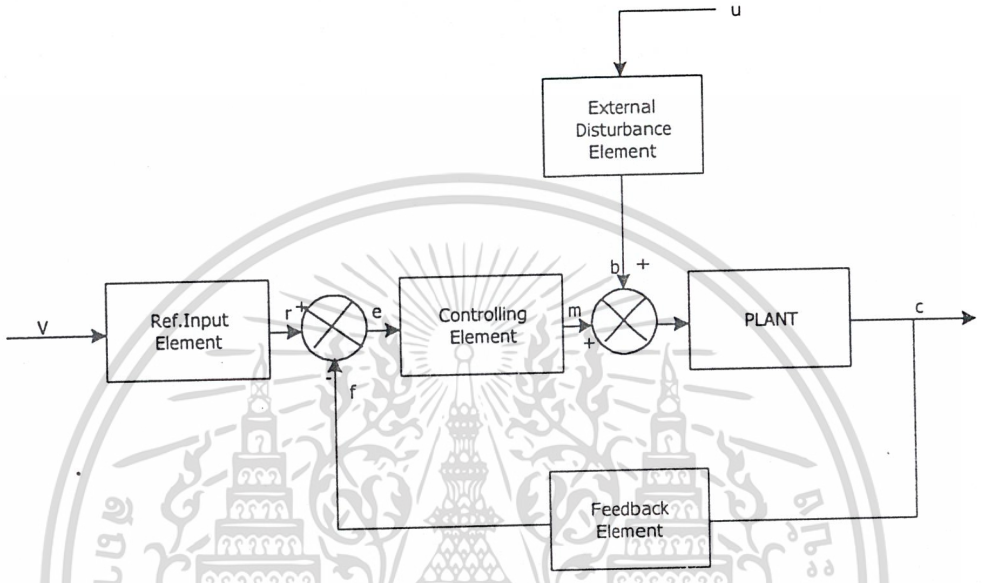
2.2.5 ประเภทของระบบควบคุมอัตโนมัติ

การควบคุมอัตโนมัติในระบบทางกายภาพต่างๆ ซึ่งเรียกว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ประเภทวงจรปิด (Close–Loop) หรืออีกประเภทที่มีการป้อนกลับ (Feed Back) กับประเภทวงจรเปิด (Open – Loop) หรือประเภทที่ไม่มีการป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5.1 ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทวงจรปิด หรือประเภทที่มีการป้อนกลับ (Close – Loop or Feedback Control System)

ระบบการควบคุมประเภทนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2 – 9 เป็นระบบการควบคุมที่เอาท์พุทของระบบหรือ Controlled Variable (C) ถูกป้อนกลับมายังส่วนที่เป็นตัวควบคุม (Control) ของระบบ เพื่อมาเปรียบเทียบกับค่า Reference Variable (R) โดยอาศัยตัวเปรียบเทียบค่าตลอดเวลา



รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมอัตโนมัติ ประเภทวงจรปิด หรือประเภทที่มีการป้อนกลับ (Close-Loop or Feed back Control System)

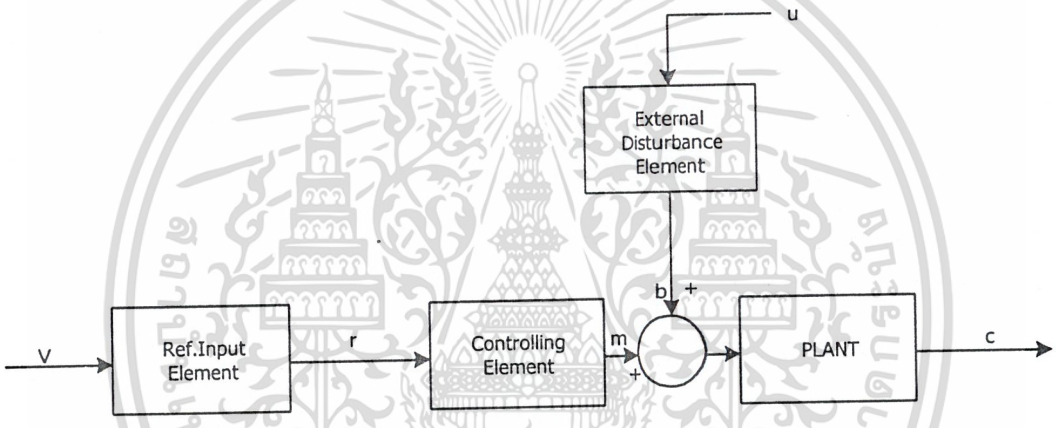
และเนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว ลักษณะของ Controlled Variable (C) และ Reference Variable (R) จะไม่เหมือนกันใน Feedback Loop จึงมักประกอบด้วย Feedback Element ซึ่งทำหน้าที่ รับ วัด ขยาย หรือ ลด หรือ เปลี่ยนรูป Controlled Variable (C) ให้เป็น Feedback Variable

ในช่วง Transient Response ของระบบการควบคุมประเภทนี้ Error (หรือที่บางครั้งเรียกว่า Actuating Signal) ซึ่งมีสัญลักษณ์ e จะเปลี่ยนค่าตลอดเวลา ถึงแม้ Reference Variable (R) จะไม่เปลี่ยนค่าก็ตาม เนื่องจาก Feed back Variable เปลี่ยนค่าตลอดเวลา เพราะ Controlled Variable (C) เปลี่ยนค่าตลอดเวลา ฉะนั้นส่วนที่เป็น Final Element หรือ ส่วนที่เป็นตัวปรับตัวแปรกระบวนการของระบบควบคุมประเภทนี้ โดยทั่วไปแล้วจะทำงานด้วยอัตราที่ไม่คงที่ (ยกเว้น ในระบบควบคุมแบบ เปิด – ปิด หรือ On – Off Control) ตัวอย่างของระบบการควบคุมประเภทที่มีป้อนกลับ ได้แก่ การกระทำต่างๆ ของคน เช่น การรับประทานอาหาร ระบบประสาทจะทำหน้าที่เป็น Feed back-Element คือ แปรสัญญาณความอิ่มจากกระเพาะอาหาร แล้วส่งไปยังสมอง สมองก็จะทำหน้าที่เป็น Comparator เปรียบเทียบระดับความอิ่ม หากเปรียบเทียบแล้วปรากฏว่ายังไม่อิ่ม สมองก็จะสั่งให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้ามเนื้อมือ และแขนทำงานต่อไป คือส่งอาหารเข้าปากต่อไป ข้อสังเกตที่เห็นได้จากกระบวนการเหล่านี้ก็คือ ถ้าคนคนหนึ่งหิวมาก เขาจะรับประทานอาหารได้อย่างรวดเร็ว มูมมาม และจะค่อยๆ รับประทานอาหารช้าลงเมื่ออิ่มขึ้น และจะหยุดรับประทานเมื่ออิ่ม หรือถึง Steady State แล้ว และอีกตัวอย่างหนึ่งของการควบคุมประเภทนี้ได้แก่ การเดินของคน จะเห็นว่าการทำงานของระบบนี้ มีตาเป็น Feed back Element หากเจอหลุม ก้อนหิน หรือ สิ่งกีดขวางใดๆ ที่ตาสังเกตพบ ตาจะส่งสัญญาณไปยังสมอง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบ และ Controller Element คือสมอง ก็จะบังคับให้กล้ามเนื้อเท้า และขาทำงาน คือ เดินหลบสิ่งกีดขวางเหล่านั้น แต่ยังคงมุ่งไปที่เป้าหมายเดิม เป็นเช่นนี้เรื่อยไป

2.2.5.2 ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทวงจรเปิดหรือประเภทที่ไม่มีการป้อนกลับ (Open – Loop Control System)



รูปที่ 2.10 ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบวงจรเปิด หรือแบบไม่มีการป้อนกลับ

ระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นเรื่องของการควบคุมที่ไม่มีการเปรียบเทียบสภาพของเอาท์พุทของระบบ หรือ Controlled Variable (C) กับ Reference Variable (R) ของระบบ กล่าวคือ Error หรือ Actuating Signal (e) มีค่าคงที่ตลอดเวลา และโดยทั่วไป เรื่องของกระบวนการจะทำงานที่อัตราคงที่นั้น ข้อสังเกตที่สำคัญของระบบควบคุมประเภทนี้นั้นก็คือ ความคลาดเคลื่อนของเอาท์พุทของระบบ เพราะในทางปฏิบัติระบบจะถูกรบกวนจากภายนอกเสมอ ทำให้ส่วนที่เป็นตัวปรับค่าตัวแปรกระบวนการไม่สามารถทำงานได้ตามที่ Controller สั่งมาแต่จะเอาการรบกวนเข้ามา และไม่มีการแก้ไขกลับไป (Feed back) ที่ส่วนที่เป็นตัวควบคุมอีกแต่อย่างใด

ตัวอย่างของระบบควบคุมอัตโนมัติประเภทนี้ ได้แก่การทำงานของเครื่องซักผ้า ซึ่งทำงานเป็นจังหวะๆ คือ เติมน้ำ ซัก รีดน้ำ แล้วเติมน้ำใหม่ รีดน้ำหรือ ฯลฯ แล้วหยุดเครื่องตามแต่ที่ผู้ผลิตหรือผู้ใช้ตั้งค่าเอาไว้ หรือโปรแกรมเอาไว้ เครื่องก็จะไม่ปรับตัวเองให้การทำงานให้เหมาะสมกับความสะอาด หรือสกปรกของค่าในเครื่องเลย อีกตัวอย่างหนึ่งได้แก่ การทำงานของระบบสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟจราจร ที่เปลี่ยนไฟเขียวเพื่อเป็นไฟแดงตามทางแยก ผลัดกันข้างละ 1 – 2 นาที แล้วแต่การตั้งเครื่องการทำงานของระบบสัญญาณไฟจราจรนี้นั้น จะถือว่าเป็นแบบมีการป้อนกลับได้ก็ต่อเมื่อมีการนำเอาสภาพความแออัดของรถยนต์ หรือยานพาหนะบนถนนแต่ละแยกไปบังคับการทำงานของระบบ เช่น นับจำนวนรถยนต์ หรือยานพาหนะ ทุกด้านตลอดเวลา แล้วเอาผลไปเปรียบเทียบกัน หรือในการให้อาหารทารกก็เช่นกัน ถือว่า เป็นระบบควบคุมที่ไม่มีการป้อนกับ เพราะการให้อาหาร (Input ของระบบ) กับความหิวความอิ่มของทารก (Output) ไม่มีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ ความอิ่มของทารกไม่ได้ถูกนำมาบังคับการนำเอาอาหารเข้าปากทารกเลย ผู้ให้อาหารได้คะเนในการให้อาหารครั้งที่แล้วว่าให้ไปนานแล้วจึงควรให้อาหารครั้งใหม่ได้และสำหรับปริมาณอาหารก็คะเนเอาไว้เช่นกัน ยกเว้น ในกรณีผู้ให้อาหาร ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบค่า (Comparator) ด้วย โดยจะทำการสังเกตอากับกริยาของการรับประทานของทารกว่า ทารกเริ่มอิ่มแล้วหรือไม่ จึงจะถือได้ว่าเป็นระบบวงจรปิดหรือมีการป้อนกลับ

จึงสังเกตได้ว่า ความแม่นยำของ Controlled Variable (C) หรือ เอาท์พุทของระบบเทียบกับ Reference Variable (R) ของระบบในระบบควบคุมอัตโนมัตินี้นั้น จะขึ้นอยู่กับ การตั้ง การปรับการคาดการล่วงหน้า (Calibration and Programming) เป็นสำคัญ มิฉะนั้นระบบจะทำงานอย่างผิดพลาดและไร้ประโยชน์ ฉะนั้นระบบควบคุมแบบนี้จะทำงาน โดยอาศัยจังหวะ หรือเวลาเป็นหลักเสมอ ทั้งนี้เพราะเวลาเป็นตัวแปรที่มีอยู่ (Available) และคงที่ (Consistent) เสมอ อย่างไรก็ตาม ระบบการควบคุมอัตโนมัติแบบวงจรเปิด หรือแบบที่ไม่มีการป้อนกลับหากนับผู้ใช้ระบบ (System-Operator) ร่วมเข้ากับตัวเครื่องด้วย ระบบใหม่ที่ได้จะได้เป็นระบบควบคุมประเภทวงจรปิดกล่าวคือ การปิดหรือการป้อนกลับ เกิดที่ตัวผู้ใช้เครื่อง เช่น ระบบสัญญาณไฟวงจรดังที่ได้กล่าวมา โดยจะมีเจ้าพนักงานจราจรเป็นผู้บังคับสัญญาณไฟ แทนการผลัดเปลี่ยนกันเองตามจังหวะเวลา (Timer) ที่ตั้งไว้ หรือ ผู้ให้อาหารทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบค่าในการให้อาหารทารกดังกล่าวแล้วด้วย

2.3 ตัวควบคุมกระบวนการ แบบ พีไอดี (PID Controller)

2.3.1 ความเบื้องต้น

เป็นที่ทราบกันดีว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบ พีไอดี ได้ถูกนำมาควบคุมกระบวนการในการผลิตเป็นเวลานานกว่า 40 ปีมาแล้วอุตสาหกรรมการผลิตแบบอัตโนมัติทั่วไป ในปัจจุบันก็ยังนิยมใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี อยู่ทั้งนี้อาจเป็นเพราะรูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอดี เป็นรูปที่สามารถควบคุมกระบวนการต่าง ๆได้อย่างกว้างขวางไม่ว่ากระบวนการนั้นจะมีผลตอบแบบความถี่ต่ำ ความถี่กลาง หรือความถี่สูง ตัวควบคุมแบบพีไอดี ก็สามารถควบคุมกระบวนการได้เป็นอย่างดี ถ้ามีการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอย่างเหมาะสม

อุตสาหกรรมในประเทศไทยนั้นได้มีการนำระบบควบคุมแบบพีไอดี มาใช้งาน แต่ในเรื่องการใช้งานนั้น มักจะใช้เพียงแค่การควบคุมแบบพี หรือการควบคุมแบบพีไอ เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจาก

เอกสารนี้ ... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี จะต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ หรือผู้ที่มีความชำนาญกับกระบวนการเป็นอย่างสูง ค่าของพารามิเตอร์ที่ได้นั้นถึงจะเป็นค่าที่ควบคุมกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการปรับค่าที่ผู้เชี่ยวชาญใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ วิธีทดลองปรับค่า (Trial and-Error Method) ซึ่งค่าที่ได้ก็อาจไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด เนื่องจากการปรับค่ามักอาศัยประสบการณ์ ซึ่งไม่สามารถพิสูจน์ทางทฤษฎีได้อย่างชัดเจน

2.3.2 แนวคิดและทฤษฎี

ทฤษฎีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดี นั้น ได้มีผู้เสนอแนวทางและหลักการออกมาหลายแนวทาง แต่พอจะแบ่งเป็นแนวทางใหญ่ได้สองแนวทาง คือ การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมขณะทำงาน (On – line) วิธีนี้เหมาะกับกระบวนการที่มีค่าของพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ หรือตลอดเวลา ระบบควบคุมในลักษณะนี้มีอยู่ไม่มากนักและเสถียรภาพของกระบวนการที่ใช้ค่าที่ได้จากการหาค่าด้วยวิธีนี้ ก็ยังเป็นที่วิจัยกันอยู่ว่ามีมากน้อยเพียงใดและทำอย่างไรกับกระบวนการจึงมีเสถียรภาพ ส่วนอีกวิธีหนึ่งคือ การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมก่อนทำงานนั้น (Off – line) ซึ่งเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมขณะเริ่มต้นเดินกระบวนการหลังทำการติดตั้ง หรือหลังหยุดการทำงานของกระบวนการ (Shutdown) นั้นๆ ระบบอุตสาหกรรมทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบอุตสาหกรรมในประเทศไทยนิยมใช้วิธีที่ 2 กันมาก ดังนั้น ในงานวิจัยครั้งนี้ จะมุ่งศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ก่อนทำงาน

การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมก่อนทำงาน (Off-line) นั้น ได้มีผู้ศึกษาและวิจัยเสนอออกมาเป็นหลักการออกมามากมายหลายหลักการ แต่ที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง ได้แก่หลักการของ Ziegler and Nichols ซึ่งเสนอวิธีที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี หาได้จากค่าอัตราขยาย (Gain) ที่ทำให้กระบวนการเกิดการแกว่ง และคาบของการแกว่งนั้น และยังเสนวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมจาก Process Reaction Corve อีกด้วย, Astrom and Hagglund เสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากขนาดของ Limit Cycle ที่ได้จากการที่ตัวควบคุมผลักกระบวนการไปสู่ Limit Cycle ที่ความถี่ของหระบวนการเท่ากับ 180 องศา, Cohen and Coon เสนอวิธีหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากราค่าประวิง แต่ค่าคงตัวเวลาของกระบวนการ ที่ประมาณจากผลตอบแทนสัญญาณแบบขั้นบันไดขณะเป็นวงรอบเปิด (Open–loop) โดยประมาณว่ากระบวนการเป็นกระบวนการเป็นการกำลังหนึ่งที่มีเวลาประวิง (Deth time)

งานวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการนำเอาคอมพิวเตอร์มาเป็นเครื่องมือที่จะช่วยหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยสร้างแบบจำลองของกระบวนการที่จะควบคุมเป็นกระบวนการกำลังสองที่มีเวลาประวิง การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองคำนวณจากพื้นที่ควบคุม ของผลตอบของกระบวนการที่ถูกรบกวนขณะเป็นวงรอบเปิด หลังจากนั้น จึงนำไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบพีไอดี ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

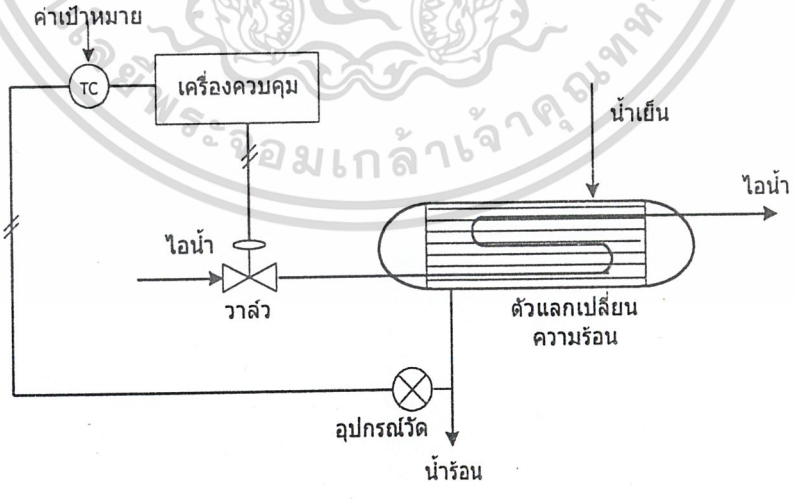
ใช้หลักการของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) ตามดรรชนีสมรรถนะ (Performance Index) ที่กำหนด

2.3.3 ตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID (PID Controller)

ในกระบวนการผลิตที่ทำงานโดยอุปกรณ์อัตโนมัติ จำเป็นต้องมีตัวควบคุมกระบวนการซึ่งการควบคุมกระบวนการต่างๆ เหล่านี้ก็มีมากมายหลายแบบ ตั้งแต่การควบคุมกระบวนการแบบง่ายๆ (Single – Loop Control) จนถึงการควบคุมกระบวนการแบบซับซ้อน แต่ถ้ามองลงไปยังส่วนย่อยของตัวควบคุมกระบวนการแล้ว มักพบว่าประกอบไปด้วยตัวควบคุมกระบวนการแบบ พีไอดี ทั้งสิ้น น้อยครั้งที่จะพบการควบคุมกระบวนการแบบอื่นๆ ในบทนี้จะขอกล่าวถึงตัวควบคุมกระบวนการแบบพีไอดี รวมทั้งการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระบวนการแบบพีไอดี ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน

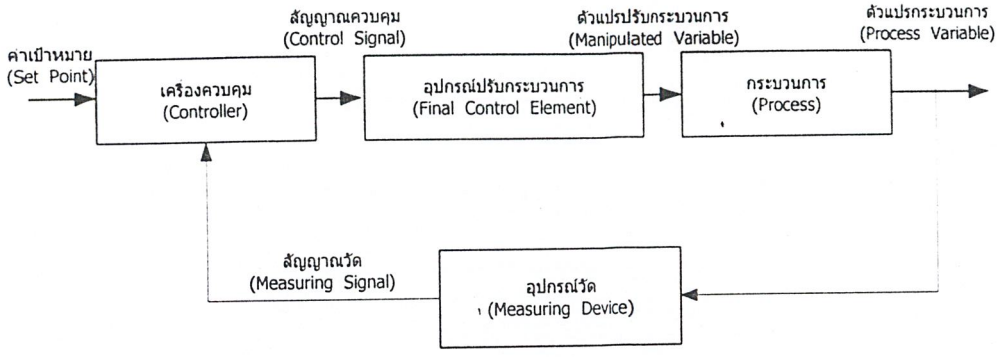
2.3.4 องค์ประกอบของการควบคุม

ก่อนที่จะกล่าวถึงตัวควบคุมและการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม จำเป็นที่จะต้องกล่าวถึงองค์ประกอบของการควบคุมแบบง่ายๆ เพื่อนิยามคำบางคำของการควบคุม โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างของระบบควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมได้ตามรูปที่ 2.12 กระบวนการนี้ต้องการควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ทางออกให้มีอุณหภูมิตามที่ตั้งค่าไว้



รูปที่ 2.11 ระบบควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

2.3.5 ระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ส่วน คือ

2.3.5.1 กระบวนการ (Process)

กระบวนการ หมายถึง กระบวนการทางฟิสิกส์ที่ต้องการควบคุมให้มีลักษณะตามต้องการ แสดงด้วยตัวแปรกระบวนการ (Process Variable) การควบคุมสถานะของกระบวนการ ทำได้โดยการปรับ หรือเปลี่ยนค่าตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulate Variable) ในทิศทางที่ทำให้ตัวแปรกระบวนการมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามต้องการ ตามรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 กระบวนการที่กล่าวถึงคือตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเย็นขาเข้าโดยการรับพลังงานความร้อนจากไอน้ำ เพื่อให้กลายเป็นน้ำร้อนขาออก ตัวแปรกระบวนการในที่นี้ จะหมายถึงอุณหภูมิน้ำร้อนขาออก

2.3.5.2 อุปกรณ์วัด (Measuring Device)

เป็นอุปกรณ์ที่ให้สัญญาณขาออกหรือสัญญาณวัด (Measuring Signal) ซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับตัวแปรทางฟิสิกส์ที่ต้องการวัดหรือตัวแปรกระบวนการ โดยทั่วไป สัญญาณขาออกของอุปกรณ์วัดจะเป็นสัญญาณมาตรฐานคือสัญญาณไฟฟ้าขนาด 4 – 20 mA_{dc} หรือ 1 – 5 V_{dc} หรือสัญญาณลมขนาด 3 –15 psi_g

2.3.5.3 เครื่องควบคุมหรือตัวควบคุม (Controller)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คำนวณหาและสร้างสัญญาณควบคุม (Control Signal) จากสัญญาณขาเข้า (Input) หรือสัญญาณจุดปรับตั้ง (Set Point) ตามกฎเกณฑ์การควบคุม (Control Law) ที่ถูกกำหนดไว้ก่อนล่วงหน้าแล้ว เพื่อนำสัญญาณนี้ไปควบคุมอุปกรณ์ปรับกระบวนการต่อไป

2.3.5.4 อุปกรณ์ปรับกระบวนการ (Final Control Element)

คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับสภาวะของกระบวนการ ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับกระบวนการ ตามคำสั่งหรือสัญญาควบ-คุม ที่ได้รับจากตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

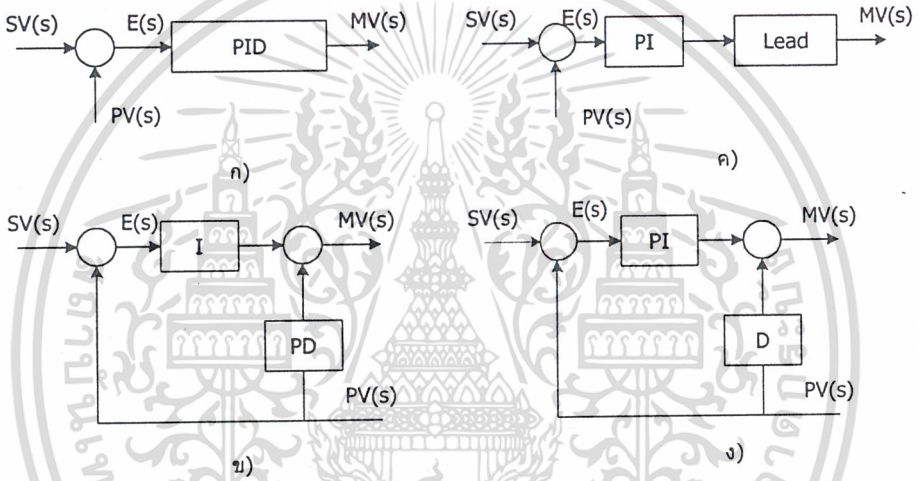
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.3.6 ตัวควบคุมแบบ PID คืออะไร

ตัวควบคุมกระบวนการแบบพีไอดี คือตัวควบคุมชนิดหนึ่งในการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ทำหน้าที่นำเอาสัญญาณเอาท์พุทของกระบวนการมาเปรียบเทียบกับสัญญาณจุดปรับตั้งที่กำหนดและคำนวนตามกฎเกณฑ์การควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งประกอบด้วยการคำนวณมี 3 ส่วน คือ Proportional, Integral และ Derivative สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมกระบวนการแบบพีไอดี ก็คือ ผลรวมของการคำนวณทั้ง 3 ส่วน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั่นเอง

2.3.6.1 รูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID

ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) พอที่จะแบ่งรูปแบบของตัวควบคุมตามกฎเกณฑ์ของการควบคุมออกแบบได้ 4 แบบ ตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอดี

โดยที่

SV(s) → จุดปรับตั้ง(Set Point หรือ Set Value)

PV(s) → สัญญาณตัวแปรกระบวนการ (Process Variable)

E(s) → ผลต่างระหว่างจุดปรับตั้งและสัญญาณป้อนกลับ มีค่าเท่ากับ SV(s) – PV(s)

MV(s) →สัญญาณตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulated Signal)

รูปแบบตามรูปที่ 2.13 ก) เป็นรูปแบบที่ใช้มากในการอธิบายเพื่อความเข้าใจตามหนังสือต่างๆ แต่เป็นรูปแบบที่ไม่ค่อยได้ใช้ในการควบคุมกระบวนการควบคุมการผลิตจริงๆ พารามิเตอร์แต่ละตัวจะไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังนั้น การปรับค่าพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง จะไม่มีผลของพารามิเตอร์ตัวอื่นไปเกี่ยวข้อง สมการของการควบคุมใน s–Domain แสดงได้ด้วยสมการที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

42510

$$MV(s) = \left(\frac{100}{PB}\right) * \left(1 + \frac{1}{Tis} + Tds\right) * e(s) \qquad (2.1)$$

รูปแบบตามรูปที่2.3ข)เป็นรูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในตัวควบคุมพีไอดี แบบเชิงอุปมาน (Analog) ทั้งนี้เนื่องจากว่าง่ายในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แต่ในปัจจุบันไม่ค่อยได้พบเห็นกันมากนัก เนื่องจากการปรับค่า PB, T_i และ T_d นั้น จะมีผลกระทบต่อกัน (Mutual Interference) สมการของการควบคุมใน s – Domain แสดงได้ด้วยสมการที่ 2.2

$$MV(s) = \left(\frac{100}{PB}\right) * \left(1 + \frac{1}{Tis}\right) * (1 + Tds) * e(s) * \frac{1}{\left(1 + \frac{Tds}{N}\right)} \qquad (2.2)$$

สำหรับตัวควบคุมแบบ PID ตามรูปที่ 2.3 ค) และรูปที่ 2.3 ง) เป็นรูปแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในเครื่องควบคุม PID ชนิดเชิงเลข (Digital PID Controller) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยที่รูปแบบตามรูปที่ 2.3 ค) นั้น เป็นรูปแบบที่เหมาะสำหรับการควบคุมที่กระบวนการมีการรบกวนจากภายนอก (Load หรือ Supply Disturbance) แต่กระบวนการนั้นจะปรับตัวได้ไม่ค่อยดีเมื่อได้มีการเปลี่ยนแปลงจากค่า Set Point เนื่องจากค่า Proportional Band มีผลกับสัญญาณตัวแปรกระบวนการ ส่วนรูปแบบที่ 2.3 ง) เป็นรูปแบบที่เหมาะสำหรับการควบคุมที่มีการเปลี่ยนค่าของ Set Point แต่กระบวนการจะปรับตัวได้ไม่ค่อยดีถ้ามีสัญญาณรบกวนจากภายนอกทั้งนี้เนื่องจากค่า Proportional-Band นั้น มีผลกับค่าผลต่างระหว่างค่า Set Point กับตัวแปรกระบวนการ สำหรับรูปแบบทั้งสองที่กล่าวมานี้นั้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า Derivative Term นั้นจะมีผลเฉพาะค่าตัวแปรกระบวนการ ทั้งนี้ มีข้อดีคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า Set Point อย่างทันทีทันใดจะไม่มีผลต่อเสถียรภาพของกระบวนการ สมการคณิตศาสตร์ใน s – Domain ของรูปแบบที่ 2.3 ค) แสดงได้ตามสมการที่ 2.3 และสมการคณิตศาสตร์ใน s – Domain ของรูปแบบที่ 2.3 ง) แสดงได้ตามสมการที่ 2.4

$$MV = \frac{100}{PB}\left[PV(s) + \frac{E(s)}{Tid} + Tds * \frac{PV(s)}{1 + \frac{Tds}{n}} \right] \qquad (2.3)$$

$$MV = \frac{100}{PB}\left[EV(s) + \frac{E(s)}{Tid} + Tds * \frac{PV(s)}{1 + \frac{Tds}{n}} \right] \qquad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

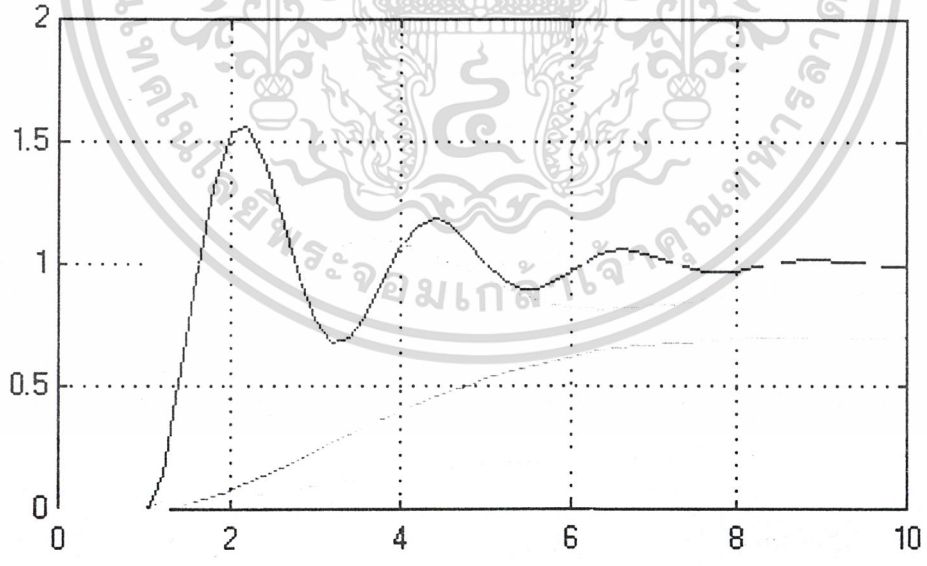
2.3.7 ผลของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ กับกระบวนการ

2.3.7.1 ผลของ Proportional Band กับกระบวนการ

Proportional Band (PB) กับการควบคุมกระบวนการนั้น Proportional Band จะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าอัตราขยายของกระบวนการ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายกับค่า Proportional Band สามารถแสดงได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 2.5

$$GAIN = \frac{100}{PB} \tag{2.5}$$

สำหรับผลของ Proportional Band กับการควบคุมแบบ P – Control นั้น Proportional Band จะมีผลกับขนาดของผลตอบสนองรวมไปถึงเรื่องความไว (Sensitivity) และออฟเซต (Offset) หรือค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (Steady State Error) ผลของค่า Proportional Band ที่มากเกินไป จะมีผลทำให้เกิดค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวมากขึ้น และทำให้ความไวของผลตอบลดลง ในทางกลับกันค่าของ Proportional Band ที่น้อยเกินไปนั้นจะทำให้กระบวนการเกิดการแกว่งขึ้น หรือเข้าใกล้จุดไร้เสถียรภาพ (Unstable) มากขึ้น รูปที่ 2.4 แสดงผลของการเพิ่มหรือลดค่า Proportional Band ต่อกระบวนการกำลังสอง

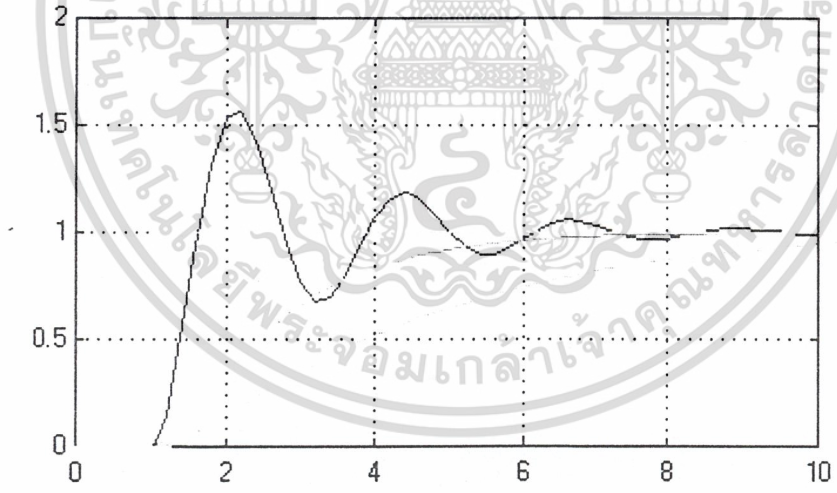


รูปที่ 2.14 ผลของ Proportional Band ต่อกระบวนการควบคุมแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.7.2 ผลของ Integral Time กับกระบวนการ

สำหรับ Integral Action นั้น จะมีผลกับผลตอบของค่าสะสม แต่จะไม่มีผลกับผลตอบในลักษณะทันทีทันใด การลดค่า Integral Time จะมีผลทำให้ออฟเซตหรือค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของกระบวนการลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเรื่อง Integral Action จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของความผิดพลาดสะสมของผลตอบ แต่ถ้า Integral Time ที่ตั้งให้กระบวนการนั้นมีค่าน้อยเกินไป (Integral Action มากไป) ก็จะทำให้ผลตอบของกระบวนการเกิดแกว่งมากขึ้น (การพุ่งเกินมากขึ้น) เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวนานขึ้นได้ ในทำนองกลับกันการเพิ่มค่า Integral Time จะมีผลในในทางตรงกันข้ามกับที่กล่าวมาแล้ว คือจะเพิ่มค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวของผลตอบของกระบวนการถ้าผลตอบสนองของกระบวนการนั้นเป็นผลตอบสนองที่มีค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ แต่ในขณะเดียวกัน ก็จะเป็นการลดการแกว่ง หรือการพุ่งเกินของผลตอบของกระบวนการ ในกรณีที่กระบวนการนั้นมีค่า Integral Time เดิมน้อยเกินไป เมื่อมีการเริ่มเดินเครื่องอย่างอัตโนมัติ (Automatic Starting) ด้านการควบคุมของตัวควบคุม PID Integral Action จะทำให้เกิด Integral-Windup เนื่องจากขณะเริ่มเดินเครื่อง ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นเป็นเวลานาน ทำให้เทอมของ Integral มีค่าเกิน 100% รูปที่ 2.5 แสดงผลของการเพิ่มหรือลดค่า Integral Time ในการควบคุมแบบ พีไอดี

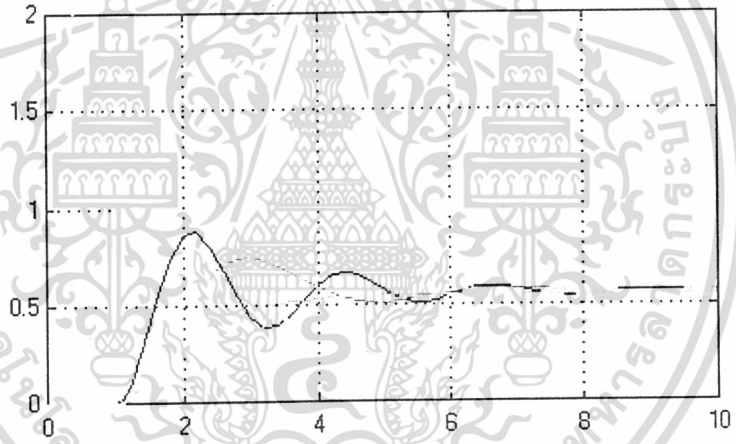


รูปที่ 2.15 ผลของ Integral Time ที่มีต่อผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมแบบพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.7.3 ผลของ Derivative time กับผลตอบของกระบวนการ

ผลของ Derivative Action จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุท ซึ่งมีผลทำให้กระบวนการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้เร็วขึ้น สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่มีรูปแบบตามสมการที่ 2.3 และ 2.4 นั้น Derivative Action จะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการโดยจะทำให้กระบวนการมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นแต่ Derivative Action จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Set Point แต่อย่างใด อย่างไรก็ตาม Derivative Action จะมีผลเสียในการควบคุมกระบวนการที่มีสัญญาณรบกวนมาก ทั้งนี้เนื่องจาก Derivative Action จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้าอย่างมาก ดังนั้น กระบวนการที่มีสัญญาณรบกวน ตัวอย่างเช่น กระบวนการควบคุมอัตราไหล หรือกระบวนการควบคุมความดัน Derivative Control อาจมีผลทำให้กระบวนการไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) ได้ รูปที่ 2.6 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของ Derivative Action ต่อการควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 2.16 แสดงผลของ Derivative Action ที่มีแต่ผลตอบของกระบวนการในการควบคุมแบบ พีไอ

สำหรับผลของพารามิเตอร์ทั้งสามตัวที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น เป็นการพิจารณาผลตอบของกระบวนการอย่างไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน หรือเป็นการพิจารณาทางทฤษฎีเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติจริงๆแล้ว ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสามกับผลตอบของกระบวนการยังเกี่ยวพันธ์กับสิ่งอื่นๆ อีกเช่น รูปแบบของการควบคุมนั้น จะใช้การควบคุมในลักษณะใด และยังเกี่ยวพันธ์กับสภาพแวดล้อม สัญญาณรบกวนที่กระบวนการได้รับอีกด้วย ดังนั้น ในการปรับค่าของพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยปกติต้องอาศัยความคุ้นเคยและความชำนาญกับกระบวนการหรือตัวควบคุมแบบนั้นๆ เป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.8 การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ตามที่กล่าวมาแล้วว่า การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มักจะใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) ซึ่งการปรับค่าด้วยวิธีนี้นั้น จำเป็นอย่างมากที่ต้องอาศัยความชำนาญประสบการณ์และความคุ้นเคยกับกระบวนการเป็นอย่างสูง ซึ่งบุคคลประเภทนี้ เป็นบุคคลที่หาได้อย่างยากยิ่งในประเทศของเรา อย่างไรก็ตาม ก็มีการวิจัยหาวิธีที่จะช่วยหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้ ถึงแม้วิธีเหล่านี้จะปฏิบัติได้อย่างค่อนข้างลำบากในกระบวนการที่แท้จริงก็ตาม ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่เป็นที่นิยมและคุ้นเคยกันเป็นอย่างมากสำหรับผู้ที่อยู่ในวงการนี้ วิธีที่กล่าวถึงได้แก่วิธีที่นำเสนอโดย J.G.Ziegler และ N.B.Nichols

J.G.Ziegler และN.B.Nicholsเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการควบคุมแบบพีไอดี โดยได้ศึกษาผลของ Proportional Band, Integral Time และ Derivative Time ที่มีผลต่อการควบคุมกระบวนการ และเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการควบคุมแบบพีดี และแบบพีไอดีไว้ โดยจะเสนอทั้งวิธีการหาจากผลตอบแบบวงรอบเปิด และการหาค่าพารามิเตอร์จากผลตอบแบบวงรอบแบบปิด ซึ่งจะขอสรุปวิธีการหาพารามิเตอร์ของ Ziegler – Nichols ไว้โดยย่อดังนี้

2.3.8.1 วิธีวงรอบปิด (Closed – Loop Method)

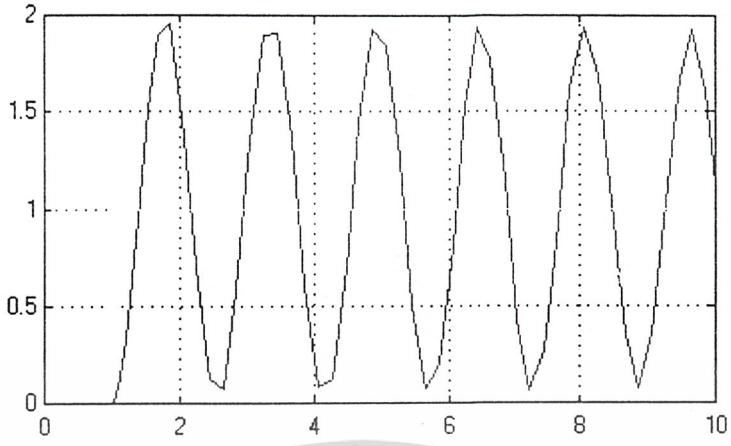
ในการหาค่าพารามิเตอร์แบบวงรอบปิดของ Ziegler–Nichols นั้นจะขอนิยามคำจำกัดความของตัวแปรที่ต้องหาก่อนการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม 2 ตัว ดังนี้

S_u (Ultimate Sensitivity) คือค่าของ Proportional Band ที่ทำให้ผลตอบในขณะวงรอบปิดแกว่งจนกระทั่งค่าอัตราส่วนของแอมปลิจูด (Amplitude Ratio) ของผลตอบนั้น มีค่าเท่ากับ 1

P_u (Period of Oscillation) คือคาบของสัญญาณที่มีค่าอัตราส่วนของแอมปลิจูดเท่ากับ 1

ลักษณะของสัญญาณที่มีอัตราส่วนของแอมปลิจูดเท่ากับ 1 และมีคาบของสัญญาณเป็น P_U แสดงตามรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงสัญญาณที่มีอัตราส่วนของแอมปลิจูดเท่ากับ 1 และคาบของสัญญาณ P_U ตามที่กำหนดของZiegler – Nichols

สำหรับการควบคุมแบบพีไอ ที่จุดที่เหมาะสมที่สุดนั้น Ziegler – Nichols กำหนดว่าค่า Proportional Band มีค่าเท่ากับ 2.2 x S_u และค่าของ Integral Time มีค่าเท่ากับ $P_u/1.2$

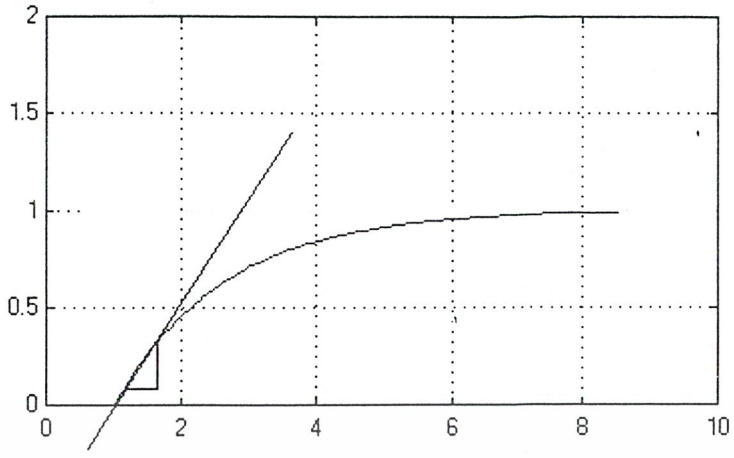
สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี Ziegler และ Nichols และ กำหนดว่า ที่จุดที่เหมาะสมที่สุด ค่า Proportional Band มีค่าเท่ากับ 1.66 x S_u ค่าของ Integral Time มีค่าเท่ากับ 0.5 x P_u และค่า Derivative Time มีค่าเท่ากับ $P_u/8$

จะเห็นว่าในการหาค่าของ Ziegler – Nichols ที่นำเสนอนั้นเป็นการหาค่าโดยประมาณและจะเห็นว่าไม่มีการกล่าวถึงรูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งในปัจจุบันมีรูปแบบในการคำนวณมากมาย

2.3.8.2 วิธีวงรอบเปิด (Open – Loop Method)

ในเรื่องของการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีวงรอบเปิด Ziegler และ Nichols นั้น จะหาค่าพารามิเตอร์ของ การควบคุมจาก Process Reaction Curve โดยจะกำหนดนิยามของพารามิเตอร์ 3 ตัว ได้แก่ L, R และ F โดยค่าทั้ง 3 ได้แสดงดังในรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงพารามิเตอร์ที่หาจาก Process Reaction Curve

F คือขนาดการเปลี่ยนแปลงจากจุดปรับตั้ง

R คือความชันมากที่สุด (Maximum Slope) ของผลตอบสนอง

L คือค่าการประวิงเวลาของผลตอบ Deth Time

จากค่าที่กำหนด Ziegler – Nichols กำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดของการควบคุมโดย

การควบคุมแบบพีไอ

Proportional Band $= 0.9/R_1L$

Integral Time $= 3.33L$

การควบคุมแบบพีไอดี

Proportional Band $= 1.2/LR_1$ to $2/LR_1$

Integral Time $= 2L$

Derivative Time $= 0.5L$

โดย $R_1 = R/F$

2.4 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพอร์ทอนุกรม

การเคลื่อนย้ายข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ไปยังอุปกรณ์ต่อพ่วงภายนอกหรือคอมพิวเตอร์ด้วยกันนั้น มีด้วยกัน 2 รูปแบบคือ รับส่งข้อมูลแบบขนานและรับส่งข้อมูลแบบอนุกรม การรับส่งข้อมูลแบบขนานเป็นการรับหรือส่งข้อมูลคราวละ 4 หรือ 8 บิตในเวลาเดียวกัน ทำให้การรับและส่งข้อมูลมีความเร็วสูง ทว่าจำนวนของรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการถ่ายทอดข้อมูลจะต้องมีมากเท่ากับจำนวนบิตของข้อมูลที่ทำการถ่ายทอดด้วย นอกจากนี้ยังมีสายที่ใช้สำหรับควบคุมและ

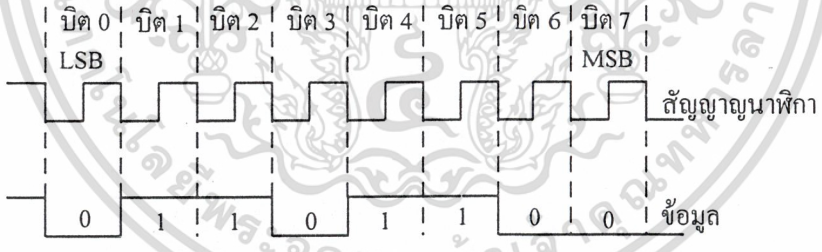
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบการรับส่งข้อมูลด้วย ซึ่งอาจต้องใช้สายมากเป็น 2 เท่าของจำนวนบิตข้อมูลก็ได้ ส่งผลให้ราคาของสายที่ใช้ในการเชื่อมต่อแบบขนานมักจะมีราคาแพงอีกข้อจำกัดหนึ่งของการถ่ายทอด ข้อมูลแบบขนานคือ ระยะทางในการถ่ายทอดข้อมูล โดยปกติจะอยู่ที่ประมาณ 10 – 15 ฟุต

ในขณะที่การรับส่งข้อมูลแบบอนุกรมจะเป็นการรับส่งข้อมูลครั้งละ 1 บิต โดยมีรูปแบบการรับส่งที่เป็นมาตรฐาน ต้องมีการตรวจสอบความพร้อมในการรับและส่งข้อมูลของตัวรับและตัวส่งการรับส่งข้อมูลแบบอนุกรมมีข้อดีในเรื่องของจำนวนสายสัญญาณที่น้อยมากและไม่แปรผันตามจำนวนบิตของข้อมูล ระยะทางการรับส่งสูงกว่าแบบขนานมาก โดยปกติถ้าเป็นพอร์ทอนุกรม RS-232 จะสามารถต่อสายได้ยาว 50 ฟุตโดยประมาณ

2.5 การสื่อสารแบบอนุกรม

การสื่อสารแบบอนุกรมแบ่งได้เป็น 2 แบบซึ่งก็คือ การสื่อสารอนุกรมแบบซิงโครนัสและการสื่อสารอนุกรมแบบอะซิงโครนัส การสื่อสารแบบซิงโครนัสจะมีสัญญาณนาฬิการ่วมอยู่กับการรับและส่งสัญญาณด้วย ตัวอย่างการส่งข้อมูลแบบซิงโครนัสก็คือคีย์บอร์ดของคอมพิวเตอร์ ซึ่งสายเส้นหนึ่งจะเป็นสายของสัญญาณนาฬิกา ส่วนสายอีกเส้นจะเป็นสายของข้อมูล ดังนั้นการติดต่อกันแบบซิงโครนัสนี้จะต้องใช้สายในการเชื่อมต่ออย่างน้อยที่สุด 3 เส้นคือ สัญญาณนาฬิกาข้อมูลและกราวด์ ในรูป 1.1 แสดงให้เห็นไดอะแกรมเวลาของการสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัส



รูป 2.19 ไดอะแกรมเวลาของการสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัส

2.5.1 การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส

การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัสคือการรับส่งข้อมูลโดยไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิการ่วมด้วย แต่จะใช้การกำหนดค่าอัตราเร็วในการรับและส่งข้อมูลให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งเรียกอัตราเร็วนี้ว่า อัตราบอดหรือบอดเรด (baud rate) มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที (bit per second : bps)

รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งแบบอะซิงโครนัสประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกันคือ

1. บิตเริ่มต้น (start bit) มีขนาด 1 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

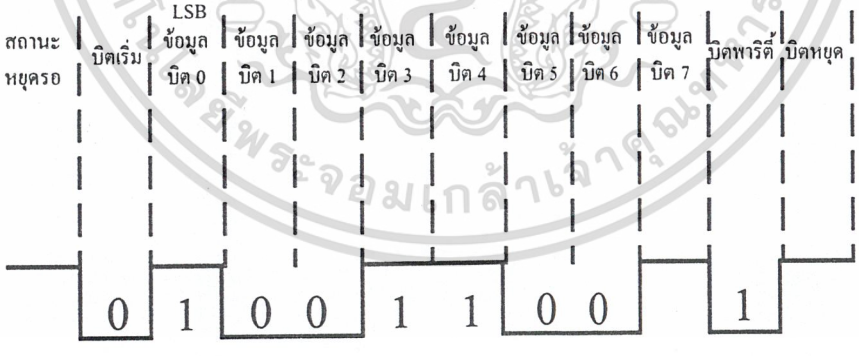
2. บิตข้อมูลแบบอนุกรม มีขนาด 5,6,7 หรือ 8 บิต

3. บิตตรวจสอบพาริตี้ (parity bit) มีขนาด 1 บิตหรือไม่มี

3. บิตปิดท้ายหรือบิตหยุด (stop bit) มีขนาด 1,1.5 หรือ 2 บิต

รูปที่ 1.2 แสดงรูปแบบข้อมูลอนุกรม แบบอะซิงโครนัส เมื่อไม่มีการส่งข้อมูลขา DATA จะมีสถานะลอจิก "1" เรียกสถานะนี้ว่า สถานะหยุดรอ (waiting stage) การเริ่มต้นส่งข้อมูลจะเริ่มจากการใช้ขา DATA มีลอจิก "0" ด้วยช่วงระยะเวลา 1 บิต เรียก 1 บิตนี้ว่า บิตเริ่มต้น (start bit) จากนั้นบิตข้อมูลจะถูกส่งออกไปโดยเริ่มจากบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุดหรือบิต LSB ก่อนซึ่งข้อมูลที่ต้องการส่งอาจมีจำนวน 5,6,7 หรือ 8 บิตก็ได้ จากนั้นตามด้วยบิตพาริตี้ (parity bit) ซึ่งใช้ในการตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งข้อมูล บิตสุดท้ายที่จะส่งคือ บิตปิดท้ายหรือบิตหยุด (stop bit) โดยเป็นการทำให้ขา DATA มีสถานะลอจิก "1" อีกครั้งด้วยระยะเวลาอย่างน้อย 1 บิต, 1.5 บิต หรือ 2 บิต เพื่อเป็นการแสดงว่าสิ้นสุดข้อมูลแล้ว

อัตราความเร็วในการรับและส่งข้อมูลของการรับส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสหรืออัตราบอดหรือบอดเรตที่ใช้สำหรับพอร์ทอนุกรม RS-232 มีด้วยกันหลายค่า ได้แก่ 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600 และ 19200 บิตต่อวินาที โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามเทคโนโลยีของคอมพิวเตอร์ เนื่องจากบอดเรต คือค่าของจำนวนบิตที่สามารถส่งได้ใน 1 วินาที สมมติว่าข้อมูลอนุกรมมีขนาด 8 บิต ไม่มีการตรวจสอบพาริตี้ มีบิตเริ่มต้น 1 บิต และบิตปิดท้าย 1 บิต ความยาวข้อมูล 1 ไบต์จะมีความยาวเท่ากับ 10 บิต ถ้าใช้บอดเรตในการส่งข้อมูลเท่ากับ 9600 บิตต่อวินาที ก็จะสามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็ว 960 ไบต์ต่อวินาที



รูปที่ 2.20 รูปแบบของข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส

การตรวจสอบพาริตี้สามารถกำหนดให้เป็นแบบคี่ (odd), แบบคู่ (even) หรือไม่มีการทำการตรวจสอบพาริตี้ก็ได้ พาริตี้คี่หรือพาริตี้คู่แสดงถึงจำนวนลอจิก "1" ทั้งหมดภายในข้อมูลที่ส่งไป 1 ไบต์ รวมบิตพาริตี้ว่ามีจำนวนเลขคู่หรือเลขคี่ ยกตัวอย่าง ข้อมูลที่จะทำการส่งมีขนาด 8 บิต มีค่าเท่ากับ 99H หรือ 10011001B จะเห็นว่าข้อมูลที่ในไบต์นี้ มีจำนวนลอจิก "1" จำนวน 4 ตัวซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเลขคู่ ดังนั้นถ้ากำหนดค่าพาริตี้เป็นคู่ ค่าของบิตพาริตี้จะต้องมีลอจิกเป็น “0” แต่ถ้ากำหนดพาริตี้เป็นคี่ ค่าของบิตพาริตี้จะต้องเป็น “1” เพื่อให้ข้อมูล 1 ไบต์รวมทั้งบิตพาริตี้เป็นคี่

บิตพาริตี้ถูกสร้างขึ้นจากภาคส่งข้อมูลของ UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter :เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูลอนุกรม ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดภายหลัง) ซึ่งทางภาครับจะต้องกำหนดคุณสมบัติการตรวจสอบพาริตี้ที่ตรงกันไว้ว่าจะตรวจสอบพาริตี้คี่หรือพาริตี้คู่ จากนั้นภาครับของ UART จะทำการตรวจสอบค่าพาริตี้ที่เกิดขึ้นว่าเป็นคู่หรือเป็นคี่โดยการนับจำนวนลอจิก “1” ทั้งหมดรวมทั้งบิตพาริตี้ด้วย ถ้ากำหนด
พาริตี้ไว้เป็นคู่แต่อ่านค่าในการนับตัวเลขออกมาเป็นคี่ ทางภาครับจะแสดงข้อผิดพลาดออกมาให้ผู้ใช้ทราบ กระบวนการดังกล่าวเป็นวิธีการตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการรับส่งข้อมูลที่ง่ายที่สุด แต่มันสามารถตรวจได้เมื่อมีบิตข้อมูลที่ทำการรับส่งผิดพลาดเพียงบิตเดียวเท่านั้น ถ้าข้อมูลที่ทำการส่งมีบิตที่ผิดพลาดมากกว่า 1 บิต การตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะไม่ได้ผล สำหรับการตั้งพาริตี้บิตเป็น NONE นั้นทั้งภาครับและภาคส่ง จะไม่มีการตรวจสอบพาริตี้

คอมพิวเตอร์ในรุ่น AT เกือบทั้งหมดจะใช้ไอพี UART เบอร์ 16450 และ 16550 ส่วนคอมพิวเตอร์ในรุ่น XT ให้ไอซี UART เบอร์ 8250 ไอซี UART เหล่านี้มีระดับแรงดันของลอจิกเป็นแบบทีทีแอล (+5V) แต่เพื่อให้มีแรงดันเป็นไปตามมาตรฐาน RS-232 และเพื่อให้การรับส่งข้อมูลสามารถทำได้ที่ระยะทางไกลมากขึ้น ระดับแรงดันทีทีแอลจะถูกแปลงเป็นระดับแรงดันที่สูงขึ้น โดยลอจิก “0” จะมีระดับแรงดัน -3V ถึง -12V และลอจิก “1” มีระดับแรงดัน +3V ถึง -12V และลอจิก “1” มีระดับแรงดัน +3V ถึง +12V

2.5.2 มาตรฐานพอร์ทอนุกรมแบบ RS-232

มาตรฐานพอร์ทอนุกรมแบบ RS-232 เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส 2 ทิศทาง โดยมาตรฐาน RS-232 ในอดีตนั้นถูกออกแบบมาเพื่อที่การส่งผ่านข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ไปยังโมเด็มเพียงอย่างเดียว เพื่อที่จะนำข้อมูลจากโมเด็มนี้ส่งผ่านสายโทรศัพท์ไปยังคอมพิวเตอร์อีกชุดซึ่งอยู่ห่างไกลกัน โดยสมาคมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Industries Association : EIA) ได้วางมาตรฐานที่มีชื่อเรียกกันว่า EIA RS-232 มาตรฐานนี้ในช่วงแรกจะใช้คอนเน็กเตอร์เป็นแบบ DB-25 โดยกำหนดความยาวสูงสุดของสายสัญญาณไว้ที่ 50 ฟุต มีระดับสัญญาณตั้งแต่ -3V ถึง -12V แสดงว่ามีข้อมูล (mark) และ +3V ถึง +12V แสดงว่าเป็นช่องว่าง (space)

มาตรฐาน RS-232 ถูกใช้ในการกำหนดรูปแบบการสื่อสารข้อมูลกันระหว่างอุปกรณ์เชื่อมต่อข้อมูล (Data Terminal Equipment :DTE) กับวงจรข้อมูลปลายทาง (Data Circuit Termination : DCE) อุปกรณ์ DTE จะต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีการประมวลผลในตัวเช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความสามารถในการสร้างบิตข้อมูลแบบอนุกรมได้ ส่วนอุปกรณ์ DCE จะทำหน้าที่เป็นเพียงตัวรับข้อมูลที่ส่งมาจาก DTE เท่านั้น

ข้อแตกต่างของอุปกรณ์ DTE และอุปกรณ์ DCE อย่างหนึ่งที่เห็นได้ชัดคือ คอนเน็กเตอร์ของ DTE จะเป็นตัวผู้ ส่วนคอนเน็กเตอร์ของ DCE จะเป็นตัวเมีย ซึ่งพอร์ทอนุกรมของคอมพิวเตอร์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะเป็นแบบ DTE ส่วนคอนเน็กเตอร์ที่อยู่ที่โมเด็มจะเป็นแบบ DCE

สำหรับเรื่องของการใช้งานในคอมพิวเตอร์ พอร์ทอนุกรม RS – 232 ถูกใช้เพื่อเชื่อมต่อกับโมเด็ม, เมาส์ และเครื่องพิมพ์ที่สามารถติดต่อทางพอร์ทอนุกรมได้

5.2.3 คอนเน็กเตอร์สำหรับพอร์ท RS-232 และการเชื่อมต่อ

มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ RS-232 จะใช้คอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 ตัวผู้ หรือ DB-9 ตัวผู้ ซึ่งคอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 จะมีขาต่อใช้งาน เพียง 9 เส้นเช่นเดียวกับคอนเน็กเตอร์แบบ DB-9 เนื่องจากขาอื่นๆ ที่เคยมีการใช้งานมาในอดีตไม่ค่อยมีความสำคัญมากนักจึงถูกยกเลิกไป โดยแสดงรูปร่างและตำแหน่งขาดังรูปที่ 1.3

- ขา Data Carrier Detect :DCD หรืออาจเรียกว่า Carrier Detect : CD ขานี้การที่จะแอกตีฟเมื่อมีการส่งสัญญาณพาร์จากอุปกรณ์สื่อสารข้อมูล เช่น โมเด็ม สำหรับการใช้งานปกติ ขานี้จะไม่ได้ถูกใช้งานมากนัก
- ขา Receive Data : RD หรือ RxD ขานี้ใช้รับสัญญาณของอนุกรมเข้ามายังคอมพิวเตอร์ โดยจะนำข้อมูลที่อ่านได้ไปเก็บไว้ในรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์
- ขา Transmitted :TD หรือ TxD ขานี้ใช้เพื่อส่งข้อมูลอนุกรมออกจากคอมพิวเตอร์โดยการนำข้อมูลที่เก็บอยู่ในบัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูลออกไป
- ขา Data Terminal Ready :DTR เป็นขาเอาท์พุทที่ใช้สำหรับการส่งสัญญาณออกจากคอมพิวเตอร์เพื่อให้อุปกรณ์ปลายทางรับรู้ว่าต้องการติดต่อกับอุปกรณ์ปลายทาง โดยขา DTR นี้จะต้องเชื่อมต่อกับขา DDSR ของอุปกรณ์ปลายทาง และขา DTR ของอุปกรณ์ปลายทางจะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของคอมพิวเตอร์และถ้าใช้การเชื่อมต่อแบบ 3 สาย ต้องเชื่อมต่อขา DTR และ DSR ของพอร์ทอนุกรมเข้าด้วยกัน และจะต้องต่อเชื่อมเข้ากับขา DCD ด้วยในกรณีที่โปรแกรมสื่อสารที่ใช้มีการตรวจจับสัญญาณพาร์
- ขา Signal Ground : GND เป็นขากราวด์ของสัญญาณ
- ขา Data Set Ready : DSR ขานี้จะใช้ควบคู่กับ DTR เพื่อตรวจสอบการเชื่อมต่อกันระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ปลายทาง ซึ่งขา DSR นี้จะเป็นขาสำหรับข้อมูลจากภายนอก
- ขา Request To Send : RTS เป็นขาเอาท์พุทสำหรับส่งสัญญาณร้องขอให้อุปกรณ์ที่อยู่ปลายทางส่งข้อมูลมาให้คอมพิวเตอร์ โดยขาที่รับสัญญาณ RTS ก็คือขา CTS ซึ่งในกรณีที่มี

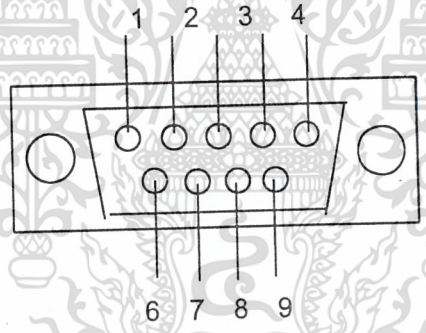
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่อแบบ 3 สาย จะต้องเชื่อมต่อขา RTS และ CTS เข้าด้วยกัน เพื่อให้การรับและส่งข้อมูลเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา

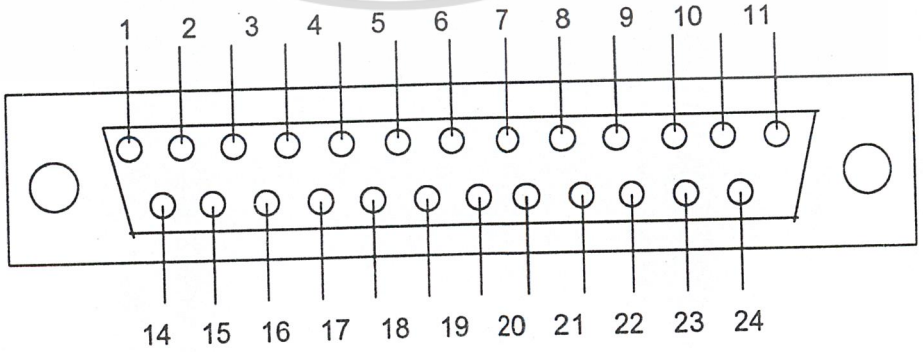
- ขา Clear To Send : CTS เป็นขาอินพุททำหน้าที่รอรับสัญญาณที่ส่งเข้ามา เมื่อมีการส่งสัญญาณเข้ามาที่ขานี้ ข้อมูลที่ขา TxD จะถูกส่งออกไป ขานี้ใช้เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์ต่อพ่วงว่าพร้อมที่รับข้อมูลแล้วหรือยัง

- ขา Ring Indicator : RI ใช้แสดงสถานะสัญญาณเรียกจากสายโทรศัพท์ ปกติในเรื่องของการสื่อสารโดยทั่วไปสายนี้จะไม่ถูกใช้งาน จะใช้งานก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมต่อกับโมเด็มแล้วยังมีเรื่องความต้องการตรวจสอบสัญญาณเรียกจากสายโทรศัพท์

สำหรับการเชื่อมต่อของสายระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกแสดงดังในรูปที่ 1.4 ลูกศรในรูปแสดงถึงทิศทางของข้อมูล การเชื่อมต่อในรูปที่ 1.4 (ก) เป็นการเชื่อมต่อแบบ NULL MODEM หรือการเชื่อมต่อโดยตรงไม่ต้องผ่านโมเด็ม ส่วนเรื่องการเชื่อมต่อในรูปที่ 1.4 (ข) เป็นการเชื่อมต่อโดยใช้สายสัญญาณน้อยที่สุดเพียง 3 เส้น โดยเส้นหนึ่งสำหรับส่งข้อมูล อีกเส้นสำหรับรับข้อมูล และอีกเส้นเป็นกราวด์



รูปที่ 2.21 คอนเน็กเตอร์อนุกรม 9 ขาหรือแบบ DB-9 (มองจากด้านหลังคอมพิวเตอร์)

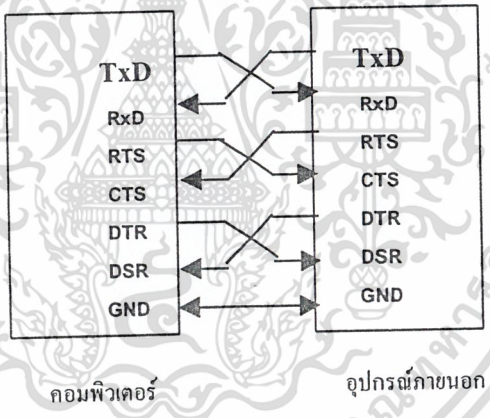


รูปที่ 2.22 คอนเน็กเตอร์อนุกรม 25 ขาหรือแบบ DB-25 (มองจากด้านหลังคอมพิวเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

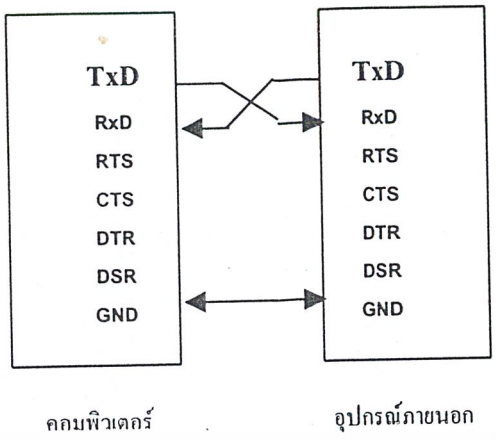
ตารางที่ 2.1 การจัดขาสัญญาณของพอร์ทอนุกรมในแบบต่างๆ และหน้าที่การทำงาน

DB-9	DB-25	ชื่อของสายสัญญาณ	สัญญาณ
1	8	Data Carrier Detech : DCD	อินพุท
2	3	Receive Data : RxD	อินพุท
3	2	Transmitted Data : TxD	เอาท์พุท
4	20	Data Terminal Ready : DTR	เอาท์พุท
5	7	Signal Ground : GND	-
6	6	Data Set Ready : DSR	อินพุท
7	4	Request To Send : RTS	เอาท์พุท
8	5	Clear To Send : CTS	อินพุท
9	22	Ring Indicator : RI	อินพุท



รูปที่ 2.23 การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบ Null modem

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบ RS-232 ในลักษณะที่ใช้สายสัญญาณน้อยที่สุดเพียง 3 เส้น

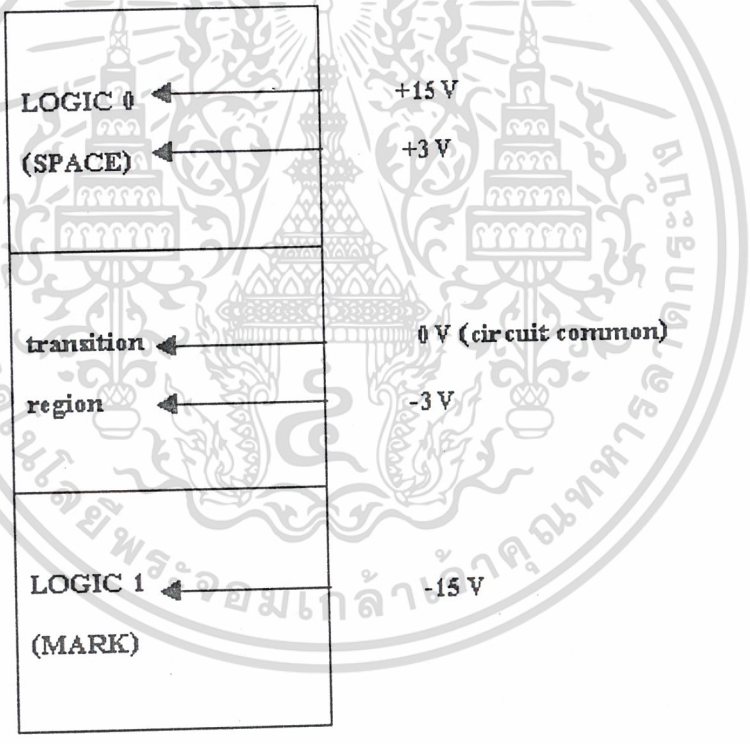


Figure : Logic definitions for RS-232 outputs

รูปที่ 2.25 การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ทอนุกรมในรูปแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

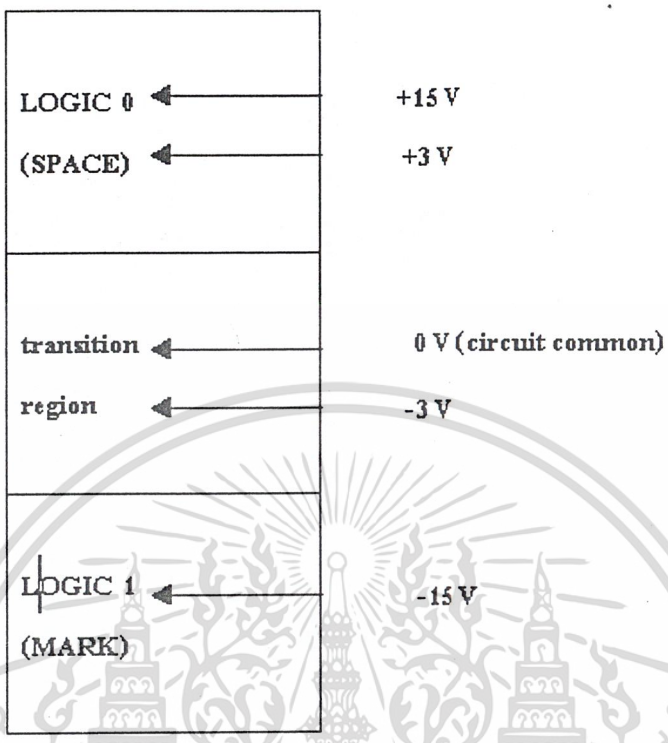


Figure : Logic definitons for RS-232 inputs

รูป 2.26 (ต่อ) การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ทอนุกรมในรูปแบบต่าง ๆ

2.6 การเชื่อมต่อทางด้านฮาร์ดแวร์

จากรูปข้างล่างซึ่งแสดงการเชื่อมต่อทั้งหมดที่ใช้ในการจำลอง (Simulation) ซึ่งจะมีกระบวนการ (Process) เป็นลักษณะของฮาร์ดแวร์กระบวนการจำลอง (Analog Process Simulation) และตัวควบคุมกระบวนการซึ่งแทนด้วยซอฟท์แวร์และคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังแสดงถึงวงจรที่เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และกระบวนการ ซึ่งมีวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก (Digital To Analog Converter; A/D) เพื่อทำการปรับสัญญาณให้เหมาะสม ทั้งนี้เพราะว่าคอมพิวเตอร์จะประมวลด้วยสัญญาณดิจิตอล ในขณะที่กระบวนการจำลองจะรับ ส่ง และทำงานด้วยสัญญาณแบบอนาลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีหลักการที่ว่าขาอินเวอร์ติ้งและขานอนอินเวอร์ติ้งนั้นจะต้องมีแรงดันเท่ากัน ดังนั้นเรื่องแรงดันที่มาตกคร่อม VR_1 และ R_5 จะเท่ากันด้วย ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านที่ตัวจะเท่ากับ $V_{in}/250\ \Omega$ (ค่าความต้านทานของ VR_1 เท่ากับ 50 Ω) ซึ่งจะเห็นว่าความต้านทานโหลดที่เราจะนำมาต่อคร่อมซีเนอร์ไดโอด (ZD_1) นั้นจะไม่มีผลต่อค่ากระแสเลย และในวงจรนี้สามารถที่จะต่อความต้านทานโหลดได้ถึง 650 Ω ซึ่งมาจาก 13 V / 20 mA (เนื่องจาก ZD_1 1N4743A มีแรงดันซีเนอร์เท่ากับ 13 V) และเราสามารถทำการปรับแต่งค่ากระแสได้โดยใช้ VR_1 และใช้วงจรสวิทซ์ทรานซิสเตอร์แบบดาร์ลิงตั้น (Tr1 เบอร์ 2SC1815 และTr2 เบอร์2N3053) ในการที่จะทำให้ควบคุมกระแสที่สูงกว่าได้โดยใช้กระแสควบคุมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

โดยค่า I_{C2} เท่ากับ 20 mA, β_1 ของ Tr.1 = 120 และ β_2 ของ Tr.2 = 90

ดังนั้น
$$I_{B2} = I_{C2} = \frac{I_{C2}}{\beta_2} = \frac{20mA}{90}$$

และ
$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_1} = \frac{\frac{20mA}{90}}{120} = 1.852\mu A$$

หมายถึงว่ากระแสที่ออกจากออปแอมป์เพียง 1.852 μA สามารถจะควบคุมกระแสเอาท์พุทได้ถึง 20 mA

โดยที่ Tr3 เบอร์ 2SC1815 ทำหน้าที่ในการป้องกันกระแสเกินโดยเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันตกคร่อม R_4 (27Ω) เพิ่มขึ้นทำให้มีแรงดันขาเบสและอิมิตเตอร์ (V_{BE}) ของ Tr3 มากขึ้นทำให้ Tr3 ทำงานได้มากขึ้นทำให้มีกระแสไหลผ่านเข้ามาทางขาคอลเลคเตอร์ของ Tr3 มากขึ้นทำให้กระแสที่จะไหลเข้าขาเบสของ Tr.1 น้อยลงทำให้กระแสเอาท์พุทลดลง

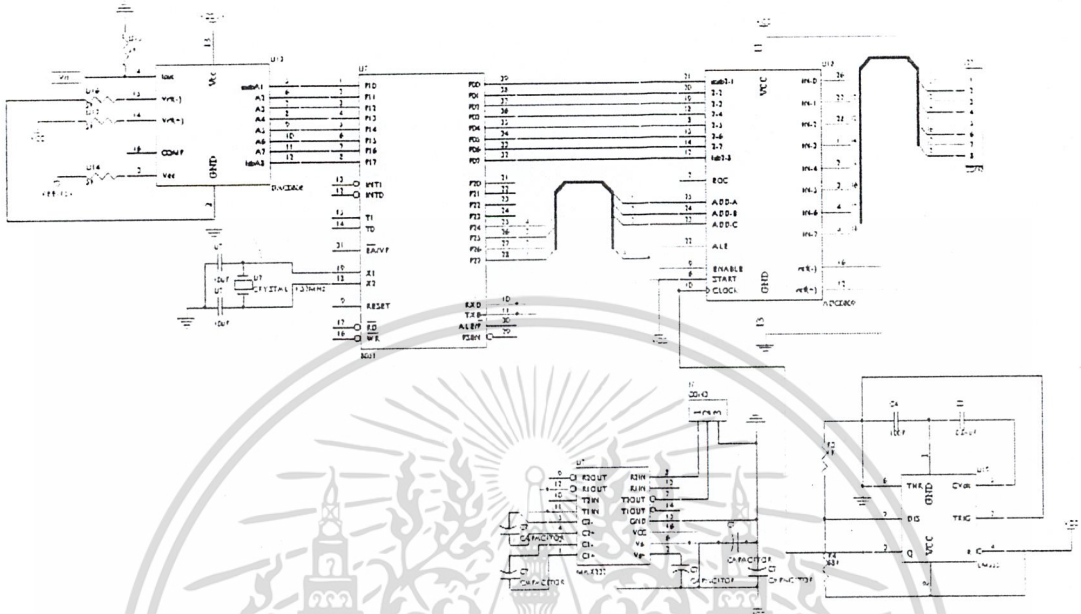
ดังนั้นเมื่อมีแรงดัน 5 V เข้ามาที่ขานอนอินเวอร์ติ้ง (ขา 5) ของ LM358B ทำให้มีแรงดันตกคร่อมขาอินเวอร์ติ้ง (ขา 6) เท่ากับ 5 V เท่ากันด้วย ดังนั้นจึงมีแรงดันตกคร่อมที่ VR_1 100 V และตัวต้านทาน R_5 200 Ω เท่ากับ 5 V ดังนั้นจึงมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ 5 V/250 Ω (ค่า VR1 = 50) เท่ากับ 20 mA ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ควบคุมจึงมีค่าเท่ากับ 20 mA ด้วย

แต่ถ้ามีแรงดัน 1 V เข้ามาที่ขานอนอินเวอร์ติ้งทำให้มีแรงดันตกคร่อม VR_1 และ R_5 เท่ากับ 1 V ดังนั้นจึงมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ 1 V/ 250Ω เท่ากับ 4 mA

โดย C_1 และ C_2 นั้นจะทำหน้าที่ในการหน่วงเวลาไว้สักพักเพื่อที่ไม่ให้มีกระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแต่จะให้ค่อยๆ เพิ่มทีละน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอค และ อนาลอคเป็นดิจิตอล (A/D, D/A Converter)



รูปที่ 2.27 วงจร Interface ประกอบด้วยวงจร A/D และ D/A

2.7.1 A/D Converter

ในวงจร A/D converter นี้จะใช้ไอซีเบอร์ ADC0809 ซึ่งเป็นไอซี A/D มี 8 แชนแนล โดยมีความละเอียด 255 ระดับ และสามารถตั้งแรงดันอ้างอิงได้จากขา Ref+ และ Ref- โดยเราสามารถเลือกแชนแนลได้จากการควบคุมขา ADD-A ถึง ADD-C โดยการควบคุมเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เลือกแชนแนลจากขาควบคุม

ADD-C	ADD-B	ADD-A	Channel
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	2
0	1	1	3
1	0	0	4
1	0	1	5
1	1	0	6
1	1	1	7

ส่วนสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมในการเลือกแชนแนลนั้นเป็นสัญญาณจากพอร์ท 2 ของ MCS – 51 คือ P2.5 - P2.7 โดย P2.5 จะถูกต่อเข้ากับขา ADD-C P2.6 จะถูกต่อเข้ากับขา ADD-B และ P2.7 จะถูกต่อเข้ากับขา ADD-A

ส่วนสัญญาณที่ใช้ในการสั่งให้เริ่มทำงานนั้นก็คือสัญญาณจากพอร์ท 2 ของ MCS – 51 เช่นกัน คือ P2.4 จะทำงานที่ขอบขาขึ้น (สภาวะแอคทีฟจะอยู่ที่การเปลี่ยนระดับลอจิกจาก "0" เป็น "1") โดยจะถูกต่อเข้ากับขา start และ ALE ของไอซี ADC0809

โดยในการทำงานของไอซี ADC0809 นั้นจะต้องมีวงจรกำเนิดพัลส์จากภายนอก ซึ่งในโครงงานนี้จะใช้ไอซี 555 ในการผลิตพัลส์ซึ่งความถี่ที่ใช้นั้นจะมีผลต่อการทำงานคือ ถ้าความถี่ที่ผลิตได้น้อยจะทำให้ใช้เวลานานในการทำงาน แต่ถ้าความถี่สูงจะใช้เวลาในการทำงานน้อย

อุปกรณ์ทางด้านอินพุทเช่น อัตราการไหล, แรงดัน หรือระดับของของเหลว จะถูกต่อเข้ากับแชนแนลต่าง ๆ ของไอซี ADC0809 เช่น ในโครงงานนี้จะมีการต่อการวัดแรงดันที่เทียบเท่าเป็นระดับของเหลวกับแชนแนลที่1และแรงดันที่คิดเทียบเท่าเป็นอัตราการไหลเข้าที่แชนแนลที่4 ดังนั้นถ้าเราต้องการอินพุทที่เป็นระดับของเหลวเข้ามา เราก็จะกำหนดให้พอร์ท C เป็น "$0B" และเช่นกันถ้าต้องการอินพุทเพื่อที่เป็นอัตราการไหลก็จะกำหนดพอร์ท C เป็น "$0C" เช่นถ้า Input ของแชนแนลที่ 3 เท่ากับ 2 Volts ตัวแปร x จะมีค่าเท่ากับ $66

จากวงจร I/O unit จะมีวงจร A/D converter ซึ่งใช้ไอซี ADC0809 และไอซีไทม์เมอร์ 555 โดยไอซี 555 นั้นต่อเป็นวงจรอะสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์ โดยมีค่า R1 = 68K, R2 = 1K และค่าของ C2 = 100 pF ดังนั้นความถี่ที่ผลิตได้จะมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.443}{(R_1 + 2R_2).C_2}$$

$$=206.142 \text{ kHz}$$

ดังนั้นเวลาในการทำงานแต่ละรอบสูงสุดของไอซี ADC0809 คือ

$$\frac{1.443}{(R_1 + 2R_2).C_2}$$

เท่ากับ 1.237 ms ที่ต้องคูณด้วย 255 เนื่องจากจำนวนพัลส์สูงสุดที่ใช้ในการทำให้เกิดเอาท์พุต $FF (อินพุตเข้ามาสูงสุด = +5V เท่ากับ 255 พัลส์

2.7.2 วงจร D/A Converter

วงจรนี้จะประกอบด้วยไอซีหลักคือ DAC0808, 74374 และ 74138 โดยไอซีแต่ละตัวมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

ไอซี DAC0808 เป็นไอซีที่ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณ Digital ให้เป็นสัญญาณ Analog ขนาด 8 บิท

ไอซี 74374 เป็นไอซีที่ทำหน้าที่ในการแลทซ์วงจรเนื่องจากอุปกรณ์ภายนอกนั้นทำงานไม่ทันเครื่องคอมพิวเตอร์ จึงจำเป็นที่จะต้องมีวงจรแลทซ์เพื่อให้ข้อมูลค้าง

ไอซี 74244 เป็นไอซีที่ทำหน้าที่บัฟเฟอร์ข้อมูล

ไอซี 74138 เป็นไอซีที่ทำหน้าที่ในการเลือกว่าจะใช้แชนแนลไหน ซึ่งวงจรนี้ได้ทำการออกแบบไว้ 8 แชนแนลสำหรับการเอาท์พุท

หลักการทำงานคือจะใช้สัญญาณจากพอร์ท C บนของไอซี 8255 เป็นสัญญาณควบคุมและพอร์ท B เป็นพอร์ทในการรับส่งข้อมูล โดยสัญญาณจากพอร์ท C บนจะประกอบด้วย

สัญญาณ C7 เป็นสัญญาณที่ใช้บอกว่าจะเป็นการทำงานในส่วนของ D/A converter โดยถ้าเป็น “0” จะเป็นการทำงาน D/A converter แต่ถ้าเป็น “1” จะไม่มีการทำงาน โดยจะต่อเข้ากับขา E1 ของไอซี 74138

สัญญาณ C6 เป็นสัญญาณที่ใช้ในการเลือกแชนแนลของไอซี 74138 โดยจะต่อเข้ากับขา C

สัญญาณ C5 เป็นสัญญาณที่ใช้ในการเลือกแชนแนลของไอซี 74138 โดยจะต่อเข้ากับขา B

สัญญาณ C4 เป็นสัญญาณที่ใช้ในการเลือกแชนแนลของไอซี 74138 โดยจะต่อเข้ากับขา A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 สัญญาณที่ใช้ในการเลือกแชนแนลของไอซี

C7	C6	C5	C4	Channel
0	0	0	0	Y0
0	0	0	1	Y1
0	0	1	0	Y2
0	0	1	1	Y3
0	1	0	0	Y4
0	1	0	1	Y5
0	1	1	0	Y6
0	1	1	1	Y7

โดยเอาท์พุทของไอซี 74138 นั้นจะไปเข้าขา CLK ของไอซี 74374 ของแต่ละชุดแต่ในวงจรนั้นจะมีไอซีเพียงชุดเดียวเนื่องจากมีเอาท์พุทที่ต้องไปควบคุมเพียงตัวเดียวคือ Control valve (ของกระบวนการจำลอง) ถ้ามีเอาท์พุทหลายตัวก็สามารถต่อเพิ่มไปถึง 8 ชุด โดยใช้ขา Y0-Y7 ของไอซี 74138 ทำหน้าที่ในการเลือกการทำงานว่าจะให้ชุดไหนเป็นตัวทำงาน

ซึ่งวงจรนี้จะใช้ Vcc +5V และ Vee –5V โดยต่อผ่านตัวต้านทานค่า 5K และ Vref(+) = +5V และ Vref(-) = 0V และเราจะใช้ Software ในการแปลงให้อยู่ในรูปสัญญารมาตรฐาน 1-5 V ซึ่งในความเป็นจริงทางด้าน Hardware ก็สามารถทำให้อยู่ในรูปสัญญาณมาตรฐานได้แต่เนื่องจากว่าสัญญาณที่ได้อาจมีการสูญเสียไปทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้เช่น เมื่อเป็น 1 V คือวาล์วควบคุมจะต้องปิดสนิทแต่ในความเป็นจริงอาจจะปิดไม่สนิทก็ได้ ซึ่งการแก้ไขทาง Hardware ทำได้ลำบากเมื่อมีความคลาดเคลื่อนแต่ทางด้าน Software นั้นจะทำได้ง่ายและสะดวกมากกว่า

โดยเอาท์พุทของ DAC0808 นั้นจะมีเอาท์พุทเป็นแรงดัน 0 – 5 V ดังนั้นถ้าต้องการให้เอาท์พุทอยู่ในรูปของกระแสก็จะต้องมีการแปลงจากแรงดันเป็นกระแส 4-20 mA โดยที่มีโปรแกรมพื้นฐานสามารถเขียนได้ดังนี้

```
Port[$303] := $90;   {ส่งค่า Control word ออกไปทางพอร์ทควบคุม}
Port[$302] := $80;   {สั่งให้ Channel 0 ทำงาน}
Port[$301] := $80;   {ส่งข้อมูล $80 ออกมาคอยที่ 74374 เพื่อคอยสัญญาณ CLK}
Delay(100);          {หน่วงเวลาเพื่อที่จะทำให้เกิดพัลส์}
Port[$302] := $00;   {ทำให้เกิดพัลส์ของขาขึ้นที่ขา CLK ของ 74374 ทำให้ 74374 ทำงาน
ทำให้มีข้อมูลไปที่ DAC0809}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของเอาท์พุทของ DAC0808 นั้นจะเป็นลักษณะกลับกันคือ ถ้าอินพุทเป็น $00 เอาท์พุทจะออก 5 V แต่ถ้าอินพุทเป็น $FF เอาท์พุทจะเป็น 0 V ดั้งนั้นจึงต้องมีวงจรอีกชุดหนึ่งเพื่อแปลงให้เอาท์พุทนั้นเป็นไปตามปกติคือให้อินพุทเข้ามาเป็น $00 แล้วเอาท์พุทออก 0 V หรืออินพุทเข้ามาเป็น $FF เอาท์พุทออกเป็น 5 V

เราสามารถทำได้โดยการต่อออปแอมป์ให้อยู่ในวงจรซัมมิ่งอินเวอร์ติ้ง (Summing-Inverting) แล้วนำมาผ่านวงจรอินเวอร์ติ้งอีกครั้ง ซึ่งในโครงงานนี้จะใช้ออปแอมป์ 741 ในการทำ Summing Inverting และใช้ออปแอมป์ LM358A ในการทำอินเวอร์ติ้ง ซึ่งจะทำให้ได้เอาท์พุทออกมาตามต้องการ คืออินพุทเป็น $00 เอาท์พุทออก 0 V และอินพุทเป็น $FF เอาท์พุทออก 5 V

ถ้าคอมพิวเตอร์ส่งข้อมูลดิจิตอลออกไปเป็น $66 จะทำให้มีเอาท์พุทออกที่วงจร D/A-Converter เท่ากับ 2 V

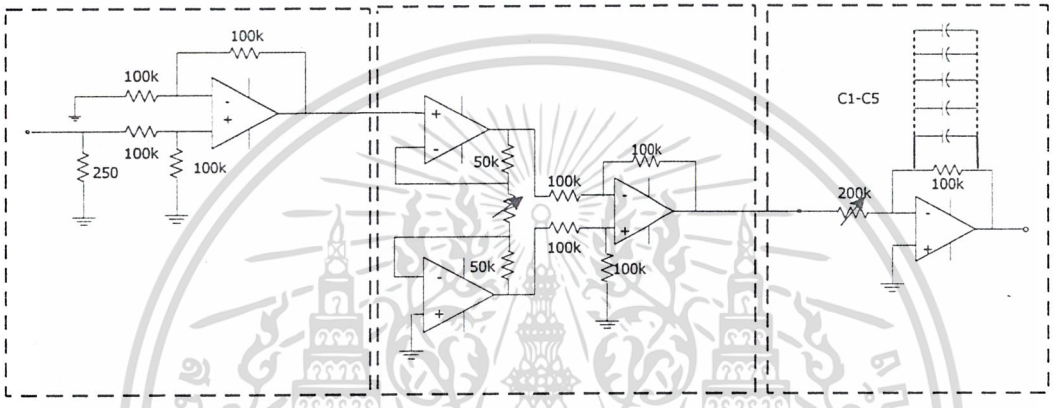
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

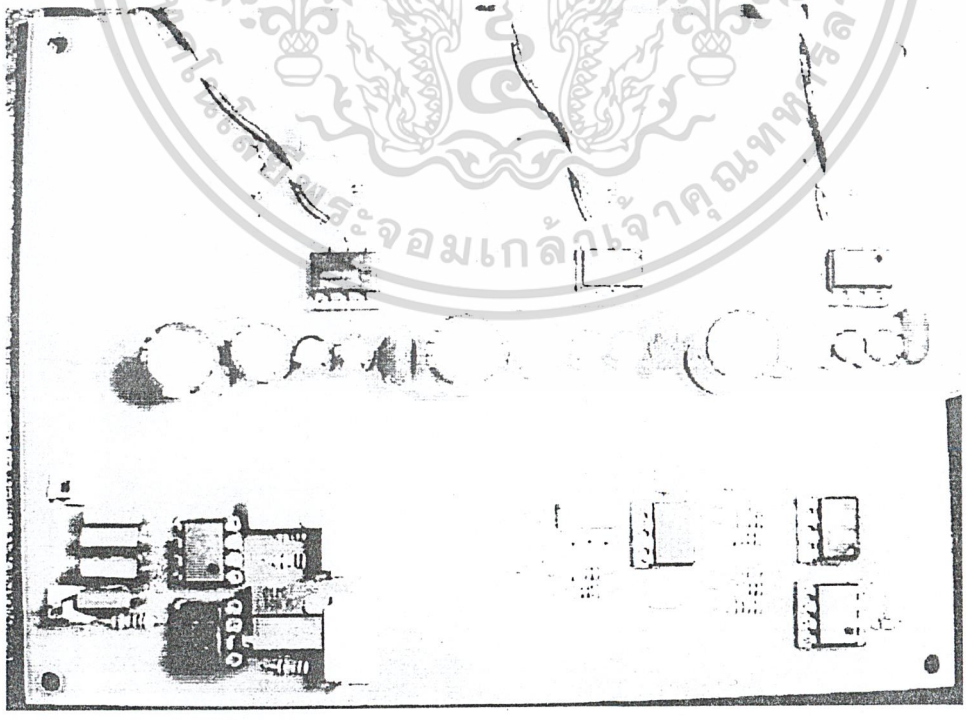
การออกแบบและการสร้าง

3.1 ออกแบบวงจรออปแอมป์

ในการสร้างวงจรจำลองกระบวนการในโครงงานนี้ ใช้ ออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์หลักในการสร้างวงจร ซึ่งมีวงจรดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 วงจรจำลองกระบวนการ



รูปที่ 3.2 วงจรแบบจำลองกระบวนการหลังจากที่สร้างเสร็จแล้ว

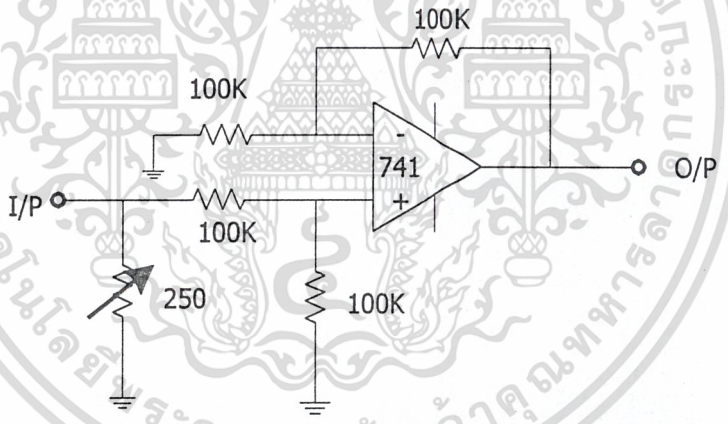
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 เป็นวงจรที่รวมเอาวงจร 3 วงจรเข้าด้วยกัน คือวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน (V/I-Converter), วงจรขยายอินส์ทรูเมนท์แอมป์ (Instrument Amplifier) และก็มีเรื่องวงจรอินติเกรเตอร์อันดับหนึ่ง (Intergrator) การทำงานของวงจรโดยรวมนั้น เริ่มจากรับค่าที่เป็นสัญญาณมาตรฐานกระแส 4–20 mA เข้ามาทางด้านอินพุทซึ่งจะเป็นวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน ทำหน้าที่แปลงสัญญาณกระแส 4–20mA เพื่อให้อยู่ในรูปของแรงดัน 1 – 5 โวลท์ จากนั้นจึงเข้าสู่วงจร Instrument-Amplifier เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ 1–1000 เท่า และเข้าสู่วงจรอินติเกรเตอร์อันดับหนึ่งซึ่งเป็นวงจรที่ทำหน้าที่จำลองคุณสมบัติของกระบวนการที่มีค่าคงที่ทางเวลาซึ่งสามารถปรับค่าได้

ลักษณะการทำงานของแต่ละวงจร สามารถอธิบายแยกแต่ละวงจรออกจากกัน ดังนี้

3.2 วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน (I/V)

ทำหน้าที่แปลงสัญญาณกระแสจากกระบวนการจำลองซึ่งอยู่ในช่วง 4 – 20 มิลลิแอมป์ให้เป็นสัญญาณแรงดันในช่วง 1 – 5 โวลต์ ก่อนที่จะส่งต่อไปยังวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลต่อไป ซึ่งวงจรมีลักษณะดังรูปที่ 3

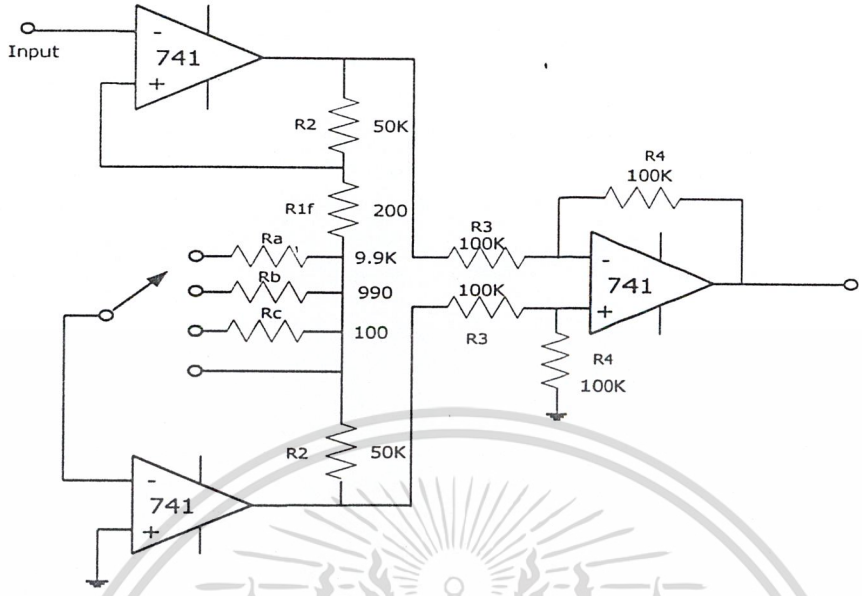


รูปที่ 3.3 วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน (I/V Converter)

เมื่อมีสัญญาณกระแสอินพุท ซึ่งอยู่ในช่วง 4 – 20 มิลิแอมป์ ไหลผ่านตัวต้านทานปรับค่า 250 โอห์ม จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวมัน ซึ่งจะอยู่ในช่วง 1 – 5 โวลต์ จากนั้นจึงทำการขับสัญญาณด้วยวงจรขยายแบบกลับขั้ว (Investing Amplifier) ด้วยอัตราขยาย 1 เท่า โดยป้อนแรงดันเข้าขาอินเวอร์ติ้งของไอซี 1 ทำให้ได้สัญญาณในช่วง 1 – 5 โวลต์ ส่งต่อไปยังวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วงจรขยาย Instrument Amplifier



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรขยาย Instrument Amplifier

จากรูปกำหนดให้ Ra, Rb, Rc คือ $R1_v$

ดังนั้น $$v_{01} = v_1 + \left(\frac{v_1 - v_2}{R_1}\right) R_2$$

$$= v_1 + \frac{R_2}{R_1} v_1 - \frac{R_2}{R_1} v_2$$

และ $$v_{02} + \left(\frac{v_1 - v_2}{R_1}\right) R_2 - v_2 = 0$$

ดังนั้น $$v_{02} = v_2 - \frac{(v_1 - v_2)}{R_1} R_2$$

$$= v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1 + \frac{R_2}{R_1} v_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ $$v_{01} - v_{02} = v_1 + \frac{R_2}{R_1}v_1 - \frac{R_2}{R_1}v_2 - v_2 + \frac{R_2}{R_1}v_1 - \frac{R_2}{R_1}v_2$$

$$= (v_1 - v_2) + 2\frac{R_2}{R_1}v_1 - 2\frac{R_2}{R_1}v_2$$

$$= (v_1 - v_2) + 2\frac{R_2}{R_1}(v_1 - v_2)$$

$$= \left(1 + 2\frac{R_2}{R_1}\right)(v_1 - v_2)$$

$$v_{01} = v_1 + \left(\frac{v_1 - v_2}{R_1}\right)R_2$$

$$v_{02} = v_2 - \left(\frac{v_1 - v_2}{R_1}\right)R_2$$

จากผลต่างของแรงดัน $(v_{01} - v_{02})$ ของวงจรผลต่างจะเป็นสัดส่วนตรงกับ v_0

$$v_0 = -\frac{R_4}{R_3}(v_{01} - v_{02})$$

แทนสมการ(6.5)ในสมการ(6.6)

$$v_0 = -\frac{R_4}{R_3}\left(1 + 2\frac{R_2}{R_1}\right)(v_1 - v_2)$$

หรือ $$v_0 = \frac{R_4}{R_3}\left(1 + 2\frac{R_2}{R_1}\right)(v_1 - v_2)$$

จะได้อัตราการขยายผลต่างของวงจรขยายผลต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_d = \frac{v_0}{v_2 - v_1} = \frac{R_4}{R_3}\left(1 + 2\frac{R_2}{R_1}\right)$$

ถ้าหาก $v_1 = v_2 = v_{CM}$

จาก $$v_{01} = v_1 + \left(\frac{v_1 - v_2}{R_1}\right)R_2 = v_1 = v_{CM}$$

และ $$v_{02} = v_2 - \left(\frac{v_1 - v_2}{R_1}\right)R_2 = v_2 = v_{CM}$$

ดังนั้น $$v_0 = \frac{R_4}{R_3}(v_{01} - v_{02})$$

$$= -\frac{R_4}{R_3}(v_{CM} - v_{CM}) = 0$$

จากรูปที่ 3.3 เป็นการออกแบบวงจรขยายอินส์ทรูเมน ให้มีอัตราขยายเปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ 2 – 1000 เท่า กำหนดให้ใช้ความต้านทานเปลี่ยนค่าได้มีค่าเท่ากับ 0 -100 KΩ เท่านั้น เมื่อกำหนดให้อัตราขยายของวงจรขยายผลต่างเท่ากับ 1 เท่า

$$1 + \frac{2R_2}{R_1} = 2 - 1000$$

เมื่อ $$R_1 = R_{1f} + R_{1v}$$

ดังนั้น $$1 + \frac{2R_2}{R_{1f} + R_{1v}} = 2 - 1000$$

ที่ $R_{1v} = 0\Omega$ จะได้อัตราขยาย 100 เท่า

$$1 + \frac{2R_2}{R_{1f}} = 1000 \qquad \text{(ก)}$$

ที่ $R_{1v} = 100k\Omega$ จะได้อัตราขยาย 2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1+\frac{2R_2}{R_{1f}+100k}=2 \qquad \text{(ข)}$$

แก้สมการ (ก) และ (ข) จะได้

$$R_{1f}=100.2\Omega$$

$$R_2=50.050k\Omega$$

และที่ $R_{1v}=100k\Omega$ จะได้อัตราขยาย 10 เท่า

$$1+\frac{2R_2}{R_{1f}+9.9k}=10$$

และที่ $R_{1v}=100k\Omega$ จะได้อัตราขยาย 100 เท่า

$$1+\frac{2R_2}{R_{1f}+990}=100$$

ดังนั้นวงจร Instrument Amp ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ ตั้งแต่ 2 เท่าจนถึง 1000 เท่า โดย ใช้ Selector Switch เลือกค่าอัตราขยาย เป็นดังนี้

- 2 เท่า (Shot Circuit)
- 10 เท่า (Rc = 100 Ω)
- 100 เท่า (Rb = 990 Ω)
- 1000 เท่า (Ra = 9.9 kΩ)

3.4 วงจร First Order

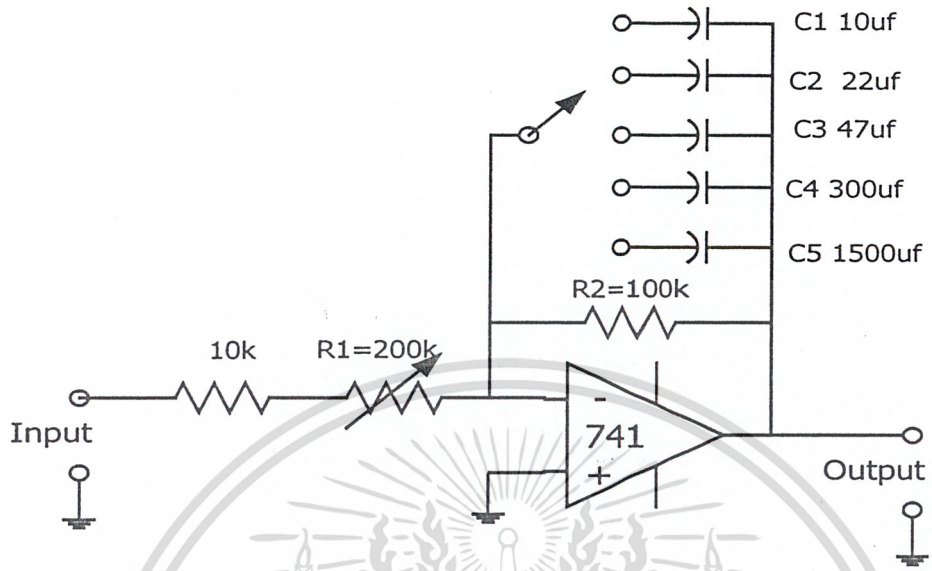
วงจร First Order มีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ

1. วงจร First Order ชุดที่ 1 ซึ่งมีลักษณะวงจรดังรูปที่ 3.4 เป็นวงจร Intergrated Amp ธรรมดาที่มีการปรับค่า τ ได้ 5 ค่า

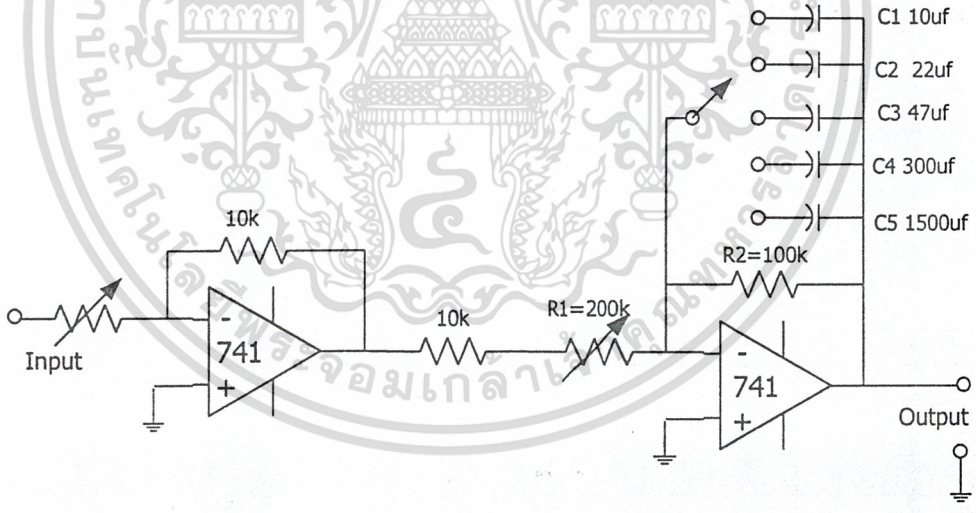
2. วงจร First Order ชุดที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นวงจรที่จะต้องมีการต่อวงจร Invert Amp เพิ่มเข้ามาก่อนที่จะต่อเข้ากับอินพุท ทั้งนี้เนื่องจากว่า เอ้าพุทของวงจะอันดับหนึ่ง ชุดแรก จะออกมาเป็นค่าบวกถ้าหากนำไปต่อเข้าวงจรชุดที่สอง เอาท์พุทของวงจรชุดที่สองก็จะมีค่าเป็นลบ ซึ่งนำไปต่อเข้าวงจร Interface ไม่ได้ ดังนั้น จึงต้องมีการกลับขั้วสัญญาณให้เป็นลบ เสียก่อน แล้วจึงนำไปต่อเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรชุดที่สอง เอาท์พุทของวงจรชุดที่สองก็จะมีค่าเป็นบวกซึ่งจะนำไปต่อเข้าวงจร Interface ต่อไป ส่วนวงจรชุดที่ 3 ก็ต้องมีการต่อเช่นเดียวกับวงจรชุดที่ 2 เนื่องจากเหตุผลเดียวกัน



รูปที่ 3.5 วงจร First Order ชุดที่ 1



รูปที่ 3.6 วงจร First Order ชุดที่ 2 และชุดที่ 3

วงจรนี้มีลักษณะเป็นวงจร ขยายแบบ Integrated Amplifier โดยสามารถเปลี่ยนค่า τ ของวงจรได้ 5 ค่า โดยทำการเปลี่ยนค่า C โดยใช้ Selector Switch วงจรนี้ มีทั้งหมด 3 วงจร โดยเมื่อนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละวงจรมาต่อกัน ก็จะมี Order ตามจำนวนของวงจรที่ต่อกัน คือ 3th Order นั่นเอง และวงจรนี้ยังมีการขยายด้วยอัตราขยาย 0.1 – 2 เท่าโดยปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้ 200k เมื่อต่อรวมกันกับวงจร Instrument Amplifier แล้ว ทำให้มีอัตราขยายรวมกัน เป็น 0.1 – 2000 เท่า ซึ่งเป็นค่าอัตราขยายที่ใช้สำหรับเปลี่ยนค่าเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองของวงจร

สำหรับการคำนวณหาคงที่ทางเวลา (τ) นั้น จะใช้วิธีการเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์และกำหนดค่าความต้านทานคงที่ ซึ่งมีวิธีในการคำนวณดังนี้

จากรูปที่ 3.5 จะได้ Transferfunction= $\frac{k}{\tau s+1}$

โดยที่ $k=\frac{R_2}{R_1+R_{10k}}$

และ $\tau=R_2C$

ดังนั้น $C=\frac{\tau}{R_2}$

เมื่อ กำหนดให้ τ_1=1 sec

จะได้ $C_1=10\,\mu F$

เมื่อ τ_2=2 sec

จะได้ $C_2=20\,\mu F$

เมื่อ τ_3=5sec

จะได้ $C_3=50\,\mu F$

เมื่อ τ_4=1 min

จะได้ $C_4=300\,\mu F$

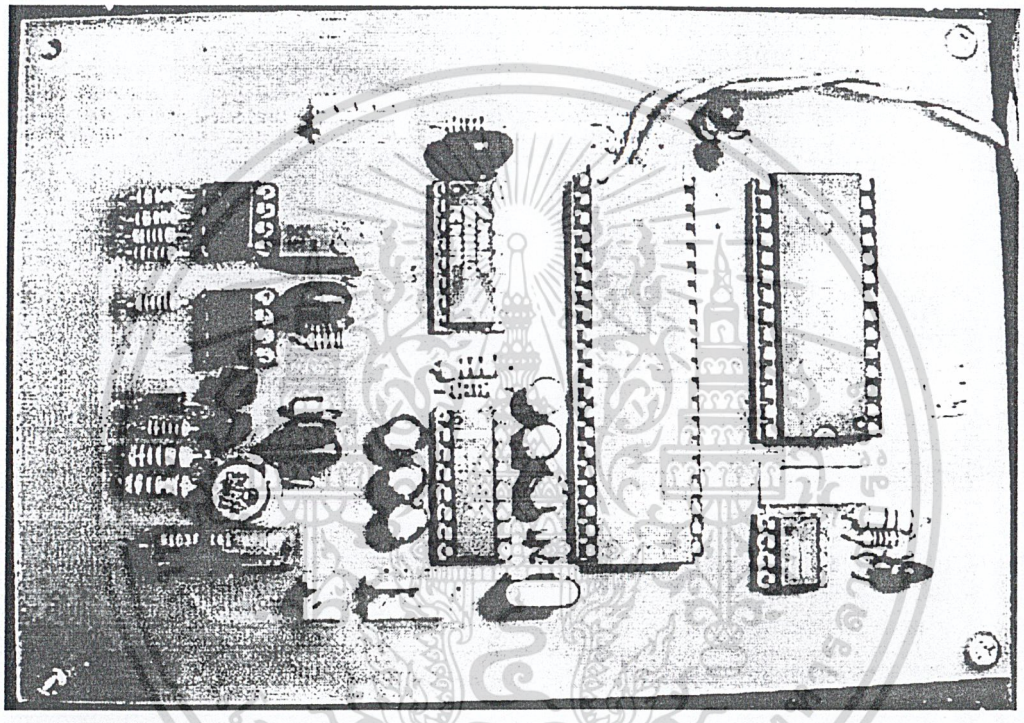
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อ τ_5=5 min

จะได้ C_5=1500 μ F

ซึ่งค่าทั้งหมดคาปาซิเตอร์ที่คำนวณได้นี้ จะได้นำมาต่อวงจรดังวงจรที่ 3.5 และ 3.6

3.4 วงจร Interface

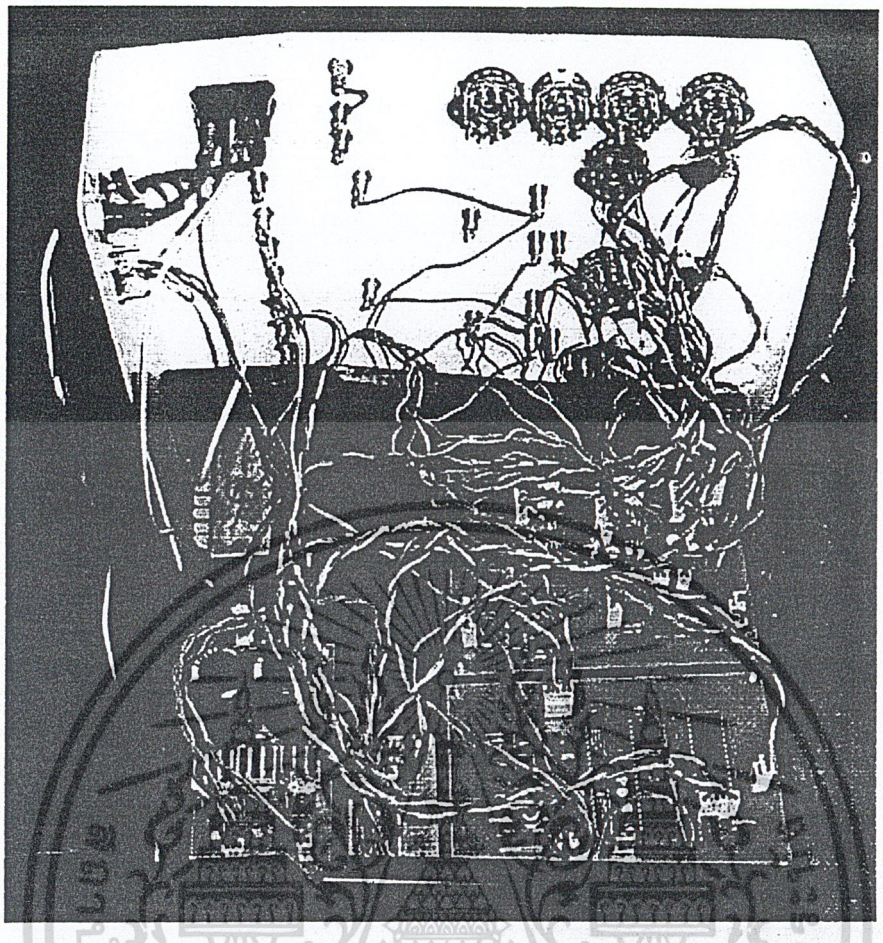


รูปที่ 3.7 วงจร Interface เมื่อสร้างเสร็จแล้ว

วงจรสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์และแบบจำลองกระบวนการ (Interface) เป็นวงจรที่ใช้สื่อสารผ่านพอร์ทอนุกรม RS-232 ซึ่งใช้ในการรับส่งค่าระหว่างคอมพิวเตอร์และระบบจำลองกระบวนการมีวงจรการต่อและลักษณะการทำงานดังได้กล่าวไปแล้วในบทที่2และเมื่อสร้างเสร็จแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.7 เป็นรูปของการต่อสายสัญญาณภายในทั้งหมดของวงจรแบบจำลองกระบวนการซึ่งได้นำเอาวงจรสื่อสารฯ วงจรแปลงกระแสให้เป็นแรงดัน วงจรอินติเกรเตอร์อันดับหนึ่ง รวมทั้งแหล่งจ่ายไฟมารวมกัน และรูปแบบของหน้ากล่องแบบจำลองเมื่อเสร็จสมบูรณ์แล้ว ก็จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การต่อสายสัญญาณภายในของแบบจำลองการควบคุมกระบวนการ

3.6 หน่วยติดต่อกับผู้ใช้

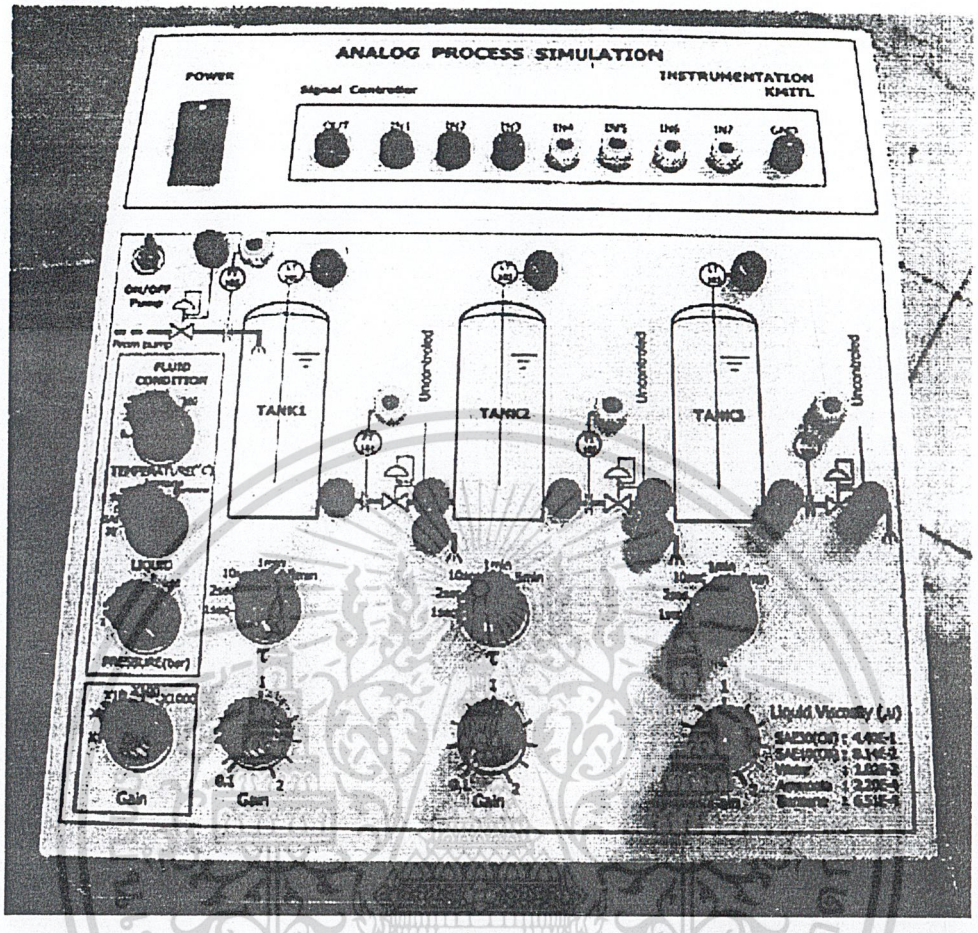
มีอยู่ 2 หน่วยด้วยกันคือ

1. ส่วนของแบบจำลองกระบวนการหรือ Analog Process Simulation เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จำลองการทำงานของกระบวนการทั้งหมด โดยรับค่าเข้ามาจากคอมพิวเตอร์ และนำค่าไปทำงาน จากนั้นจึงส่งค่าออกไป และเข้าสู่คอมพิวเตอร์อีกครั้งหนึ่งเพื่อแสดงผล ดังจะได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2. ส่วนของโปรแกรมควบคุมการทำงานและแสดงผล เป็นส่วนที่ ทำงานบนคอมพิวเตอร์ เป็นโปรแกรมควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) ที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้ดังจะได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 ส่วนของแบบจำลองกระบวนการ (Analog Process Simulation)



รูปที่ 3.9 รูปด้านหน้าของแบบจำลองการควบคุมกระบวนการ (Analog Process Simulation)

ส่วนของแบบจำลองกระบวนการ มีลักษณะดังรูปที่ 3.9 ปุ่มปรับค่าต่างๆ ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

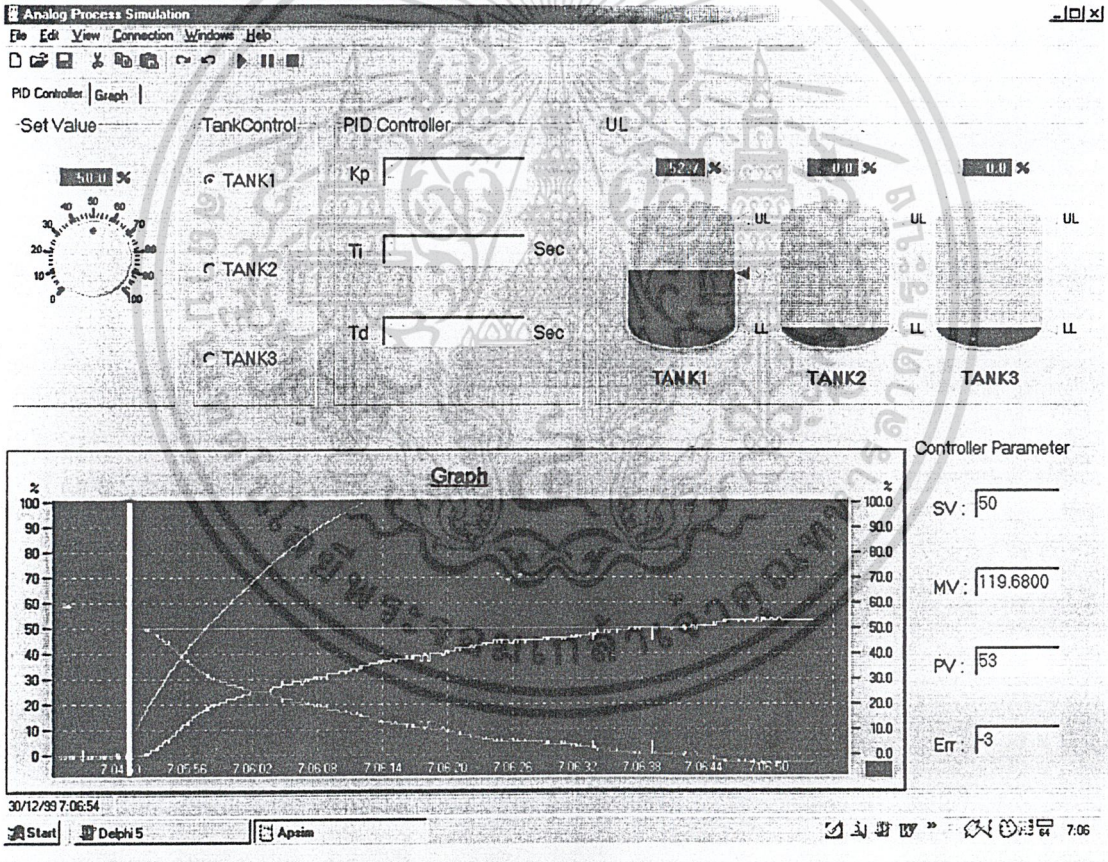
- FLUID CONDITION มีปุ่มปรับค่าอยู่ 3 ปุ่มด้วยกันคือ Temperature, Liquid และ Pressure ซึ่งแต่ละปุ่มใช้สำหรับปรับสภาวะของของเหลวที่จะไหลเข้าสู่กระบวนการ
- Gain 0-1000 เป็นปุ่มปรับอัตราขยาย ตั้งแต่ 0 – 1000 เท่า ใช้สำหรับปรับอัตราขยายของระบบโดยรวม โดยปรับค่าได้ 4 ค่าคือ 0, 10, 100 และ 1000 เท่าดังได้กล่าวไปแล้ว
- τ เป็นปุ่มใช้ปรับค่าคงที่ทางเวลาของระบบ มีอยู่ 5 ค่าด้วยกัน คือ 1 วินาที, 2 วินาที, 5 วินาที, 1 นาที และ 5 นาที
- Gain เป็นปุ่มปรับอัตราขยายของวงจรอันดับหนึ่งแต่ละตัว ใช้ปรับค่าอัตราขยายตั้งแต่ 0.1 – 1 เท่า เมื่อนำมารวมกับ Gain 0-1000 แล้วทำให้สามารถปรับอัตราขยายได้ระหว่าง 0.1 – 2000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของการต่อสายเมื่อทำการทดลองมีปลักซ์ต่อสายต่างๆ ดังต่อไปนี้

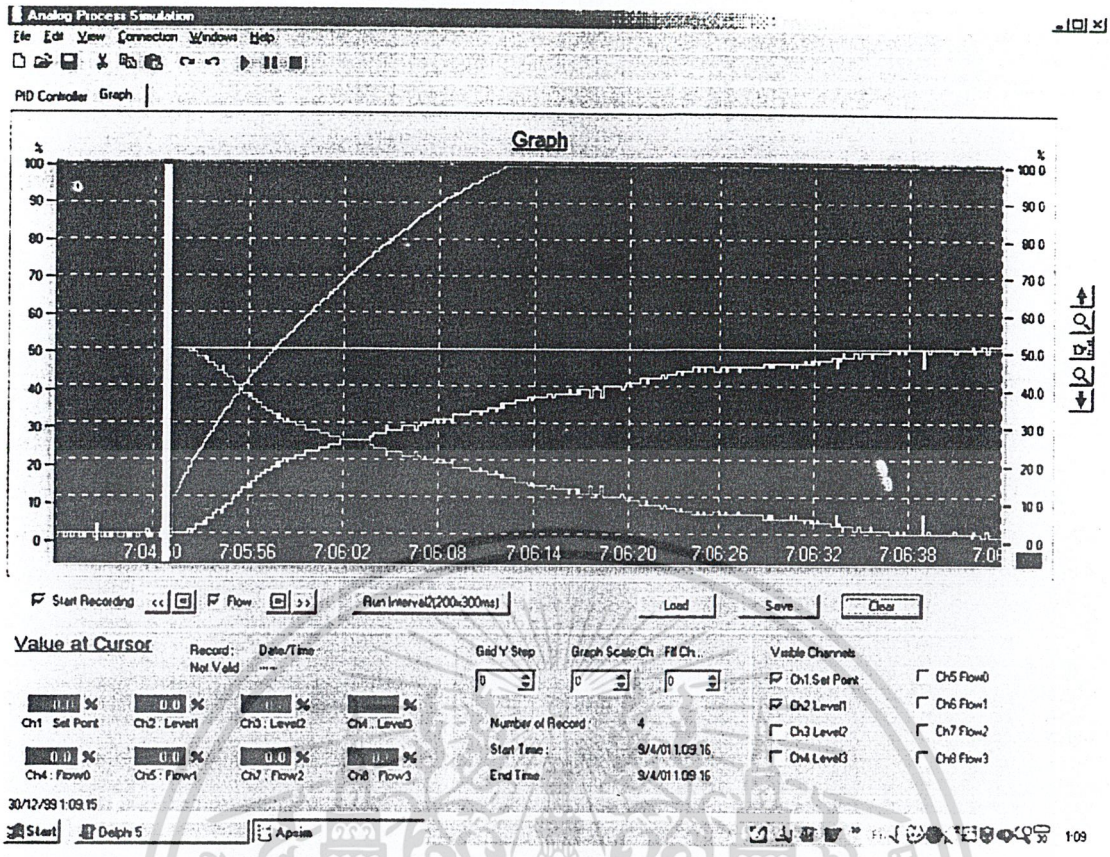
- Signal Controller เป็นส่วนที่ใช้ต่อสัญญาณที่จะเข้าหรือออกจากตัวควบคุมซึ่งก็คือคอมพิวเตอร์นั่นเอง โดย ปลักซ์สีเขียวคือสัญญาณควบคุม และปลักซ์สีน้ำเงินและสีเหลืองใช้รับค่าสัญญาณจากแบบจำลองฯ เข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผล
- ในส่วนของการต่อวงจรของเหลว ก็มีการต่อตามสัญลักษณ์ที่ปรากฏบนหน้ากล่อง กล่าวคือ วาล์ลควบคุม ใช้สำหรับรับค่าสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม LT101, LT102 และ LT103 ก็คือตัววัดระดับ ต่อเข้ากับ ตัวรับสัญญาณที่ Signal Controller ส่วน FT100, FT101,FT103 ก็เป็นตัววัดการไหลจะต่อเข้ากับตัวรับสัญญาณที่ Signal Controller เช่นเดียวกัน

3.6.2 ส่วนของโปรแกรมควบคุมการทำงานและแสดงผล

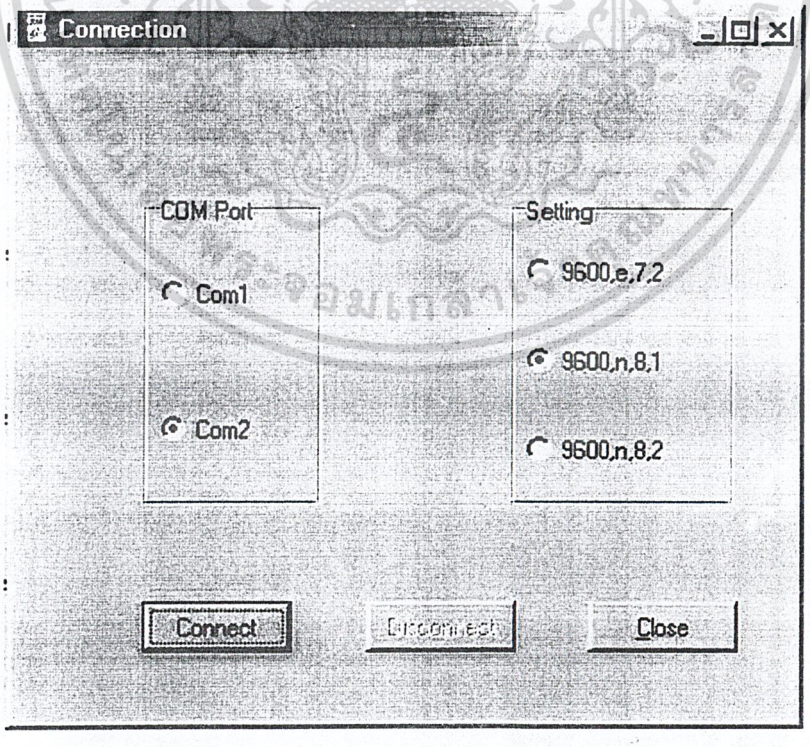


รูปที่ 3.10 โปรแกรมการควบคุมการทำงานและแสดงผล ส่วนที่ 1 (Main Program)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 โปรแกรมการควบคุมการทำงานและแสดงผล ส่วนที่ 2 (Graph)



รูปที่ 3.12 โปรแกรมควบคุมการทำงานและแสดงผลส่วนที่ 3 (Connection)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของโปรแกรมควบคุมการทำงานนั้น มีอยู่ 3 ส่วนด้วยกัน ดังรูปที่ 3.6 ถึงรูปที่ 3.8 การทำงานในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. Main Program เป็นหน้าต่างหลักของการทำงาน เมื่อเราเปิดโปรแกรมขึ้นมา จะพบกันหน้าต่างนี้ก่อน จากนั้น จะต้องทำการเชื่อต่อกันระหว่างกระบวนการจำลองและคอมพิวเตอร์โดยคลิ๊กที่ปุ่ม Connection ก็จะปรากฏหน้าต่าง Connection ดังรูปที่ 3.8 จากนั้น เราก็คลิ๊กที่ ปุ่ม Connect อีกครั้งหนึ่ง เป็นการเชื่อมต่อระหว่างกระบวนการจำลองและคอมพิวเตอร์ เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้ว หน้าต่าง Connection ก็จะถูกปิดไปโดยอัตโนมัติ เข้าสู่การทำงานในส่วนของการควบคุม

ในส่วนการควบคุม สามารถอธิบายการทำงานคร่าวๆ ได้ดังนี้

- Set Value เป็นปุ่มปรับค่า SV ให้กับระบบ
- Tank Control เป็น ปุ่มเลือกว่าจะให้มีการควบคุมที่ถังไหน
- PID Controller เป็นช่องสำหรับใส่ค่าพารามิเตอร์ PID ของตัวควบคุม
- Tank เป็นรูปแสดงค่าระดับน้ำที่ควบคุม
- Graph เป็นกราฟแสดงผลการทำงานของแบบจำลองฯ
- Controller Parameter เป็นค่าแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำณวนของตัวควบคุม

2. Graph เป็นส่วนแสดงผลการทำงานที่สมบูรณ์ สามารถที่จะย่อและขยายได้ นอกจากนี้ยังสามารถที่จะเลือกว่าให้แสดงค่าใดบ้าง รวมถึงการเก็บบันทึกค่าด้วย

3.6 ซอฟท์แวร์ และ PID Controller

การเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการจะต้องมีการทำงานใน 2 ลักษณะ คือ

1. เป็นโปรแกรมควบคุมการทำงาน ของกระบวนการจำลองในมีค่าตามเป้าหมายโดยใช้การควบคุมแบบ PID

2. เป็นโปรแกรมแสดงผลการควบคุม

เนื่องจากโปรแกรมต้องมีลักษณะดังกล่าว จึงได้เลือกโปรแกรมภาษา Delphi ซึ่งเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดว์ เนื่องจากสามารถพัฒนาได้รวดเร็ว มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน และสวยงาม

โดยการเขียนโปรแกรมต้องมีส่วนของการอินเตอร์เฟส (Interface) โดยรับข้อมูลที่เป็นรหัสแอสกี้ (ACSII) จาก MCS-51 ซึ่งรับอินพุทมาจากอุปกรณ์ภายนอกที่เป็น Sensor หรือ Transducer (ในโครงงานนี้ได้แก่ แรงดันเอาท์พุทของ กระบวนการจำลองแต่ละชุด) แล้วนำค่าที่ได้มานี้มาคำนวณด้วยการสมการพีไอดี แล้วจึงส่งค่าที่คำนวณได้ส่งออกไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกที่เป็น Final Element (ในโครงงานนี้ ได้แก่แรงดัน Input)

ในส่วนของโปรแกรม PID นั้นมีสมการที่ใช้ในการควบคุมคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)d(t) + K_d \frac{de(t)}{d(t)} \qquad (3.1)$$

ทำการ Diff สมการที่ (3.1) จะได้

$$\frac{dM(t)}{d(t)} = K_p e(t) + K_i \frac{d}{d(t)} \int e(t)d(t) + K_d \frac{d}{d(t)}\left[\frac{de(t)}{d(t)}\right]$$

$$= K_p \frac{de(t)}{d(t)} + K_i e(t) + K_d \frac{d^2 e(t)}{d(t^2)}$$

กำหนดให้

$$E(t) = e_n$$

$$\frac{dM(t)}{dt} = \frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{M_n - M_{n-1}}{\Delta t}$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{E_{n-1}}{\Delta t}$$

$$\frac{m_n - m_{n-1}}{\Delta t} = \frac{K_p(e_n - e_{n-1})}{\Delta t} + K_i e_n + K_d \frac{d}{dt}(e_n - e_{n-1})$$

$$\frac{m_n - m_{n-1}}{\Delta t} = K_p(e_n - e_{n-1}) + K_i e_n + \frac{Kd}{\Delta t}\left(e_n - e_{n-1} - (e_{n-1} - e_{n-2})\right)$$

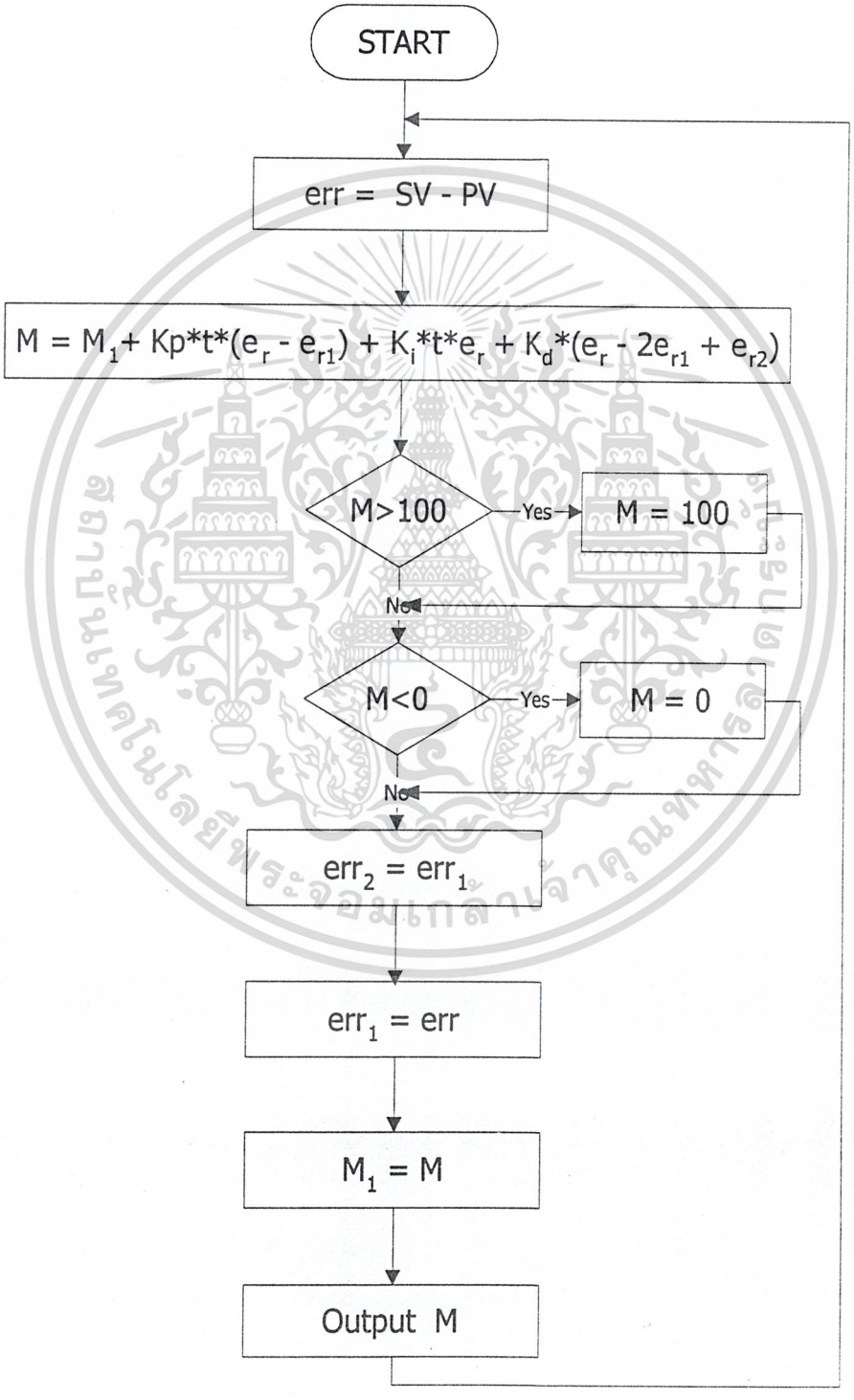
$$m_n - m_{n-1} = K_p \Delta t(e_n - e_{n-1}) + K_i \Delta t e_n + Kd(e_{n-2} e_{n-1} + e_{n-2})$$

$$m_n = m_{n-1} + K_p \Delta t(e_n - e_{n-1}) + K_i \Delta t e_n + Kd(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2})$$

เมื่อ m_n = Manipulate ที่จะส่งสัญญาณออกไปควบคุมอุปกรณ์ Final Element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมพีไอดี จะต้องมีการรับค่า SV (Setpoint) จากผู้ควบคุมและ PV (Process-Variable) จากระบบปฏิบัติการ โดยนำค่าทั้งสองนั้นมาทำการแปลงเพื่อหาค่าผิดพลาด (error:e_r) เพื่อนำไปใช้งานในการเขียนโปรแกรมควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งผลจากการคำนวณนั้นจะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 100 ดังนั้น ถ้าผลที่เกิดจากการคำนวณ (m_n) นั้นมีค่าน้อยกว่า 0 (0%) หรือมากกว่า 100 (100%) จะต้องให้ค่านั้นเท่ากับ 0 และ 100 ตามลำดับ ดัง Flow Chart ข้างล่าง

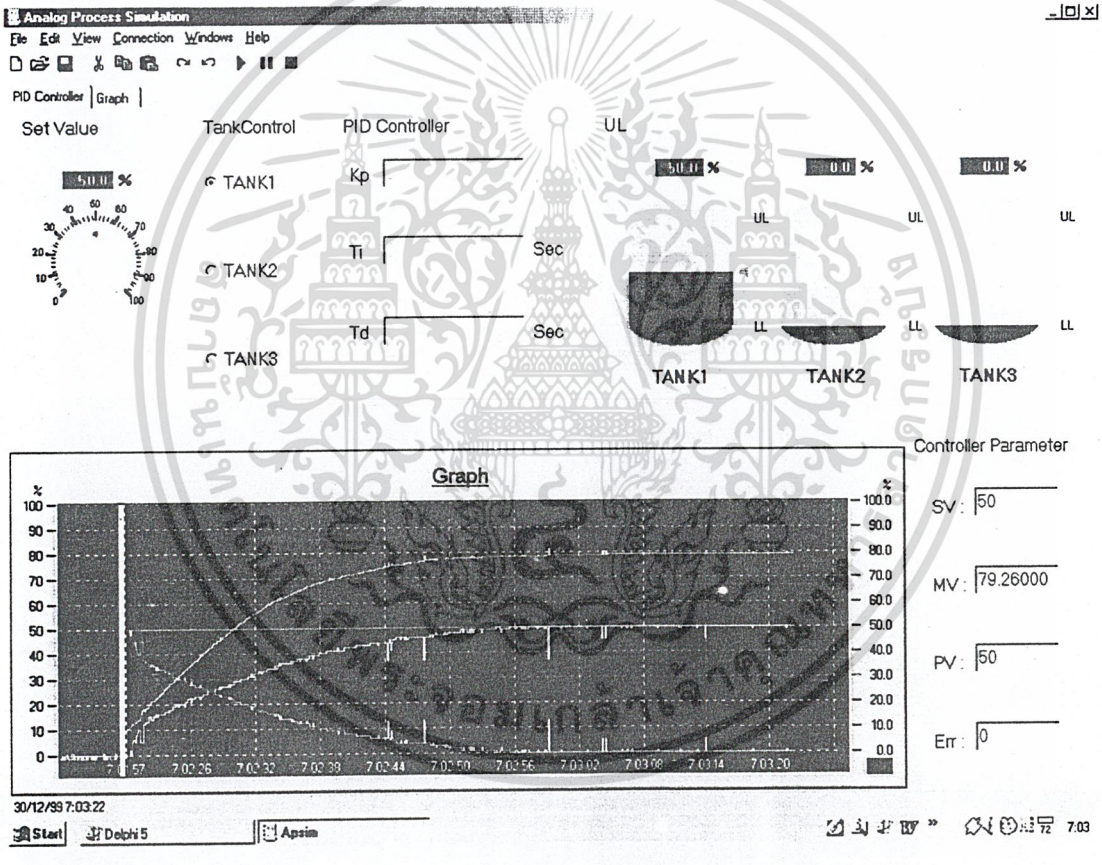


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

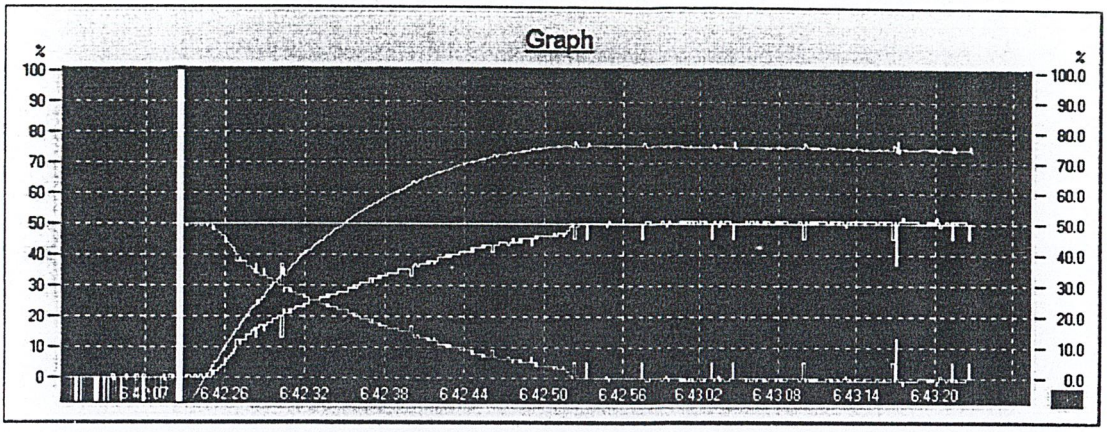
ในการทดลองของโครงการนี้ได้นำเอา ข้อมูลจากบทที่ 2 เพื่อมาทำการออกแบบชุดทดลองแต่ละชิ้นในบทที่ 3 เพื่อที่จะนำมาทำการทดลอง เพื่อให้ได้เงื่อนไขในเรื่องการทำงาน ที่เหมือนกับกระบวนการจริงอย่างมีประสิทธิ์ภาพมากที่สุด จากนั้น ได้ทำการทดลองผลของการควบคุมกระบวนการด้วยคอมพิวเตอร์ โดยมีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งที่แบบจำลองการควบคุมกระบวนการและที่โปรแกรมควบคุมการทำงานหลายๆ ค่าดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรมควบคุมการทำงาน Analog Process Simulation

จากรูปที่ 4.1 เป็นหน้าต่างหลักของโปรแกรมควบคุมการทำงานของ Analog Process Simulation แสดงให้เห็นผลการควบคุมด้วยกราฟ ซึ่งต่อไปนี้ จะนำเฉพาะรูปกราฟเท่านั้น มาแสดงเพื่อจะได้เห็นเส้นกราฟได้ชัดเจนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลตอบสนองเมื่อที่ค่าเป้าหมายเท่ากับ 50%

จากรูปที่ 4.2 เป็นการทดลองที่ค่าเป้าหมาย 50% โดยมีเส้นกราฟ 4 เส้น แสดงค่าต่างๆ ดังนี้

สีเขียว แสดงค่าเป้าหมาย (SV)

สีม่วง แสดงค่าตัวแปรปรับกระบวนการ (MV)

สีเหลือง แสดงค่าตัวแปรกระบวนการ (PV)

สีแดง แสดงค่าผิดพลาด (Error)

จากกราฟ จะเห็นได้ว่า ค่าตัวแปรกระบวนการค่อยๆ เข้าสู่ค่าเป้าหมาย โดยใช้เวลาทั้งสิ้น 24 วินาที ทั้งนี้ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ มีค่าดังต่อไปนี้

Kp = 2

Ti = 0.1

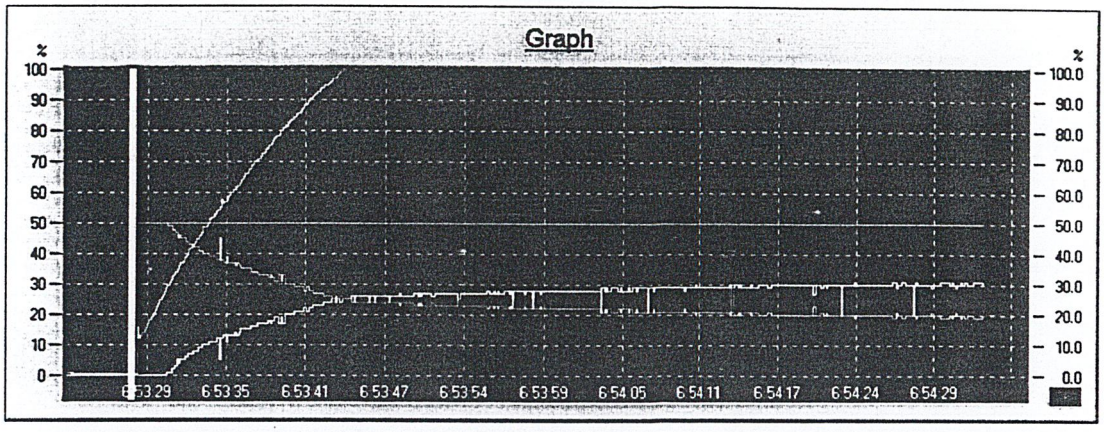
Td = 0.1

และค่าพารามิเตอร์ที่กระบวนการจำลองมีค่าดังต่อไปนี้

Gain = 1.6

τ = 10 วินาที

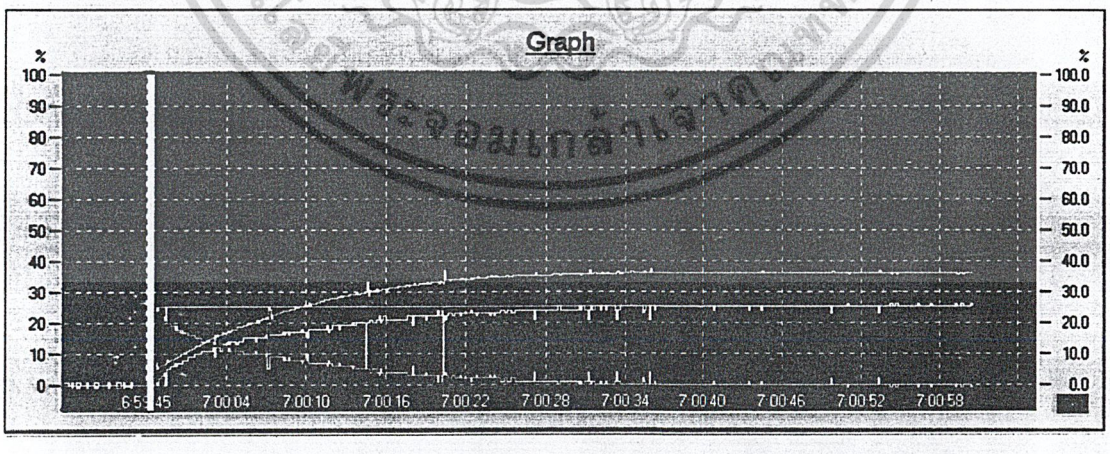
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่กระบวนการจำลอง Gain เป็น 1.0

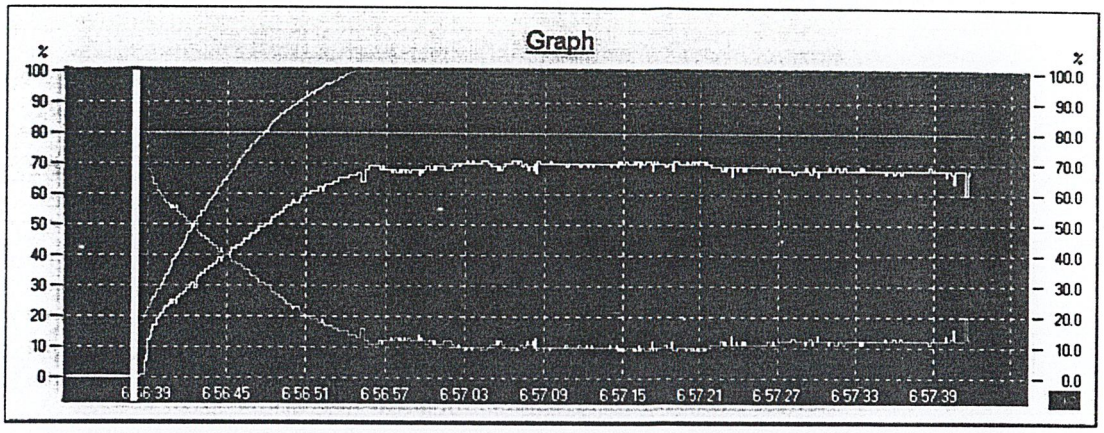
จากรูป ที่ 4.3 เมื่อเราเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่กระบวนการจำลองโดยเปลี่ยน Gain จาก 1.6 เป็น 1.0 ส่วนค่า τ มีค่าเท่าเดิมคือ 10 วินาที แต่จะเห็นว่าค่าตัวแปรกระบวนการมีค่าสูงสุดได้เพียง 30% อันเนื่องจากว่า ความไม่เหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการจำลอง กล่าวคือ มีค่า Gain น้อยเกินไป ทำให้เอาท์พุทมีค่าน้อยเกินไป ในขณะที่ อินพุท มีค่า 100% แล้ว ดังจะเห็นได้จากกราฟ สีม่วง ดังนั้นค่า คลาดเคลื่อน จึงมีค่าเท่ากับ 20% ดังกราฟสีแดง

ดังนั้น ในการทดลองจึงต้องระวังเป็นอย่างมากในเรื่องของความไม่เหมาะสมของกระบวนาการจำลอง เพราะถ้าตั้งค่า Gain น้อยเกินไป ก็จะทำให้เอาท์พุทมีค่าน้อยไปด้วย แต่ถ้าตั้งค่า Gain มากเกินไป อาจจะทำให้ไม่สามารถควบคุมได้ เนื่องจากค่า MV เพียงนิดเดียว ก็จะทำให้เอาท์พุทมีค่าสูงเกินไปเสียแล้ว



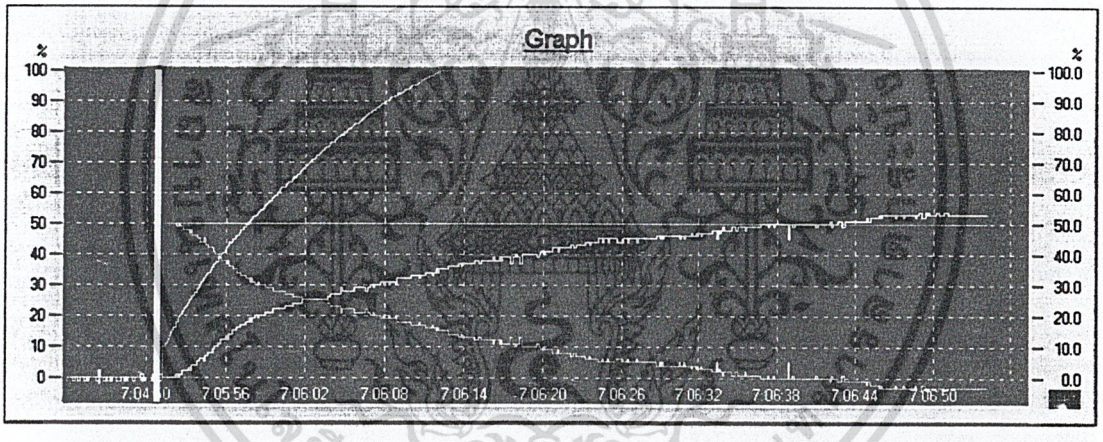
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองเมื่อ Gain ที่กระบวนการจำลอง มีค่า 1.0 แต่ SV เท่ากับ 25%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.5 ค่า Gain ที่กระบวนการจำลองเท่ากับ 1.6 แต่ค่า SV เท่ากับ 80% ค่า τ เท่ากับ 10 วินาที

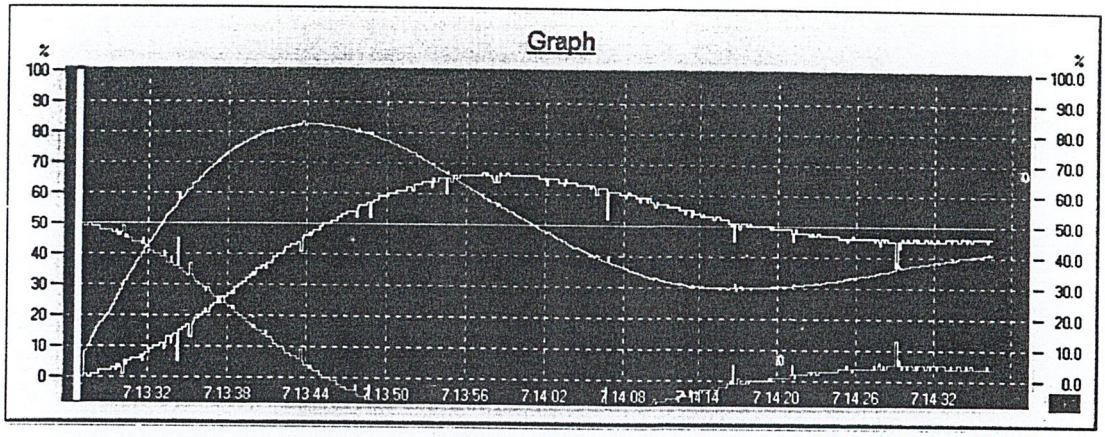
รูปที่ 4.5 เป็นรูปที่แสดงให้เห็นว่าถึแม้ค่า Gain จะมีค่า 1.6 แต่ถ้าหากตั้งค่า SV เท่ากับ 80% แล้ว จะทำให้ PV มีค่าได้แค่เพียง 68% คือมีค่าไม่ถึงค่า SV เหมือนกัน



รูปที่ 4.6 ค่า Gain ที่กระบวนการจำลองเท่ากับ 1.6 ค่า SV เท่ากับ 50% แต่ค่า τ เท่ากับ 1 นาที

จากรูปที่ 4.6 เมื่อเปลี่ยนค่า τ ของแบบจำลองฯ เป็น 1 นาที จำทำให้ระบบมีค่า Rise Time นานขึ้น แต่เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ PID ทำให้เวลาที่ใช้ ไม่ถึง 1 นาที เมื่อเราตั้งค่าพารามิเตอร์ PID ให้เหมาะสม จะทำให้ลดเวลา Rise Time ลงได้อีก

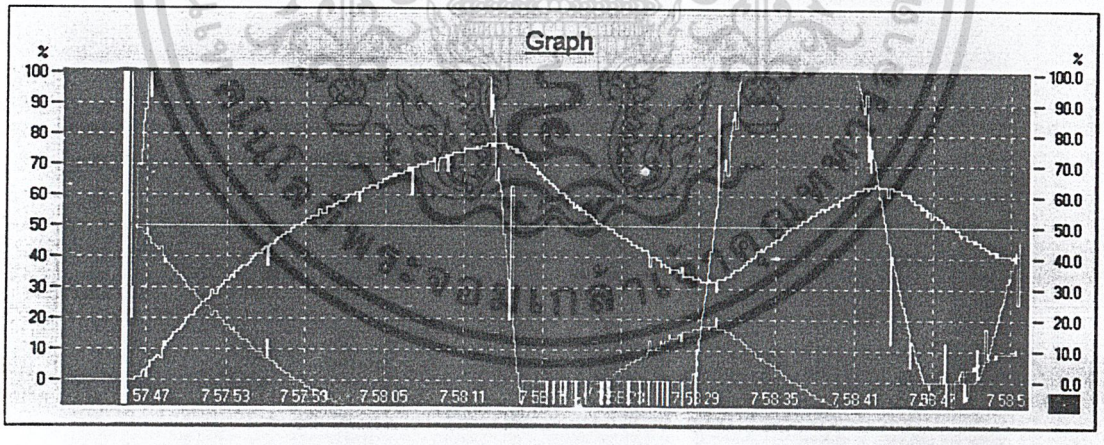
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ค่า Gain ของแบบจำลองฯ มีค่าเท่ากับ 1.6 SV มีค่า 50% และค่า τ เท่ากับ 5 นาที Kp = 2 Ti = 0.1, Td = 0.1

จากรูปที่ 4.7 เมื่อเปลี่ยนค่า τ เท่ากับ 5 นาที จะทำระบบนั้นๆ เกิดการ Over shoot ถึงแม้แบบจำลองฯ จะเป็นกระบวนการอันดับหนึ่ง แต่เมื่อรวมเข้ากับ PID แล้วทำให้ระบบมีอันดับสูงกว่าอันดับหนึ่ง จึงทำให้เกิดการ Over Shoot ดังในกราฟในรูปที่ 4.7 นี้ เป็นการควบคุมโดยให้ค่าพารามิเตอร์

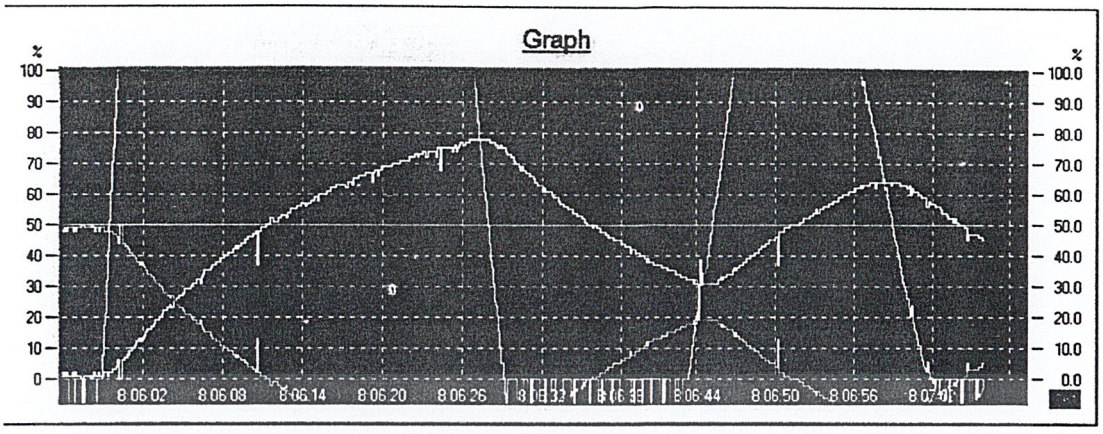
kp = 2, Ti = 0.2, Td = 0.2



รูปที่ 4.8 ค่า Gain ของแบบจำลองฯ เท่ากับ 1.6 ค่า SV มีค่า 50% และค่า τ เท่ากับ 5 นาที Kp =1, Ti = 1, Td = 10

กราฟในรูปที่ 4.8 เป็นการแสดงค่าของกระบวนการเมื่อค่าพารามิเตอร์ PID มีค่าต่างๆ คือ Kp = 1, Ti =1, Td = 10 ซึ่งจะเห็นว่า เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มจะเข้าสู่เสถียรภาพ แต่ช้ากว่ากราฟในรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พารามิเตอร์ PID ในรูปที่ 4.7 เหมาะสมกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ค่า Gain ที่แบบจำลองฯ เท่ากับ 1.6 ค่า SV เท่ากับ 50% τ เท่ากับ 5 นาที Kp = 1, Ti = 1, Td = 2

จากรูป 4.9 จะเป็นการควบคุมที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของ PID ที่เหมาะสม ทำให้ระบบเข้าสู่ค่า Set Value อย่างรวดเร็ว และระบบ จะมีเสถียรภาพที่ดี

ทั้งหมดนี้เป็นส่วนหนึ่งของการทดสอบการทำงานของโปรแกรมควบคุมกราทำงานของแบบจำลองการควบคุมกระบวนการ จะเห็นได้ว่า การปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะทำให้ระบบเปลี่ยนแปลงการทำงานไปด้วนซึ่งสามารถใช้เพื่อเรียนรู้การปรับค่าพารามิเตอร์ PID เพื่อควบคุมการทำงานได้เป็นอย่างดี แต่ทั้งนี้ การปรับค่า Gain ที่แบบจำลอง ก็ยังต้องมีค่าที่เหมาะสมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่5
บทสรุปและปัญหาที่เกิดขึ้น

5.1 บทสรุป

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบ และการสร้างแบบจำลองการควบคุมกระบวนการ โดยใช้สมการคณิตศาสตร์จากกระบวนการจริง เพื่อใช้ในการทดลองของการควบคุมกระบวนการโดยการปรับค่าของพารามิเตอร์พีไอดี เพื่อความสะดวกในที่จะการทดลอง และจะได้ลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการจริง เนื่องจากการปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดีนั้น ใช้วิธีการลองผิดลองถูก(Trial and Error) ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายแก่กระบวนการได้ง่ายมาก และจากการสอบการทำงาน พบว่า แบบจำลองการควบคุมกระบวนการ (Analog Process Simulate) ที่ได้สร้างขึ้นนี้ สามารถที่จะใช้แทนกระบวนการควบคุมระดับได้ดี และเมื่อเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นที่เอาท์พุท ก็มิได้ทำให้ตัวของระบบเกิดความเสียหายแต่อย่างใด และยังให้ผลการทดลองเหมือนกับกระบวนการจริง รวมทั้งสามารถสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์ได้อย่างแม่นยำ และสะดวกเป็นอย่างมาก เนื่องจากใช้การติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ทอนุกรม RS – 232 ซึ่งใช้สายสัญญาณเพียง 3 เส้นและต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ได้ทันที

ดังนั้นในการทดลอง จึงควรทำการปรับตั้งค่าที่แบบจำลองฯ ให้มีค่าเหมาะสมด้วย ดังจะได้แสดงการปรับตั้งค่าดังตารางที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 การปรับตั้งค่าที่เหมาะสม

SV	Gain 2 – 100	1st Order	2nd Order	3rd Order
0 – 10 %	*1	>*1	>*1	>*1
10 – 50 %	*1	>*1.5	>*1.5	>*1.5
50 – 100 %	*2	>*1.5	>*1.5	>*1.5
	หรือ *10	>*1	>*1	>*1

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

ในการออกแบบและการสร้างโครงงานแบบจำลองการควบคุมกระบวนการ (Analog-Process Simulation) นั้น ได้เกิดปัญหาขึ้นหลายอย่างทั้งในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และในส่วนของโปรแกรมควบคุมและแสดงผล ปัญหาที่เกิดขึ้นในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจากความผิดพลาดในการออกแบบ ทำให้ต้องแก้ไขวงจรในขณะที่สร้าง ซึ่งทำได้ยาก ดังนั้นจึงต้องระวังในเรื่องนี้ให้มาก นอกจากนี้ ในส่วนของวงจรรับส่งสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์และแบบจำลอง (Interface) มีความเร็วในการรับส่งขอมูลน้อยเกินไป คือ มีค่าความเร็วสัญญาณนาฬิกาเพียง 0.5 มิลลิวินาที (ms) ซึ่งเมื่อต่อวงจร และการเขียนโปรแกรมให้มีการวนรับสัญญาณ 7 ช่องสัญญาณแล้ว จะทำให้สัญญาณแต่ละช่องสัญญาณที่รับเข้ามาเกิดความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณ จึงต้องมีการแก้ไขโปรแกรมด้วยการรับสัญญาณอินพุทเพียงช่องสัญญาณเดียว จึงทำให้ยังแสดงผลได้ครั้งละหนึ่งเอาท์พุทเท่านั้น และเมื่อจะแสดงผลที่เอาท์พุทจุดอื่นนั้น ก็จะต้องมีการต่อสายที่ตัวของแบบจำลองฯ ใหม่ ทำให้การแสดงผลยังไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร ซึ่งการแก้ไขก็คือ การสร้างชุดวงจรรับส่งสัญญาณให้มีความเร็วสูงกว่านี้ จะทำให้การแสดงผลสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Okata, K. **Modern Control Engineering.** 3rd Edition. New Jersey : Prentice-Hall. 1997.

[2] Smith, A.C. and Corripio, A.B. **Automatic Process Control.** New York : John Wiley & Sone. 1985.

[3] Honeycutt, R.A. **Op Amps and Linear Integrated Circuits.** New York : Delmar Publishers. 1988.

[4] Bishop, R.H. **Modern Control System Analysis and Design Using MATLAB.** Texas : The University of Texas at Austin.

[5] ชวพงษ์ สิงหเพทย์ และคณะ. **การควบคุมอัตโนมัติ.** กรุงเทพฯ : ฟิสิกส์เซ็นเตอร์. 2531.

[6] นพดล อินนา. **ทฤษฎีและการคำนวณกลศาสตร์ของไหล.** กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[7] กิตติ ตีรเศรษฐ. **พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุม.** พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2539.

[8] มนัส สังวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. **คู่มือโปรแกรม MATLAB ฉบับสมบูรณ์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : อินโฟเพรส. 2543.

[9] กิตติ ตีรเศรษฐ และ วิทยา ทิพย์สุวรรณพร. **วิศวกรรมระบบควบคุมและระบบควบคุมป้อนกลับ.**

[10] กนกเวทย์ ตั้งพิมลรัตน์, ชยากรณ์ เลี้ยงรื่นรมย์ และ ชัชพล ประเสพโชค. "การจำลองการควบคุมกระบวนการ." ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2531 ภาคเรียนที่ 2 ภาควิชาวิศกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2531.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้