

การออกแบบสมิทพรีดิกเตอร์โดยวิธีแผนผังสัมพันธ์
สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิ

SMITH PREDICTOR DESIGN BY CDM
FOR TEMPERATURE CONTROL SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานที่ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๕๔

KMITL-2011-EN-M-060-003

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบสมิทพรีดิคเตอร์โดยวิธีแผนผังสัมประสิทธิ์
สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิ

SMITH PREDICTOR DESIGN BY CDM
FOR TEMPERATURE CONTROL SYSTEM



T117893



พฤติ พัวเวส
PREUTTI PUAWADE

กท.
พ 4327
2554

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **117893**
วัน,เดือน,ปี... **22 ต.ค. 2554**

12348302
b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KMITL 2011-EN-M-060-003
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SMITH PREDICTOR DESIGN BY CDM
FOR TEMPERATURE CONTROL SYSTEM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะที่ออกจากรีpositor ของหน่วยงานนี้ไปอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL 2011-EN-M-060-003



COPYRIGHT 2011

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบสมิทพรีดิคเตอร์โดยวิธีแผนผังสัมพันธ์สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิ
Thesis Title Smith Predictor Design by CDM for Temperature Control System
นักศึกษานายพลฤทธิ พัวเวส
รหัสประจำตัว 51060808
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2011-EN-M-060-003

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.สุพรรณ กุลพาณิชย์	
รศ.ดร.สุรพันธ์ ชัยม่น	
ผศ.ดร.พิสิฐ บุญศรีเมือง	
รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554 เวลา 11.00 -13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุขชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบสมิทพรีดิกเตอร์โดยวิธีแผนผังสัมพันธ์สำหรับ
ระบบควบคุมอุณหภูมิ

นักศึกษา

นายพฤติ พัวเวส

รหัสนักศึกษา

51060808

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมการวัดคุม

พ.ศ.

2554

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ

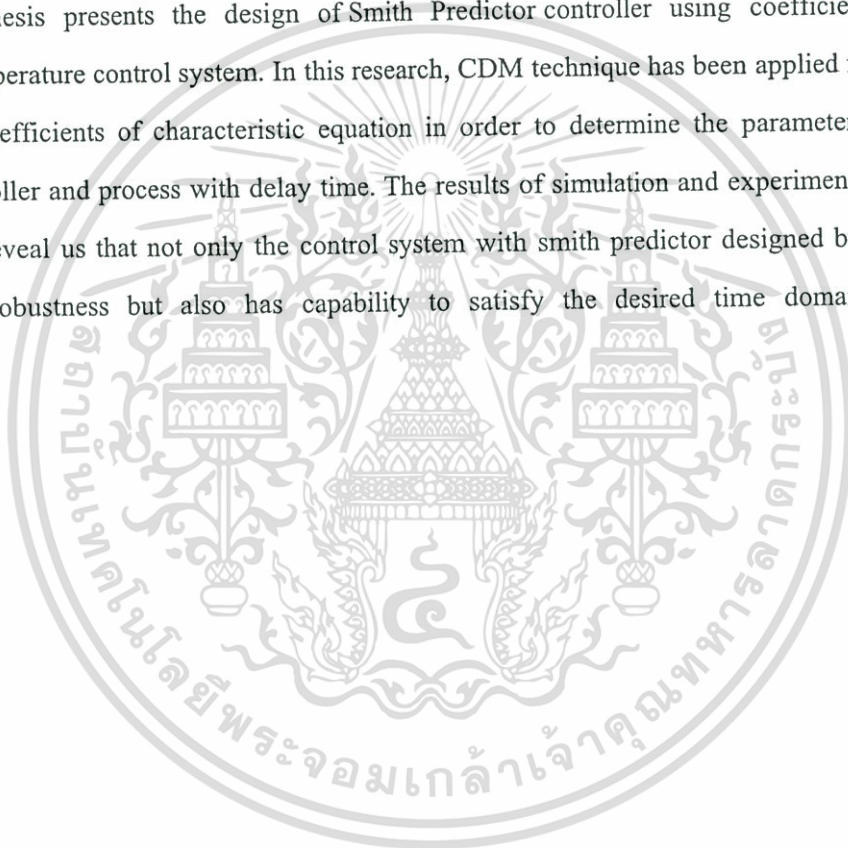
บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการออกแบบตัวควบคุมสมิทพรีดิกเตอร์ โดยใช้วิธีแผนผังสัมพันธ์ สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งในงานวิจัยนี้ เทคนิคแผนผังสัมพันธ์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ สำหรับการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะอย่างเหมาะสมเพื่อใช้ในการหาค่าของ พารามิเตอร์ของตัวควบคุมสมิทพรีดิกเตอร์และกระบวนการแบบมีเวลาไร้ผลตอบสนอง ผลการจำลอง และการทดลองกับกระบวนการเตาอบขนาดเล็กแสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมแบบสมิทพรีดิกเตอร์ที่ถูก ออกแบบ โดยวิธีแผนผังสัมพันธ์เป็นระบบที่มีเสถียรภาพ มีความคงทน และยังสามารถให้ ผลตอบสนองทางโดเมนเวลาตามข้อกำหนดที่ต้องการ

Thesis Title	Smith Predictor Design by CDM for Temperature Control System
Student	Mr. Preutti Puawade
Student ID.	51060808
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2011
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Arjin Numsomran

ABSTRACT

This thesis presents the design of Smith Predictor controller using coefficient diagram method for temperature control system. In this research, CDM technique has been applied for properly defining the coefficients of characteristic equation in order to determine the parameters of Smith Predictor controller and process with delay time. The results of simulation and experiment with small oven process reveal us that not only the control system with smith predictor designed by CDM has stability and robustness but also has capability to satisfy the desired time domain response specification.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา และอนุเคราะห์อุปการณืเครื่องมือในการทำงานวิจัยจาก รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และเป็นผู้ที่ปรับวิธีคิดและทัศนคติเกี่ยวกับงานวิจัยและการดำเนินชีวิตให้กับข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมาข้าพเจ้ารู้สึกทราบบซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกคนที่เป็นกำลังใจ

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตศึกษา ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ เกี่ยวกับการศึกษาตลอดมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 กระบวนการเดาอบขนาดเล็ก.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 องค์ประกอบของกระบวนการ.....	5
2.2.1 เตาอบ.....	5
2.2.2 Thermocouple Transmitter :TT-95.....	6
2.2.3 Signal Converter : SC-95.....	9
2.2.4 การ์ด NI USB 6008.....	10
2.2.5 หลอดความร้อน Solid State.....	10
2.3 การถ่ายเทความร้อน.....	11
2.3.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ.....	11
2.3.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา.....	13
2.3.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี.....	14
2.4 โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองวิจัย.....	16
2.4.1 โปรแกรม Matlab.....	16
2.4.2 โปรแกรม LabVIEW.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 บทสรุป	51
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	52
3.1 กล่าวนำ.....	52
3.2 ทฤษฎีการควบคุมแบบ พีไอดี (PID).....	52
3.2.1 การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุมพีไอดี	52
3.2.2 กริยาการควบคุมแบบป้อนกลับ	54
3.3 การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีแผนผังสัมพันธ์ (CDM)	60
3.3.1 คุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CDM.....	60
3.3.2 โครงสร้างของระบบควบคุม.....	61
3.3.3 กระบวนการในการออกแบบตัวควบคุม	63
3.3.4 การออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CDM	65
3.3.5 เงื่อนไขเสถียรภาพของวิธี CDM	66
3.3.6 แผนผังสัมพันธ์	67
3.3.7 การเลือกพารามิเตอร์ของวิธี CDM.....	69
3.3.8 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของวิธี CDM.....	71
3.4 ทฤษฎีของ Smith Predictor.....	76
3.5 ทฤษฎีการควบคุมแบบจำลองภายใน (IMC).....	77
3.5.1 วิธีการของ IMC	77
3.5.2 การออกแบบ IMC	79
3.5.3 การใช้งาน IMC ร่วมกับตัวควบคุม PID	80
3.6 ทฤษฎีการหาแบบจำลองกระบวนการ	83
3.6.1 รูปแบบเอ (Model A : FIT1).....	83
3.6.2 รูปแบบบี (Model B : FIT2).....	84
3.6.3 รูปแบบซี (Model C : FIT3).....	84
3.7 บทสรุป	86
บทที่ 4 วิธีการออกแบบตัวควบคุม	87
4.1 กล่าวนำ.....	87
4.2 การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ	87
4.3 การออกแบบ IMC-PI	89

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การออกแบบ CDM-PI.....	89
4.5 บทสรุป.....	91
บทที่ 5 การจำลองและการทดลอง	92
5.1 กล่าวนำ.....	92
5.2 การจำลองกระบวนการ.....	92
5.3 การทดลองกระบวนการ	99
5.4 เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง	105
5.5 บทสรุป.....	107
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	108
6.1 สรุปผลการวิจัย	108
6.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัยและแนวทางการแก้ปัญหา.....	109
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	109
บรรณานุกรม	110
ภาคผนวก.....	112
ภาคผนวก ก.	113
ภาคผนวก ข.	115
ประวัติผู้เขียน.....	121

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลทางเทคนิคของเตาอบ.....	6
2.2 ข้อมูลทางเทคนิคของ TT95.....	7
2.3 ข้อมูลทางเทคนิคของ SC95.....	9
2.4 ข้อมูลทางเทคนิคของ USB-6008.....	11
2.5 แสดงคุณสมบัติของสายสัญญาณ.....	29
2.6 รูปแบบโมเดล.....	50
3.1 ค่าพารามิเตอร์ในการหาแบบจำลองของแต่ละ โมเดล.....	85
4.1 พารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบ CDM-PI.....	91



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุม.....	2
1.2 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM.....	3
2.1 กระบวนการเดาขนาด.....	5
2.2 ผลของซีเบ็ค.....	6
2.3 ลักษณะของวงจรรภายใน TT95.....	7
2.4 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล.....	8
2.5 ลักษณะของวงจรรภายใน SC 95.....	9
2.6 Block Diagram โครงสร้างภายในของการ์ด.....	10
2.7 ช่วงการนำความร้อนของสารต่างๆ.....	13
2.8 ลักษณะของโปรแกรม Simulink.....	17
2.9 แสดงบล็อกต่างๆ ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Source) และการแสดงสัญญาณ (Sinks).....	18
2.10 แสดงบล็อกต่างๆ ภายในกลุ่มบล็อกของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System).....	18
2.11 แสดงบล็อกต่างๆ ภายในกลุ่มบล็อกการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations).....	19
2.12 แสดงกลุ่มบล็อก Discontinuities และกลุ่ม Signal Routing.....	20
2.13 แสดงหน้าต่างที่ใช้ในการกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Configuration Parameters).....	21
2.14 หน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลอง.....	21
2.15 การเลือกบล็อกที่ต้องการจาก Simulink Library Browser.....	22
2.16 บล็อกของระบบตัวอย่าง.....	23
2.17 การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างบล็อก.....	23
2.18 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของบล็อก.....	24
2.19 ไคอะบล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Transfer Fcn.....	25
2.20 แสดงลักษณะของหน้าต่างพานอล.....	26
2.21 Numerical Control and Indicator.....	26
2.22 Boolean Control and Indicator.....	27
2.23 แสดงการกำหนดอุปกรณ์.....	27
2.24 แสดงหน้าต่างของไดอะแกรม.....	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 การเชื่อมต่อสายสัญญาณ	29
2.26 การใช้โครงสร้างของคำสั่งแบบ Shortcut.....	30
2.27 แสดงเมนูบาร์	30
2.28 แสดง Tools Palette.....	32
2.29 แสดง Control Palette.....	32
2.30 แสดง Function Palette	33
2.31 แสดงทูลบาร์ในหน้าต่างพาเนล	33
2.32 แสดงทูลบาร์ในหน้าต่างไดอะแกรม.....	34
2.33 หน้าต่างบล็อกไดอะแกรม	36
2.34 แสดงการใช้งาน Array แบบ 1 มิติ.....	37
2.35 แสดงวิธีการเพิ่มมิติของอาร์เรย์.....	38
2.36 แสดงการใช้งาน Array Size Function	39
2.37 แสดงการใช้งาน Initialize Array Function	39
2.38 แสดงการใช้งาน Build Array Function	40
2.39 แสดงการใช้งาน Subset Array Function.....	40
2.40 แสดงการใช้งาน Index Array Function	41
2.41 แสดงการใช้งาน Index Array Function กับอาร์เรย์ 2 มิติ.....	41
2.42 แสดงการใช้งาน Cluster	42
2.43 แสดงการสร้างคลัสเตอร์ด้วย Control และ Indicator.....	42
2.44 แสดงการใช้งาน Bundle Function	43
2.45 แสดงการใช้งาน Bundle Function	44
2.46 แสดงการใช้งาน Unbundle Function.....	45
2.47 แสดงคุณสมบัติของ Waveform Chart	46
2.48 แสดงคุณสมบัติของ Waveform Graph.....	46
2.49 แสดงคุณสมบัติของ Waveform Graph.....	47
2.50 Control Design & Simulation Palette	47
2.51 Control Design Palette.....	48
2.52 Create_tf_cont.vi	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยทั่วไป.....	53
3.2 แสดงกิริยาการควบคุมแบบ ON-OFF	54
3.3 แสดงคุณสมบัติของกิริยาการควบคุมแบบ Proportional.....	56
3.4 แสดงผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ Integral	57
3.5 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ Derivative	57
3.6 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ PI (Direct action).....	58
3.7 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ PD.....	59
3.8 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ PI (Direct action).....	59
3.9 โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุม.....	61
3.10 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM.....	61
3.11 แผนผังสัมพันธ์	68
3.12 การเปลี่ยนแปลงของดรชเน็เสถียรภาพและค่าเวลาคงตัวสมมูลย์สอดคล้องกับเสถียรภาพ และผลตอบสนองของระบบ.....	69
3.13 โครงสร้างของ Smith Predictor	76
3.14 ระบบแบบวงรอบเปิด.....	77
3.15 โครงสร้างของ IMC	77
3.16 การลดรูปโครงสร้างของ IMC.....	80
3.17 โครงสร้างของกระบวนการหลังการลดรูป.....	80
3.18 การหาค่าต่างๆ จากผลตอบสนองแบบขั้น โดยใช้ Model A.....	83
3.19 การหาค่าต่างๆ จากผลตอบสนองแบบขั้น โดยใช้ Model B.....	84
3.20 การหาค่าต่างๆ จากผลตอบสนองแบบขั้น โดยใช้ Model C.....	84
3.21 โมเดลกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ผลตอบสนองแบบขั้น.....	85
4.1 ผลตอบสนองทางเอาต์พุตของกระบวนการเตาอบขนาดเล็กแบบวงรอบเปิด.....	88
4.2 ระบบการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ.....	88
4.3 โครงสร้างมาตรฐานของวิธีแผนผังสัมพันธ์.....	90
5.1 โปรแกรมในการจำลองกระบวนการ.....	92
5.2 ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 2.5$ (ก) คือ Process Variable (ข) คือ Manipulate Variable.....	93

5.3	ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 5$ (ก) คือ Process Variable	
	(ข) คือ Manipulate Variable	94
5.4	ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 7.5$ (ก) คือ Process Variable	
	(ข) คือ Manipulate Variable	95
5.5	ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 10$ (ก) คือ Process Variable	
	(ข) คือ Manipulate Variable	96
5.6	เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบเมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 2.5, 5, 7.5, 10$ ตามลำดับ.....	97
5.7	เปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่าง CDM-PI กับ IMC-PI เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 10$	98
5.8	โปรแกรมในการทดลองกระบวนการ.....	99
5.9	ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 2.5$ (ก) คือ Process Variable	
	(ข) คือ Manipulate Variable	100
5.10	ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 5$ (ก) คือ Process Variable	
	(ข) คือ Manipulate Variable	101
5.11	ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 7.5$ (ก) คือ Process Variable	
	(ข) คือ Manipulate Variable	102
5.12	ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 10$ (ก) คือ Process Variable	
	(ข) คือ Manipulate Variable	103
5.13	เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบเมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 2.5, 5, 7.5, 10$ ตามลำดับ.....	104
5.14	เปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่าง CDM-PI กับ IMC-PI เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 10$	104
5.15	เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 2.5$	105
5.16	เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 5.0$	105
5.17	เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 7.5$	106
5.18	เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 10$	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สมิทพรีดิคเตอร์ [1] เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพสูงในการชดเชยช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง (Dead-Time) ทำให้กระบวนการมีเสถียรภาพ ประโยชน์หลักๆ ของวิธีนี้คือการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมกระบวนการที่มีช่วงเวลากาหน่วง อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ได้กล่าวถึงเสถียรภาพในระบบที่มีความไม่แน่นอน ระบบที่ไร้เสถียรภาพ และระบบที่มีตัวแปรหน่วง. Furukawa และ Shimemura [2] ได้เพิ่มโครงสร้างการสังเกตการณ์, Watanabe และ Ito [3] ได้เปลี่ยนกระบวนการที่รู้ค่าโดยความต่างกันของโมเดลกระบวนการ, Gawthrop [4] ใช้การประมาณค่าแบบสแควร์ วิธีการง่ายๆ ในการประยุกต์ใช้งานตัวควบคุมแบบปรับตัวเองได้สำหรับกระบวนการอันดับหนึ่งได้ถูกนำเสนอในโครงสร้างการควบคุมแบบสมิทพรีดิคเตอร์ [5], Huang [6] ได้ศึกษาวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวเองได้ ซึ่งใช้เวลารวมอนันต์ของฟังก์ชันกำลังสองเป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของระบบโดยอ้างถึงการแก้ปัญหาทำให้เสถียรภาพที่เกี่ยวข้องกับความซับซ้อนของสมิทพรีดิคเตอร์, Hamachi *et al* [7] เสนอการออกแบบ Smith Predictor โดยวิธีแผนผังสัมประสิทธิ์ (CDM) เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีขึ้น [8], วิธีแผนผังสัมประสิทธิ์ (CDM) [9] เป็นวิธีการออกแบบแบบที่ชคณิต ซึ่งการออกแบบนั้นอยู่บนพื้นฐานขนาดที่สัมพันธ์กันของค่าสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะ (Characteristic Polynomial) วัตถุประสงค์ในการออกแบบก็คือต้องการสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) ที่เหมาะสม ดังนั้นวิธีนี้จึงดูเหมือนกับเป็นวิธีการวางโพลโดยอ้อม (Indirect Pole Placement Method) โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบด้วยวิธี CDM จะประกอบไปด้วยค่าดัชนีเสถียรภาพ γ และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ซึ่งพารามิเตอร์ของวิธี CDM นี้จะใช้สำหรับทำการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ วิธี CDM จะใช้สมการพหุนามแสดงแทนระบบ โดยเศษ (Numerator) และส่วน (Denominator) ของฟังก์ชันถ่ายโอนจะพิจารณาแยกกัน ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นทำได้โดยการกำหนดสมการคุณลักษณะหรือสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด โดยพิจารณาข้อกำหนดด้านสมรรถนะ (Performance Specification) ของระบบควบคุม และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากวิธี CDM จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากตัวควบคุมและกระบวนการ เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

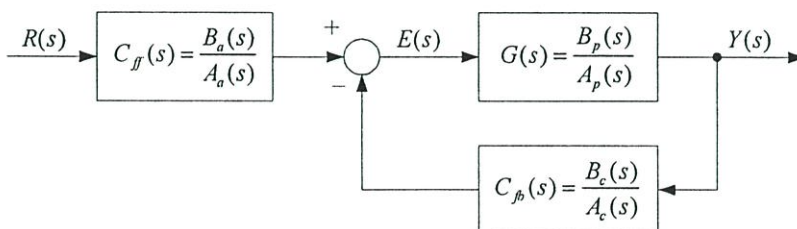
1. ศึกษาการทำงานและหาแบบจำลองกระบวนการเตาอบขนาดเล็ก
2. ศึกษาโครงสร้างของ Smith Predictor
3. ศึกษาวิธีการทำงานแบบวงรอบการควบคุมภายใน
4. ศึกษาและออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังสัมประสิทธิ์

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

วัตถุประสงค์ของการควบคุมในทางอุดมคติ คือต้องการให้ค่าเอาต์พุตของกระบวนการแปรตามค่าเป้าหมาย แต่ในความเป็นจริงแล้วทำได้ยาก จึงจำเป็นจะต้องมีการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้ค่าที่เราต้องการ ซึ่งตัวควบคุมส่วนใหญ่ที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายคือตัวควบคุมแบบพีไอดี สำหรับกระบวนการเตาอบขนาดเล็กเป็นกระบวนการที่มีค่า Time-Delay จึงทำให้ตัวควบคุมดังกล่าวมีปัญหาในการควบคุม ดังนั้นหากลดค่า Time-Delay ของกระบวนการลงได้ตัวควบคุมที่ออกแบบก็สามารถควบคุมกระบวนการได้ตามปกติ ซึ่งวิธีการลด Time-Delay ผู้วิจัยได้นำเสนอทฤษฎี Smith Predictor เพื่อช่วยลด Time-Delay

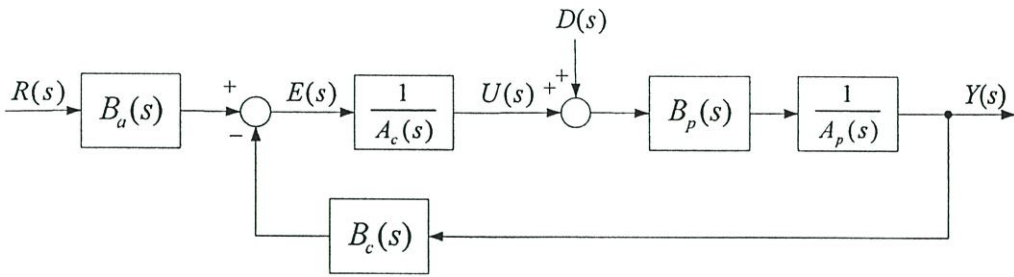
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีแผนผังสัมประสิทธิ์ เป็นวิธีการออกแบบแบบพีชคณิต ซึ่งการออกแบบนั้นอยู่บนพื้นฐานขนาดที่สัมพันธ์กันของค่าสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะ (Characteristic Polynomial) วัตถุประสงค์ในการออกแบบก็คือต้องการสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) ที่เหมาะสม ดังนั้นวิธีนี้จึงดูเหมือนกับเป็นวิธีการวางโพลโดยอ้อม (Indirect Pole Placement Method) โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบด้วยวิธี CDM จะประกอบไปด้วยค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ซึ่งพารามิเตอร์ของวิธี CDM นี้จะใช้สำหรับทำการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 จากรูปจะเห็นได้ว่าระบบควบคุมประกอบไปด้วยกระบวนการ $G(s) = B_p(s)/A_p(s)$ ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ $C_{fb} = B_c(s)/A_c(s)$ ในลูปป้อนกลับ และตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า $C_{ff} = B_a(s)/A_a(s)$



รูปที่ 1.1 โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM

เพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน โครงสร้างระบบควบคุมสามารถทำให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายได้โดยให้ $A_c(s) = A_c(s)$ แสดงได้ดังรูปที่ 1.2 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบนี้เรียกว่า โครงสร้างระบบควบคุมแบบ 2 องศาอิสระ (Two Degree of Freedom: 2DOF) และเป็นโครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (Single Input Single Output: SISO) โดย $B_p(s)$ และ $A_p(s)$ คือสมการพหุนามของกระบวนการ $B_c(s)$, $A_c(s)$ และ $B_a(s)$ คือสมการพหุนามของตัวควบคุม

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอคือวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีแผนผังสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method: CDM) กับวิธี แบบจำลองภายในหรือ Internal Model Controller (IMC) ซึ่งวิธีแบบจำลองภายในถือว่าเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมร่วมกับโครงสร้างแบบ Smith Predictor โดยการออกแบบตัวควบคุมของทั้งสองวิธีจะอยู่ภายใต้โครงสร้างแบบ Smith Predictor ซึ่งจะใช้วิธีทั้งสองมาออกแบบเพื่อหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller)

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยเทคนิคของ Smith Predictor และวิธีแผนผังสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method: CDM) พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับวิธีแบบจำลองภายใน (Internal Model Controller: IMC) โดยใช้โปรแกรม MatLab สำหรับจำลองกระบวนการและใช้โปรแกรม LabVIEW สำหรับทดลองกระบวนการจริง โดยทำการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการเตาอบขนาดเล็ก

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กระบวนการเดาอบขนาดเล็ก ซึ่งจะกล่าวถึงองค์ประกอบทั้งหมดของกระบวนการ ทฤษฎีของความร้อน และโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย กล่าวถึงทฤษฎีทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ไม่ว่าจะเป็น ทฤษฎีของแบบจำลองภายใน ทฤษฎีตัวควบคุมแบบพีไอดี ทฤษฎีการหาโมเดลของกระบวนการและ ทฤษฎีแผนผังสัมพันธ์

บทที่ 4 วิธีการออกแบบตัวควบคุม กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการการหาโมเดลของกระบวนการ ออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีแบบจำลองภายในและการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีแผนผังสัมพันธ์

บทที่ 5 การจำลองและการทดลอง กล่าวถึงขั้นตอนจำลองกระบวนการและวิธีการทดลอง ทั้งหมดและนำเสนอผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ สรุปปัญหาที่พบในงานวิจัยพร้อมทั้งเสนอแนะ แนวทางแก้ปัญหาและแนวทางการพัฒนา

บทที่ 2

กระบวนการเตาอบขนาดเล็ก

2.1 กล่าวนำ

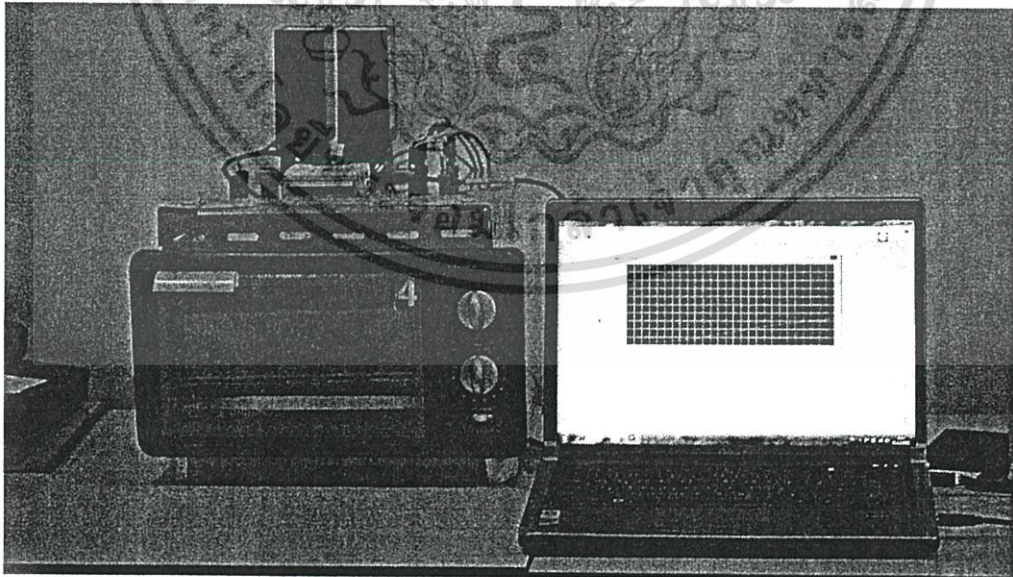
ในการควบคุมกระบวนการใดๆ ผู้ควบคุมหรือนักวิจัยจำเป็นต้องเรียนรู้และศึกษากระบวนการนั้นเป็นอย่างดี ทั้งในแง่ของโครงสร้าง พฤติกรรมการทำงาน องค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ ก่อนจะนำไปวิเคราะห์และออกแบบในขั้นตอนต่อไป ดังนั้นในบทนี้จะขอกกล่าวถึงกระบวนการกระบวนการเตาอบขนาดเล็กโดยละเอียด รวมไปถึงอุปกรณ์ต่อพร้อมทั้งหมด นอกจากนี้แล้วยังกล่าวถึงโปรแกรมที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ด้วย ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.2 องค์ประกอบของกระบวนการ

องค์ประกอบของกระบวนการเตาอบขนาดเล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

2.2.1 เตาอบ

เตาอบเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งภายในเตาอบมีลักษณะโครงสร้างของเตาอบแสดงดังรูปที่ 2.1 เตาอบมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม มีฝาเปิด-ปิดเตาอยู่ด้านหน้าทางด้านขวามือ มีปุ่มตั้งเวลาและปุ่มเลือกหลอดความร้อน ภายในประกอบไปด้วยชั้นวางสำหรับใส่โหลด มีภาคใส่โหลด (น้ำ) ขนาด 1500 cm^3 พร้อมทั้งหลอดโซลิดสเตตให้ความร้อนจำนวนสองหลอดให้กำลังงานสูงสุดหลอดละ 325 W



รูปที่ 2.1 กระบวนการเตาอบขนาดเล็ก

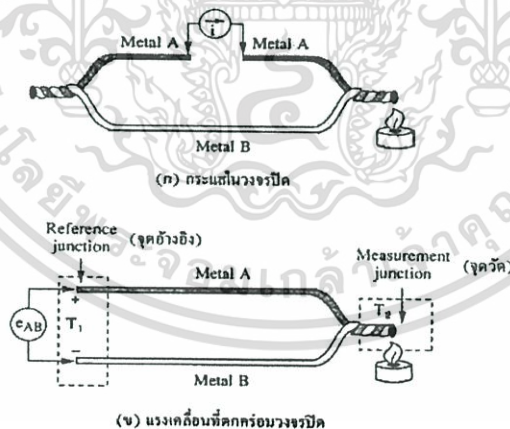
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลทางเทคนิคของเตาอบ

รายละเอียด	คุณสมบัติ
เตาเอาไฟฟ้า Turbora รุ่น	TGO-07
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	650 W
ความถี่คลื่นไฟฟ้า	50 Hz
ฮีทเตอร์บน	325 W
ความจุเครื่อง	7 L
ฮีทเตอร์ล่าง	325 W
น้ำหนักโดยประมาณ	2.9 Kg.
แรงเคลื่อนไฟฟ้า	220 V

2.2.2 Thermocouple Transmitter : TT-95

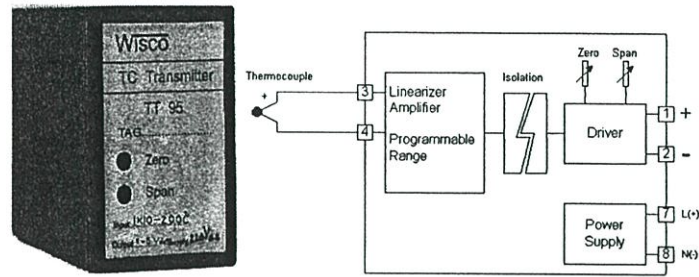
เทอร์โมคัปเปิล คือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (EMF) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ชนิด (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่า จุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้เรียกว่า จุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิแตกต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ค้นพบโดย Thomas Seebeck



รูปที่ 2.2 ผลของซีเบ็ค

หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล คือ รับค่าความร้อนมาจากเตาอบซึ่งเทอร์โมคัปเปิลจะแสดงค่าออกมาในหน่วยมิลลิโวลต์ นำมาต่อเข้ากับ TT-95 แล้วทำการแปลงสัญญาณออกมามีค่าเท่ากับ 1 ถึง 5 โวลต์ เพื่อส่งสัญญาณไปยังการ์ด USB 6008 และลักษณะของวงจรภายใน TT-95 ดังแสดงในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



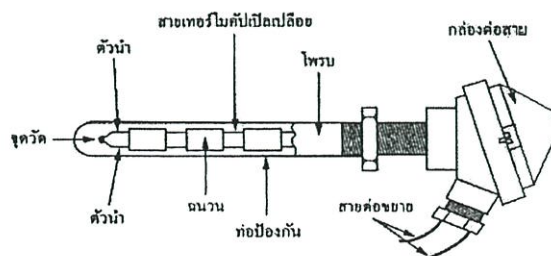
รูปที่ 2.3 ลักษณะของวงจรภายใน TT95

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางเทคนิคของ TT95

รายละเอียด	คุณสมบัติ
Thermocouple Input	ย่านการใช้งานของ Type K 0 ถึง 200 °C
Cold Junction Compensation	0 ถึง 50 °C
Linearity	< ± 0.2% ของ span
Output	4 ถึง 20 มิลลิแอมป์
Power Supply	220 VAC
Ambient Temperature	0 ถึง 50 °C
Isolation Voltage	500 VAC
Connection	Plug -11 pins socket
Mounting	Wall or DIN rail
Dimension	W50×H70×D130 mm

■ โครงสร้าง (Construction)

โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล มีลักษณะดังรูปที่ 2.4 โดยมีลักษณะดังนี้ คือ มีความต้านทานต่ำ ให้สัมประสิทธิ์อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงๆ ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่นำไปใช้วัดค่า และเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตัวฝักหรือท่อป้องกันส่วนมากจะทำจากสเตนเลส ความไวของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับความหนาของท่อป้องกัน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ ย่านการใช้งาน (Range)

ย่านอุณหภูมิการใช้งานและความไวในการวัดของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวจะแตกต่างกันตามแต่ละสมาคมจะกำหนด ในส่วนที่สำคัญ คือ ค่าแรงเคลื่อนที่ออกมาจากแต่ละอุณหภูมิ จะต้องอ้างอิงกับตารางค่ามาตรฐานของแต่ละสมาคมที่ใช้ให้ถูกต้องเป็นเอกภาพเดียวกันหมดทั้งระบบ

■ เวลาตอบสนอง (Time Response)

เวลาตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับขนาดของสายและวัสดุที่นำมาทำท่อป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล

■ การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning)

ปกติแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลจะมีขนาดเล็กมากจึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ขยายความแตกต่างที่มีอัตราขยายสูงๆ

■ การใช้งานเทอร์โมคัปเปิลชนิด K นั้น มีดังนี้

1. ขั้วลบของเทอร์โมคัปเปิลจะเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (เหล็กที่เป็นสารแม่เหล็ก) ที่อุณหภูมิห้องแต่ที่จุดคิวรีของมัน (curie point คือ อุณหภูมิที่มันเปลี่ยนจากคุณสมบัติเหล็กไปเป็นแม่เหล็ก) อยู่ในช่วงที่ใช้งานพอดี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางเอาต์พุตอย่างทันทีทันใด ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าจุดคิวรีดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะผสม จุดคิวรีนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติจากเทอร์โมคัปเปิลตัวหนึ่งให้เป็นเทอร์โมคัปเปิลอีกตัวหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องทดลองหาการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนที่ไม่ทราบค่า ณ อุณหภูมิที่เราไม่ทราบค่านี้

2. ที่อุณหภูมิสูงๆ (ช่วง 200°C ถึง 600°C) เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K จะมีผลของ ฮีสเตอร์รีซิสเกิดขึ้นขณะที่อ่านค่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและในช่วงที่อุณหภูมิลดลง ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่สามารถจะคาดเดาการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนได้

3. ที่อุณหภูมิ 1000°C ขั้วของเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K จะเกิดออกไซด์ เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อน

4. การใช้โคบอลต์เป็นโลหะผสม สำหรับเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K จะทำให้เกิดปัญหาในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์หรือในพื้นที่อื่นๆที่มีฟลักซ์นิวตรอนสูงๆ ธาตุบางตัวจะรับเอาการปลดปล่อยนิวเคลียร์ จึงทำให้เปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางด้านเอาต์พุต

รหัสสีสำหรับสายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ขั้วบวกจะเป็นสีเขียว ขั้วลบจะเป็นสีขาว

ข้อดีแบบ K

1. เป็นแบบที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด
2. สำหรับการวัดอุณหภูมิช่วงสั้น ๆ จะวัดได้จาก -180°C ถึงประมาณ $1,350^{\circ}\text{C}$
3. สามารถใช้วัดในงานที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซิง หรือ สภาวะแบบเฉื่อย (inert) ได้ดีกว่าแบบอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

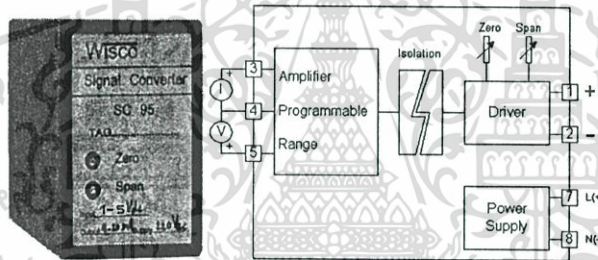
4. สามารถใช้กับสภาพงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้ดี
5. ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่นๆ และมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในการวัดเทอร์โมคัปเปิลด้วยกัน

ข้อเสียแบบ K

1. ไม่เหมาะกับการวัดที่ต้องสัมผัสกับปฏิกิริยาเคมีและออกซิไดโดยตรง
2. ไม่เหมาะกับการงานที่มีไอของซัลเฟอร์
3. ไม่เหมาะกับการสภาพงานที่เป็นสูญญากาศ (ยกเว้นจะใช้ในช่วงเวลาสั้นๆ)
4. หลังการใช้งานไป 30 ปี ทำให้ส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไป เป็นผลทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไป

2.2.3 Signal Converter : SC-95

SC-95 เป็นอุปกรณ์ที่รับสัญญาณจากการ์ด USB 6008 แล้วแปลงสัญญาณจาก 1 ถึง 5 โวลต์เป็น 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เพื่อส่งต่อไปควบคุมฮีทเตอร์ของเตาอบและลักษณะของวงจรภายใน SC-95 ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของวงจรภายใน SC 95

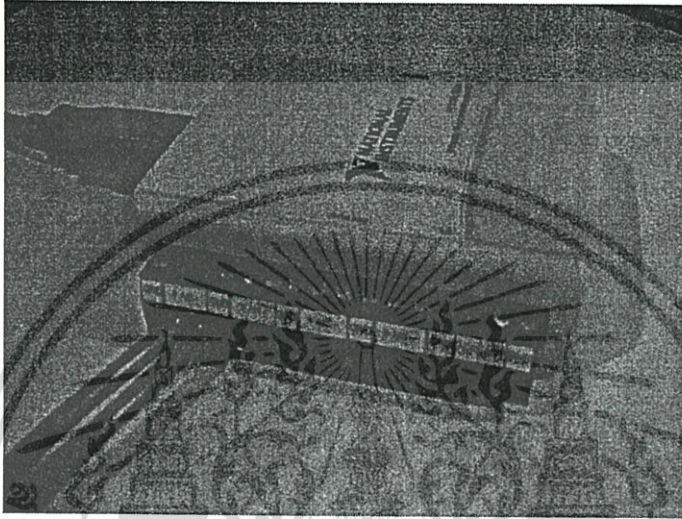
ตารางที่ 2.3 ข้อมูลทางเทคนิคของ SC-95

รายละเอียด	คุณสมบัติ
Input Voltage	Range 1 ถึง 5 โวลต์
Linearity	< $\pm 0.2\%$ ของ span
Output	4 ถึง 20 มิลลิแอมป์
Power Supply	220 VAC
Ambient Temperature	0 ถึง 50 oC
Isolation Voltage	500 VAC
Connection	Plug -11 pins socket
Mounting	Wall or DIN rail
Dimension	W50×H70×D130 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การ์ด NI USB 6008

การ์ด NI USB 6008 เป็นการ์ด A/D และ D/A ที่สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB เป็นของบริษัท National Instrument (NI) มีพอร์ตอะนาล็อกอินพุต 8 ช่อง ขนาด 12 bit 10 kS/s และพอร์ตอะนาล็อกเอาต์พุต 2 ช่อง ขนาด 12 bit 150 kS/s เชื่อมต่อกับโปรแกรม LabVIEW โดยใช้ NI-DAQmx เป็นไดรเวอร์ ลักษณะของการ์ด NI USB 6008 แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 Block Diagram โครงสร้างภายในของการ์ด

2.2.5 หลอดความร้อน Solid State

หลอดความร้อน Solid state เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนโดยใช้หลักการการแผ่รังสีอินฟราเรดทำให้ได้ความร้อนสูงในเวลาที่รวดเร็ว ต่อใช้งานกับแรงดันไฟฟ้า 220 VAC โดยมีกระแส 4-20 mA เป็นตัวคอยปรับความร้อน เตาอบที่นำมาใช้ในงานวิจัยจะมี หลอดความร้อน Solid state อยู่ 2 หลอด คืออยู่ด้านบนและด้านล่างของเตาอบแต่ละหลอดให้พลังงานความร้อน 325 W จากรูปที่ 2.1 จะสังเกตเห็น หลอดความร้อน Solid State กำลังทำงาน

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลทางเทคนิคของ USB-6008

รายละเอียด	คุณสมบัติ
BUS	USB
Analog Input	8SE/4DI
Input Resolution (bits)	12(bits)
Output Resolution (bits)	12 (bits)
Max Sampling Rate (kS/s)	10 (kS/s)
Input Range (V)	1 ถึง 20 (V)
Analog Output	2 ch
Output Rate	150 Hz
Output Range (V)	0-5V
Digital I/O Lines	12
32-Bit Counter	1
Trigger	Digital

หมายเหตุ SE : single ended , DI : difference

2.3 การถ่ายเทความร้อน

2.3.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ

การนำความร้อนเป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยเคลื่อนที่แบบจลน์ (kinetic motion) เป็นการถ่ายเทความร้อนเฉพาะจากที่หนึ่งเคลื่อนย้ายไปยังอีกที่หนึ่งในเนื้อวัตถุเดียวกันหรืออีกวัตถุหนึ่งก็ตาม ทั้งนี้โดยการแตะหรือสัมผัสกันทางกาย โดยไม่มีการขยับหรือย้ายซึ่งเนื้อวัตถุหรือแม้แต่โมเลกุลของวัตถุ หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุลเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หุยคั่น ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อนไหวอยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก เป็นต้น อันเป็นผลจากการนำหรือถ่ายทอดพลังงานความร้อน โดยอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้ วัตถุแข็งที่บแสงจะมีการเคลื่อนย้ายของความร้อนโดยวิธีการนำเพียงอย่างเดียว การเคลื่อนย้ายของความร้อนในตัวกลางหรือวัตถุที่ไม่เป็นของแข็ง ส่วนมากจะเป็นแบบผสม กล่าวคือ ความร้อนจะเคลื่อนที่หรือถ่ายเทไปด้วยวิธีการนำและการพาไปทั้งสองวิธี และบางลักษณะจะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการแผ่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎความสัมพันธ์ของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง กำหนดจากบิโอต์ (Biot) แต่ต่อมานักฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ โจเซฟ ฟูรีเยร์ (Joseph Fourier) นำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการกำหนดการไหลของความร้อนตามกฎของฟูรีเยร์

กฎของฟูรีเยร์ (Fourier's Law) กล่าวว่าอัตราการไหลของความร้อน q ผ่านวัตถุแข็งเนื้อเดียว (Homogeneous) ใดๆ จะเป็นสัดส่วนตรงกับพื้นที่หน้าตัด A ที่ตั้งฉากกับการไหลของความร้อนนั้น และยังเป็นสัดส่วนตรงกับค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ΔT ที่เทียบกับระยะทาง L ตามแนวการไหลของความร้อนนั้น ซึ่งจะเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ว่า

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad (\text{W}) \quad (2.1)$$

โดยที่ k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุแข็งเนื้อเดียว (Thermal conductivity of material) หน่วยของ k นี้จะเป็น $\text{W/m}\cdot\text{K}$

k/L คือ เรียกว่า Conductance

หรือเขียนความสัมพันธ์ของสมการการนำความร้อนในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียลเป็น

$$-kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{W}) \quad (2.2)$$

$$q_x = -kA \frac{dT}{dX} \quad (\text{W}) \quad (2.3)$$

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{W/m}^2 \quad (2.4)$$

โดยที่

q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x

q_x'' คือ ฟลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก x

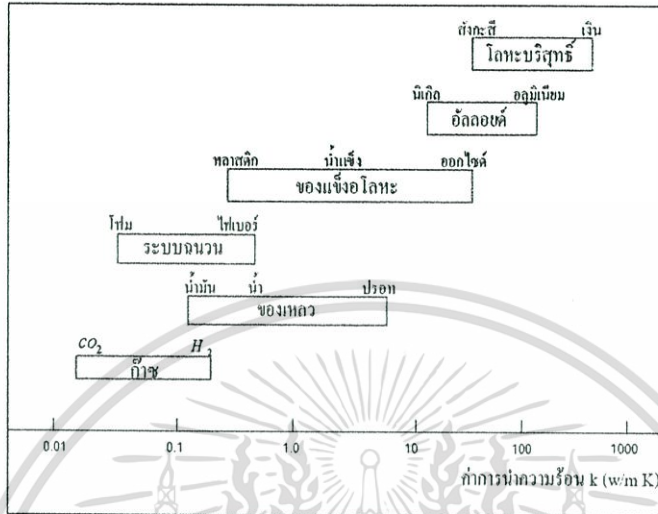
k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ

จากสมการ ถ้าอุณหภูมิลดลงในทิศทางบวกของ x แล้ว dT/dx เป็นลบ ดังนั้น q_x'' หรือ q_x มีค่าเป็นบวก เนื่องจากสมการมีเครื่องหมายลบติดอยู่ เพราะฉะนั้นเครื่องหมายลบจึงต้องใส่ในสมการและเพื่อให้แน่ใจว่า q_x'' หรือ q_x เป็นปริมาณบวก เมื่อการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางบวกของ x ในทางกลับกันเมื่อในทางด้านขวามือของสมการเป็นลบ แสดงว่าการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางลบของ x

จุดประสงค์หลัก ในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหาค่าสนามอุณหภูมิ (Temperature Field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลจากเงื่อนไขซึ่งสอดคล้องกับขอบเขตของมัน นั่นคือ ต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รู้การกระจายของอุณหภูมิ (Temperature Distribution) เมื่อทราบค่านี้ก็จะสามารถหา พลักซ์ความร้อนที่จุดใดๆ ในตัวกลางนั้น จากกฎของฟูริเยร์ (Fourier's Law) การหาค่านี้ทำได้โดยใช้กฎของพลังงาน (Energy Conservation) กับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งระบุกระบวนการถ่ายเทพลังงานและใช้สมการอัตราที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้ จะเป็นสมการ ดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งคำตอบของมันจะให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น



รูปที่ 2.7 ช่วงการนำความร้อนของสารต่างๆ

2.3.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

เป็นปรากฏการณ์ที่ความร้อนถูกถ่ายโอนไปยังของไหลหรือของแข็งโดยตัวกลางที่เป็นของไหลหรือของแข็งในระดับโมเลกุลที่เคลื่อนที่ได้ การเคลื่อนที่ของของไหลเพื่อพาความร้อนนั้นอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลเพื่อพาความร้อนนั้นเพราะผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอีกทีหนึ่งก็ได้ ซึ่งเรียกการพาความร้อนแบบนี้ว่าเป็นการพาความร้อนแบบอิสระหรือแบบธรรมชาติ (Free Convection หรือ Natural Convection) แต่ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลนั้นเกิดจากการบังคับโดยวิธีทางกลไกใดๆ เรียกว่า การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) การถ่ายเทความร้อนอาจจะเกิดผสมกันได้ทั้งการนำและการพา

เมื่อพิจารณาอัตราการพาความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาโดยของไหลจากผิวของวัตถุใดๆ จำเป็นจะต้องเข้าใจปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนจากผิววัตถุไปหาของไหลที่ชั้นชิดผิวเสียก่อน Newton ได้เสนอด้วยความสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา Q จากผนังวัตถุแข็งซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A โดยที่ผนังนั้นมีอุณหภูมิ t_w ส่วนของไหลมีอุณหภูมิ t_f จะเขียนได้ว่า

$$Q = h_c A (t_w - t_f) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเมื่อค่า h_c เรียกว่า Convective Transfer Coefficient เรียกสั้น ๆ ว่า Heat Transfer Coefficient หน่วยเป็น $W/m^2 \cdot K$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_c นี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหลและความเร็วการไหลของของไหลนั้น ปกติแล้วจะต้องหาได้จากการทดลอง สมการบนนั้นไม่ได้รวมเอาความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี การคำนวณความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีนั้นจะแยกคำนวณต่างหาก บ่อยครั้งลักษณะการถ่ายเทความร้อนของระบบทางวิศวกรรมพบว่าความร้อนจากการแผ่รังสีจะน้อยเมื่อเทียบกับความร้อนจากการนำและการพา จึงมักจะไม่นำมาพิจารณาทั้งนี้หมายถึง อุณหภูมิของแหล่งความร้อนไม่สูงมากนัก แต่ถ้าอุณหภูมิผิวสูงมากๆ แล้วความร้อนจากการแผ่รังสีก็ต้องนำมาพิจารณา

2.3.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

มีการค้นพบว่าวัตถุใดก็ตามจะต้องแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetic Radiation) ครอบคลุมที่ตัววัตถุนั้นยังมีอุณหภูมิไม่ถึงศูนย์สัมบูรณ์ (Absolute Zero Temperature) พบว่ายิ่งอุณหภูมิสูงก็จะมี การแผ่รังสีมาก ถ้าเอาวัตถุสองชิ้นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาใกล้กันทำให้ต่างก็อยู่ในเขตอิทธิพลของการแผ่รังสีของกันและกันแล้ว วัตถุชิ้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะเป็นฝ่ายรับรังสีตัวมากกว่ารังสีที่ตัวเองแผ่ออกไป ดังนั้นพลังงานที่สะสมอยู่ภายในของวัตถุชิ้นอุณหภูมิต่ำนั้นก็จะสะสมมากขึ้นกว่าเดิม ขณะเดียวกัน เมื่อเวลาผ่านไปวัตถุชิ้นที่มีอุณหภูมิสูงกว่าก็มีพลังงานที่สะสมอยู่ภายในลดลง คือ เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการถ่ายพลังงานโดยโฟตอน (Photon) จากวัตถุหนึ่ง ไปยังอีกวัตถุหนึ่ง การแผ่รังสีเนื่องจากเป็นพลังงานในรูปรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนจะไม่ต้องการตัวกลางในการเดินทางไปของพลังงาน โดยจะผ่านพลังงานนี้ไปได้แม้ช่องว่างที่เป็นสุญญากาศ การแผ่รังสีความร้อนจะพุ่งออกจากแหล่งเป็นแนวตรงความเร็วเท่ากับสามเท่าของความเร็วแสง โดยทั่วไปวัตถุที่เป็นของแข็งจะรับหรือส่ง การแผ่รังสีได้ไม่ว่าจะเป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นใดๆ ส่วนของไหลหรือแก๊สบางชนิดจะแผ่หรือรับรังสีได้ที่มีความยาวคลื่นจำกัดเฉพาะค่าหนึ่ง

เมื่อพิจารณาของแข็งชิ้นหนึ่งเริ่มต้นที่อุณหภูมิ T_s ซึ่งสูงมากกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม T_{sur} โดยรอบๆ ของแข็งนี้เป็นสุญญากาศเนื่องจากของแข็งชิ้นนี้แยกตัวจากผนังสิ่งแวดล้อมโดยสุญญากาศ ดังนั้นจึงไม่มีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการพา อย่างไรก็ตามเราพบว่าของแข็งนั้นจะเย็นตัวลง และในที่สุดเข้าสู่สมดุลกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวมัน การเย็นตัวนี้เกี่ยวข้องกับการลดลงของพลังงานภายในที่เก็บไว้โดยของแข็ง และเป็นผลโดยตรงของการส่งออกของการแผ่รังสีความร้อนจากผิว ในขณะเดียวกันผิวนั้นก็จะรับหรือดูดการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามถ้า $T_s > T_{sur}$ แล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิโดยการแผ่รังสี $q_{r,net}$ จะออกจากพื้นผิว และพื้นผิวก็จะเย็นจนกระทั่ง T_s เข้าสู่ T_{sur}

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายขบวนการเคลื่อนที่ของการแผ่รังสีที่สำคัญมี 2 ทฤษฎี คือ

1. ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Electromagnetic Theory) ซึ่งกล่าวว่า การแผ่รังสีเป็นการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2. ทฤษฎีของ Max Planck ซึ่งกล่าวว่า การแผ่รังสีเป็นการเคลื่อนที่ของโฟตอน (Photon) หรือ ควอนตัม (Quantum) ของพลังงานธรรมชาติของคลื่นรังสีความร้อนแสดงให้เห็นได้ว่า ความยาวคลื่น λ จะเกี่ยวข้องกับความเร็ว ν ของการแผ่รังสี สำหรับการแผ่รังสีซึ่งเคลื่อนที่ในตัวกลางเฉพาะ คุณสมบัติทั้งสองเกี่ยวข้องกันโดย

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.6)$$

โดยที่ c คือ ความเร็วของแสงในตัวกลาง (สำหรับสุญญากาศ $c_0 = 2.998 \cdot 10^8$ m/s)

การแผ่รังสีความร้อนซึ่งปล่อยออกโดยพื้นผิวใดพื้นผิวหนึ่งจะประกอบด้วยความยาวคลื่นหลายๆความยาวคลื่นออกมาพร้อมๆ กัน ขนาดของการแผ่รังสีจะแปรเปลี่ยนตามความยาวคลื่นและลักษณะการแปรเปลี่ยนเรียกว่า spectral เช่น ความสามารถในการปล่อยออกของรังสีที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นเรียกว่า Spectral Emissivity รังสีที่ส่งออกจะประกอบไปด้วย การกระจายที่ไม่สม่ำเสมอ แต่ต่อเนื่องกันของคลื่นโมโนโครเมติกต่างๆ (ความยาวคลื่นเดี่ยว) ตามที่พบขนาดของรังสีที่ความยาวคลื่นใดๆและ Spectral Distribution นั้นจะแปรเปลี่ยนกับธรรมชาติและอุณหภูมิของผิวแผ่รังสี นอกจากนั้นพื้นผิวใดพื้นผิวหนึ่งอาจแผ่รังสีที่ไม่เท่ากันในทิศทางต่างๆ ก็ได้ เช่น อาจแผ่รังสีในแนวตั้งมากกว่าแนวระดับ เป็นต้น ลักษณะการแปรเปลี่ยนของรังสีตามลักษณะทิศทางนี้เรียกว่า Directional เพื่อให้ได้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีที่ต้องการ

การแผ่รังสีเมื่อไปกระทบกับวัตถุใดแล้ว ส่วนหนึ่งของรังสีจะถูกดูดเข้าเก็บไว้ในเนื้อวัตถุ ส่วนหนึ่งจะสะท้อนจากวัตถุ อีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่านตัวเนื้อวัตถุนั้น สัดส่วนของรังสีทั้งหมด เมื่อกำหนดให้เป็นหนึ่งแล้วนั้น ส่วนที่ถูกดูดไว้ในเนื้อวัตถุเรียกว่า Absorptive (α) ส่วนที่สะท้อนไปจากวัตถุเรียกว่า Reflectivity (\mathcal{R}) ส่วนที่ถูกส่งผ่านเนื้อวัตถุเรียกว่า Transitivity (τ) ซึ่งจะเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\alpha + \mathcal{R} + \tau = 1 \quad (2.7)$$

แต่ส่วนมากวัตถุทึบแสงซึ่งก็มักจะเป็นของแข็งและของไหลหลายอย่าง มักจะไม่มีทำให้รังสีที่แผ่มาส่งผ่านเนื้อวัตถุ ถ้าเป็นเช่นนี้แล้ว ค่า $\tau = 0$ จะเขียนได้เป็น

$$\alpha + \mathcal{R} = 1 \quad (2.8)$$

วัตถุในจินตภาพชนิดหนึ่ง วัตถุนี้ไม่มีจริงแต่ถูกกำหนดขึ้นมา ว่าเป็นวัตถุที่จะถูกดูดรับรังสีที่แผ่มากระทบวัตถุนั้นจนหมด วัตถุเช่นนี้เรียกว่า Black Body ซึ่งวัตถุนี้จะมีค่า $\alpha = 1$ และ $\mathcal{R} = 0$

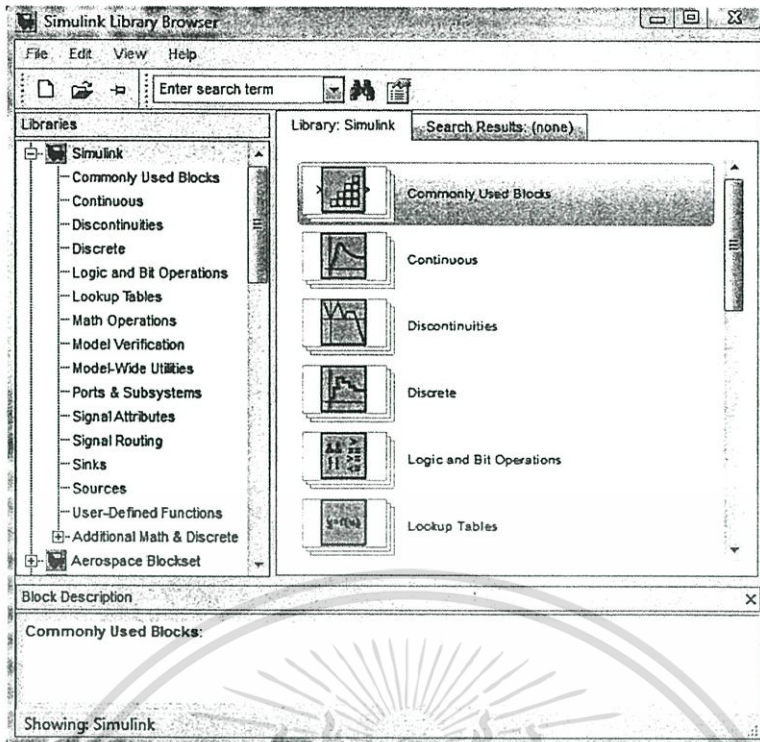
คำว่า Black ไม่ได้หมายความว่าวัตถุนั้นมีสีดำ เมื่อมองด้วยตาเปล่า เพราะวัตถุสีดำจากการมองเห็นนั้น หมายถึงผิววัตถุนั้นๆ ดูแสงที่ไปตกกระทบที่ผิวจนหมดแต่ไม่ได้หมายถึงว่าได้ดูดรังสีความร้อนทั้งหมดที่ตกกระทบ วัตถุบางอย่างดูดรังสีความร้อนที่ตกกระทบได้สูงมากแต่ดูแสงเข้าตัวเมื่อตกกระทบได้น้อยเช่นหิมะจะถือว่าเข้าใกล้ความเป็น Black Body เพราะสามารถดูดรังสีความร้อนที่มาตกกระทบได้สูง โดยมีค่า $\alpha = 0.985$ เป็นต้น

2.4 โปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการวิจัยมีสองโปรแกรมคือ โปรแกรม Matlab และ โปรแกรม LabView โดยที่โปรแกรม Matlab จะถูกนำมาใช้ในการจำลองกระบวนการ ส่วนโปรแกรม LabView นั้นจะนำมาใช้สำหรับทดลองกระบวนการจริง ซึ่งรายละเอียดของแต่ละโปรแกรมอธิบายได้ดังนี้

2.4.1 โปรแกรม Matlab

โปรแกรม Matlab มีเครื่องมือให้เลือกใช้งานมากมาย แต่ในการวิจัยนี้ถูกนำมาใช้ในการจำลองกระบวนการ จึงขอกล่าวถึงเฉพาะส่วนของเครื่องมือที่ใช้สำหรับจำลองกระบวนการเท่านั้น ซึ่งในที่นี้คือ โปรแกรม Simulink เป็นโปรแกรมที่เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยบริษัท Mathworks โดยเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ในส่วนของ Simulink นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้ลักษณะการ โปรแกรมในรูปแบบของ Block Diagram เป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งมักจะพบปัญหาในการหา Closed Form Solution หรือการหาคำตอบเมื่อเทียบกับเวลาในช่วงเวลาใดๆ และเนื่องจากระบบทางวิศวกรรมโดยส่วนใหญ่จะสามารถอธิบายด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์เช่นกัน ดังนั้น Simulink จะเข้ามามีบทบาทในการทำให้การจำลองการตอบสนองของระบบมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น



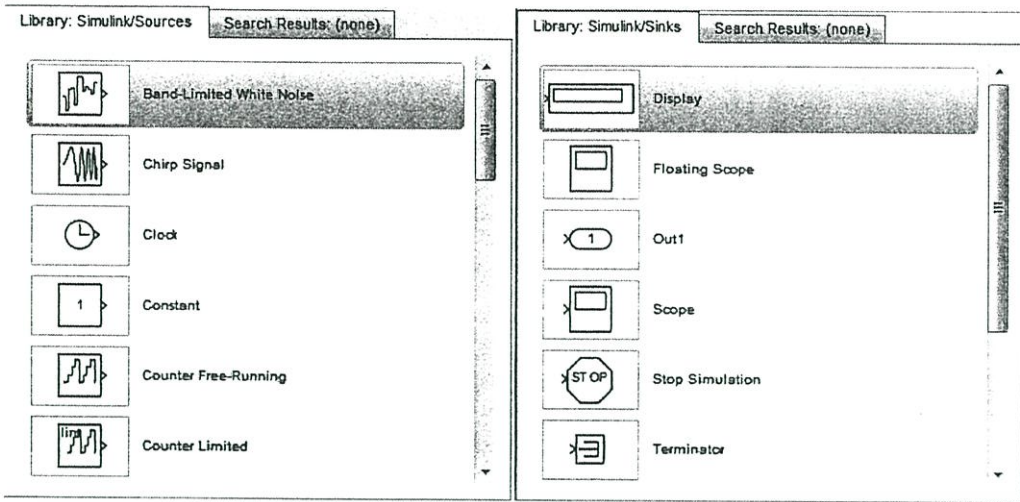
รูปที่ 2.8 ลักษณะของ โปรแกรม Simulink

โปรแกรม Simulink เป็นโปรแกรมที่มีลักษณะการเขียนโดยใช้บล็อกไดอะแกรมของฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งสิ่งสำคัญที่ควรระวังสำหรับการเขียน โปรแกรมในลักษณะนี้คือการกำหนดคุณสมบัติให้กับแต่ละบล็อกนั้นจะต้องถูกต้องไม่เช่นนั้นจะไม่สามารถรันโปรแกรมได้

2.4.1.1 กลุ่มของบล็อกที่ใช้งานในเบื้องต้น

- แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และแหล่งทิ้งสัญญาณ (Sinks)

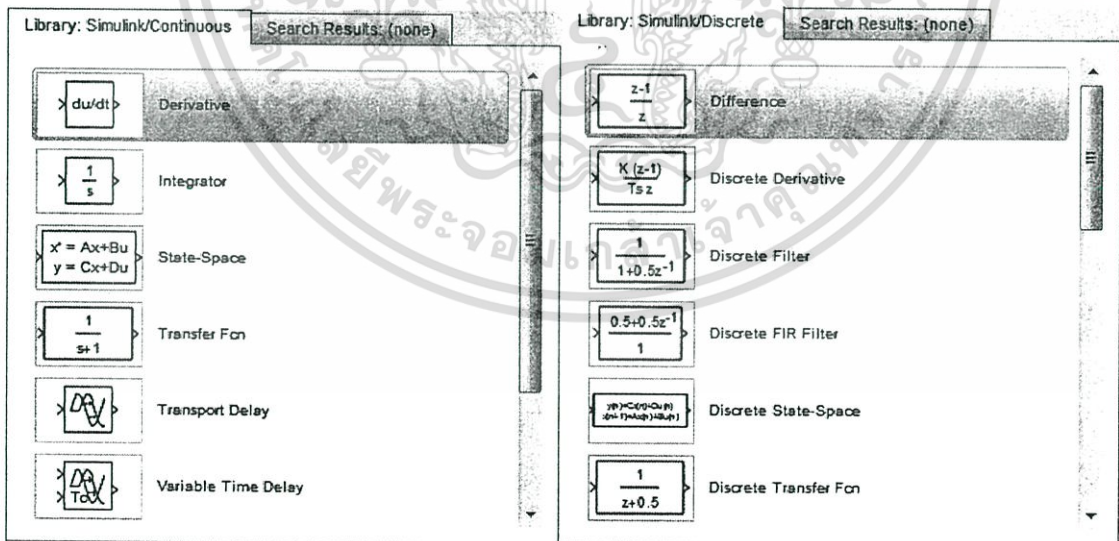
กลุ่มบล็อกแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) ที่กำหนดมาให้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดข้อมูลหรือสัญญาณ ที่มักใช้บ่อยในการวิเคราะห์ระบบทางพลศาสตร์ เช่น แหล่งกำเนิดค่าคงที่ (Constant) แหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ (Sinusoidal Wave) แหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Step หรืออื่นๆ นอกจากนี้ยังมีแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ทำหน้าที่เสมือน Signal Generator รูปที่ใช้ในการทดลองทางวิศวกรรมอื่นๆ หรือแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock) ที่มักจะใช้บ่อยเพื่อ จับเวลาของการจำลองปัญหา หรืออื่นๆ กลุ่มบล็อกแหล่งทิ้งสัญญาณ (Sinks) เป็นกลุ่มบล็อกที่มักจะใช้ในการเก็บสัญญาณที่ต้องการมากกว่าการทิ้งสัญญาณอย่างที่ตั้งชื่อกำหนด โดยทั่วไปแล้วบล็อกที่จะใช้บ่อยคือบล็อกของ Scope ประเภทต่างๆ เพื่อตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในจุดใดๆ ของระบบที่กำลังถูกจำลองในขณะที่กำลังทำการจำลอง หรือบล็อกที่เก็บสัญญาณ (To Workspace) เพื่อใช้ในการดำเนินการอื่นๆ ที่พื้นที่ทำงานของ MATLAB รูปที่ 2.9 แสดงบล็อกต่างๆ ของทั้งแหล่งกำเนิด และแหล่งสัญญาณของ Simulink V.7.6



รูปที่ 2.9 แสดงบล็อกต่างๆ ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และบล็อกแสดงสัญญาณ (Sinks)

- ระบบต่อเนื่อง (Continuous) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete)

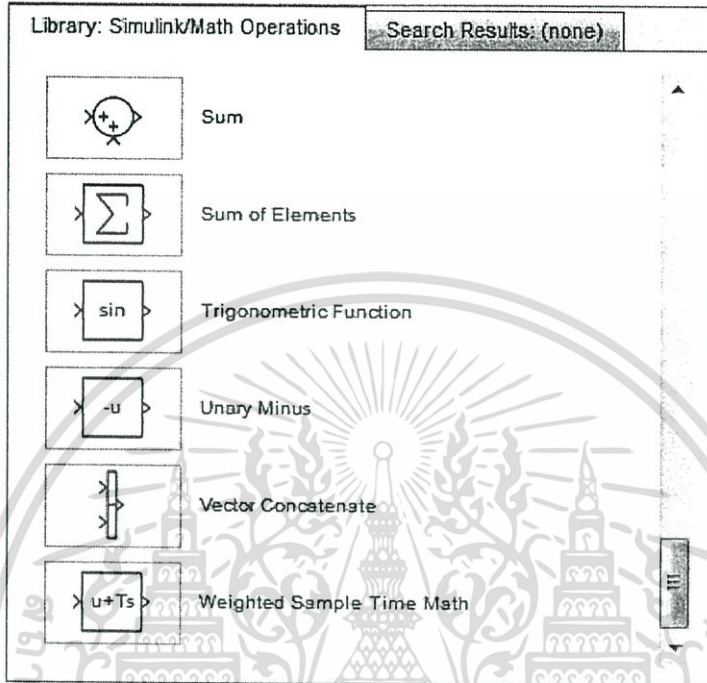
กลุ่มบล็อกของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่มีการใช้ในการจำลองปัญหาของระบบพลศาสตร์ทุกระบบ สามารถที่จะถูกวิเคราะห์ในลักษณะของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ซึ่งไม่ว่าระบบจะถูกจำลองในลักษณะใด โปรแกรม Simulink นั้นสามารถตอบสนองต่อลักษณะรูปแบบของระบบได้ในหลายลักษณะ เช่น Transfer Function หรือ Integration Blocks หรือ Delay Blocks หรืออื่นๆ รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะบล็อกที่ใช้ในการกำหนดระบบในลักษณะต่างๆ ของทั้งระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ของ Simulink V. 7.6



รูปที่ 2.10 แสดงบล็อกต่างๆ ภายในกลุ่มบล็อกของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System)

- การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations)

กลุ่มบล็อกการดำเนินการทางคณิตศาสตร์เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่มีการใช้ในการจำลองปัญหาบ้อยกลุ่มบล็อกนี้จะประกอบไปด้วยบล็อกย่อยๆ ที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการต่างๆ ทางคณิตศาสตร์ เช่น การนำสัญญาณมาบวกกัน (Sum) การคูณสัญญาณด้วยค่าคงที่ (Gain) หรืออื่นๆ รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะบล็อกย่อยในกลุ่มบล็อกการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ ของ Simulink V. 7.6



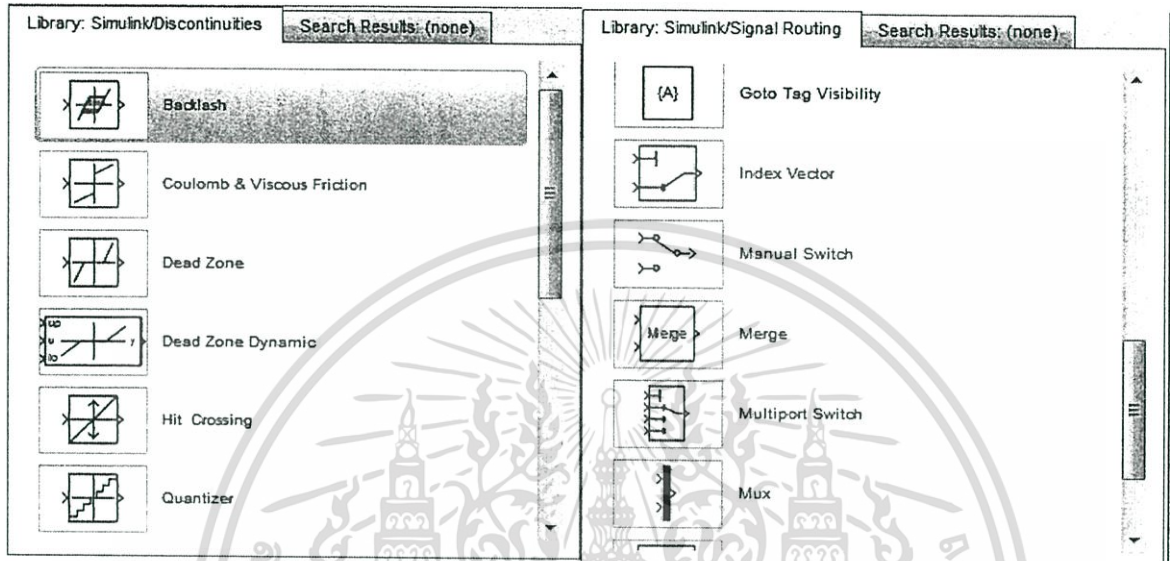
รูปที่ 2.11 แสดงบล็อกต่างๆ ภายในกลุ่มบล็อกการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations)

- ความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities)

ข้อดีของโปรแกรม Simulink คือความสามารถในการจำลองระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear System Simulation) ซึ่งในการหาคำตอบด้วยมือ หรือการหา Closed Form Solution โดยทั่วไปจะเป็นการยากฟังก์ชันหรือลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นที่พบบ่อยคือ Saturation, Signum, Limited Slew Rate หรืออื่นๆ รูปที่ 2.12 แสดงกลุ่มบล็อก Discontinuities ซึ่ง แสดงความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถใช้ในการจำลองปรากฏการณ์ทางวิศวกรรมได้หลายเหตุการณ์ เช่นการใช้ Saturation บล็อก มักจะใช้แทนข้อจำกัดทางกายภาพเช่นขีดจำกัดของแรงดันทางเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าหรือระดับแรงดันสูงสุดในระบบไอครอลิกส์ บล็อก Switches เป็นอีก บล็อกหนึ่งที่ใช้บ่อย เป็นบล็อกที่ใช้ในการจำลองปัญหา IF-THEN เช่นเดียวกับที่พบในการเขียน โปรแกรมโดยทั่วไป บล็อก Slew Rates ใช้ในการจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าทางกายภาพ เช่น ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น

- ทางเดินสัญญาณ (Signal Routing)

ในการจำลองระบบที่มีความซับซ้อน บางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องมีการรับ/ส่งสัญญาณจากส่วนหนึ่งของระบบ ไปสู่อีกส่วนหนึ่งของระบบ ซึ่งการใช้เส้นเชื่อมอาจจะไม่สะดวกในการทำงานซึ่งบล็อกในชุดนี้เป็นประเภท GOTO หรือ FROM บล็อกประเภท Multiplexing จะมีประโยชน์ในการจัดระเบียบของแผนภูมิให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้นรูปที่ 2.12 แสดงกลุ่มบล็อก Signal Routing

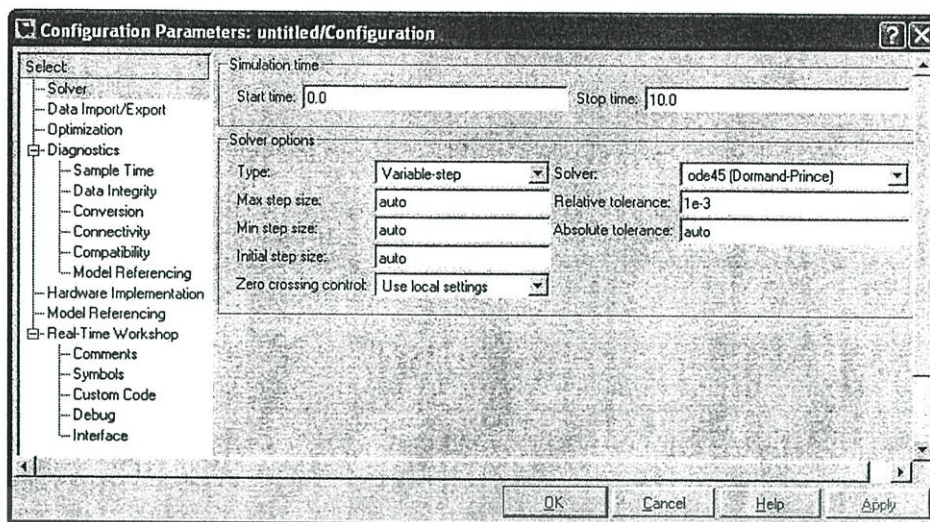


รูปที่ 2.12 แสดงกลุ่มบล็อก Discontinuities และกลุ่ม Signal Routing

- การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Parameters Configuration)

การจำลองปัญหาบนคอมพิวเตอร์จะต้องอาศัยเทคนิคของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในการแก้ปัญหาและหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ สำหรับโปรแกรม Simulink นั้น ระบบในรูปแบบต่างๆ สามารถจำลองทั้งระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous System) และระบบแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ขึ้นอยู่กับลักษณะองค์ประกอบของระบบย่อย การจำลองสามารถกำหนดให้เริ่ม หรือหยุดที่ช่วงเวลา หรือส่วนหนึ่งของเวลาได้ตามกำหนด ข้อสังเกตที่ต้องพึงระวังคือระยะเวลาที่สนใจในการจำลองปัญหา กับระยะเวลาที่ใช้ ในการจำลองปัญหา หรือระยะเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่สนใจจะไม่ตรงกัน เช่นคอมพิวเตอร์อาจใช้ระยะเวลาในการจำลองการตอบสนองในช่วง 10 นาที ของระบบที่สนใจ เพียง 1 วินาที เป็นต้น ในการจำลองแบบปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประเภทที่ Step Size มีค่าไม่คงที่นั้น Step Size ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถกำหนดได้ อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประเภท Step Size คงที่ เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการจำลองปัญหา ทั้งนี้เนื่องจากสามารถระบุช่วงเวลา หรือจุดของเวลาที่สนใจได้อย่างแม่นยำ Step Size ที่ใช้ในการจำลองปัญหาจะต้องมีการกำหนดและจะมีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบพลศาสตร์ที่สนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

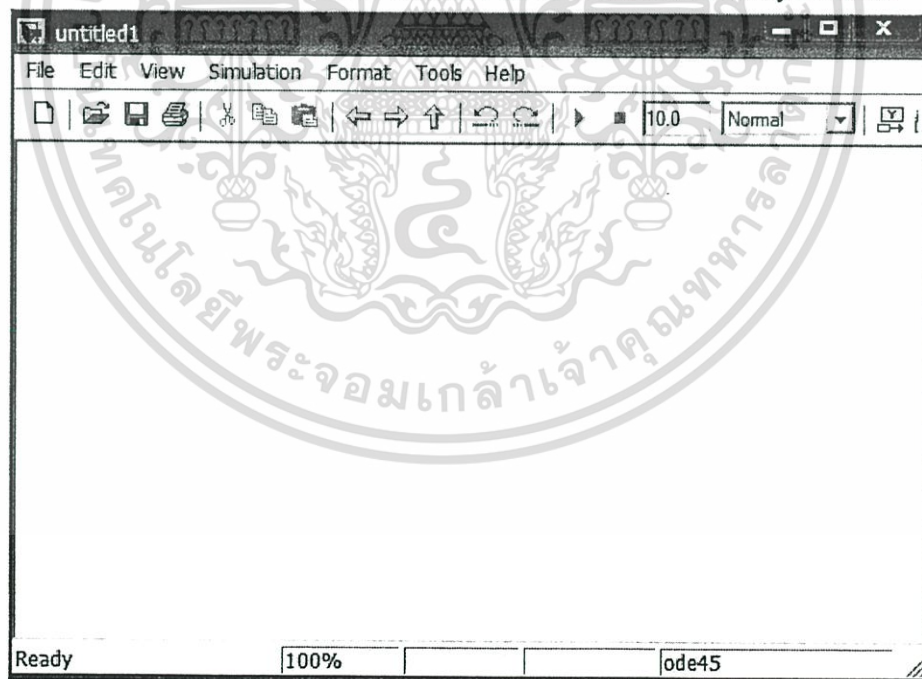


รูปที่ 2.13 แสดงหน้าต่างที่ใช้ในการกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Configuration Parameters)

2.4.1.2 การสร้างแบบจำลองระบบควบคุม

การสร้างแบบจำลองของระบบควบคุมใน Simulink นั้นต้องทำการสร้างหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองขึ้นมาก่อนซึ่งขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองระบบควบคุมทำได้ดังนี้

- เลือก เมนู File --> New --> Model จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งหน้าต่างนี้จะใช้สำหรับการวางบล็อกที่เลือกมาจาก Simulink Library Browser

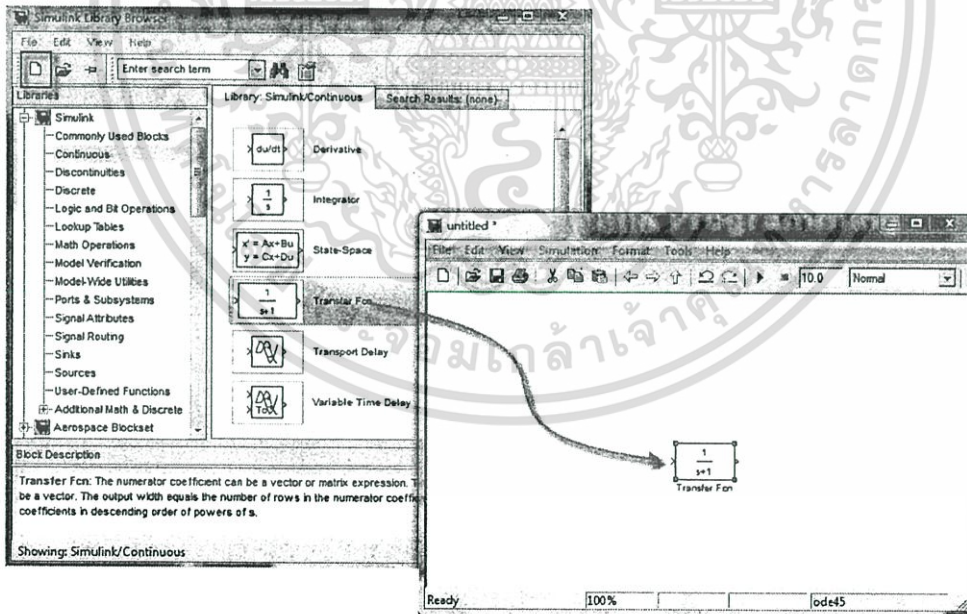


รูปที่ 2.14 หน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนบนของหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองจะเป็นเมนูบาร์สำหรับคำสั่งต่างๆ ดังนี้

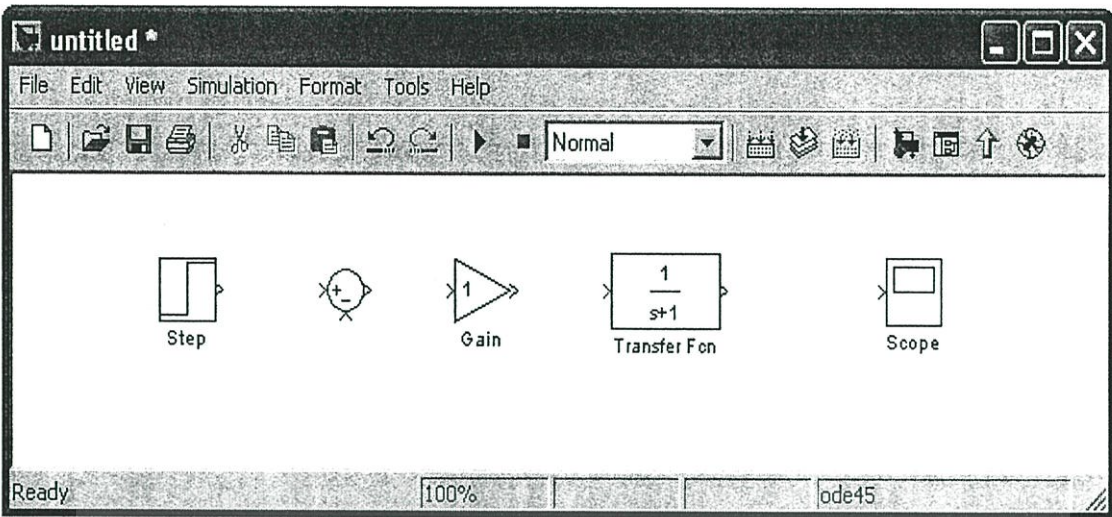
1. เมนู File เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการจัดการแฟ้มข้อมูลทั้งหมด เช่น การเปิดไฟล์ การบันทึกไฟล์ และการกำหนดคุณลักษณะของโปรแกรม Simulink เมนู Edit เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการแก้ไขแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา
 2. เมนู Edit เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการแก้ไขแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา
 3. เมนู View เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการแสดงเครื่องมืออุปกรณ์บนหน้าจอแบบจำลอง
 4. เมนู Simulation เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการจัดการการจำลองการทำงานของระบบควบคุมที่ทำการสร้างขึ้นมา
 5. เมนู Format เป็นคำสั่งเกี่ยวกับรูปแบบการแสดงผลบนหน้าจอจำลอง
 6. เมนู Tools เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการเลือกใช้เครื่องมือต่างๆ
 7. เมนู Help เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการขอความช่วยเหลือ
- เมื่อทำการสร้างหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองแล้วนำบล็อกใน Simulink Library Browser มาวางในหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองได้โดยทำการคลิกบล็อกที่ต้องการค้างไว้จากนั้นทำการลากมาไว้ในหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองจากนั้นปล่อยปุ่มจะปรากฏบล็อกที่ต้องการบน หน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเลือกบล็อกที่ต้องการจาก Simulink Library Browser

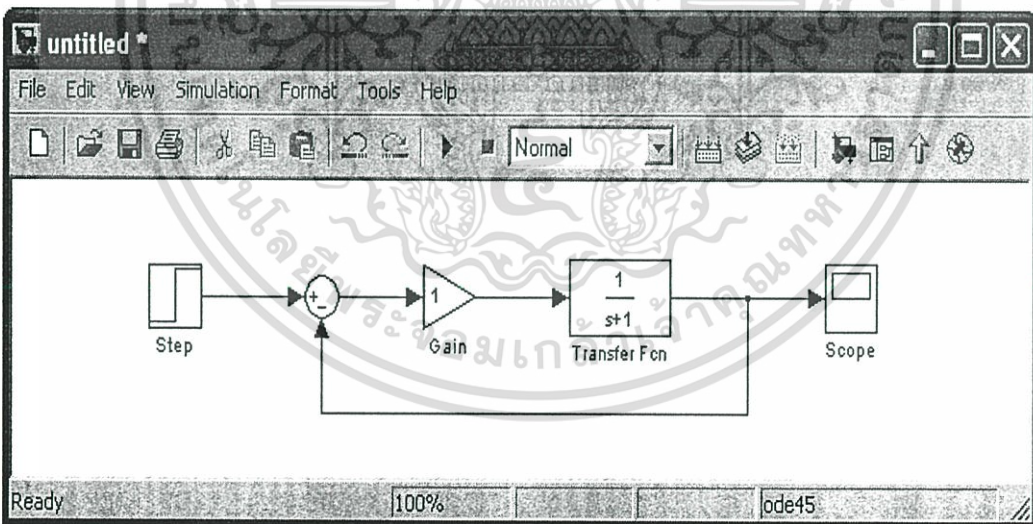
- เมื่อได้บล็อกที่ต้องการแล้วเราสามารถนำบล็อกอื่นๆ มาวางบนหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองได้เช่นกัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 บล็อกของระบบตัวอย่าง

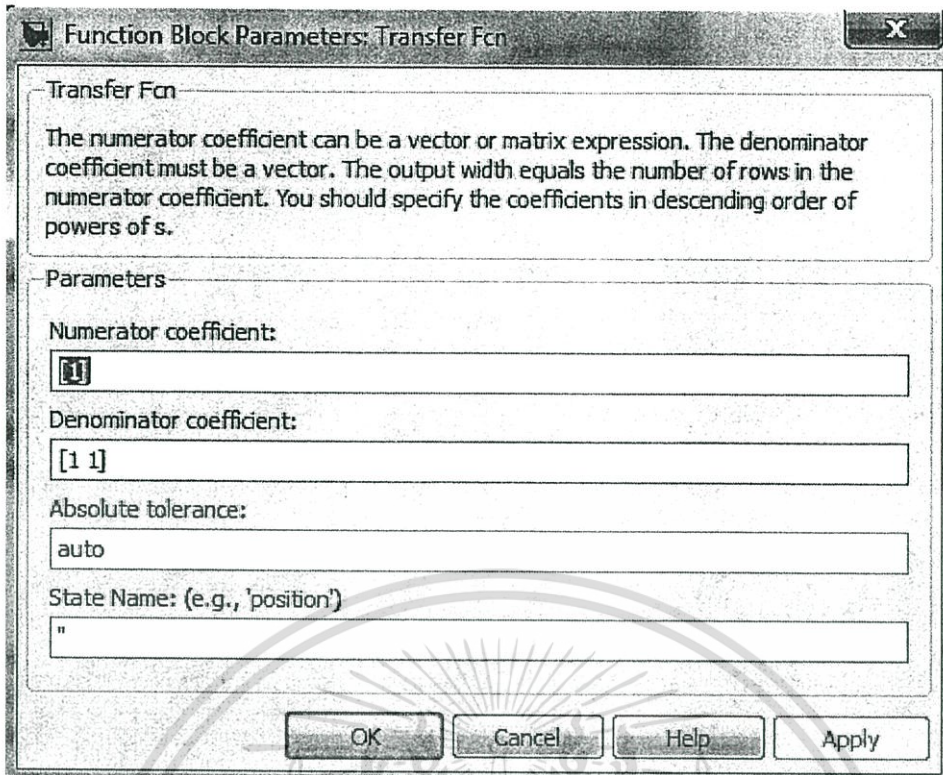
- รูปที่ 2.16 สังเกตได้ว่าแต่ละบล็อกจะมีช่องสัญญาณเข้าและสัญญาณออก ไว้สำหรับลากเส้นสัญญาณเชื่อมต่อระหว่างบล็อกต่างๆ เข้าด้วยกัน การลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อกต่างๆ ทำได้โดยเลื่อนเมาส์ให้ไปชี้ที่จุดต่อสัญญาณของบล็อกที่ต้องการ ตัวชี้ของเมาส์จะเปลี่ยนเป็นเครื่องหมายบวก จากนั้นคลิกค้างไว้แล้วลากตัวชี้ไปที่จุดต่อสัญญาณของบล็อกที่ต้องการ แสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างบล็อก

- การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของบล็อกสามารถทำได้โดยดับเบิ้ลคลิกที่บล็อกซึ่งจะปรากฏ ไอคอนสำหรับให้ใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

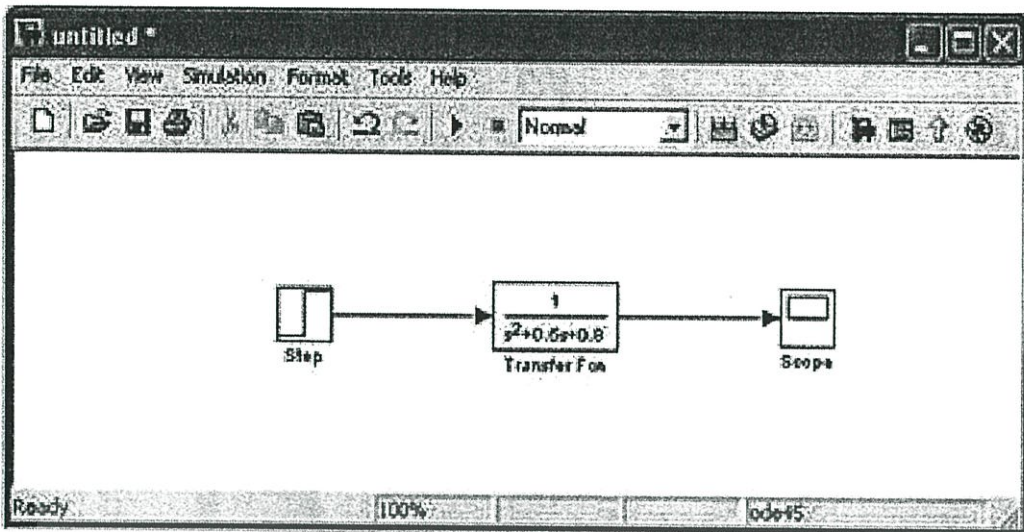


รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของบล็อก

เพื่อให้เข้าใจหลักการทํางานและวิธีการสร้างโปรแกรมด้วย Simulink มากยิ่งขึ้นจะแสดงวิธีการสร้างแบบจำลองของระบบควบคุมใน Simulink โดยการสร้างแบบจำลองของกระบวนการใน Simulink นั้นสามารถแบ่งเป็น 3 วิธี คือ

1. การสร้างแบบจำลองกระบวนการจากสมการ Differential Equation
2. การสร้างแบบจำลองกระบวนการจากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน
3. การสร้างแบบจำลองระบบควบคุมจากสมการ State-Space

ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการสร้างแบบจำลองกระบวนการจากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน การสร้างแบบจำลองของระบบที่แสดงอยู่ในรูป 2.19 Transfer Function นั้นจะใช้บล็อก Transfer Fcn แสดงแทนระบบ การใส่ค่าโพลีโนเมียลในส่วนของ Numerator และ Denominator นั้นทำได้โดยดับเบิลคลิกที่บล็อกซึ่งจะปรากฏได้อะล๊อตที่ให้ใส่ค่าขึ้นมาแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 โดยการใส่ค่าลงไปนั้นมีเงื่อนไขอยู่ว่าส่วน Numerator นั้นต้องมีอันดับน้อยกว่า ส่วน Denominator ซึ่งสังเกตได้ว่าการสร้างแบบจำลองของระบบจาก Transfer Function นั้นจะทำการวัดผลตอบสนองได้ที่ส่วนเอาต์พุตของระบบเท่านั้น



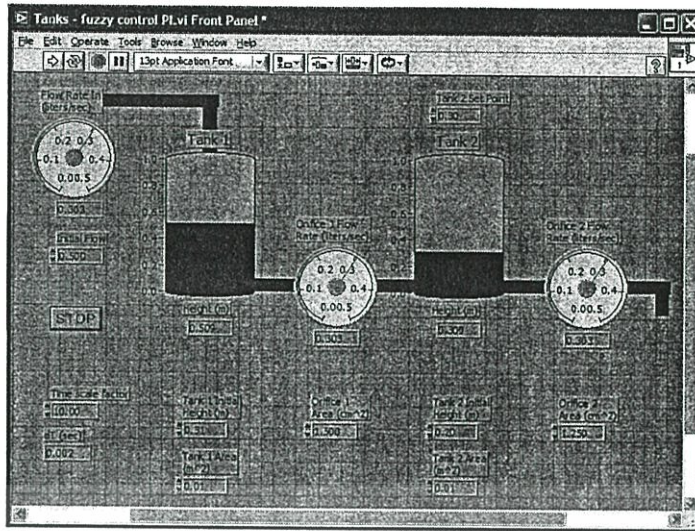
รูปที่ 2.19 ไคอะล๊อคใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Transfer Fcn

2.4.2 โปรแกรม LabVIEW

2.4.2.1 พื้นฐานโปรแกรม LabVIEW

- พาเนล

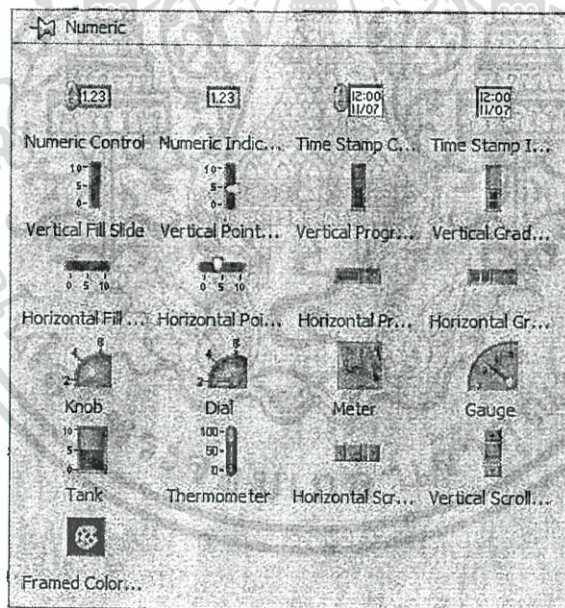
พาเนลเป็นหน้าต่างที่ใช้แสดงการควบคุมการทำงานของโปรแกรม ผู้ใช้สามารถสร้างรูปแบบขึ้นเองได้อย่างรวดเร็วเพราะ LabVIEW มีส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับออกแบบหน้าต่างพาเนลซึ่งในหน้าต่างพาเนลก็จะมีส่วนประกอบหลักๆ ด้วยกัน 3 ส่วนคือ พื้นที่สำหรับเขียนโปรแกรม เมนูบาร์ และทูลบาร์ สำหรับหน้าต่างพาเนล จะแสดงตัวควบคุมการทำงาน (Controls) และตัวแสดงผล (Indicator) ส่วนลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมนั้นจะแสดงในส่วนของหน้าต่างไคอะแกรม โดยในโปรแกรม LabVIEW จะถือว่าตัวควบคุมเป็นอุปกรณ์ “อินพุต” และตัวแสดงผลเป็นอุปกรณ์ “เอาต์พุต” การวางตัวควบคุมและตัวแสดงผลลงในหน้าต่างพาเนลทำได้โดยคลิกเมาส์ทางด้านขวาบนหน้าต่างพาเนล จะปรากฏบล็อกทูลพาเลทขึ้นมาซึ่งภายในทูลพาเลทจะประกอบด้วยตัวควบคุมและตัวแสดงผลแบบต่างๆ การวางอุปกรณ์ทำได้โดยการใช้เมาส์คลิกค้างไว้ที่อุปกรณ์ที่ต้องการจากนั้นลากไปวางในหน้าต่างพาเนลก็จะได้ภาพดังตัวอย่างในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะของหน้าต่างพาด

- Numerical Controls and Indicator

สำหรับตัวควบคุมและตัวแสดงผลที่มีลักษณะเป็นตัวเลขนั้นสามารถเรียกใช้ในส่วน
ของ หน้าต่าง ฟรอนพาด โดยเลือกจาก Control»Modern»Numeric บน Control พาเลท

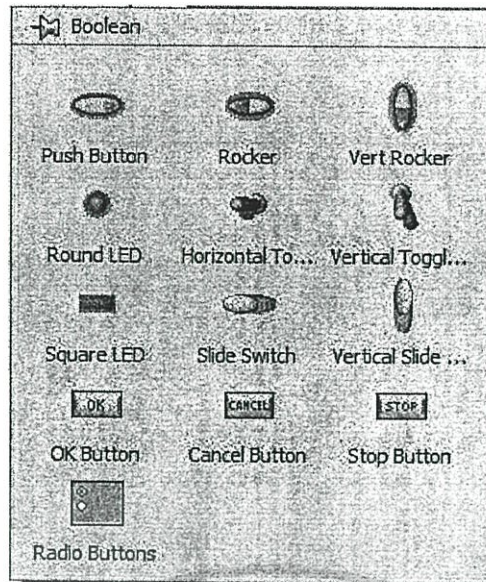


รูปที่ 2.21 Numerical Control and Indicator

- Boolean Control and Indicator

สำหรับตัวควบคุมและตัวแสดงผลที่มีลักษณะบูลีนนั้นจะแสดงการทำงานในลักษณะ
ของความถูกหรือผิด (True /False) สามารถเรียกใช้ในส่วนของ All Function หรือ Button and LED บน
ทูลพาเลท

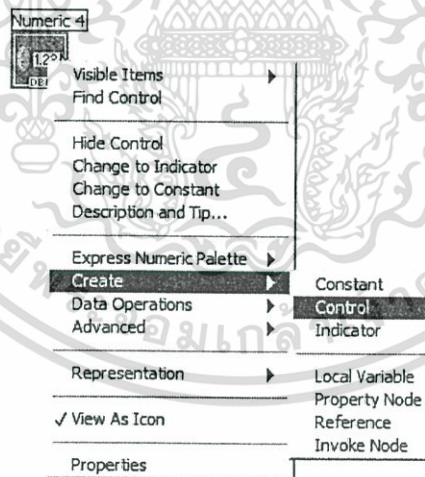
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 Boolean Control and Indicator

- การกำหนดอุปกรณ์

โดยปกติแล้วอุปกรณ์หนึ่งตัวก็จะทำงานหรือมีสถานะได้หนึ่งอย่าง ไม่ว่าจะ มีสถานะเป็นค่าคงที่ ตัวควบคุมหรือตัวแสดงผล ซึ่งสามารถกำหนดได้ว่าจะให้อุปกรณ์แสดงสถานะเป็นแบบใด การกำหนดทำได้โดยการคลิกขวาที่อุปกรณ์แล้วเลือกคำสั่ง Create ซึ่งในคำสั่ง Create จะมีคำสั่งย่อยอยู่ 3 คำสั่งคือ Constant, Control และ Indicator ซึ่งสามารถเลือกกำหนดสถานะของอุปกรณ์นั้นได้



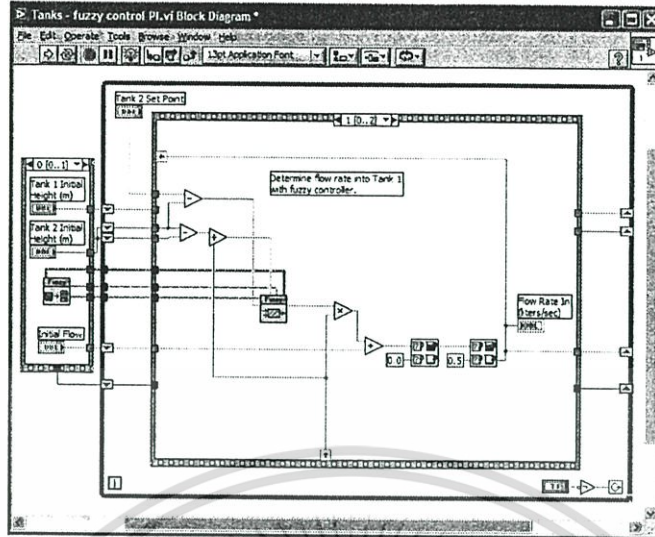
รูปที่ 2.23 แสดงการกำหนดอุปกรณ์

• ไต่อแกรม

ในส่วนของหน้าต่าง Block Diagram จะเป็นส่วนที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมและแสดงการทำงานของโปรแกรมทั้งหมด แสดงการเชื่อมโยงระหว่างบล็อกคำสั่งแต่ละบล็อกเข้าด้วยกัน โดยการเขียนโปรแกรมด้วยภาพ ลักษณะนี้ในโปรแกรม LabVIEW เรียกว่าการเขียนโปรแกรมด้วยภาษารูปภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิกส์ (G-Languages) การเขียนโปรแกรมด้วยภาพนั้นจะอาศัยหลักการทำงานของเครื่องมือวัดหรือการวัดคุม ทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบรูปแบบโปรแกรมตามต้องการ



รูปที่ 2.24 แสดงหน้าต่างของโคอะแกรม

การเขียนโปรแกรมในหน้าต่างโคอะแกรมมีส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ ดังนี้

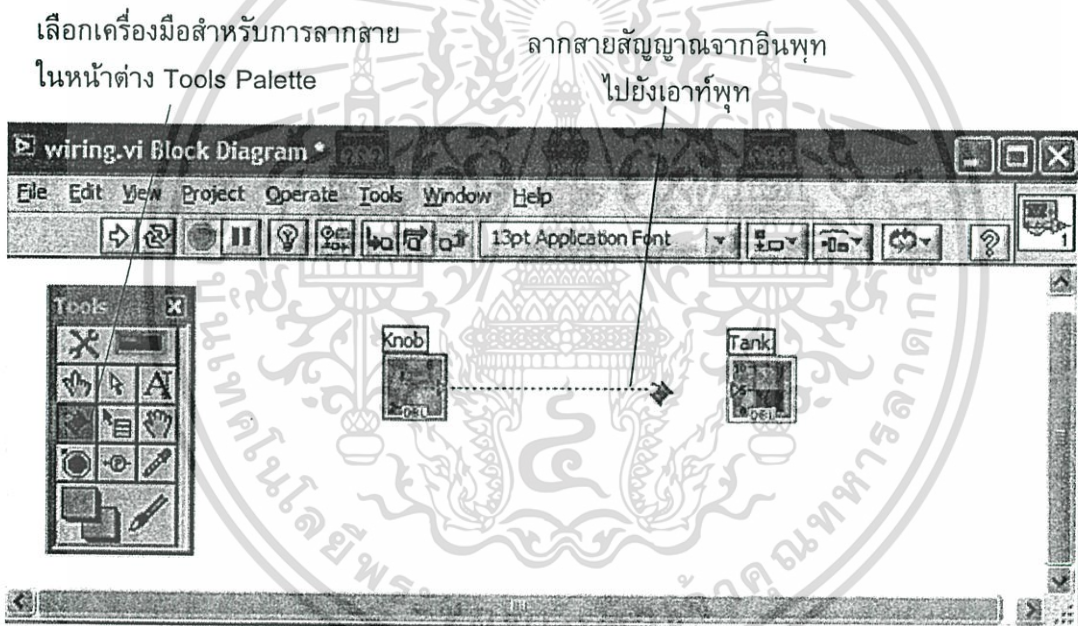
- **Nodes** มีความคล้ายคลึงกับการเขียนโปรแกรมแบบสแตจมันท์และการเขียนแบบฟังก์ชันในการเขียนโปรแกรมแบบต่างๆ ไป ประกอบด้วย
- **Function** คิดตั้งมาพร้อมกับ LabVIEW
- **Sub VI Node** คือ VI ที่สร้างขึ้นเองและถูกนำมาใช้เป็น SubVI ในภายหลัง
- **Structure** เช่น Case, loop, and Sequence ที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน of โปรแกรม
- **Code Interface Node (CIN)** ใช้ติดต่อระหว่าง LabVIEW และ User Supplied Code ของภาษาซี
- **Terminal** เป็นจุดเชื่อมต่อเพื่อส่งผ่านข้อมูลระหว่างหน้าต่างโคอะแกรมกับหน้าต่างพาเนลและระหว่างโหนดแต่ละโหนดในหน้าต่างโคอะแกรม มีความคล้ายคลึงกันกับการกำหนดพารามิเตอร์และค่าคงที่ในการเขียนโปรแกรมทั่ว ๆ ไป Terminal มีอยู่หลายชนิด เช่น Control and Indicator Terminal, Node Terminal, Constants
- **Wiring** เป็นการเชื่อมต่อทางเดินของข้อมูลระหว่าง Terminal ซึ่งเป็นแบบส่งทางเดียว สีและรูปแบบ ของ Wires จะบอกถึงชนิดของข้อมูลที่ส่งผ่านโดยใช้ Wiring Tool (รูปหลอดด้าย) ใน Tool Palette โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติของสายสัญญาณ

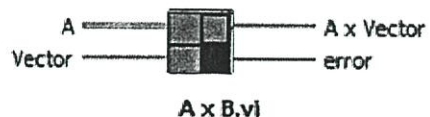
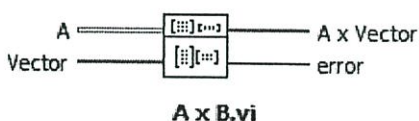
สีของ Control หรือ Indicator	รูปแบบของWiring
1. สีน้ำเงิน แทนตัวเลขที่เป็นจำนวนเต็ม	1. เส้นบางแทนค่าจำนวนเดียว
2. สีส้ม แทนตัวเลขที่มีค่าทศนิยม	2. เส้นหนาแทนค่าของอาร์เรย์ ขนาด 1 มิติ
3. สีเขียว แทน Logic หรือ Boolean	3. เส้นคู่แทนค่าของอาร์เรย์ ขนาด 2 มิติ
4. สีชมพู แทนค่าของ String	

การ Wiring ทำโดยใช้ Wiring Tool เลื่อนไปให้ตรง Terminals แรกที่ต้องการเชื่อมต่อ สังเกตให้ Terminals กระทบแล้วคลิกเมาส์ จากนั้นให้ลากไปยัง Terminals ที่ต้องการเชื่อมต่อ โดยจะเกิดเส้นประสีดำลากตาม Cursor ให้คลิกเมาส์บน Terminals ที่สองในขณะที่ Terminals นั้นกำลังกระทบ ข้อแตกต่างระหว่าง Control กับ Indicator บน Block Diagram คือ Control จะมีขอบเป็นเส้นหนา ส่วน Indicator จะมีขอบเป็นเส้นบาง



รูปที่ 2.25 การเชื่อมต่อสายสัญญาณ

• ไอคอนและจุดเชื่อมต่อ



ไอคอน (Icon) และจุดเชื่อมต่อ (Connector) ในโปรแกรม LabVIEW คืออุปกรณ์ตัวเดียวกันเพียงแต่อุปกรณ์นั้นสามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยทั่วไปเรียก

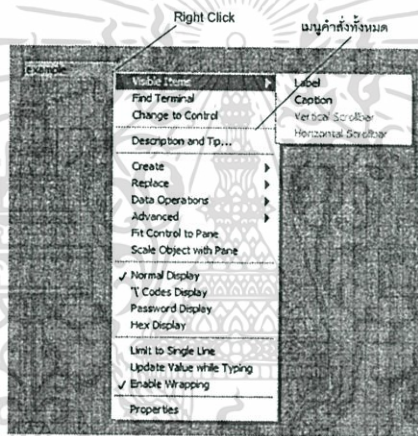
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์เหล่านั้นว่า ไอคอน (Icon) เมื่อต้องการเชื่อมต่อสายสัญญาณของไอคอนเราจำเป็นต้องรู้ว่า จุดเชื่อมต่อ (Connector) ของไอคอนนั้นอยู่ที่ตำแหน่งใดของไอคอนและมีคุณสมบัติอย่างไรเราจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนคุณสมบัติของไอคอนให้เป็นคอนเน็คเตอร์โดยคลิกเมาส์ทางขวาที่รูปไอคอนแล้วเลือก Visible Item»Terminal ไอคอนก็จะเปลี่ยนไปเป็นเทอร์มินอลที่แสดงจุดเชื่อมต่ออย่างชัดเจน

● **เมนูคำสั่ง**

- **เมนูคำสั่งแบบ Shortcut**

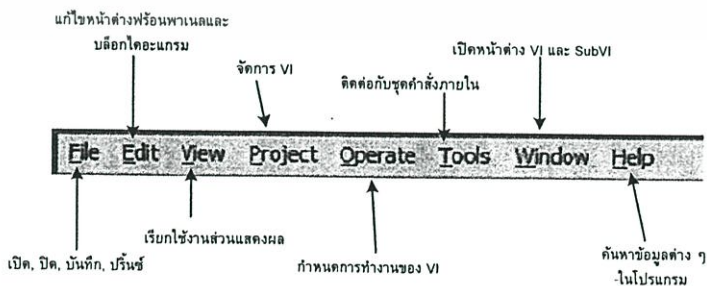
การเรียกใช้งานชุดคำสั่งในโปรแกรม LabVIEW มีอยู่สองวิธีคือ เรียกในเมนูบาร์ (Menu bar) และเรียกจากเมนูคำสั่งแบบย่อ โดยวิธีการเรียกใช้งานชุดคำสั่งแบบย่อทำได้โดยการลากเมาส์ไปวางบริเวณออปเจ็คบนหน้าต่างพร้อมพาเนลหรือหน้าต่างบล็อกไดอะแกรมแล้วคลิกเมาส์ทางด้านขวาซึ่งจะปรากฏชุดคำสั่งย่อขึ้นมาภายในคำสั่งก็จะมีชุดคำสั่งย่อย การเรียกใช้งานนั้นทำได้โดยการลากเมาส์ไปชี้ตรงคำสั่งที่ต้องการซึ่งจะเกิดแถบสีน้ำเงินที่บริเวณที่เมาส์ชี้อยู่ถ้าต้องการใช้คำสั่งให้คลิกเมาส์บริเวณคำสั่งที่ต้องการ



รูปที่ 2.26 การใช้โครงสร้างของคำสั่งแบบ Shortcut

- **เมนูคำสั่งแบบ Pull Down**

ในหน้าต่างพาเนลและ ไดอะแกรมจะมีชุดคำสั่งที่เมนูบาร์อยู่ 7 คำสั่ง คือ File, Edit, Option, Tools, Browse, Window และ Help



รูปที่ 2.27 แสดงเมนูบาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คำสั่ง **File** ในเมนูคำสั่งไฟล์จะประกอบไปด้วยชุดคำสั่งย่อยสำหรับการจัดการเกี่ยวกับการเปิด VI การปิด VI การสร้าง VI ใหม่ การบันทึก การปริ้นส์หน้าพาเนลหรือไดอะแกรม อีกทั้งยังมีคำสั่งลัดที่สั่งเปิดจากคีย์บอร์ดเช่น **Ctrl+N** สำหรับสร้างหน้าต่างสำหรับสร้าง VI ขึ้นมาใหม่ **Ctrl+O** เพื่อเปิด VI **Ctrl+C** เพื่อปิด VI เป็นต้น

- คำสั่ง **Edit** ใช้สำหรับการคัดลอก การวาง การแก้ไขหรือปรับแต่งออปเจ็คเมื่อเกิดการผิดพลาดในการสร้าง VI คำสั่งย่อยในคำสั่ง Edit ที่ถูกใช้บ่อยครั้งที่สุดก็คือ คำสั่ง **Undo** **Data Chang** และ **Redo** ซึ่งคำสั่งนี้จะช่วยเราในเรื่องของการแก้ไขโปรแกรมหากเราแก้ไขผิดพลาดหรือไม่ต้องการเราก็สามารถกลับไปยังจุดที่เราเริ่มต้นแก้ไขได้โดยใช้คำสั่งนี้

- คำสั่ง **VIEW** ภายในเมนูคำสั่ง VIEW จะประกอบไปด้วยชุดแสดงผลของโปรแกรม เช่น **Tools Palette**, **Controls Palette** และ **Functions Palette** และยังมีส่วนแสดงผลของค่าผิดพลาดของโปรแกรม

- คำสั่ง **Project** ภายในประกอบไปด้วยชุดคำสั่งพื้นฐานของโปรแกรม ใช้สำหรับจัดการกับโปรแกรมที่เปิดพร้อมกันหลายๆ โปรแกรม ใช้เปิด ปิด บันทึก และสร้างโปรแกรม

- คำสั่ง **Operate** ใช้สำหรับสั่งให้โปรแกรมทำงานหรือหยุดทำงาน เปลี่ยนหรือเซ็ทค่ามาตรฐานของ VI และสามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานจากโหมดรันไปเป็นโหมดแก้ไขได้

- คำสั่ง **Tools** สำหรับเมนูนี้จะใช้เกี่ยวกับการติดต่อระหว่างโปรแกรมกับอุปกรณ์ภายนอก เปรียบเทียบ VI การสร้างแอปพลิเคชันต่าง ๆ และติดต่อกับเว็บไซต์ของ NI ด้วย

- คำสั่ง **Browse** ใช้สำหรับการนำทางในการเปิด VI ที่ซ่อนอยู่

- คำสั่ง **Window** ใช้สำหรับเลือกการเปิดหน้าต่างพาเนลและไดอะแกรมสลับกันหรือจะเปิดทั้งสองหน้าต่างพร้อมกันก็ได้

- คำสั่ง **Help** ใช้สำหรับสืบค้นข้อมูลต่าง ๆ ภายในโปรแกรม LabVIEW

- **พาเลท**

พาเลทเป็นหน้าต่างย่อยที่มีส่วนประกอบของ Object ที่ใช้สำหรับการเขียน VI การนำไปใช้งานนั้นทำได้ง่ายเพียงแค่อีกเมาส์ทางด้านขวาบริเวณที่ว่างของหน้าต่างพาเนลหรือไดอะแกรม ซึ่งจะปรากฏพาเลทขึ้นมาจากนั้นใช้เมาส์คลิกที่ Object ที่ต้องการแล้วลากไปวางบนหน้าต่างพาเนลหรือหน้าต่างไดอะแกรม พาเลทมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่ 3 ส่วนคือ **Tools**, **Control** และ **Function**

- **Tools Palette**

ทูลพาเลทจะเป็นตัวบอกหรือกำหนดสถานะของเมาส์ว่าทำงานอยู่ในโหมดใด การเรียกใช้พาเลทนี้ทำได้โดยการเลือกที่เมนู **Window** แล้วเลือกคำสั่งย่อย **Show Tools Palette** แล้วจะ

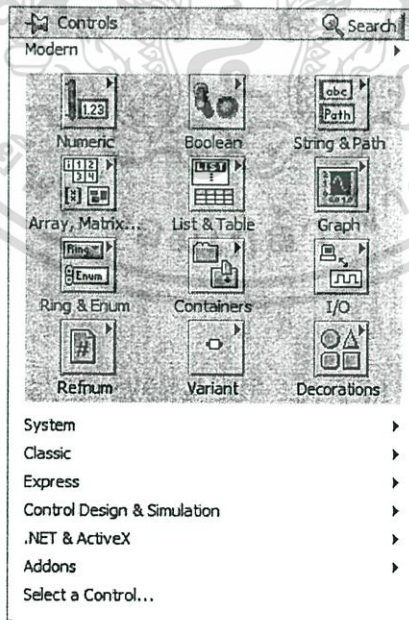
ปรากฏ Tools Palette ขึ้นมาดังรูป 2.28 การใช้งานนั้นเพียงแค่ว่าเราใช้เมาส์ไปคลิกที่สัญลักษณ์ใน Tools Palette เคอร์เซอร์ของเมาส์ก็จะเปลี่ยนไปตามลักษณะที่เราเลือก



รูปที่ 2.28 แสดง Tools Palette

- Control Palette

มีส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่เป็นตัวควบคุมและตัวแสดงผลที่ใช้สำหรับสร้าง VI โดยภายใน Control Palette ก็จะมีพาเลทย่อยๆ อีกเพราะว่าอุปกรณ์ใน Control Palette จะมีอุปกรณ์ย่อยๆ อีก แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถเรียกดูอุปกรณ์ทั้งหมดที่อยู่ใน Control Palette ได้โดยคลิกเมาส์เลือกที่ All Control ซึ่งจะรวมเอาอุปกรณ์ทั้งหมดไว้ในนั้น นอกจากนี้แล้วเรายังสามารถเปิดใช้งาน Control Palette ได้อีกทางหนึ่งคือเลือกที่เมนู Window แล้วเลือก Show Control Palette ก็สามารถเลือกใช้ Control Palette ได้เช่นกัน

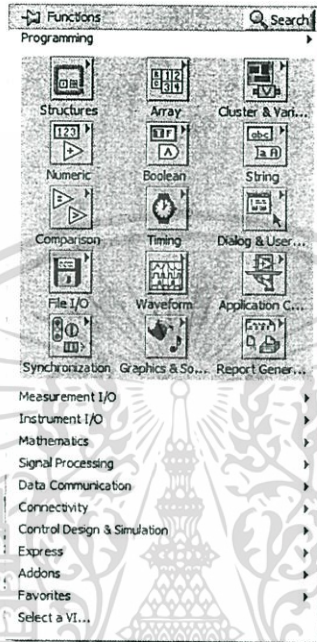


รูปที่ 2.29 แสดง Control Palette

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Function Palette

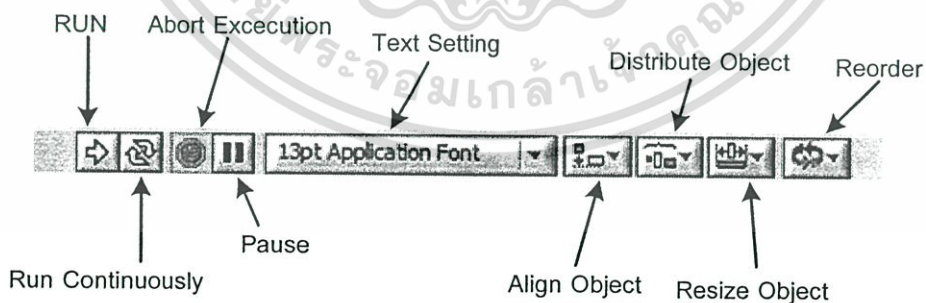
การใช้งานโดยทั่วไปจะมีความคล้ายกันกับ Control Palette ซึ่งภายในประกอบไปด้วยอุปกรณ์ในการสร้าง VI ตัวอย่างอุปกรณ์หลักๆ ใน Function Palette เช่น For Loops, While Loops และ Formula Nodes สามารถเรียกใช้งานได้ 2 วิธีเช่นเดียวกับการเรียกใช้งาน Control Palette คือ เลือกที่เมนู Window แล้วเลือก Show Function Palette หรือคลิกเมาส์ทางด้านขวาบริเวณพื้นที่ว่างในหน้าต่างไออะแกรม



รูปที่ 2.30 แสดง Function Palette

- เครื่องมือ (Tool)

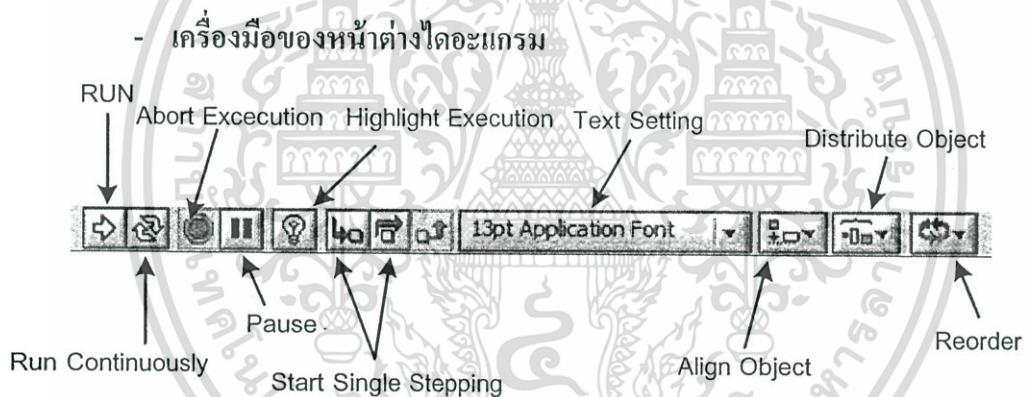
- เครื่องมือของหน้าต่างพาด



รูปที่ 2.31 แสดงทุลบาร์ในหน้าต่างพาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RUN	ใช้สำหรับรัน โปรแกรม
RUN Continuously	ใช้สำหรับรัน โปรแกรมอย่างต่อเนื่อง
Abort Execution	หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าปุ่ม Stop ใช้สำหรับหยุดการรัน โปรแกรม
Pause	ใช้สำหรับหยุดการรัน โปรแกรมชั่วคราวเพื่อตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม เมื่อต้องการรัน โปรแกรมต่อให้กดปุ่มนี้ซ้ำอีกครั้ง โปรแกรมจะรันต่อไป
Text setting	ใช้สำหรับจัดการกับตัวอักษรทั้งหมดไม่ว่าจะเป็น ฟรอน ขนาด รูปแบบตัวอักษร รวมไปถึงการกำหนดสีให้กับตัวอักษร
Align Object	ใช้จัด Object ต่างๆ ที่ใช้เขียนโปรแกรมให้อยู่ในแนวเดียวกันทั้งแนวตั้งและแนวนอนเพื่อความเป็นระเบียบ
Distribute Object	ใช้สำหรับการกำหนดระยะห่างระหว่าง Objects อัตโนมัติ
Resize Object	ใช้สำหรับปรับขนาดของ Object
Reorder	ใช้สำหรับกำหนดลำดับก่อนหลังสำหรับการวางซ้อนทับกันของ Object
Context Help	ใช้แสดงคุณสมบัติหรือรายละเอียดของ Object แต่ละตัว



รูปที่ 2.32 แสดงทุลบาร์ในหน้าต่างไอดีอะแกรม

RUN	ใช้สำหรับรัน โปรแกรม
RUN Continuously	ใช้สำหรับรัน โปรแกรมอย่างต่อเนื่อง
Abort Execution	หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าปุ่ม Stop ใช้สำหรับหยุดการรัน โปรแกรม
Pause	ใช้สำหรับหยุดการรัน โปรแกรมชั่วคราวเพื่อตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม เมื่อต้องการรัน โปรแกรมต่อให้กดปุ่มนี้ซ้ำอีกครั้ง โปรแกรมก็จะรัน
Highlight Execution	แสดงลำดับขั้นการทำงานของโปรแกรม โดยแสดงให้เห็นทิศทางการทำงานของสัญญาณ
Start Single Step	ใช้สำหรับสั่งให้โปรแกรมทำงานทีละคำสั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Text Setting	ใช้สำหรับจัดการกับตัวอักษรทั้งหมดไม่ว่าจะเป็น ฟรอน ขนาด รูปแบบ ตัวอักษร รวมไปถึงการกำหนดสีให้กับตัวอักษร
Align Object	ใช้จัด Object ต่างๆ ที่เราใช้เขียนโปรแกรมให้อยู่ในแนวเดียวกันทั้งแนวตั้ง และแนวนอนเพื่อความเป็นระเบียบ
Distribute Object	ใช้สำหรับการกำหนดระยะห่างระหว่าง Objects อัตโนมัติ
Reorder Context Help	ใช้สำหรับกำหนดลำดับก่อนหลังสำหรับการวางซ้อนทับกันของ Object ใช้แสดงคุณสมบัติหรือรายละเอียดของ Object แต่ละตัว

- พื้นฐานการเขียนโปรแกรมภาษากราฟฟิก

- ฟรอนพาเนล

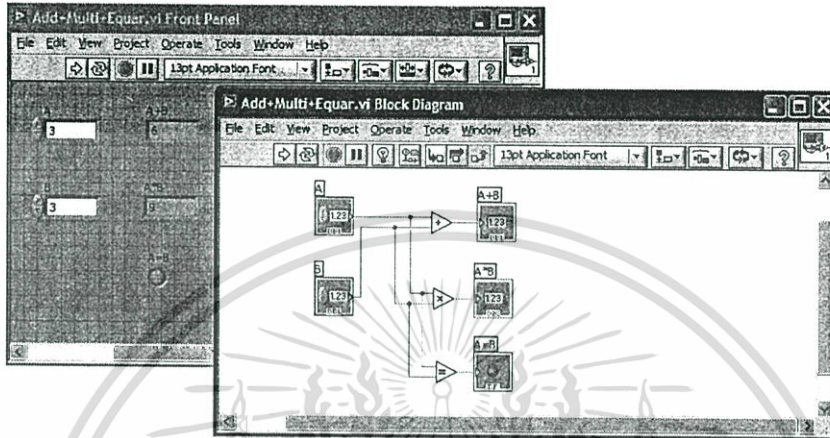
หน้าต่างฟรอนพาเนลสำหรับเขียนโปรแกรม LabVIEW นั้นจะเป็นหน้าต่างที่ใช้ติดต่อกับผู้ใช้งาน ซึ่งในหน้าต่างพาเนลจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์อยู่ 2 ส่วน คือ อุปกรณ์สำหรับการควบคุม (Control) ยกตัวอย่างเช่น Knobs, Switches และอุปกรณ์อีกอย่างหนึ่งก็คืออุปกรณ์สำหรับแสดงผล (Indicator) เช่น LED, Text Setting, Graph และ Chart เป็นต้น ส่วนอุปกรณ์อื่นๆ ที่ไม่ใช่ อุปกรณ์ควบคุมและแสดงผลจะแสดงไอคอนอยู่ในหน้าต่างบล็อกไดอะแกรม สำหรับอุปกรณ์ควบคุมในภาษากราฟฟิกจะหมายถึง “อินพุต” และอุปกรณ์แสดงผลจะหมายถึง “เอาต์พุต” การวางอุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์แสดงผลลงไปในหน้าต่าง ฟรอนพาเนลทำได้โดยการเลือกอุปกรณ์ที่ต้องการบนหน้าต่าง Control Palette แล้วใช้เมาส์ลากไปวางบนหน้าต่างพาเนล ซึ่งการเรียกหน้าต่าง Control Palette ทำได้โดยการคลิกเมาส์ทางด้านขวาบริเวณพื้นที่ว่างของหน้าต่างพาเนลก็จะปรากฏหน้าต่าง Control Palette ที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์แสดงผลขึ้นมา การเรียกใช้งานหน้าต่าง Control Palette อีกวิธีหนึ่งก็คือ เลือกที่เมนู Window ของแท็บเมนูบาร์ แล้วเลือก Show Control Palette จะปรากฏหน้าต่างของ Controls Palette ขึ้นมาให้เลือกใช้งาน เช่นเดียวกัน

- บล็อกไดอะแกรม

ในหน้าต่างบล็อกไดอะแกรมจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างโปรแกรม ซึ่งถ้าเปรียบเทียบการภาษาอื่นๆ แล้วอุปกรณ์ที่วางลงไปในหน้าต่างบล็อกไดอะแกรมจะถือว่าเป็น Source Code การทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่ในหน้าต่างของบล็อกไดอะแกรมทำงานสัมพันธ์กันและเป็นไปตามที่ผู้เขียนต้องการนั้นสามารถทำได้ด้วยการลากสายสัญญาณจากจุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์แต่ละตัวให้ถึงกันและกำหนดค่าหรือคุณสมบัติของอุปกรณ์แต่ละตัวก็จะทำให้โปรแกรมทำงานตามที่ผู้เขียนต้องการ คุณสมบัติของอุปกรณ์ที่อยู่บนหน้าต่างบล็อกไดอะแกรมมีอยู่ 3 คุณสมบัติ คือ Node, Terminal และ Wires

- Nodes

เป็นตัวกระทำทำให้โปรแกรมทำงานตามที่ผู้เขียนต้องการถ้าเปรียบเทียบกับโปรแกรมทั่วไป Nodes ก็เปรียบเสมือน Statement, Functions, และ Subroutines โหนดในโปรแกรม LabVIEW มี 3 ชนิด คือ Function, Sub VI โหนด และ Structure โหนดแบบ Function จะสร้างขึ้นมาเพื่อให้สามารถทำงานขั้นพื้นฐานได้ เช่น การบวกเลข การคูณเลข เป็นต้น ดังการบวกและการคูณในรูปที่ 2.33 ก็เป็นฟังก์ชันโหนดแบบหนึ่งเช่นกัน



รูปที่ 2.33 หน้าต่างบล็อกไดอะแกรม

- Terminal

เป็นทางผ่านของข้อมูลระหว่างบล็อกไดอะแกรมกับพรีอนพาเนล และระหว่างโหนดแต่ละโหนดในบล็อกไดอะแกรม เทอร์มินอลเปรียบได้กับค่าพารามิเตอร์และค่าคงที่ในโปรแกรมภาษาอื่น เทอร์มินอลแต่ละชนิดก็มีความแตกต่างกันซึ่งในโปรแกรม LabVIEW มีเทอร์มินอลอยู่ 4 ชนิดคือ Control and Indicator Terminals, Node Terminal, Constants, และ เทอร์มินอลพิเศษ ซึ่งเทอร์มินอลแต่ละตัวสามารถลากสายสัญญาณเพื่อเป็นทางผ่านของข้อมูล สำหรับตัวอย่างในกรณีของ Control and Indicator Terminals เมื่อมีข้อมูลแบบตัวเลขผ่านเข้ายังบล็อกไดอะแกรมโดยผ่านช่องทาง Control Terminals แล้วทำการประมวลผลในหน้าต่างบล็อกไดอะแกรมเมื่อโปรแกรมทำการประมวลผลเสร็จเรียบร้อยก็จะส่งข้อมูลจากหน้าต่างบล็อกไดอะแกรมไปยังหน้าต่างพรีอนพาเนลโดยผ่านช่องทาง Indicator Terminal

- Wires

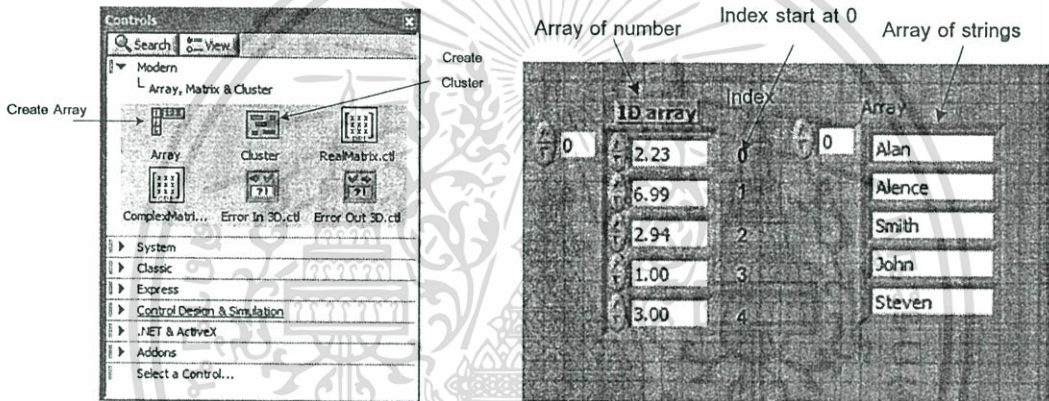
เป็นทางผ่านของข้อมูลระหว่าง Terminal โดยการลากสายสัญญาณทำได้โดยการเลือกเครื่องมือที่ชื่อว่า Connect Wire ที่หน้าต่าง Tool Palette ที่มีลักษณะคล้ายกับหลอดด้าย เมาส์จะเปลี่ยนเป็นรูปหลอดด้ายจากนั้นลากไปวางตรงจุดต่อของเทอร์มินอลแรกที่ต้องการลากคลิกเมาส์หนึ่ง

ครั้งแล้วลากไปยังจุดต่อของเทอร์มินอลปลายทางที่ต้องการคลิกเมาส์อีกครั้งก็เสร็จการเชื่อมต่อสัญญาณ

2.4.2.2 การใช้งาน Array Cluster Charts และ Graph

- พื้นฐานการใช้งาน อาร์เรย์

อาร์เรย์เป็นการเก็บตัวแปรหรือข้อมูลชนิดเดียวกันหลาย ๆ ข้อมูลไว้ด้วยกันส่วนคลัสเตอร์จะเก็บข้อมูลที่ชนิดต่างกันไว้ด้วยกันได้ ปัญหาที่พบบ่อยคือเวลาโปรแกรมทำงานจะมีข้อมูลเป็นจำนวนมาก ฉะนั้นอาร์เรย์หรือคลัสเตอร์จะช่วยในการเก็บข้อมูล อาร์เรย์สามารถสร้างได้หลายมิติเริ่มตั้งแต่ 1 มิติ ซึ่งในอาร์เรย์ 1 มิติสามารถเก็บข้อมูลได้สูงถึง $2^{31} - 1$ ข้อมูลค่าสูงสุดที่จะเก็บได้ก็ขึ้นอยู่กับขนาดของหน่วยความจำ อาร์เรย์ในโปรแกรม LabVIEW สามารถเก็บข้อมูลได้หลายชนิดยกเว้น Chart และ Graph วิธีการอ้างถึงข้อมูลในอาร์เรย์เรียกว่าดัชนี (Index) ซึ่งมีค่าเริ่มต้นตั้งแต่ 0 ไปจนถึง N-1 เมื่อ N คือจำนวนข้อมูลในอาร์เรย์ ในรูปที่ 2.34 เป็นอาร์เรย์ 1 มิติ โดยมีค่าดัชนีเริ่มต้นที่ 0

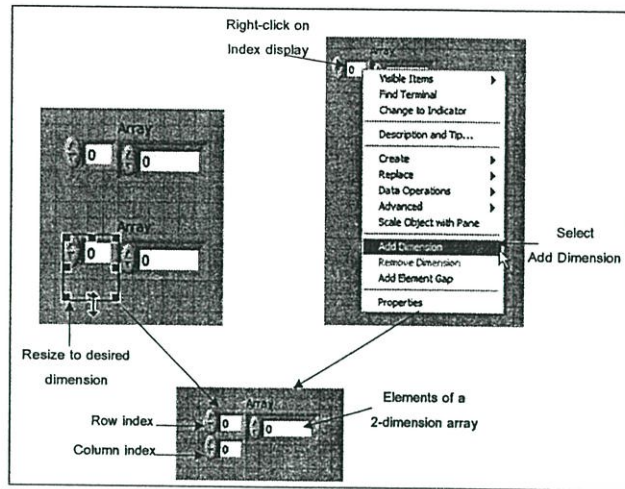


รูปที่ 2.34 แสดงการใช้งาน Array แบบ 1 มิติ

- อาร์เรย์หลายมิติ

อาร์เรย์ 2 มิติ (2D) จะมีตัวบอกคุณลักษณะอยู่ 2 ตัว คือ บอกแถวและบอกหลัก อาร์เรย์ 3 มิติ ก็จะมีตัวบอกคุณลักษณะ 3 ตัว ดังนั้นอาร์เรย์ n มิติ ก็จะมีตัวบอกคุณลักษณะ n ตัว การเพิ่มมิติของอาร์เรย์สามารถทำได้ 2 วิธีคือ ใช้ Positioning Tool เพื่อเพิ่มมิติของอาร์เรย์ และคลิกเมาส์ขวาที่อาร์เรย์แล้วเลือกคำสั่ง Add Dimension จากเมนูย่อย ซึ่งวิธีการทั้งสองที่ใช้ในการเพิ่มมิติของอาร์เรย์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.35

การลดมิติของอาร์เรย์ก็สามารถทำได้สองวิธีเช่นเดียวกันกับการเพิ่มคือ ใช้ Positioning Tool เพื่อลดขนาดมิติของอาร์เรย์และคลิกเมาส์ขวาที่อาร์เรย์แล้วเลือกคำสั่ง Remove Dimension จากเมนูย่อย



รูปที่ 2.35 แสดงวิธีการเพิ่มมิติของอาร์เรย์

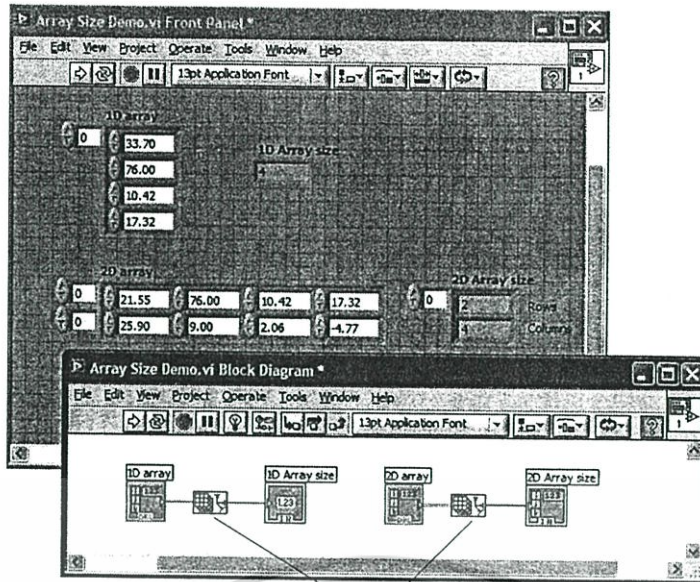
- ฟังก์ชันของอาร์เรย์

- Array Size

ฟังก์ชัน Array Size จะเป็นตัวบอกขนาดของอาร์เรย์ว่ามีขนาดใด เช่น ถ้าอาร์เรย์อินพุตเป็นอาร์เรย์ 1 มิติ (4 แถว 1 หลัก) อาร์เรย์เอาต์พุตจะเป็นอาร์เรย์ 1 มิติ มีจำนวนสมาชิกทั้งหมด 4 ตัว หรือถ้าอาร์เรย์อินพุตเป็นอาร์เรย์ 2 มิติ (2 แถว 4 หลัก) อาร์เรย์เอาต์พุตจะแสดงเป็นอาร์เรย์ 2 มิติ (แสดงจำนวนของแถวและหลัก) แสดงดังรูปที่ 2.36

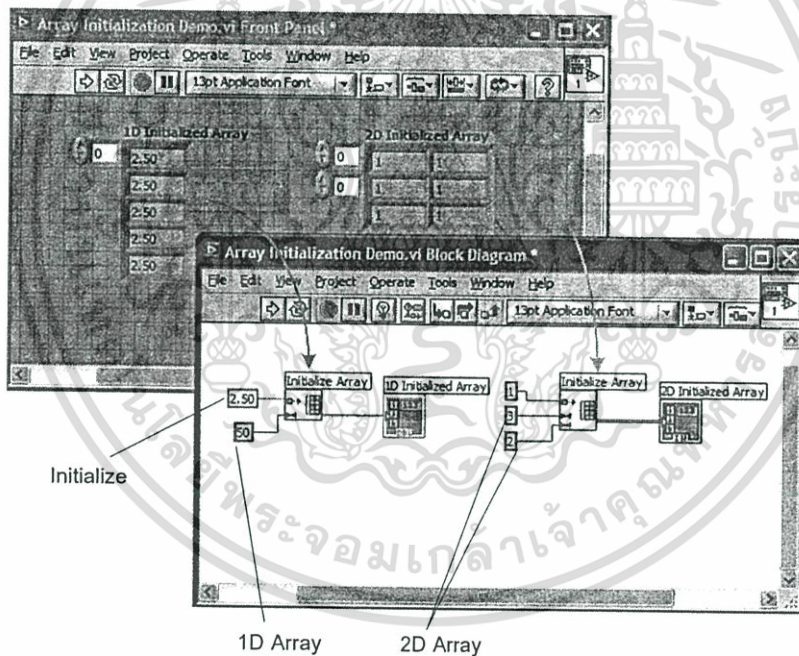
- Initialize Array

เป็นการสร้างอาร์เรย์ตามขนาดที่กำหนดพร้อมทั้งสามารถกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับอาร์เรย์ที่สร้างได้อีกด้วย เช่น ต้องการสร้างอาร์เรย์ 1 มิติ มีจำนวนสมาชิกทั้งหมด 50 ตัว และกำหนดให้ค่าเริ่มต้นของอาร์เรย์เป็น 2.5 สามารถสร้างได้โดยคลิกเมาส์ขวาที่เทอร์มินอล Element ซึ่งอยู่ทางด้านบนซ้ายของบล็อก Initialize Array แล้วเลือก Create>Constant และกำหนดค่าเริ่มต้นเป็น 2.5 ที่เทอร์มินอล Dimension Size ของบล็อก Initialize Array ที่อยู่ด้านล่างเทอร์มินอล Element คลิกเมาส์ขวาแล้วเลือก Create>Constant และกำหนดให้เป็น 50 (จำนวนสมาชิก) ถ้าต้องการเพิ่มมิติของอาร์เรย์ก็สามารถทำได้โดยคลิกเมาส์ขวาที่บล็อกของ Initialize Array แล้วเลือก Add Dimension ซึ่งจะเพิ่มเทอร์มินอลเพื่อกำหนดขนาดของแถวและหลัก แสดงดังรูปที่ 2.37



Array Size function

รูปที่ 2.36 แสดงการใช้งาน Array Size Function



รูปที่ 2.37 แสดงการใช้งาน Initialize Array Function

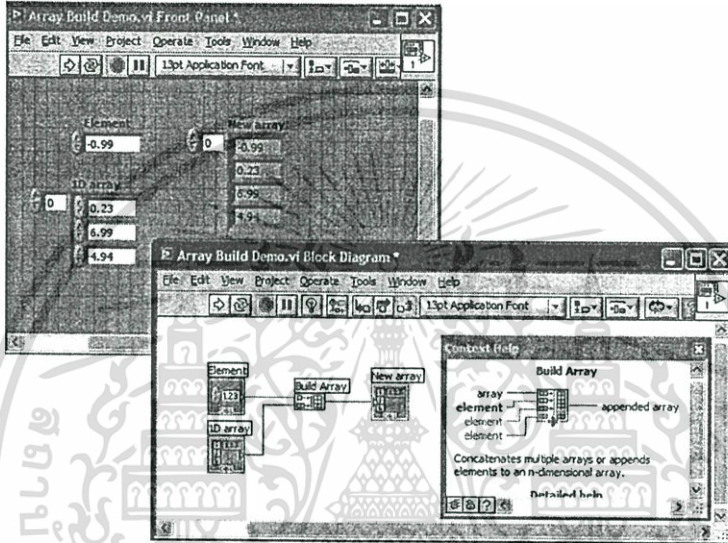
- Build Array

เป็นการนำอาร์เรย์หรือสมาชิกในอาร์เรย์หลาย ๆ ตัวมารวมกันแล้วเกิดเป็นอาร์เรย์ใหม่ ซึ่งอินพุตสามารถที่จะเป็นทั้งอาร์เรย์และเป็นจำนวนสเกลล่า โดยปกติแล้ว Build Array จะมีอินพุต 2 อินพุต ถ้าต้องการเพิ่มจำนวนอินพุตสามารถทำได้โดยการคลิกเมาส์ขวาที่บล็อก Build Array แล้วเลือก Add Input หรือจะใช้ Positioning Tool คลิกค้างแล้วลากขยายเพื่อเพิ่มอินพุต และถ้าต้องการลดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

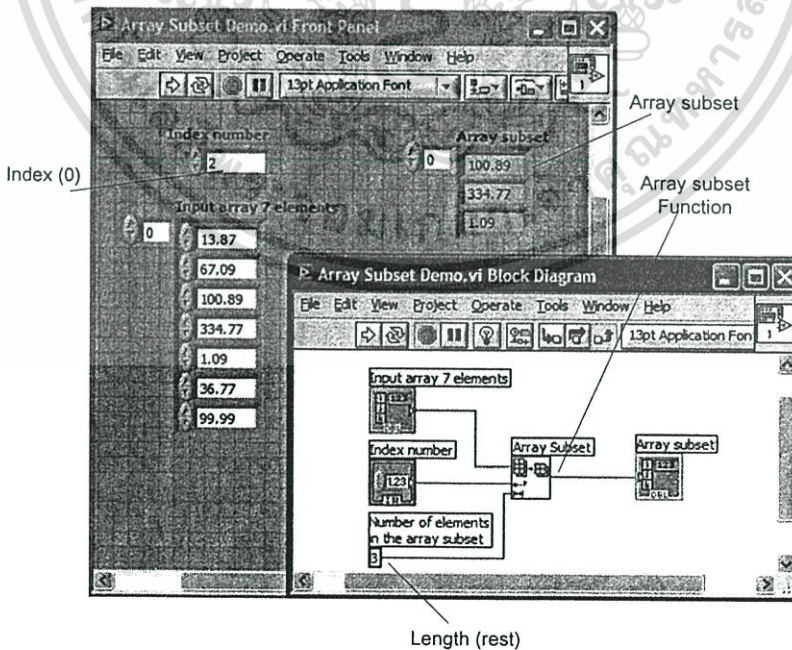
จำนวนอินพุตก็สามารถทำได้โดยคลิกเมาส์ขวา Build Array แล้วเลือก Remove Input ตัวอย่างการใช้งาน Build Array แสดงดังรูปที่ 2.38

- Array Subset

เป็นวิธีการเลือกค่าของข้อมูลที่อยู่ในอาร์เรย์ไปใช้งาน โดยมีสิ่งที่จะต้องกำหนดอยู่ 2 อย่างคือ Index (0) ซึ่งเป็นการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นที่เราต้องการ (ตำแหน่งแรกนับเป็นตำแหน่งที่ 0) และ Length (rest) เพื่อกำหนดจำนวนข้อมูลที่ต้องการ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3-15 อาร์เรย์ 1 มิติ มีจำนวนข้อมูล 7 ข้อมูล ต้องการใช้ข้อมูลตั้งแต่ตำแหน่งที่ 3 ถึง 5 ทำได้โดยกำหนด Index (0) ให้มีค่าเท่ากับ 2 และ Length (rest) ให้มีค่าเท่ากับ 3 แสดงดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.38 แสดงการใช้งาน Build Array Function

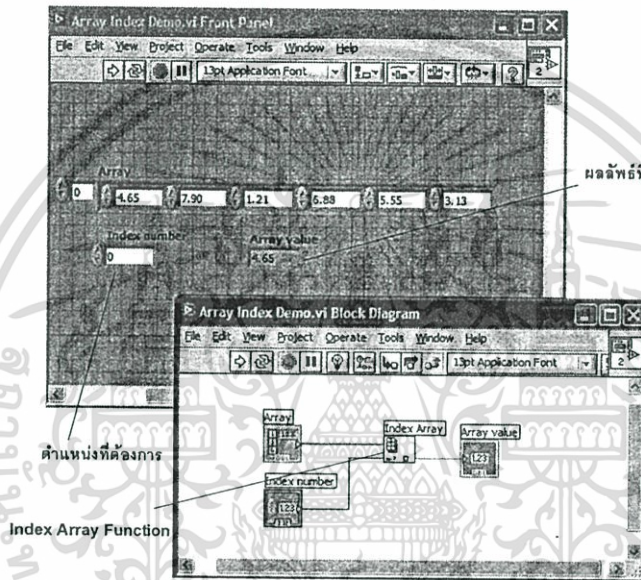


รูปที่ 2.39 แสดงการใช้งาน Subset Array Function

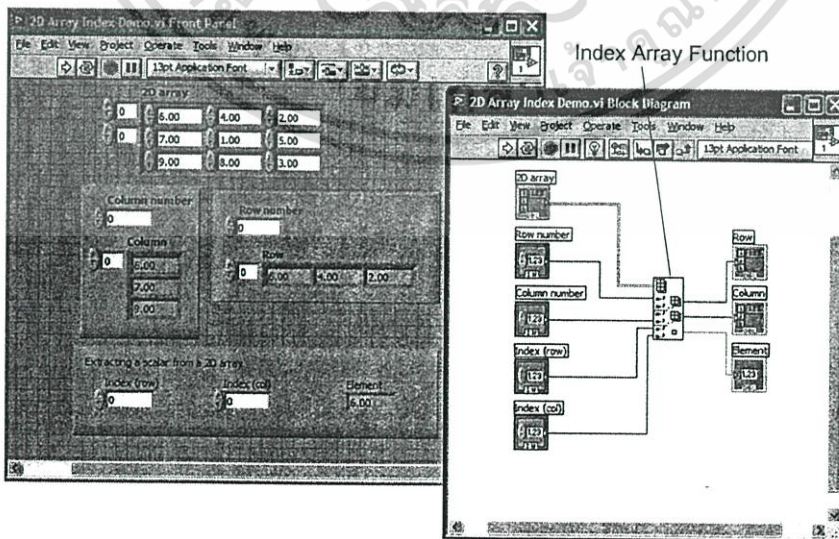
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Index Array

ฟังก์ชัน Index Array สามารถที่จะเลือกข้อมูลในอาร์เรย์ในตำแหน่งที่ต้องการมาใช้งานได้โดยการเลือกตำแหน่งของข้อมูลได้เลย ในกรณีที่เป็นอาร์เรย์ขนาด 2 มิติ ก็สามารถใช้ Index Array เลือกว่าจะเลือกข้อมูลออกเอาต์พุตที่ตำแหน่งแถวและหลัก แสดงดังรูปที่ 2.40 มีอาร์เรย์ 1 มิติ มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 6 ข้อมูล ต้องการเลือกข้อมูลที่ 1 ไปใช้งานสามารถทำได้โดยกำหนดให้ Index Number มีค่าเท่ากับ 0 (ตำแหน่งแรกนับเป็นตำแหน่งที่ 0) และในรูปที่ 2.41 เป็นการใชฟังก์ชัน Index Array ในการเลือกข้อมูลจากอาร์เรย์ 2 มิติ ขนาด 3 x 3 โดย Index Array จะต้องมี 2 ตัวเพื่อเลือกตำแหน่งแถวและตำแหน่งหลักที่ต้องการ ซึ่งการเพิ่มอินพุตของ Index Array สามารถทำได้โดยการใช้ Position Tool คลิกที่ Index Array แล้วลากขยายเพื่อเพิ่มอินพุตให้กับ Index Array



รูปที่ 2.40 แสดงการใช้งาน Index Array Function



รูปที่ 2.41 แสดงการใช้งาน Index Array Function กับอาร์เรย์ 2 มิติ

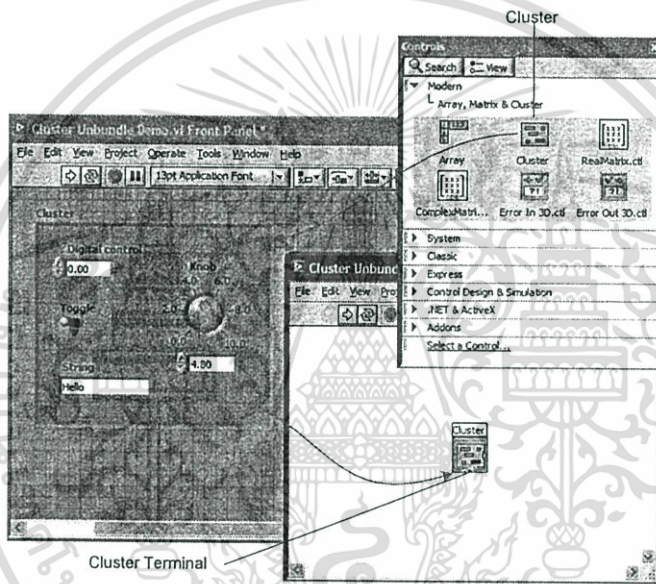
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกรค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พื้นฐานการใช้งานคลัสเตอร์

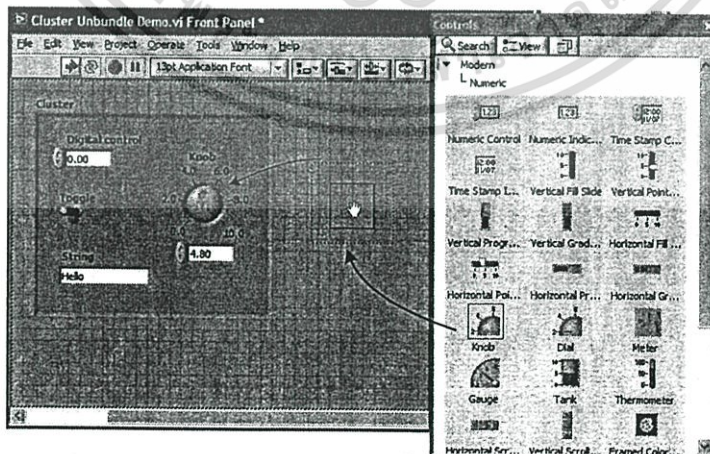
คลัสเตอร์เป็นเครื่องมือที่ทำหน้าจัดเก็บข้อมูลคล้ายกับอาร์เรย์เพียงแต่ว่าคลัสเตอร์สามารถเก็บข้อมูลที่ต่างชนิดกันได้ เช่นเก็บข้อมูลที่เป็น Numeric, Boolean และ String ไว้ด้วยกันได้ วิธีการเรียกใช้งานคลัสเตอร์ทำได้โดยเลือกที่ Controls Palette»Modern»Array & Cluste»Cluster

- การสร้างคลัสเตอร์ด้วย Control และ Indicator

การสร้างคริสเตอร์ด้วย Control และ Indicator นั้นสามารถที่จะกระทำได้เช่นเดียวกันกับการสร้างอาร์เรย์ แต่สำหรับการสร้างคลัสเตอร์จะแตกต่างจากการสร้างอาร์เรย์ตรงที่ข้อมูลในคลัสเตอร์สามารถเป็นได้ทั้ง Numeric, String และ Boolean แต่ข้อมูลโรอาร์เรย์จะเป็น Numeric เท่านั้น การใช้งานนั้นจะต้องมีฟังก์ชันที่ช่วยแยกชนิดของข้อมูลออกจากกันซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 2.42 แสดงการใช้งาน Cluster



รูปที่ 2.43 แสดงการสร้างคลัสเตอร์ด้วย Control และ Indicator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

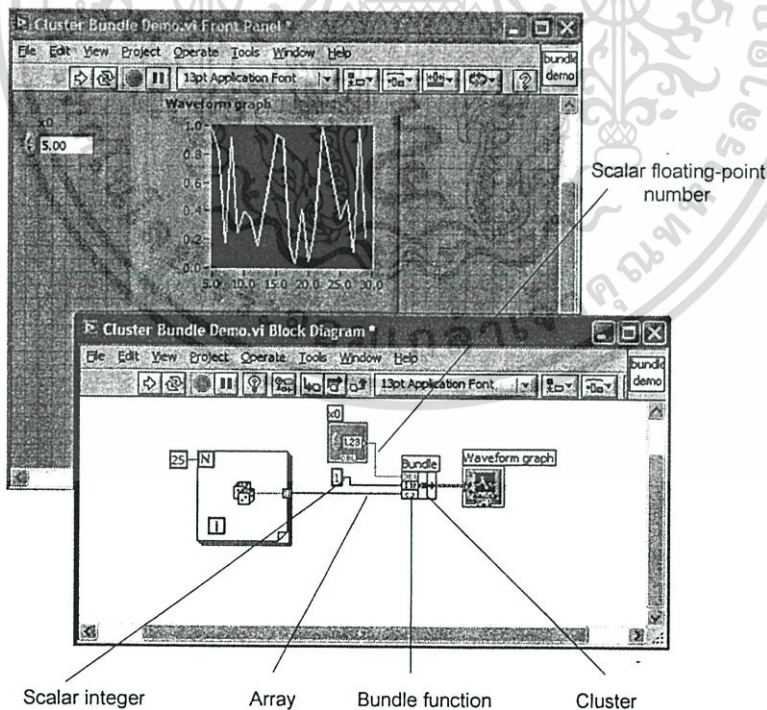
- ฟังก์ชันของคลัสเตอร์

ฟังก์ชันที่ช่วยในการทำงานของคลัสเตอร์มีอยู่หลายแบบด้วยกันในที่นี้จะขงกล่าวถึงฟังก์ชันที่ถูกนำมาใช้งานบ่อยๆ 2 ฟังก์ชันคือ Bundle และ Unbundle ซึ่งวิธีที่เรียกใช้ฟังก์ชันทำได้โดยเลือกที่ Function Palette» All Function»Cluster แล้วเลือกฟังก์ชัน Bundle หรือ Unbundle ตามต้องการ

- Bundle Function

Bundle Function เป็นฟังก์ชันที่ใช้รวมเอาอินพุตหลายๆ ตัวมาสร้างเป็นคลัสเตอร์ใหม่ขึ้นมาโดยอินพุตนั้นสามารถเป็นได้ทั้ง ตัวเลขจำนวนจริง อาร์เรย์ หรือแม้กระทั่งคริสเตอร์ เมื่อวางบล็อกของฟังก์ชัน Bundle ลงไปในหน้าต่างบล็อกโคดอะแกรม ฟังก์ชัน Bundle จะมีอินพุตเทอร์มินอล 2 เทอร์มินอลอยู่ทางซ้ายและเทอร์มินอลเอาต์พุต 1 เทอร์มินอลอยู่ทางขวาและอินพุตที่เป็นคลัสเตอร์จะอยู่ด้านบนของบล็อก เราสามารถที่จะเพิ่มหรือลดจำนวนเทอร์มินอลอินพุตให้มีจำนวนเท่าที่จำเป็นต้องการใช้งานโดยใช้เมาส์คลิกที่บล็อกแล้วเลื่อนขึ้นลงในแนวตั้งหรือใช้เมาส์ไปวางตรงเทอร์มินอลอินพุตแล้วคลิกเมาส์ขวา แล้วเลือก Add Input ถ้าต้องการเพิ่มเทอร์มินอล และเลือก Remove Input ถ้าต้องการลดเทอร์มินอล

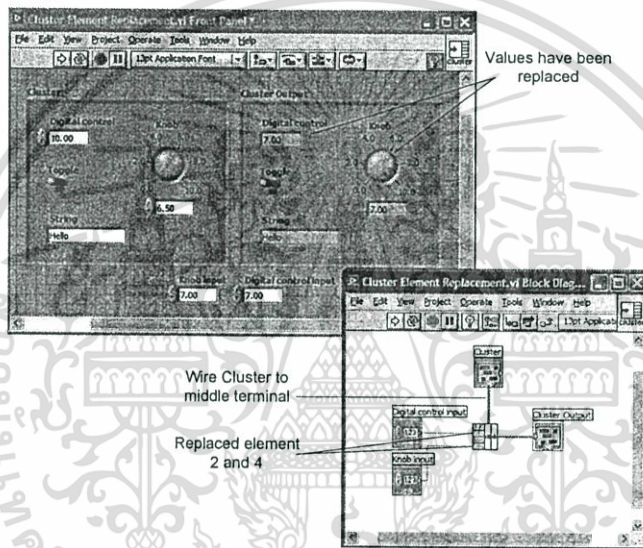
ในรูปที่ 2.44 จะเป็นตัวอย่างการสร้างคริสเตอร์ด้วย Bundle โดยมีอินพุต 3 ชนิดคือ Floating-Point Number, Scalar Integer และ Array ที่สร้างจาก For Loop และมีเอาต์พุตที่แสดงผลด้วยกราฟ



รูปที่ 2.44 แสดงการใช้งาน Bundle Function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

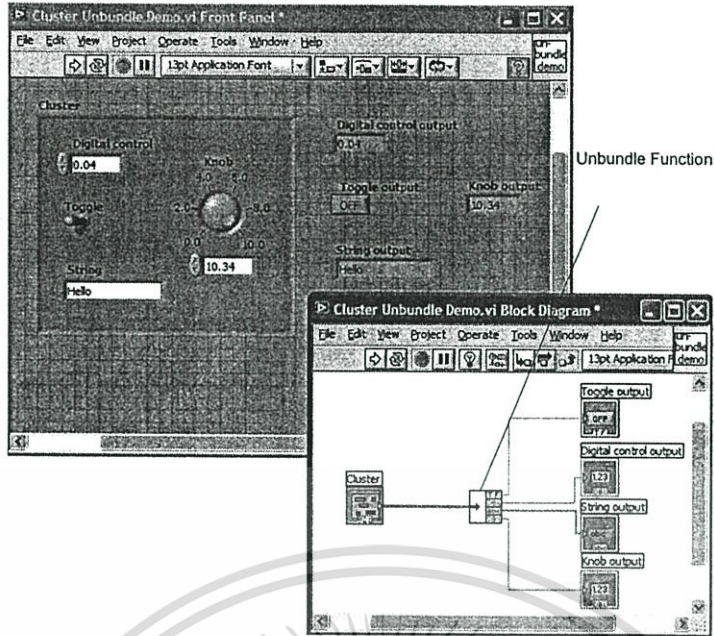
การเพิ่มเทอร์มินอลอินพุตของฟังก์ชัน Bundle ทางซ้ายในขณะที่มีอินพุตที่เป็นคลัสเตอร์อยู่ด้วยโดยไม่มีผลกระทบต่อโปรแกรมเดิม ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.45 ซึ่งมีคลัสเตอร์ 2 ตัว หนึ่งตัวเป็นอินพุตและอีกหนึ่งตัวเป็นเอาต์พุต การทำงานของโปรแกรมคือเอาต์พุตจะทำงานแปรตามอินพุต ถ้าเราต้องการควบคุมเอาต์พุตโดยที่ไม่ต้องไปแก้ไขอินพุตเราสามารถที่จะเพิ่มอินพุตให้กับ Bundle และสร้างอินพุตให้กับ Bundle ให้ตรงกับเอาต์พุตที่เราต้องการควบคุม จากรูปที่ 2.45 การทำงานของโปรแกรมขณะที่มีอินพุตที่เป็นคลัสเตอร์เพียงอย่างเดียวเอาต์พุตจะแปรตามอินพุตแต่เมื่อเราเพิ่มอินพุตแบบ Knop และอินพุต Numeric Control เข้าไปที่เทอร์มินอลอินพุตของ Bundle เมื่อเราทดสอบโปรแกรมจะเห็นได้ว่าเมื่อเราเปลี่ยนค่าอินพุตแบบ Knop และอินพุต Numeric Control ในคลัสเตอร์อินพุตค่าภายในคลัสเตอร์เอาต์พุตจะไม่เปลี่ยนแปลงแต่เมื่อเราเปลี่ยนค่าอินพุตที่เราเพิ่มเข้าไปค่าเอาต์พุตก็จะเปลี่ยนแปลงตาม



รูปที่ 2.45 แสดงการใช้งาน Bundle Function

- Unbundle Function

ในคลัสเตอร์จะประกอบไปด้วยชนิดของข้อมูลที่แตกต่างกัน Unbundle Function จะช่วยในการแยกข้อมูลอินพุตที่แตกต่างกันออกจากกันเพื่อจะนำเอาต์พุตนั้นไปใช้งานต่อไป ฟังก์ชันของ Unbundle ที่วางลงไปบนหน้าต่างบล็อกโคดอะแกรมครั้งแรกจะมีอินพุต 1 อินพุต และมีเอาต์พุต 2 อินพุต เอาต์พุต Unbundle จะเปลี่ยนไปตามอินพุตที่เป็นคลัสเตอร์ ตัวอย่างเช่น มีคลัสเตอร์อินพุตที่มีชนิดของข้อมูลแตกต่างกัน 4 ชนิด เมื่อต่อสายของคลัสเตอร์เข้ากับอินพุตของ Unbundle เอาต์พุตของ Unbundle จะเปลี่ยนเป็น 4 เอาต์พุตโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 2.46 แสดงการใช้งาน Unbundle Function

- พื้นฐานการใช้งาน Charts และ Graph

- Waveform Charts

การแสดงผลข้อมูลในลักษณะของ Chart เป็นการแสดงผลการพล็อตรูปคลื่นสัญญาณข้อมูลแบบหนึ่งที่สามารถพล็อตข้อมูลที่เป็นสเกลลาร์และเป็นอาร์เรย์ได้ การเรียกใช้งาน คือเลือกที่ Controls Palette » Graph » Waveform Chart

Waveform Chart ในโปรแกรม LabVIEW มีเพียงชนิดเดียวแต่มีคุณสมบัติในการแสดงข้อมูลที่แตกต่างกัน 3 อย่างคือ Strip Chart, Scope Chart และ Sweep Chart ซึ่งข้อแตกต่างของ Chart ทั้ง 3 แบบ สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.47

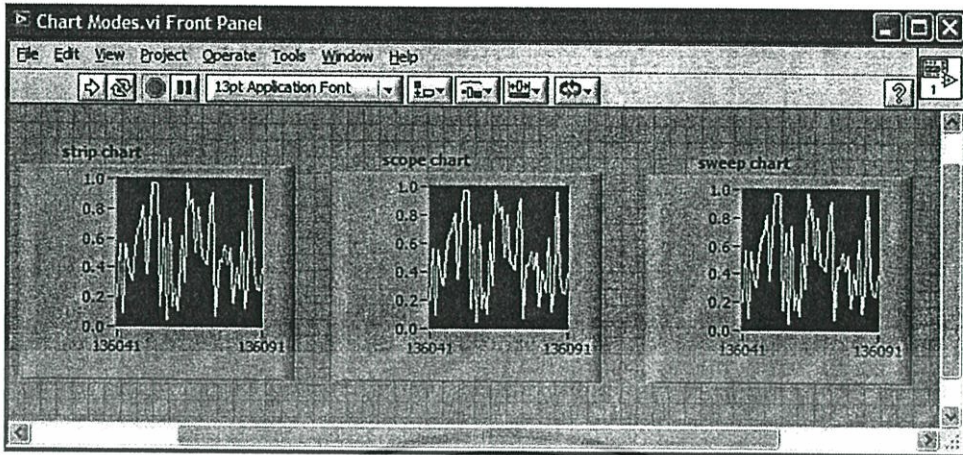
Strip Chart มีคุณสมบัติในการพล็อตข้อมูลไปจนกว่าจะหยุดพล็อตซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเส้นของสัญญาณข้อมูลที่พล็อตนั้นจะเลื่อนจากขวาไปซ้ายต่อเนื่องกันไป

Scope Chart คุณสมบัติของการพล็อตแบบนี้คือจะแบ่งเป็นช่วงของข้อมูลโดยการกำหนดที่แกนเวลาเมื่อโปรแกรมทำการพล็อตข้อมูลไปถึงค่าสุดท้ายของช่วงแรกแล้วการพล็อตข้อมูลของช่วงต่อไปโปรแกรมจะทำการลบกราฟในช่วงแรกไปแล้วเริ่มการพล็อตใหม่โดยเวลาเริ่มต้นจะนับต่อจากค่าสุดท้ายของช่วงแรก

Sweep Chart จะทำงานคล้ายกับ Scope Chart แต่เมื่อเริ่มทำการพล็อตกราฟในช่วงต่อไปเส้นกราฟในช่วงแรกจะไม่ถูกลบจะทำงานในลักษณะพล็อตทับเส้นกราฟเดิมและจะมีเส้นสีแดงในแนวตั้งกล่าวเลื่อนจากซ้ายไปขวาเพื่อแสดงถึงจุดการพล็อตกราฟครั้งล่าสุด คุณสมบัติทั้ง 3 ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

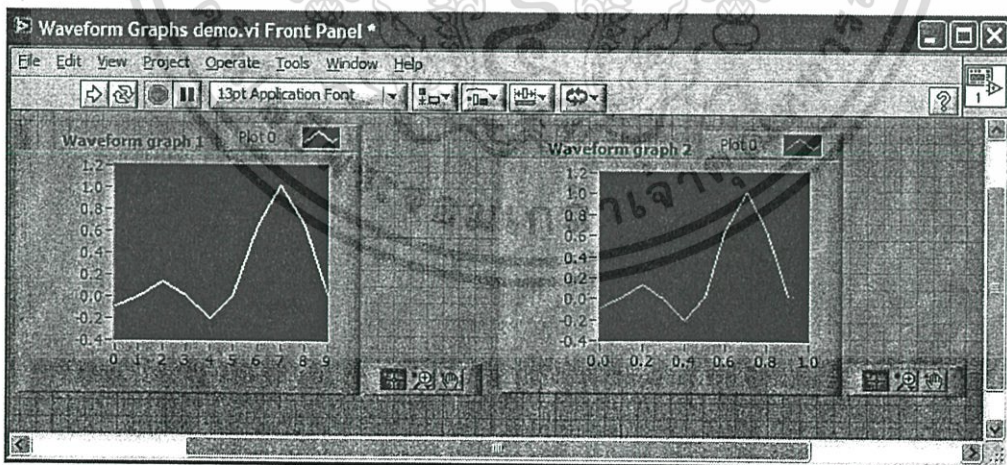
Waveform Chart แสดงดังรูปที่ 2.47 เป็นการแสดงค่าของข้อมูลที่เก็บอยู่ในอาร์เรย์เทียบกับเวลาที่รับเข้ามา



รูปที่ 2.47 แสดงคุณสมบัติของ Waveform Chart

- Waveform Graphs

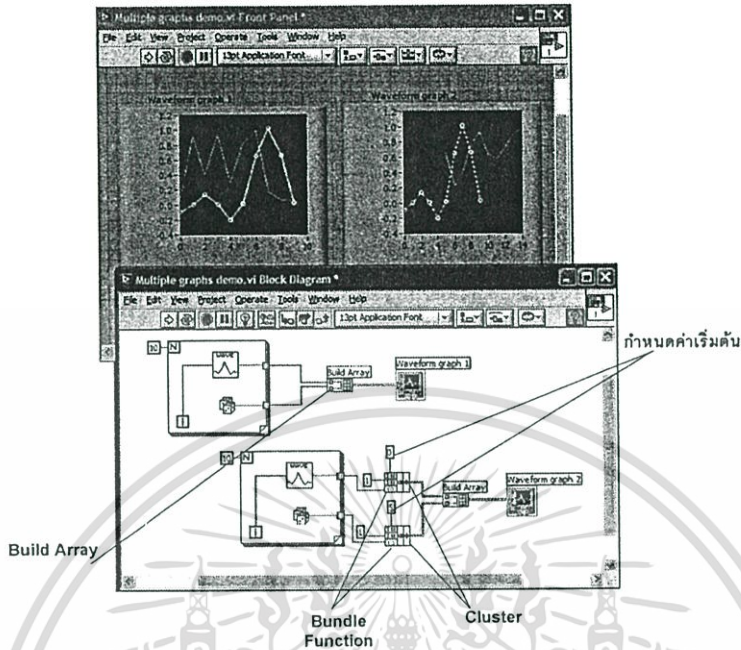
แตกต่างจาก Waveform Chart คือการพล็อตข้อมูลด้วย Waveform Graphs จะมีการกำหนดจำนวนของช่วงข้อมูลอย่างชัดเจนจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในช่วงของกราฟจะถูกแสดงออกมาทั้งหมด การพล็อตกราฟหลายเส้นทำได้โดยการนำอาร์เรย์แต่ละตัวมาต่อกันเพื่อสร้างอาร์เรย์ใหม่ จำนวนเส้นกราฟที่แสดงจะเท่ากับมิติของอาร์เรย์ การเรียกใช้งาน Waveform Graphs ทำได้คือเลือกที่ Controls Palette»Modern»Graph»Waveform Graphs ลักษณะของการพล็อตกราฟลงบน waveform graph แสดงได้ดังรูปที่ 2.48



รูปที่ 2.48 แสดงคุณสมบัติของ Waveform Graph

นอกจากนี้แล้วเรายังสามารถใช้ Bundle และ Cluster มาช่วยในการกำหนดค่าเริ่มต้นและความถี่ในการแสดงข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.49 กราฟแรกจะแสดงการสร้างสัญญาณ 2 เส้นให้อยู่บนกราฟเดียวกันโดยใช้ฟังก์ชัน Build Array เข้ามาช่วย กราฟที่สองจะเป็นการสร้างสัญญาณ 2 เส้นให้อยู่แยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนกราฟเดียวกันและให้สามารถกำหนดค่าเริ่มต้นของกราฟแต่ละเส้นได้ ซึ่งเราจะนำเอา Bundle และ Cluster โดยกราฟเส้นแรกให้เริ่มต้นที่ค่า 0 แสดงค่าทั้งหมด 10 ค่า และอีกเส้นให้เริ่มต้นที่ 5 และค่าที่แสดงทั้งหมด 10 ค่า เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.49

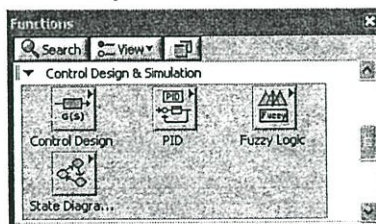


รูปที่ 2.49 แสดงคุณสมบัติของ Waveform Graph

2.4.2.3 การประยุกต์ใช้งาน Control Design & Simulation

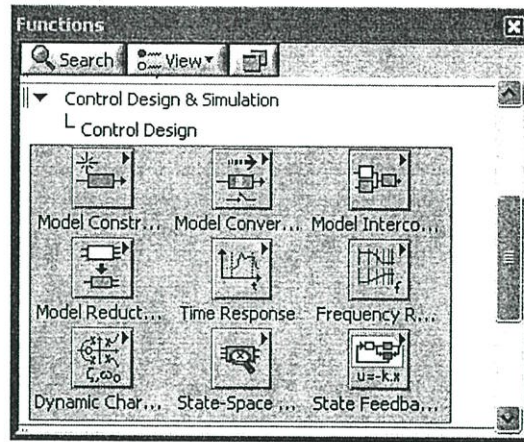
Control Design Toolkit เป็นอีกเครื่องมือหนึ่งซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถให้กับโปรแกรม LabVIEW ในด้านการใช้งานทางระบบควบคุมทั้งในส่วนของการวิเคราะห์และออกแบบระบบ ฟังก์ชันต่างๆที่ประกอบกันใน Control Design Toolkit นั้นเทียบได้กับ Control System Toolbox ที่มีในโปรแกรม Matlab โดยเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวรายละเอียดขององค์ประกอบเครื่องมือต่างๆในพาเลท CDT, การสร้างโมเดล, การเชื่อมต่อโมเดล, การหาโมเดลทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันจากโมเดลสเตตสเปซ, โมเดลแบบดิจิทัล, ผลตอบสนองในโดเมนเวลา, ผลตอบสนองในโดเมนความถี่, ตัวอย่างการวิเคราะห์และจำลองระบบควบคุม ซึ่งแต่ละหัวข้อมีเนื้อหาและตัวอย่างการใช้งานดังต่อไปนี้

- องค์ประกอบเครื่องมือต่างๆ ในพาเลท CDT



รูปที่ 2.50 Control Design & Simulation Palette

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.51 Control Design Palette

เมื่อติดตั้ง Control Design Toolkit จะปรากฏไอคอน Control Design ขึ้นที่พาเลท Functions»Control Design & Simulation ดังรูปที่ 2.50 จากนั้นคลิกที่ไอคอนดังกล่าวจะปรากฏพาเลท Control Design ดังรูปที่ 2.51 โดยเราสามารถแจกแจงพาเลทย่อยในพาเลท Control Design ตามหน้าที่การใช้งาน ได้ดังนี้

- พาเลท **Model Construction** , ประกอบด้วยฟังก์ชัน หรือ/และ พาเลทย่อย สำหรับการสร้างและแสดงโมเดลแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้:
 - Construct State-Space Model
 - Construct Transfer Function Model
 - Construct Zero-Pole-Gain Model
 - Construct Random Model
 - Construct Special Model
 - Draw Transfer Function Equation
 - Draw Zero-Pole-Gain Equation
 - Read Model From File
 - Write Model From File
 - Model Information
- พาเลท **Model Conversion**, ประกอบด้วยฟังก์ชัน สำหรับการแปลงโมเดล ดังต่อไปนี้ :
 - Convert to State-Space Model
 - Convert to Transfer Function Model
 - Convert to Zero-Pole-Gain Model
 - Convert Delay with Pade Approximation
 - Convert Delay to Poles at Origin
 - Convert Continuous to Discrete
 - Convert Discrete to Discrete
 - Convert Discrete to Continuous
 - Convert Control Design to Simulation
 - Convert Simulation to Control Design
- พาเลท **Model Interconnection**, ประกอบด้วยฟังก์ชัน หรือ/และ พาเลทย่อยสำหรับการเชื่อมต่อโมเดลต่อไปนี้:
 - Serial
 - Parallel
 - Feedback
 - Append
 - Rational Polynomial palette with Functions for combining polynomials

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พาเลท Model **Reduction**, ประกอบด้วยฟังก์ชัน ต่อไปนี้:
 - Minimal Realization
 - Model Order Reduction
 - Minimal State Realization
 - Remove IO from Model
 - Select IO (input or output) from Model
- พาเลท Time **Response**, ประกอบด้วยฟังก์ชัน หรือ/และ พาเลทย่อยสำหรับการหาผลตอบสนองทางเวลา ดังต่อไปนี้:
 - Step Response (step input)
 - Impulse Response (impulse input)
 - Initial Response (response from initial state, with zero input)
 - Linear Simulation
 - Get Time Response Data
- พาเลท Frequency **Response**, ประกอบด้วยฟังก์ชันสำหรับการหาผลตอบสนองทางความถี่ ดังต่อไปนี้:
 - Bode
 - Nyquist
 - Nichols
 - Singular Values
 - All Margins
 - Gain and Phase Margin
 - Evaluate at Frequency
 - Bandwidth
 - Get Frequency Response Data
- พาเลท Dynamic **Characteristics**, ประกอบด้วยฟังก์ชันสำหรับการหาคูณลักษณะทางไดนามิกส์ ดังต่อไปนี้:
 - Root Locus
 - Pole-Zero Map
 - Damping Ratio and Natural Frequency
 - DC Gain
 - Stability
 - Norm
 - Covariance Response
 - Total Delay
 - Distribute Delay
 - Parametric Time Response
- พาเลท State Space **Model Analysis**, ประกอบด้วยฟังก์ชันสำหรับการวิเคราะห์โมเดล State-Space ดังต่อไปนี้:
 - Controllability Matrix
 - Observability Matrix
 - Grammians
 - Canonical State-Space Realization
 - Balance State-Space Model (Diagonal)
 - Balance State-Space Model
 - Controllability Staircase
 - Observability Staircase
 - State Similarity Transform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พาเลท State Feedback Design , ประกอบด้วยฟังก์ชันสำหรับการออกแบบระบบ State แบบป้อนกลับดังต่อไปนี้:
 - Ackermann
 - State Estimator
 - Pole Placement
 - State-Space Controller
 - Linear Quadratic Regulator
 - Augment Output with States
 - Kalman Gain

- การสร้างโมเดล

Control Design Toolkit รองรับการสร้างโมเดลของระบบเชิงเส้นไม่ผันแปรตามเวลา (linear-Time-invariant system) ทั้งในแบบอนาล็อก (Continuous) และดิจิทัล (Discrete) โมเดล ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว เราสามารถจัดรูปโมเดลที่สร้างขึ้นให้อยู่ใน 3 รูปแบบที่ต่างกัน คือ แบบ Transfer function, แบบ Zero-Pole-Gain, แบบ State-Space ดังตาราง 2.5

ตาราง 2.5 รูปแบบ โมเดล

Model Form	Continuous	Discrete
Transfer Function	$H(s) = \frac{b_0 + b_1s + \dots + b_{m-1}s^{m-1} + b_ms^m}{a_0 + a_1s + \dots + a_{n-1}s^{n-1} + a_ns^n}$ $H = [H_{ij}]$	$H(z) = \frac{b_0 + b_1z + \dots + b_{m-1}z^{m-1} + b_mz^m}{a_0 + a_1z + \dots + a_{n-1}z^{n-1} + a_nz^n}$ $H = [H_{ij}]$
Zero-Pole-Gain	$H(s) = \frac{k(s-z_1)(s-z_2)\dots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_n)}$ $H = [H_{ij}]$	$H(z) = \frac{k(z-z_1)(z-z_2)\dots(z-z_m)}{(z-p_1)(z-p_2)\dots(z-p_n)}$ $H = [H_{ij}]$
State-Space	$\dot{x} = Ax + Bu$ $y = Cx + Du$	$\dot{x}(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$ $y(k) = Cx(k) + Du(k)$

รูปแบบของโมเดลในตารางสามารถนำไปใช้อธิบายโมเดลของระบบแบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต(SISO), หนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต (SIMO), หลายอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (MISO) หรือแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (MIMO) ได้ โดยวิธีการสร้างโมเดลแบบต่างๆข้างต้น ด้วย Control Design Toolkit มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การสร้างและแสดง Continuous-Time (s-) Transfer Functions

พาเลท Model Construction ประกอบไปด้วยฟังก์ชันต่างๆสำหรับการสร้างโมเดล โดยโมเดลผลลัพธ์จะแสดงในรูปของคลัสเตอร์ ซึ่งสามารถนำไปเป็นอินพุตของฟังก์ชันอื่น เช่น ฟังก์ชัน

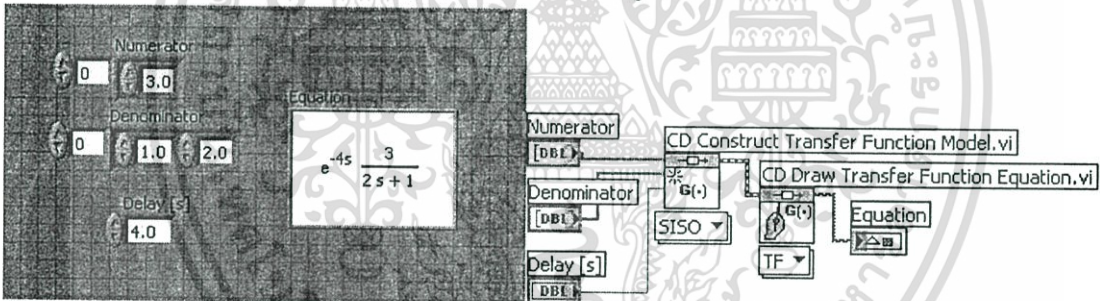
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่, การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ, การจำลองระบบควบคุม นอกจากฟังก์ชันการสร้างโมเดลแล้ว พาเลท Model Construction ยังมีฟังก์ชันสำหรับการแสดง Transfer function บน front panel ดังตัวอย่างแสดงการใช้งานดังรูปที่ 2.52

รูปที่ 2.52 แสดงตัวอย่าง VI สำหรับการสร้าง Transfer Function โดยใช้ CD Construct Transfer Function Model.vi จากบล็อกไดอะแกรมจะเห็นว่า อินพุตของ CD Construct Transfer Function Model.vi จะประกอบด้วย Numerator (เศษของ Transfer Function), Denominator (ส่วนของ Transfer function), Delay (ค่าบวกของเลขกำลังของพจน์ delay Time), Sampling Time (ในกรณีสร้างโมเดลแบบ Continuous Time Transfer function สัญญาณ sampling Time จะไม่มีการเชื่อมต่อ หรือจะกำหนดค่าให้เป็นศูนย์) ในตัวอย่างนี้เป็นการสร้างโมเดลของ Transfer function $H(s)$

$$H(s) = e^{-4s} \frac{3}{2s+1} \quad (2.9)$$

สามารถกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของ Numerator, Denominator และ Delay Time ของ Transfer Function ได้จาก Numeric Control บน Front Panel และแสดงผล Transfer Function ที่สร้างบน Front Panel โดยใช้ CD Draw Transfer Function.vi และ Indicator.vi เมื่อคลิก Run จะปรากฏ Transfer Function ที่สร้างขึ้นในช่อง Equation Indicator ดังรูปที่ 2.52



รูปที่ 2.52 Create_tf_cont.vi

2.5 บทสรุป

องค์ประกอบต่างๆ ของกระบวนการถือว่าเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ผู้ศึกษาและวิจัยจำเป็นต้องรู้ถึง ส่วนประกอบต่างๆ ของกระบวนการเป็นอย่างดี จึงจะสามารถวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมได้ นอกจากนี้แล้วยังจำเป็นต้องคำนึงถึง โปรแกรมหรือซอฟต์แวร์ที่จะนำมาใช้กับกระบวนการว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ซึ่งในบทพินิจนี้ได้กล่าวถึงทั้งกระบวนการและ โปรแกรมที่นำมาใช้อย่างละเอียด ทั้งนี้ เพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่นำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ไปศึกษาต่อไป

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีทั้งหมดที่นำมาใช้กับงานวิจัยนี้ เพื่อให้รู้ถึงที่มาของหลักการคิดและสมการแต่ละสมการ รวมไปถึงการนำทฤษฎีไปออกแบบตัวควบคุม ซึ่งในเนื้อหาจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีของตัวควบคุมพีไอดี ทฤษฎีแบบจำลองภายใน ทฤษฎี Smith Predictor ทฤษฎีแผนผังสัมประสิทธิ์ และบทสรุป ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดได้ถูกอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

3.2 ทฤษฎีการควบคุมแบบ พีไอดี (PID)

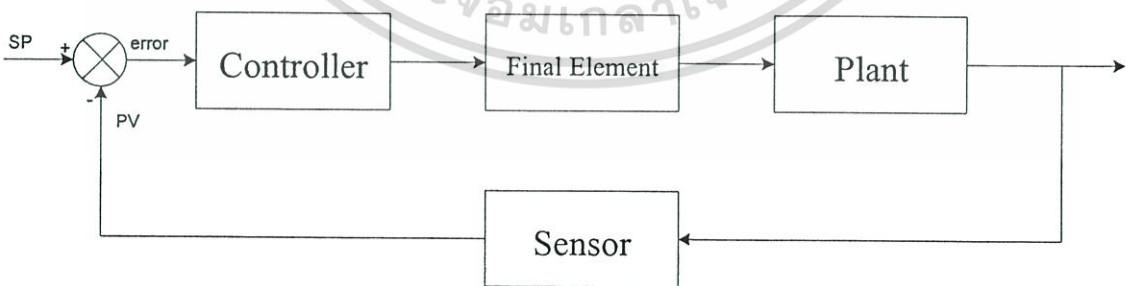
ตัวควบคุม เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ การควบคุมอัตโนมัติ คือการใช้ตัวควบคุม (Controller) ทำหน้าที่เปรียบเทียบกับค่าตั้งต้นและปรับพารามิเตอร์ให้มีผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะเป็นไปตามกฎ และรูปแบบของการควบคุมที่ผู้ควบคุมได้เลือก และกำหนดไว้ล่วงหน้า การควบคุมไม่ว่าจะเป็นการควบคุมด้วยมือหรืออัตโนมัติ ผลการควบคุมจะถูกวัดและป้อนกลับไปยังตัวควบคุมเพื่อทำการเปรียบเทียบ ค่าตั้งต้น และออกคำสั่ง ปรับใหม่ การกระทำจะดำเนินไปซ้ำๆ กันเช่นนี้ตามลำดับ ปัจจุบันเครื่องควบคุมสามารถแบ่งตามโครงสร้างการทำงานได้ 3 ชนิด คือเครื่องควบคุมแบบนิวมेटริกส์ที่ทำงาน โดยใช้สัญญาณลม เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้น (Linear Circuit) ในการสร้างสัญญาณควบคุม และเครื่องควบคุมแบบดิจิทัลทำงานโดยใช้วงจรตรรกะ (Logic Circuit) หรือไมโครโปรเซสเซอร์สร้างสัญญาณควบคุม โดยตัวควบคุมที่ถูกนำมาใช้และเป็นที่รู้จักกันดีมากที่สุดในการอุตสาหกรรมการผลิตก็คือ ตัวควบคุมแบบ PID

3.2.1 การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุมพีไอดี

ระบบควบคุมแบบ Closed-Loop เป็นระบบควบคุมแบบหนึ่งซึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะมีผลโดยตรงต่อการควบคุมดังนั้นระบบควบคุมแบบ Closed-Loop ก็คือระบบควบคุมป้อนกลับนั่นเอง สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งเป็นสัญญาณแตกต่างระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณป้อนกลับจะถูกป้อนให้ตัวควบคุม เพื่อที่จะได้ลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลงและทำให้เอาต์พุตของระบบมีค่าตามที่ต้องการ สัญญาณป้อนกลับนี้อาจเป็นสัญญาณเอาต์พุต โดยตรงหรือเป็นสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณเอาต์พุต

ระบบควบคุมป้อนกลับโดยทั่วไปประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

1. ตัวควบคุม (Controller) คือ ตัวรับสัญญาณวัดเพื่อนำมาเปรียบเทียบเป็นค่าเป้าหมายแล้วคำนวณหาค่าที่เหมาะสมเพื่อส่งเป็นสัญญาณควบคุมออกไปควบคุมกระบวนการ เราสามารถตั้งเป้าหมายให้กับตัวควบคุมนี้ได้ แบบการควบคุมมีหลายแบบ เช่น ON-OFF Control, P Control, PI Control, PID Control เป็นต้น
2. อุปกรณ์วัด (Measuring Instruments) หมายถึง อุปกรณ์ได้แก่ Sensor, Transducer หรือ อุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Converter) หรือวัดสัญญาณอื่นๆ ที่มีเอาต์พุตตามสัญญาณมาตรฐานเอาต์พุต
3. อุปกรณ์ปรับกระบวนการ (Final Control Element) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับสถานะของกระบวนการด้วยสถานะของกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามค่าสัญญาณควบคุม (Manipulated Variable) ของกฎการควบคุมอุปกรณ์พวกนี้ได้แก่ วาล์วควบคุม (Control Valve), inverter, Actuator ต่างๆ เป็นต้น
4. กระบวนการ (Plant or Process) คือ กระบวนการที่ถูกควบคุมหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ที่ต้องการควบคุมให้มีสถานะตามต้องการ ขณะที่สถานะการทำงานหรือสภาวะแวดล้อมอาจเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา กระบวนการได้แก่ อุณหภูมิ, ความดัน, อัตราการไหล, ระดับ เป็นต้น
5. สัญญาณมาตรฐาน (Standard Signal) ในการที่ต้องการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในระบบควบคุมอัตโนมัติให้ทำงานได้ตามต้องการนั้นจำเป็นต้องมีมาตรฐานรองรับซึ่งวิวัฒนาการตั้งแต่เริ่มมีระบบควบคุมอัตโนมัติมานั้นก็มีการเปลี่ยนแปลงระบบ ตัวอุปกรณ์เครื่องมือวัดมาตั้งแต่ลม (Pneumatic), ไฟฟ้า (Electrical) แล้วปัจจุบันเริ่มมีการใช้สัญญาณดิจิทัลกันแล้ว สัญญาณลม 3-15 PSI, สัญญาณไฟฟ้า 1-5 Vdc หรือ 4-20 mA



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) เพราะรูปแบบของตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมที่สามารถควบคุมกระบวนการต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีโครงสร้างการทำงานที่ไม่ซับซ้อน สามารถเข้าใจได้ง่าย การใช้งานตัวควบคุมพีไอดีนี้ขึ้นอยู่กับค่าปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของกระบวนการตามต้องการ

ตัวควบคุม PID ประกอบด้วยตัวควบคุมแบบ Proportional (P) ตัวควบคุมแบบ Integral (I) ตัวควบคุมแบบ Derivative (D) ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ดังนี้

$$m(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.1)$$

โดยที่ K_p = ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P (Proportional Gain)

T_i = ค่าเวลา Integral (Integral Time)

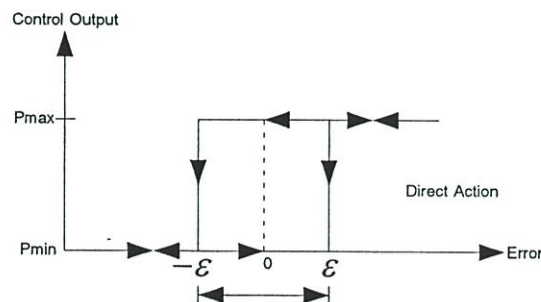
T_d = ค่าเวลา Derivative (Derivative Time)

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุม หรือตัวแปรปรับกระบวนการ (mv) ที่ได้จากตัวควบคุม PID จะถูกกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาเข้าตัวควบคุมกับตัวแปรกระบวนการ (pv) กับสัญญาณอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย (sp) โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์การควบคุมที่ผู้ควบคุมปรับแต่งไว้ล่วงหน้า ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะเป็นไปตามกรียาการควบคุมแบบต่างๆ ดังที่กล่าวต่อไปนี้

3.2.2 กรียาการควบคุมแบบป้อนกลับ

- กรียาการควบคุมแบบ ON-OFF

การควบคุมแบบ ON-OFF เป็นการควบคุมที่ง่ายที่สุด และนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยการควบคุมจะทำงานเพียง 2 สถานะ คือ เปิด (100%) กับปิด (0%) กรียาการควบคุมแบบ ON-OFF ดังแสดง รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงกรียาการควบคุมแบบ ON-OFF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าค่าวิกฤต ($+\varepsilon$) ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 0% เป็น 100% เมื่อค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าวิกฤต ($-\varepsilon$) ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 100% เป็น 0% ค่าเอาต์พุตที่อยู่ในช่วงเดธแบนด์ (Dead Band) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเสียดทานที่ไม่ได้คาดไว้ก่อน หรือบางครั้งก็จำเป็นต้องทำให้เกิดช่วงเดธแบนด์ขึ้น เพื่อป้องกัน ON-OFF บ่อยเกินไปอันจะทำให้อุปกรณ์ควบคุมหรือกระบวนการได้รับความเสียหาย แต่ช่วงเดธแบนด์นี้ต้องไม่กว้างนัก เพราะจะทำให้ค่าความเที่ยงตรงของการควบคุมลดลง ฏิกิริยาการควบคุมแบบ ON-OFF สามารถเขียนเป็นสมการ (3.2) ได้ดังนี้

$$m(t) = \begin{cases} 0\% & , e < -\varepsilon \\ 100\% & , e > +\varepsilon \end{cases} \quad (3.2)$$

เมื่อ $m(t)$ = สัญญาณควบคุมหรือเอาต์พุตของตัวควบคุม

$e(t)$ = ค่าความคลาดเคลื่อน

ε = $\frac{1}{2}$ ของค่าเดธแบนด์

- ฏิกิริยาการควบคุมแบบ Proportional (P)

ฏิกิริยาการควบคุม P นั้น ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะแปรผันตรงกับค่าความคลาดเคลื่อน กล่าวคือ ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากขึ้น ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมก็จะมีค่ามากขึ้นตาม และถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลง ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมก็จะมีค่าน้อยลงตาม ฏิกิริยาการควบคุมแบบ P สามารถเขียนสมการ (3.3) ได้ดังนี้

$$m_p(t) = K_p e(t) + \bar{m} \quad (3.3)$$

$m_p(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Proportional

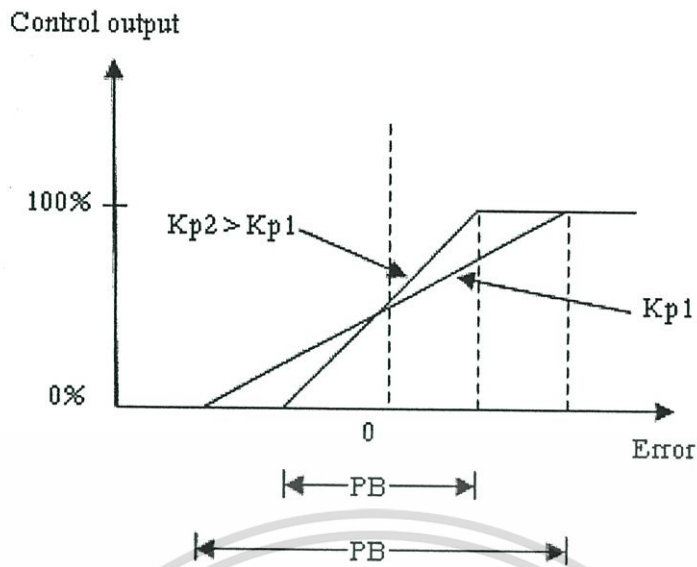
K_p = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Proportional

\bar{m} = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมที่ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์

ตัวควบคุมแบบ P บางตัวอาจจะใช้ค่า Proportional Band (PB) แทนการใช้ค่า K_p ซึ่ง PB คือ ช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างที่เอาต์พุตของตัวควบคุมมีค่า 0-100% ดังสมการ

$$PB = \frac{100\%}{K_p} \quad (3.4)$$

ข้อเสียของฏิกิริยาการควบคุมแบบ Proportional คือ ไม่สามารถกำจัดค่าออฟเซตได้



รูปที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของการทำงานของระบบควบคุมแบบ Proportional

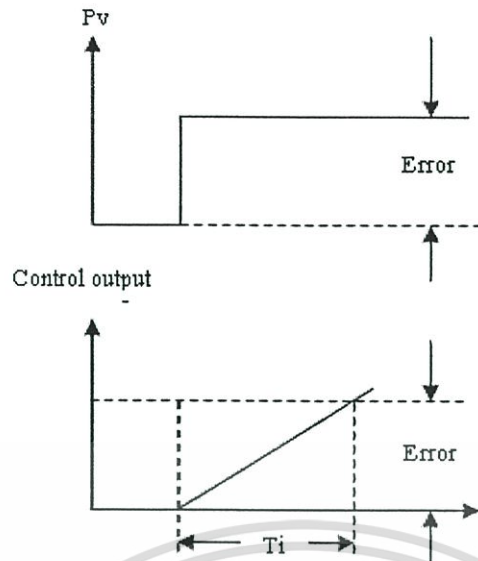
- การทำงานของระบบควบคุมแบบ Integral (I)

การทำงานของระบบควบคุมแบบ I หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การควบคุมแบบรีเซ็ต (Reset Control) โดยค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม หาได้จากค่าพื้นที่ทั้งหมดภายใต้กราฟของความคลาดเคลื่อนต่อเวลาคูณกับค่าคงที่ที่เรียกว่า อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ I (Integral Gain) ดังสมการ (3.5) ต่อไปนี้

$$m_I(t) = K_I \int_0^t e(t) dt + \bar{m}_I(0) \quad (3.5)$$

เมื่อ $m_I(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Integral
 K_I = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Integral
 $\int_0^t e(t) dt$ = พื้นที่ทั้งหมดของค่าความคลาดเคลื่อน
 $\bar{m}_I(0)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมที่เวลา t เท่ากับศูนย์

ผลของการทำงานของระบบควบคุมแบบ I นี้จะทำให้ไม่เกิดออสซิลเลชันในระบบ และลดค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ของระบบลงได้ แต่ถ้าการทำงานของระบบควบคุมมีค่าสูงเกินไป จะทำให้ผลตอบสนองของกระบวนการช้าลง ผลตอบสนองของการทำงานของระบบควบคุมแบบ I ดังแสดงในรูปที่ 3.4



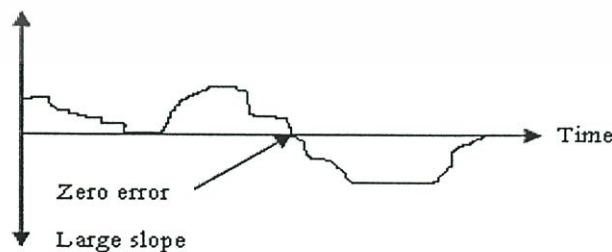
รูปที่ 3.4 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Integral

- กริยาการควบคุมแบบ Derivative (D)

กริยาการควบคุมแบบ D เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การควบคุมแบบอัตราส่วน (Rate Action) โดยสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีโอกาสเป็นศูนย์ได้ และค่าเอาต์พุตก็สามารถเปลี่ยนแปลงให้มีค่าสูงขึ้น เมื่อความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกการกระทำดังกล่าวว่า อัตราการกระทำ (Rate Action) ดังสมการ (3.6) ต่อไปนี้

$$m_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.6)$$

เมื่อ $m_D(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Derivative
 K_D = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Derivative
 $\frac{de}{dt}$ = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t



รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Derivative

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฏรยการควบคุมแบบ Proportional- Integral (PI)

ตามท่กล่าวมาแล้วว่ฏรยการควบคุมแบบ P นั้น จะมออฟเซ็ทเกดข้ัน ซ่่งการกำจ้ดค่า ออฟเซ็ทนี้ สามารถทำได้โดยการเพิ่มฏรยการควบคุมแบบ I เข้าไป ดังสมการต่อไปนี้

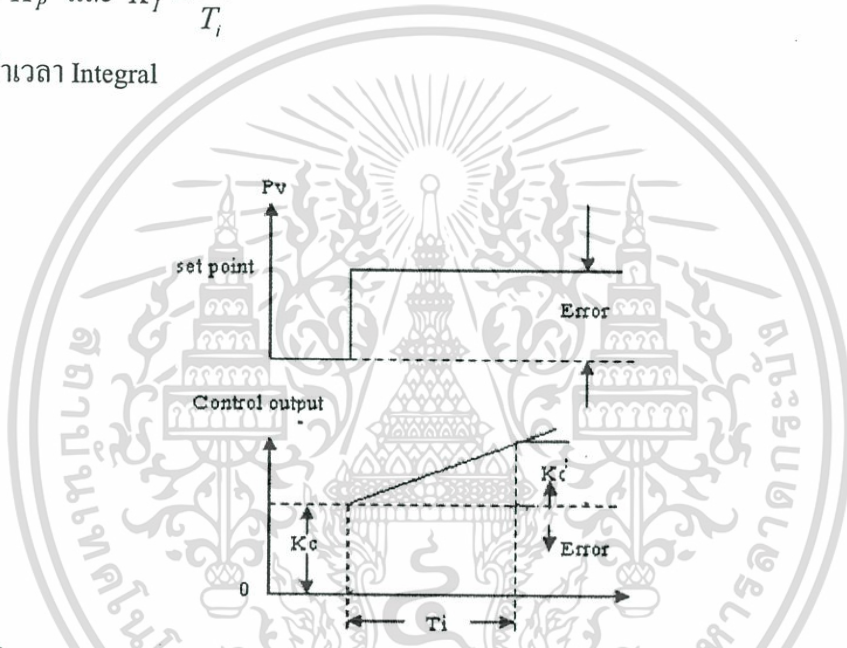
$$m_{PI}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_I \int_0^t e(t) dt \quad (3.7)$$

หรือ

$$m_{PI}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (3.8)$$

เมือ $K_C = K_p$ และ $K_I = \frac{1}{T_i}$

T_i = ค่าเวลา Integral



รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของฏรยการควบคุมแบบ PI (Direct action)

- ฏรยการควบคุมแบบ Proportional-Derivative (PD)

การประกยูกต์ใช้ฏรยการควบคุมแบบ P ร่วมกับฏรยการควบคุมแบบ D เพื่อทำให้ ผลตอบสนองของระบบรวดเร็วข้ัน แต่จะไม่มีผลโดยตรงต่อผลตอบสนองของระบบที่สภาวะคงที่ซ่่ง สมการเอาท์พุทของฏรยการควบคุมแบบ PD แสดงดังสมการ (3.9) ต่อไปนี้

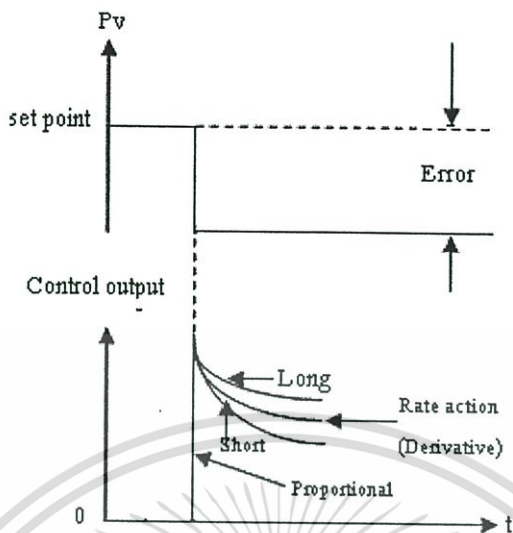
$$m_{PD}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.9)$$

หรือ

$$m_{PD}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $K_D = T_d$
 $T_d =$ ค่าเวลา Derivative



รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PD

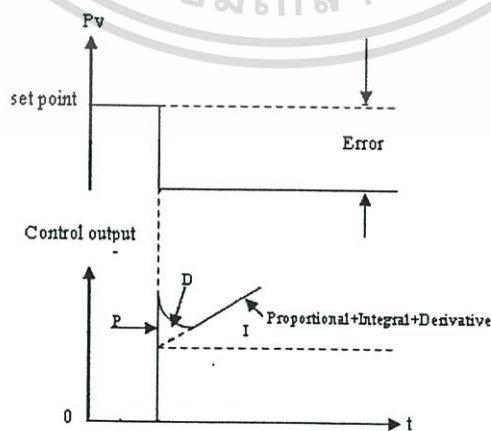
- กริยาการควบคุมแบบ Proportional – Integral- Derivative (PID)

เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมมีสมรรถนะเป็นไปตามต้องการ จึงใช้กริยาการควบคุมทั้ง 3 แบบ ร่วมกัน ซึ่งจะทำได้กริยาการควบคุมแบบ PID ที่มีสมการดัง (3.11) ต่อไปนี้

$$m_{PID}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_I \int_0^t e(t) dt + K_p K_D \frac{de(t)}{dt} \tag{3.11}$$

หรือ

$$m_{PID}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \tag{3.12}$$



รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PI (Direct action)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีแผนผังสัมประสิทธิ์ CDM

Coefficient Diagram Method หรือ CDM เป็นวิธีการออกแบบแบบพีชคณิต ซึ่งการออกแบบนั้นอยู่บนพื้นฐานขนาดที่สัมพันธ์กันของค่าสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะ (Characteristic Polynomial) วัตถุประสงค์ในการออกแบบก็คือต้องการสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) ที่เหมาะสม ดังนั้นวิธีนี้จึงดูเหมือนกับเป็นวิธีการวางโพลโดยอ้อม (Indirect Pole Placement Method) โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบด้วยวิธี CDM จะประกอบไปด้วยค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ซึ่งพารามิเตอร์ของวิธี CDM นี้จะใช้สำหรับทำการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ

วิธี CDM จะใช้สมการพหุนามแสดงแทนระบบ โดยส่วนเศษ (Numerator) และส่วนส่วน (Denominator) ของฟังก์ชันถ่ายโอนจะพิจารณาแยกกัน ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นทำได้โดยทำการกำหนดสมการคุณลักษณะหรือสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด โดยพิจารณาข้อกำหนดด้านสมรรถนะ (Performance Specification) ของระบบควบคุม และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากวิธี CDM จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากตัวควบคุมและกระบวนการ เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่อไป

ในส่วนนี้จะทำการอธิบายถึงคุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CDM โครงสร้างของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM กระบวนการในการออกแบบตัวควบคุมซึ่งประกอบไปด้วยการวางโพล และการวางซีโร การออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CDM เงื่อนไขเสถียรภาพของวิธี CDM และแผนผังสัมประสิทธิ์

3.3.1 คุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CDM

คุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CDM มีอยู่ด้วยกัน 5 ข้อ คือ

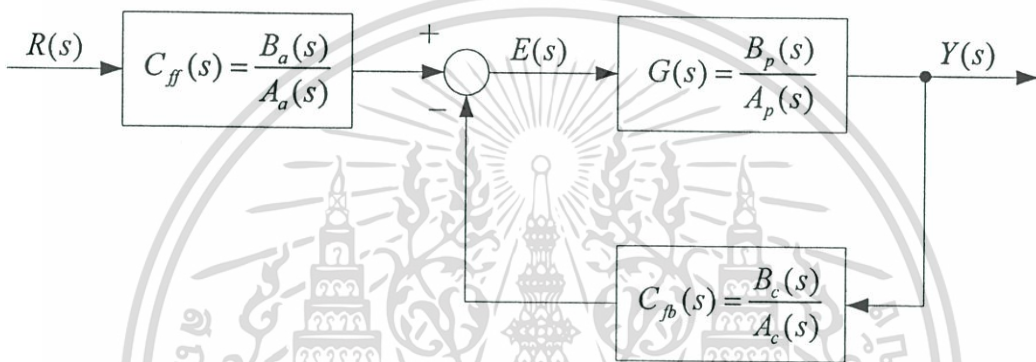
1. ใช้สมการพหุนามแสดงแทนระบบ
2. สมการพหุนามคุณลักษณะและตัวควบคุมสามารถออกแบบได้ทันที
3. แผนผังสัมประสิทธิ์สามารถใช้ตรวจสอบระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. ทฤษฎีเงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับเสถียรภาพ โดย Lipatov ถูกรวมเข้าไปไว้เป็นทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CDM
5. รูปแบบมาตรฐานสำหรับพารามิเตอร์ของ MLS ถูกปรับปรุงและใช้เป็นรูปแบบมาตรฐานสำหรับพารามิเตอร์ของวิธี CDM

การออกแบบระบบควบคุมหรือตัวควบคุมด้วยวิธี CDM นั้นจะอยู่บนพื้นฐานของการเลือกดัชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ โดยค่า τ จะเป็นตัวกำหนดความเร็วผลตอบสนอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

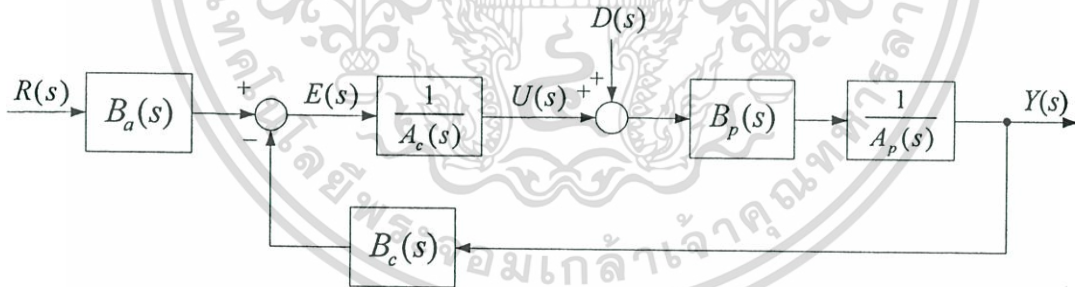
ของระบบควบคุม และค่า γ_i จะเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุม การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีเสถียรภาพจะคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการซึ่งเป็นตัวกำหนดความคงทนของระบบควบคุม

3.3.2 โครงสร้างของระบบควบคุม

โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 จากรูปจะเห็นได้ว่าระบบควบคุมประกอบไปด้วยกระบวนการ $G(s) = B_p(s)/A_p(s)$ ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ $C_{fb} = B_c(s)/A_c(s)$ ในลูปป้อนกลับ และตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า $C_{ff} = B_a(s)/A_a(s)$



รูปที่ 3.9 โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุม



รูปที่ 3.10 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM

เพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน โครงสร้างระบบควบคุมสามารถทำให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายได้โดยให้ $A_a(s) = A_c(s)$ แสดงได้ดังรูปที่ 3.10 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบนี้เรียกว่าโครงสร้างระบบควบคุมแบบ 2 ชั้นอิสระ (Two Degree of Freedom : 2DOF) และเป็นโครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (Single Input- Single Output : SISO) โดย $B_p(s)$ และ $A_p(s)$ คือสมการพหุนามของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$B_c(s)$, $A_c(s)$ และ $B_a(s)$ คือสมการพหุนามของตัวควบคุม โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการพหุนามได้ดังนี้

$$A_p(s) = p_k s^k + p_{k-1} s^{k-1} + \dots + p_1 + p_0 \quad (3.14)$$

$$B_p(s) = q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \dots + q_1 + q_0 \quad (3.15)$$

และสมการพหุนามของตัวควบคุมคือ

$$A_c(s) = l_\psi s^\psi + l_{\psi-1} s^{\psi-1} + \dots + l_1 + l_0 \quad (3.16)$$

$$B_c(s) = j_\psi s^\psi + j_{\psi-1} s^{\psi-1} + \dots + j_1 + j_0 \quad (3.17)$$

$$B_a(s) = p_\psi s^\psi + p_{\psi-1} s^{\psi-1} + \dots + p_1 + p_0 \quad (3.18)$$

โดย $\psi < k$ และ $m < k$

และเอาต์พุตของระบบควบคุมดังรูปที่ 3.10 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y(s) = \frac{B_p(s) [B_a(s)R(s) - B_c(s)N(s) + A_c(s)D(s)]}{A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)} \quad (3.19)$$

โดย $R(s)$ คือสัญญาณอินพุตอ้างอิง, $Y(s)$ คือสัญญาณเอาต์พุตของระบบควบคุม, $D(s)$ คือสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบควบคุม และ $N(s)$ คือสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่อุปกรณ์วัด เมื่อไม่คิดถึงผลกระทบจากสัญญาณ $D(s)$ และ $N(s)$ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมทั้งหมดจะกลายเป็น

$$G_{cl}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{B_a(s)B_p(s)}{A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)} \quad (3.20)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการ (3.20) แสดงให้เห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบป้อนกลับ $B_c(s)$, $A_c(s)$ นั้นใช้เพื่อวางโพลและตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า $B_a(s)$ ใช้เพื่อวางซีโร ในการออกแบบและจำลองการทำงานของระบบควบคุมต้องคำนึงถึงขนาดของสัญญาณควบคุมด้วย ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณควบคุมสำหรับการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM คือ

$$E(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} \cdot \frac{U(s)}{Y(s)} = \frac{G_{cl}(s)}{G(s)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{B_a(s)A_p(s)}{A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)} \quad (3.21)$$

3.3.3 กระบวนการในการออกแบบตัวควบคุม

สำหรับโครงสร้างระบบควบคุมแบบ 2 องศาอิสระ (2-DOF) ตัวควบคุมแบบป้อนกลับจะถูกใช้เพื่อวางโพลของระบบควบคุมหรือกำหนดโหนดการทำงานจากระบบควบคุม ซึ่งเป็นตัวพิจารณาถึงผลตอบสนองชั่วขณะและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุม ส่วนตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าจะถูกใช้เพื่อวางซีโรของระบบควบคุม ซึ่งเป็นตัวกำหนดถึงผลตอบสนองที่สภาวะชั่วขณะและที่สภาวะคงตัวของระบบควบคุม ดังนั้นปัญหาในการสร้างตัวควบคุมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ข้อหลักๆ คือ

1. เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่สภาวะชั่วขณะ และรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมตามที่ต้องการ ซึ่งก็คือการวางโพลของระบบควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ
2. เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่สภาวะชั่วขณะ และผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวหรือคุณสมบัติในการติดตามสัญญาณตามที่ต้องการ ซึ่งก็คือการวางซีโรของระบบควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้ตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

■ การวางโพล

การวางโพลเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM เพราะว่าโพลของระบบควบคุมนั้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับสมการคุณลักษณะ ดังนั้นถ้าพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมทั้งหมด $G_{cl}(s) = N_{cl}(s) / D_{cl}(s)$ จะเห็นได้ว่าสมการพหุนามในเทอมส่วน $D_{cl}(s)$ ก็คือสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมนั่นเอง จากโครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 3.10 สมการคุณลักษณะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$D_{cl}(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \quad (3.22)$$

โดย $D_{cl}(s)$ จะเป็นผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์ที่คงที่ของกระบวนการ ($B_p(s), A_p(s)$) กับค่าสัมประสิทธิ์ที่ยังไม่ทราบค่าของตัวควบคุมแบบป้อนกลับ ($B_c(s), A_c(s)$) เพราะว่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ $D_{cl}(s)$ นั้นถูกเลือกโดยวิธี CDM ดังนั้นปัญหาในการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถทำได้โดยการแก้สมการเชิงเส้น ซึ่งจะทำให้ได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบป้อนกลับ ($B_c(s), A_c(s)$) ในทันทีทันใด

■ การวางซีโร

ในการวางซีโรเพื่อใช้ในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงนั้น สามารถแบ่งชนิดของการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงได้เป็น 2 ชนิดคือ การติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอุดมคติและการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคติ โดยการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอุดมคตินั้นสามารถติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงใดๆ ได้ในทันทีทันใด ซึ่งการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบนี้สามารถใช้ได้ในทางทฤษฎีเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติแล้วนั้นไม่สามารถทำได้เพราะถูกจำกัดด้วยขนาดของสัญญาณควบคุม ในขณะที่การติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคตินั้นจะไม่สามารถติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงได้ในทันทีทันใด แต่จะค่อยๆ ไล่เข้าสู่สัญญาณอินพุตอ้างอิง ซึ่งการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงชนิดนี้สามารถใช้ได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นในที่นี้จะอธิบายแต่เพียงการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคติเท่านั้น

โดยทั่วไปแล้ว การติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคติสำหรับระบบควบคุมนั้นสามารถแบ่งชนิดของสัญญาณอินพุตได้ 3 แบบคือ สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได (Step), สัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบความเร็ว (Velocity) และสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอัตราเร่ง (Accelerator) ซึ่งการวางซีโรเพื่อใช้ในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงทั้ง 3 ชนิดนี้ ทำได้โดยกฎของพีชคณิตง่ายๆ และกฎที่ใช้ในการวางซีโรจะอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีค่าสุดท้าย (Final Value Theorem) ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

การวางซีโรเพื่อใช้ติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิง เพื่อความเหมาะสมและมีเสถียรภาพฟังก์ชันถ่ายโอน $G_{cl}(s)$ ต้องอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$G_{cl}(s) = \frac{N_{cl}(s)}{D_{cl}(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0} \quad (3.23)$$

โดย $n \geq m$ และ $a, b > 0$

เอาต์พุตของระบบควบคุมจะติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบแอสซิมโทติกเมื่อ

1. สัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบขั้นบันได $r(t) = a$, $R(s) = \frac{a}{s}$ ถ้า $a_0 = b_0$
โดย $m, n \geq 0$
2. สัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบความเร็ว $r(t) = at$, $R(s) = \frac{a}{s^2}$ ถ้า $a_0 = b_0$ และ $a_1 = b_1$
โดย $m, n \geq 1$
3. สัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอัตราเร่ง $r(t) = at^2$, $R(s) = \frac{a}{s^3}$ ถ้า $a_0 = b_0$, $a_1 = b_1$
และ $a_2 = b_2$ โดย $m, n \geq 2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CDM

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CDM โดยสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมป้อนกลับนั้นจะเป็นสมการเดียวกันกับสมการคุณลักษณะในสมการ (3.9) ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบของสมการพหุนามคุณลักษณะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ &= a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \\ &= \sum_{i=0}^n a_i s^i \end{aligned} \quad (3.24)$$

โดย $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ คือสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ

ค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ที่ใช้ในการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะและค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* ที่ใช้ตรวจสอบความคงทนของระบบควบคุมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i-1} a_{i+1}} \quad (3.25)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (3.26)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} \quad ; \quad \gamma_0, \gamma_n = \infty \quad (3.27)$$

โดย $i = 1, \dots, n-1$ จากสมการ (3.25) และสมการ (3.26) สัมประสิทธิ์ a_i สามารถเขียนได้ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{a_0 \tau}{\gamma_{i-1} \dots \gamma_2^{i-2} \gamma_1^{i-1}} \\ &= a_0 \tau^i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{(\gamma_{i-j})^j} \end{aligned} \quad (3.28)$$

เมื่อแทนสัมประสิทธิ์ a_i แต่ละอันดับในสมการ (3.24) จะได้สมการพหุนามคุณลักษณะในเทอมของ a_0, τ และ γ_i ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P(s) = a_0 \left[\left\{ \sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}} \right) (\tau s)^i \right\} + \tau s + 1 \right] \quad (3.29)$$

3.3.5 เงื่อนไขเสถียรภาพของวิธี CDM

ในการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM นั้น การพิจารณาเรื่องของเสถียรภาพจะใช้เงื่อนไขความพอเพียงสำหรับเสถียรภาพของ Lipatov โดย Lipatov กล่าวไว้ว่า วิธีที่ใช้ในการประเมินเสถียรภาพของระบบควบคุมเช่น ทฤษฎีของ Hurwitz นั้นค่อนข้างยุ่งยากและไม่เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบควบคุมที่มีอันดับสูงๆ โดยเงื่อนไขเสถียรภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานนั้นควรตรวจสอบได้ง่ายและใช้วิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน

Lipatov ได้เสนอว่า สำหรับระบบอันดับ n ที่มีจำนวนพารามิเตอร์ n ตัว ขอบเขตเสถียรภาพที่แท้จริงนั้นสามารถอนุมานให้อยู่ในรูปเชิงซ้อนที่มีมิติ n มิติ (n -Dimensional Space) โดยขอบเขตเสถียรภาพที่พอเพียง (Sufficient Stability Region) จะเป็นส่วนย่อยของขอบเขตเสถียรภาพ แม้ว่าเงื่อนไขเสถียรภาพที่พอเพียงจะไม่เป็นที่น่าพอใจก็ตาม ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่า เงื่อนไขเสถียรภาพของ Lipatov เป็นเงื่อนไขที่ขึ้นอยู่กับความพอเพียง

จากทฤษฎีตรวจสอบเสถียรภาพของ Routh Hurwitz (Routh –Hurwitz Stability Criterion) ระบบอันดับ 3 จะมีเสถียรภาพต่อเมื่อ

$$a_2 a_1 > a_3 a_0 \quad (3.30)$$

ซึ่งสามารถเขียนในเทอมของดัชนีเสถียรภาพได้ คือ

$$\gamma_2 \gamma_1 > 1 \quad (3.31)$$

สำหรับระบบอันดับ 4 จะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อเงื่อนไขต่อไปนี้เป็นจริง

$$a_2 > (a_1 / a_3) a_4 + (a_3 / a_1) a_0 \quad (3.32)$$

$$\gamma_2 \gamma_3 > 1 \quad (3.33)$$

จากสมการ (3.27), (3.31) และ (3.33) สามารถสรุปได้ว่า ระบบอันดับ 3 และระบบอันดับ 4 จะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ

$$\gamma_i > \gamma_i^* \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } i = 2 \sim n-2 \quad (3.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระบบอันดับ 5 และอันดับสูงๆขึ้นไป Lipatov ได้เสนอเงื่อนไขที่พอเพียงสำหรับความมีเสถียรภาพของระบบไว้หลายรูปแบบ โดยทฤษฎีที่เหมาะสมกับการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM กล่าวไว้ว่า

“ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อสมการพหุนามย่อยอันดับ 4 ทุกชุดของระบบมีเสถียรภาพด้วยตัวคูณขนาด 1.12 และระบบควบคุมจะไม่มีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อระบบย่อยอันดับ 3 บางชุดของระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพ”

ดังนั้นเงื่อนไขเสถียรภาพที่พอเพียงสำหรับความมีเสถียรภาพคือ

$$a_i > 1.12 \cdot \left[\frac{a_{i-1}}{a_{i+1}} a_{i+2} + \frac{a_{i+1}}{a_{i-1}} a_{i-2} \right] \quad (3.35)$$

$$\gamma_i > 1.12 \cdot \gamma_i^* \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } i = 2 \sim n-2 \quad (3.36)$$

และเงื่อนไขเสถียรภาพที่พอเพียงสำหรับความไม่มีเสถียรภาพคือ

$$a_{i+1} a_i \leq a_{i+2} a_{i-1} \quad (3.37)$$

$$\gamma_{i+1} \gamma_i \leq 1 \quad \text{สำหรับบางค่าของ } i = 1 \sim n-2 \quad (3.38)$$

3.3.6 แผนผังสัมประสิทธิ์

แผนผังสัมประสิทธิ์เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มาก สำหรับการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM โดยในแผนผังสัมประสิทธิ์นั้นจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับ ความมีเสถียรภาพ, ผลตอบสนองต่อเวลา และความคงทนของระบบควบคุมภายในแผนผังเดียว โดยแกนตั้งของแผนผังจะแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งอยู่ในรูปของลอการิทึมประกอบไปด้วย สมการพหุนามคุณลักษณะ a_i , ค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ในขณะที่แกนนอนของแผนผังจะแสดงถึงอันดับ i ที่สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์แต่ละตัว การสร้างแผนผังสัมประสิทธิ์สามารถแสดงได้ดังนี้

ถ้ากำหนดให้สมการพหุนามคุณลักษณะ $P(s)$ ของระบบควบคุมคือ

$$P(s) = 0.25s^5 + s^4 + 2s^3 + 2s^2 + 2 + 0.2 \quad (3.39)$$

จากสมการ (3.39) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ a_i และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM ดังนี้

$$a_i = [0.25 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 1 \quad 0.2] \quad (3.39a)$$

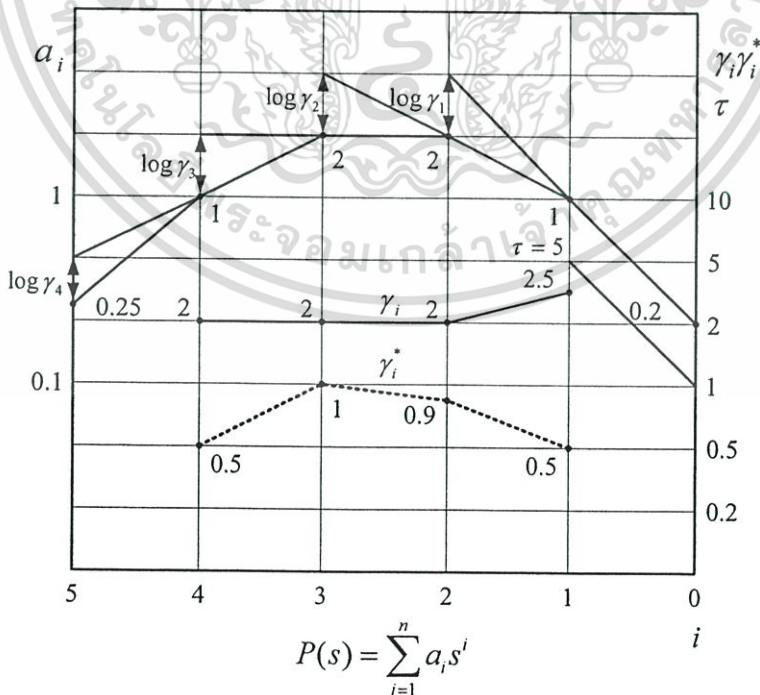
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\gamma_i = [2 \quad 2 \quad 2 \quad 2.5] \quad (3.39 \text{ b})$$

$$\gamma_i^* = [0.5 \quad 1 \quad 0.9 \quad 0.5] \quad (3.39 \text{ c})$$

$$\tau = 5 \quad (3.39 \text{ d})$$

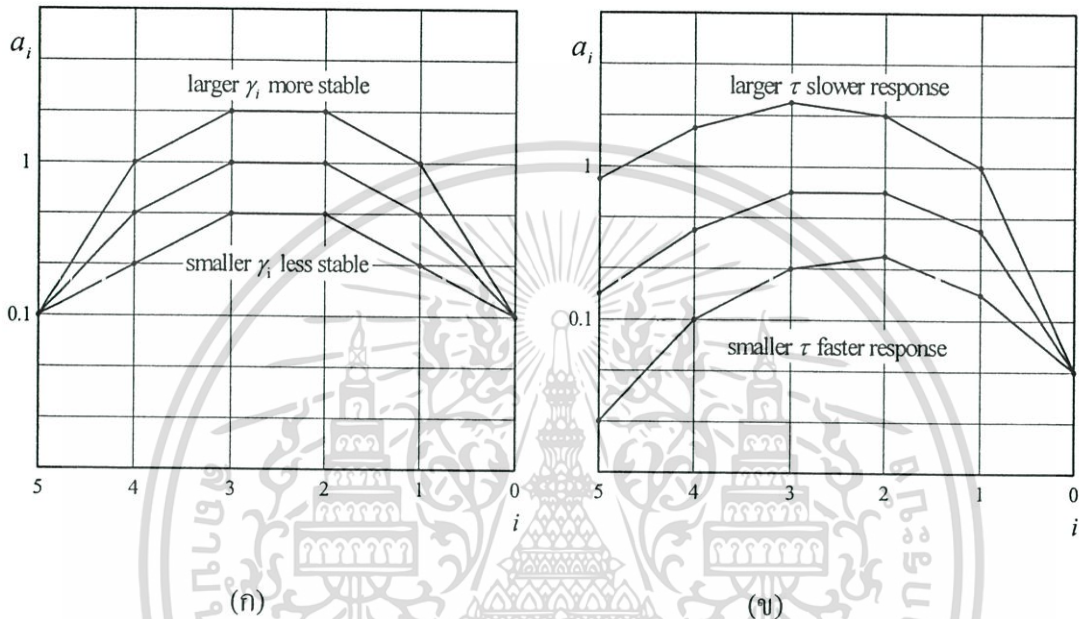
โดยค่าสัมประสิทธิ์ a_i , ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ , ค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* จะแสดงในแผนผังสัมประสิทธิ์ในรูปที่ 3.11 จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อนำเอาค่าจำกัดดัชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าจำกัดเสถียรภาพมาเปรียบเทียบกับกัน ทำให้ทราบถึงความคงทน (Robustness) ต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ เนื่องจากค่าดัชนีเสถียรภาพเป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ ดังนั้นระยะห่างระหว่างค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าจำกัดดัชนีเสถียรภาพ γ_i^* จึงเป็นตัวแสดงให้เห็นถึงระดับความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ แสดงให้เห็นได้ว่าถ้าระยะห่างระหว่าง γ_i และ γ_i^* ห่างมากขึ้นหรือมีค่ามากขึ้น ระบบควบคุมจะทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบความคงทนของระบบควบคุมได้อีกวิธีหนึ่งคือการต่อเส้นเชื่อมเป็นเส้นตรงจากสัมประสิทธิ์อันดับต่ำไปสู่สัมประสิทธิ์อันดับที่สูงกว่าเท่ากับสอง ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นการหาค่าดัชนีเสถียรภาพอีกวิธีหนึ่ง โดยระบบที่มีความคงทนมากจะมีเส้นกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ที่มีความโค้งมาก สอดคล้องกับค่า γ_i ที่มาก



รูปที่ 3.11 แผนผังสัมประสิทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ สามารถสรุปได้ว่าระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพมากขึ้น ถ้าเส้นกราฟค่าสัมประสิทธิ์มีความโค้งมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า γ_i ที่มากขึ้น และจะมีเสถียรภาพลดลงเมื่อความโค้งของเส้นกราฟลดลง แสดงได้ดังรูป 3.12 (ก) และถ้าเส้นกราฟมีความลาดเอียงทางซ้ายมากขึ้น ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะมีค่าลดลงซึ่งผลตอบสนองของระบบจะเร็วขึ้น ในทางกลับกันถ้าเส้นกราฟมีความลาดเอียงน้อย จะทำให้ค่า τ เพิ่มขึ้นและความเร็วของผลตอบสนองจะลดลง แสดงได้ดังรูป 3.12(ข) ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบควบคุมได้จากแผนผังค่าสัมประสิทธิ์เพียงแผนผังเดียว



รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงของดัชนีเสถียรภาพและค่าเวลาคงตัวสมมูลสอดคล้องกับเสถียรภาพและผลตอบสนองของระบบ

3.3.7 การเลือกพารามิเตอร์ของวิธี CDM

ในส่วนตัวแล้วได้อธิบายถึงความสำคัญของตำแหน่งจุดหักมุมในทางความถี่ และผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนองที่สภาวะชั่วขณะของระบบควบคุม ซึ่งในตอนนี้จะอธิบายถึงการเลือกพารามิเตอร์ γ_i และ τ ของวิธี CDM โดยแนวคิดพื้นฐานนี้ก็คือการเลือกวางจุดหักมุมที่ทำให้ค่าเรโซแนนท์พีกและค่าพุ่งเกินของระบบควบคุมต่ำที่สุดนั่นเอง เมื่อทำการพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนป้อนกลับของตัวควบคุมแบบ I อันดับ 1 ตามวิธีของ MLS อีกครั้งหนึ่งจะได้ว่า

$$G_{c1}(s) = \frac{1}{T_1 s + 1} \quad (3.46)$$

$$T_1 = \frac{1}{\omega_1} = 1 \quad (3.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 |G_{cl}(s)| &= -20 \log |1 + s| \\
 &= -20 \log \sqrt{1 + \omega^2}
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

โดยผลตอบสนองต่อขนาดที่ความถี่ ω_1 จะประมาณเท่ากับ $-3dB$ ดังได้อธิบายในส่วนที่แล้วว่า ผลตอบสนองต่อขนาดจะประกอบด้วยเส้นตรงที่ทำการประมาณขึ้นมาถ้าแบ่งระยะห่างระหว่างจุดหักมุมได้คือ เนื่องจากอัตราการห้วงนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลรวมระยะห่างทั้งหมดของจุดหักมุม γ_i ดังนั้นค่าพุงเกินและอัตราการห้วงจึงกลายเป็นค่าที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนกับผลรวมระยะห่างทั้งหมด γ_i ถ้าทำการเพิ่มจุดหักมุมขึ้นมาโดยเลือกวาง ω_2 ที่ความถี่ซึ่งทำให้ $|G_{cl}(s)| < -1dB$ จะต้องกำหนดให้ $\omega_2 \leq 0.509$ เมื่อนั้นระยะห่างระหว่าง ω_1 และ ω_2 คำนวณได้โดย $\log \omega_1 - \log \omega_2 \geq 0.293$ ซึ่งสามารถแปลงได้เป็น $\gamma_{n-1} \geq 10^{0.293} = 1.931$

โดยทั่วไปแล้วถ้ากำหนดให้ $\gamma_i = 2$ จะทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพที่ดีและผลตอบสนองของสมการช่วงขณะจะราบเรียบ อย่างไรก็ตามผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดจะมีค่าพุงเกินประมาณ 6% โดยการจำลองการทำงานโดย Manabe พบว่าค่าพุงเกินสามารถลดลงเป็นศูนย์ได้โดยกำหนดให้ $\gamma_1 = 2.5$ สำหรับผลตอบสนองทางความถี่การเพิ่ม γ_1 เป็น 2.5 ทำให้ระยะห่างระหว่างจุดหักมุมในช่วงความถี่ต่ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าเรโซแนนซ์ที่พิกัดที่เพิ่มขึ้นกับผลตอบสนองต่อขนาดและเป็นผลให้เกิดค่าพุงเกินนั้นจะถูกกำจัดไป

การกำหนดพารามิเตอร์ของวิธี CDM ดังที่ได้อธิบายมานั้น สามารถเขียนได้อีกแบบหนึ่งโดยจะเรียกว่า รูปแบบของ Manabe (Manabe Form) และค่ามาตรฐานของ γ_i สำหรับวิธี CDM สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_2 = 2, \quad \gamma_1 = 2.5 \tag{3.49}$$

และค่าเวลาเข้าที่สำหรับการออกแบบด้วยวิธี CDM คือ

$$t_s = 2.5\tau \sim 3\tau \tag{3.50}$$

จากสมการ (3.16) จะเห็นได้ว่าสมการพหุนามคุณลักษณะถูกอธิบายอยู่ในรูปกำลังของ τs และสัมประสิทธิ์อธิบายโดย γ_i ดังนั้นรูปทรงและความเร็วของผลตอบสนองสามารถพิจารณาได้โดยพารามิเตอร์ γ_i และ τ ตามลำดับ

คุณสมบัติพื้นฐานของค่าพารามิเตอร์ γ_i และ τ มาตรฐานสำหรับการออกแบบด้วยวิธี CDM สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ไม่มีค่าพุงเกินสำหรับกระบวนการที่เป็นแบบชนิด 1 และมีค่าพุงเกินประมาณ 40% สำหรับกระบวนการที่เป็นแบบชนิด 2
2. สำหรับระบบควบคุมที่มีค่าคงตัวเวลาสมมูลเท่ากันจะมีค่าเวลาเข้าที่น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลตอบสนองต่อสัญญาณขึ้นบันไดมีลักษณะใกล้เคียงกัน ไม่ขึ้นกับอันดับของสมการพหุนามคุณลักษณะ
4. โพลของระบบควบคุมอันดับต่ำๆจะวางตัวในแนวตั้งขนานกับแกนจินตภาพ ส่วนโพลของระบบควบคุมอันดับสูงจะอยู่ภายในบริเวณที่ล้อมรอบด้วยเส้นตรงที่ทำมุม $\pm 49.5^\circ$ จากแกนจริงลบ

ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ค่าดัชนีเสถียรภาพที่กำหนดให้ $\gamma_1 = 2.5$ และ $\gamma_2 = \gamma_3 = 2$ นั้นเป็นเพียงเงื่อนไขเบื้องต้นเพื่อให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพและได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามไม่จำเป็นต้องกำหนดให้ $\gamma_4 \sim \gamma_{n-1} = 2$ โดยสามารถแปลงค่าได้ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

$$\gamma_i > 1.5\gamma_i^* \quad \text{สำหรับ } i = 4 \sim n-1 \quad (3.51)$$

ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถออกแบบตัวควบคุมได้อย่างอิสระ ในบางครั้งอาจจะเลือกให้ค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i มีค่าสูงๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ จากเงื่อนไขเสถียรภาพโดย Lipatov ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพเมื่อค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i ทุกค่ามีค่ามากกว่า 1.5 โดย Lipatov ได้พิสูจน์ไว้ใน [9] และถ้าค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i ทุกตัวมีค่ามากกว่า 4 โพลของระบบทั้งหมดจะอยู่บนแกนจริง ดังนั้นค่าดัชนีเสถียรภาพจึงถูกเลือกให้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5-4 แต่ในบางครั้งเมื่อพิจารณากระบวนการบางกระบวนการแล้วพบว่าค่าดัชนีเสถียรภาพที่มากกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งในกรณีนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องลดค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i เพื่อให้เป็นค่าเดียวกับค่ามาตรฐาน

3.3.8 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของวิธี CDM

ในการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM นั้นการเลือกค่าพารามิเตอร์ γ_i และ τ นั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากค่า γ_i จะเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุม ส่วน τ เป็นตัวกำหนดความเร็วหรือค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุม โดยส่วนใหญ่แล้วในการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM เบื้องต้นนั้น จะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามรูปแบบของ Manabe Form ซึ่งสามารถให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ดี คือมีไม่มีค่าพุ่งเกินและมีค่าเวลาเข้าที่ตามที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตาม การกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามรูปแบบของ Manabe Form นั้นไม่สามารถใช้ได้กับทุกกระบวนการเสมอไป อาจจะต้องมีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ γ_i และ τ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ ซึ่งการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ γ_i และ τ จะแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

1. รูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมได้ตามที่ต้องการ แต่ค่าเวลาเข้าที่ของระบบไม่ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งในกรณีนี้จะทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ τ

2. ค่าเวลาเข้าที่ของระบบได้ตามที่ต้องการ แต่รูปทรงผลตอบสนองของระบบไม่ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งในกรณีนี้จะทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ γ_i

โดยทั่วไปแล้ว การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ γ_i และ τ นั้นจะใช้วิธีการลองผิดลองถูกปรับเปลี่ยนเรื่อยๆจนกว่าจะได้ผลตอบสนองของระบบควบคุมตามที่ต้องการ ซึ่งอาจจะใช้ระยะเวลาที่นานและยุ่งยากเล็กน้อย ดังนั้นวิธีในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ γ_i และ τ ที่ง่ายแต่มีประสิทธิภาพจึงจำเป็น ซึ่งในส่วนต่อไปจะอธิบายถึงการปรับแต่งพารามิเตอร์ γ_i และ τ สำหรับแต่ละกรณี ดังที่ได้อธิบายมา

3.3.8.1 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ τ

เมื่อรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมได้ตามที่ต้องการ แต่ค่าเวลาเข้าที่ยังไม่ได้ตามที่ต้องการ จำเป็นที่จะต้องทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ τ โดยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ τ นั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

สมมติให้ $G_c(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมที่ออกแบบไว้ในตอนแรกโดย

$$G_c(s) = \frac{a_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad a_i > 0 \text{ สำหรับ } i = 0 \sim n \quad (3.52)$$

สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ, อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและดัชนีเสถียรภาพสามารถเขียนได้ในรูปแบบดังนี้

สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ

$$A = [a_n \quad a_{n-1} \quad \dots \quad a_1 \quad a_0] \quad (3.53)$$

อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ

$$B = [b_{n-1} \quad b_{n-2} \quad \dots \quad b_1 \quad b_0] \quad (3.54)$$

ดัชนีเสถียรภาพ

$$C = [c_{n-2} \quad c_{n-3} \quad \dots \quad c_1 \quad c_0] \quad (3.55)$$

โดย

$$b_i = \frac{a_i}{a_{i+1}} \quad \text{สำหรับ } i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c_i = \frac{b_{i+1}}{b_i} \quad \text{สำหรับ } i = 0, 1, 2, \dots, n-2 \quad (3.57)$$

ทำการจัดสมการ (3.52) ใหม่ให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$G_{cl}(s) = \frac{a_0/a_n}{s^n + \frac{a_{n-1}}{a_n}s + \dots + \frac{a_1}{a_n}s + \frac{a_0}{a_n}} \quad (3.58)$$

จากสมการ (3.58) สามารถเขียนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะให้อยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะได้ดังนี้

$$A = \left[1 \quad \prod_{i=n-1}^{n-1} b_i \quad \dots \quad \prod_{i=2}^{n-1} b_i \quad \prod_{i=1}^{n-1} b_i \right] \quad (3.59)$$

ถ้าทำการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะในสัดส่วนที่เท่ากันคือ k จะได้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะดังนี้

$$A = \left[1 \quad k \prod_{i=n-1}^{n-1} b_i \quad \dots \quad k^{n-1} \prod_{i=2}^{n-1} b_i \quad k^n \prod_{i=1}^{n-1} b_i \right] \quad (3.60)$$

จากสมการ (3.59) และสมการ (3.60) จะสังเกตได้ว่าค่าดัชนีเสถียรภาพยังเหมือนเดิม ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปก็คือค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จากสมการ (3.60) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$G_{mc1}(s) = \frac{k^n a_0}{a_n s^n + k a_{n-1} s^{n-1} + \dots + k^{n-1} a_1 s + k^n a_0} \quad (3.61)$$

จากสมการ (3.61) จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่า τ ของระบบควบคุมเปลี่ยนไปเป็น

$$\tau = \frac{1}{k} \left(\frac{a_1}{a_0} \right) \quad (3.62)$$

โดยถ้าทำการเพิ่มค่า k ขึ้นจะทำให้ค่า τ มีค่าน้อยลง ซึ่งก็คือผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้น และในทางกลับกันถ้าค่า k อยู่ในช่วง $0 < k < 1$ ผลตอบสนองของระบบควบคุมจะช้าลง

วิธีที่ใช้ในการปรับผลตอบสนองของระบบให้ได้ค่าเวลาเข้าที่ตามที่ต้องการทำได้โดยพิจารณาว่า จากเดิมค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมอยู่ที่ค่าเวลาเท่าไร จากนั้นให้เลือกค่าเวลาเข้าที่ที่ต้องการและทำการหาค่า k โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$k = \frac{t_{s\text{old}}}{t_{s\text{new}}} \quad (3.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย t_{old} คือค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมเดิม และ t_{new} คือค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมที่ต้องการ หลังจากที่ได้ค่า k แล้วนำไปแทนในสมการ (3.62) ก็จะได้ค่า τ ของระบบควบคุมค่าใหม่ ออกมา

3.3.8.2 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ γ_i

ในกรณีที่ค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมได้ตามที่ต้องการ แต่รูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่ได้ตามที่ต้องการนั้นจำเป็นที่จะต้องปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ γ_i โดยการปรับแต่งค่า γ_i นั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

สมมติให้ $G_{cl}(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมที่ออกแบบไว้ในตอนแรก โดย

$$G_{cl}(s) = \frac{a_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad a_i > 0 \text{ สำหรับ } i = 0 \sim n \quad (3.64)$$

โดยสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ, อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและดัชนีเสถียรภาพจะมีรูปแบบเดียวกับสมการ (3.53), (3.54) และ (3.55) จัดสมการ (3.64) ใหม่ให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$G_{cl}(s) = \frac{1}{\frac{a_n}{a_0} s^n + \frac{a_{n-1}}{a_0} s^{n-1} + \dots + \frac{a_1}{a_0} s + 1} \quad (3.65)$$

จากสมการ (3.65) สามารถเขียนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะให้อยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะได้ดังนี้

$$A = \left[\frac{1}{\prod_{i=0}^{n-1} b_i} \quad \frac{1}{\prod_{i=0}^{n-2} b_i} \quad \dots \quad \frac{1}{\prod_{i=0}^1 b_i} \quad \frac{1}{\prod_{i=0}^0 b_i} \right] \quad (3.66)$$

จากสมการ (3.66) สามารถเขียนให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

$$A = \left[\frac{1}{\left[\prod_{i=0}^{n-2} c_i \prod_{i=0}^{n-3} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i \right] b_0^n} \quad \frac{1}{\left[\prod_{i=0}^{n-3} c_i \prod_{i=0}^{n-4} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i \right] b_0^{n-1}} \quad \dots \quad \frac{1}{b_0} \quad 1 \right] \quad (3.67)$$

ถ้าทำการเพิ่มค่าดัชนีเสถียรภาพในสัดส่วนที่เท่ากันคือ k จะได้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะใหม่ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}} \left[\prod_{i=0}^{n-2} c_i \prod_{i=0}^{n-3} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i \right] b_0^n} & \frac{1}{k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2} - 1} \left[\prod_{i=0}^{n-3} c_i \prod_{i=0}^{n-4} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i \right] b_0^{n-1}} \\ \dots & \frac{1}{b_0} \quad 1 \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

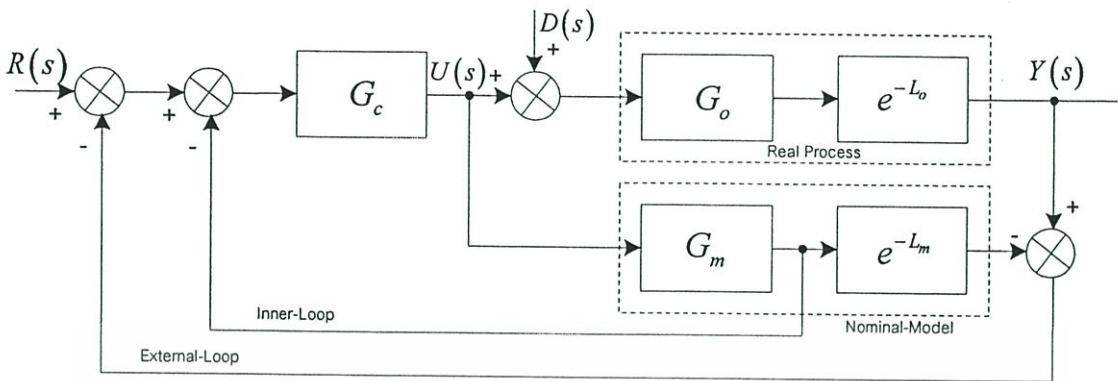
จากสมการ (3.67) และสมการ (3.68) จะสังเกตได้ว่าค่า τ ยังคงเหมือนเดิมไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลง โดยสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปก็คือค่าดัชนีเสถียรภาพ จากสมการ (3.68) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$G_{mcl}(s) = \frac{k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} a_0}{a_n s^n + k^{n-1} a_{n-1} s^{n-1} + \dots + k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n-1} a_1 s + k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} a_0} \quad (3.69)$$

วิธีในการปรับผลตอบแทนของระบบควบคุมให้ได้รูปทรงตามที่ต้องการนั้น ไม่มีวิธีที่แน่นอนตายตัวเหมือนกับกรณีของการปรับ τ โดยในกรณีนี้จะต้องค่อยๆ ลองปรับค่า k จนกว่าจะได้รูปทรงผลตอบแทนที่ต้องการ ถ้าค่า $k > 1$ จะทำให้ผลตอบแทนของระบบควบคุมช้าลงและค่าพุงเกินก็จะลดลง แต่ถ้า $0 < k < 1$ จะทำให้ผลตอบแทนของระบบควบคุมเร็วขึ้นค่าพุงเกินก็จะมากขึ้น ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะต้องลองผิดลองถูกในการปรับค่า k แต่ก็ยังดีกว่าการปรับค่า γ_i โดยตรง เนื่องจากถ้าระบบควบคุมเป็นแบบอันดับสูงๆ ค่า γ_i ที่จะทำให้การปรับก็มากตามไปด้วย

หลังจากที่ได้รูปทรงผลตอบแทนของระบบควบคุมตามที่ต้องการแล้ว ค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมอาจจะมามีค่าที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากอัตราकरणวงของระบบควบคุมได้เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการปรับค่าเวลาเข้าที่ให้ได้ตามที่ต้องการอีกครั้งหนึ่ง

3.4 ทฤษฎีของ Smith Predictor



รูปที่ 3.13 โครงสร้างของ Smith Predictor

การควบคุมแบบ Smith Predictor [1] คือการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยมีการป้อนกลับแบบวงรอบภายในแสดงดังรูปที่ 3.13 โดยที่ G_o คือกระบวนการจริงที่ไม่มีค่า Time-Delay, L_o คือค่า Time-Delay ซึ่งเป็นค่าคงที่, G_m และ L_m เป็นแบบจำลองของ G_o และ L_o ตามลำดับ, G_c คือตัวควบคุม สำหรับวงรอบการควบคุมภายในจะทำหน้าที่กำจัดค่า Time-Delay ทางเอาต์พุตแล้วป้อนกลับไปยังตัวควบคุม ซึ่งการทำแบบนี้จะทำให้เราสามารถออกแบบตัวควบคุมได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงค่า Time-Delay ซึ่งทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของ Smith Predictor สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_o(s)e^{-L_o s}}{1 + G_c(s)G_m(s) + G_c(s)[G_o(s)e^{-L_o s} - G_m(s)e^{-L_m s}]} \quad (3.70)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_o(s)e^{-L_o s}[1 + G_c(s)G_m(s)(1 - e^{-L_m s})]}{1 + G_c(s)G_m(s) + G_c(s)[G_o(s)e^{-L_o s} - G_m(s)e^{-L_m s}]} \quad (3.71)$$

ในกรณีที่ $G_o = G_m$ และ $L_o = L_m$ สามารถเขียนทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้ดังนี้

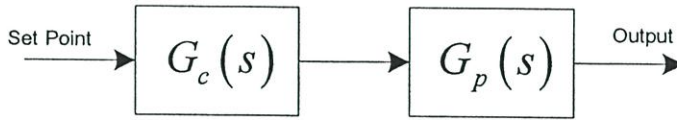
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_o(s)e^{-L_o s}}{1 + G_c(s)G_m(s)} \quad (3.72)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_o(s)e^{-L_o s}[1 + G_c(s)G_m(s)(1 - e^{-L_m s})]}{1 + G_c(s)G_m(s)} \quad (3.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ทฤษฎีการควบคุมแบบจำลองภายใน (IMC)

Internal Model Controller (IMC) นั้นกล่าวถึงแบบจำลองภายใน โดยที่กล่าวไว้ว่าสามารถควบคุมได้ถ้ามีระบบควบคุมอยู่ภายใน ในบางงานวิจัยที่เกี่ยวกับระบบควบคุมกระบวนการ ถ้ารูปแบบการพัฒนามบนพื้นฐานของแบบจำลองกระบวนการที่ถูกต้อง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะควบคุมได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อพิจารณาดังตัวอย่างในรูป 3.14



รูปที่ 3.14 ระบบแบบวงรอบเปิด

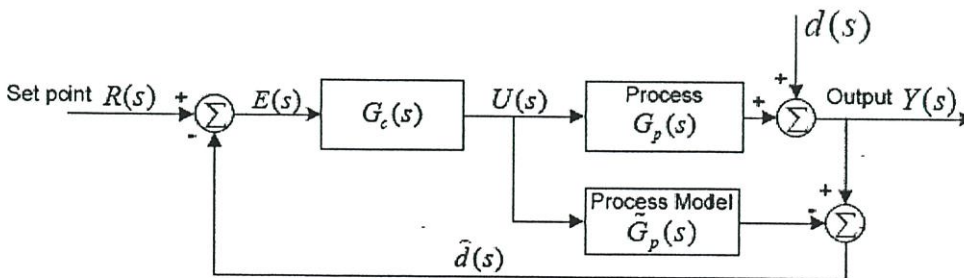
โดยที่ $G_c(s)$ คือตัวควบคุมสำหรับควบคุมกระบวนการ $G_p(s)$ สมมติว่า $\tilde{G}_p(s)$ คือแบบจำลองของกระบวนการจริง โดยกำหนดให้ $G_c(s)$ เป็นส่วนกลับของแบบจำลองกระบวนการ

$$G_c(s) = \tilde{G}_p(s)^{-1} \quad (3.74)$$

และถ้า $G_p(s) = \tilde{G}_p(s)$ (ในกรณีที่แบบจำลองกระบวนการและกระบวนการจริงมีค่าเท่ากัน) จะทำให้ค่าเอาต์พุตมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายตลอดเวลา ซึ่งถือว่าเป็นเพียงแนวคิดที่ใช้ควบคุมระบบที่ไม่มี การป้อนกลับ ทำให้เรามีความรู้เกี่ยวกับการควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับกระบวนการ เราสามารถที่จะควบคุมกระบวนการให้มีความสมบูรณ์ได้โดยการใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการที่เราไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงของกระบวนการได้

3.5.1 วิธีการของ IMC

ในความเป็นจริงนั้น แบบจำลองกระบวนการจะไม่ตรงกับกระบวนการจริง ซึ่งการควบคุมแบบวงรอบเปิดจะไม่สามารถควบคุมให้ค่าเอาต์พุตของกระบวนการเท่ากับค่าเป้าหมายได้ แต่อย่างไรก็ตาม จากพื้นฐานการพัฒนาวิธีการควบคุมที่จะสามารถควบคุมกระบวนการให้สมบูรณ์ ซึ่งวิธีการนี้คือ Internal Model Controller (IMC) โครงสร้างแสดงดังรูป



รูปที่ 3.15 โครงสร้างของ IMC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปแบบโครงสร้างของ IMC นั้น $d(s)$ คือการรบกวนที่ไม่ทราบค่าและมีผลกระทบต่อระบบ, $U(s)$ คืออินพุตที่ป้อนให้กับกระบวนการจริงและแบบจำลองของการบวนการ, เอาต์พุตของกระบวนการ $Y(s)$ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเอาต์พุตของแบบจำลองกระบวนการซึ่งผลลัพธ์คือ $\hat{d}(s)$ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\hat{d}(s) = [G_p(s) - \tilde{G}_p(s)] \cdot U(s) + d(s) \quad (3.75)$$

ถ้ากำหนดให้ $d(s)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น $\hat{d}(s)$ ก็จะได้จากค่าที่วัดได้จากความแตกต่างระหว่างกระบวนการจริงและแบบจำลองกระบวนการ และถ้า $G_p(s) = \tilde{G}_p(s)$ แล้วนั้น $\hat{d}(s)$ ก็จะมีค่าเท่ากับการรบกวนที่ไม่ทราบค่า ดังนั้น $\hat{d}(s)$ อาจพิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากค่าผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ $\tilde{G}_p(s)$ และสามารถใช้ตรวจสอบการควบคุมได้จากค่าที่หักล้างกันระหว่าง $\hat{d}(s)$ กับ $R(s)$ ซึ่งถ้ามีค่าที่ใกล้เคียงกันอย่างมากแล้วนั้น จะให้ผลลัพธ์ของสัญญาณควบคุมได้ดังนี้

$$U(s) = [R(s) - \hat{d}(s)] \cdot G_c(s) = \{R(s)[G_p(s) - \tilde{G}_p(s)] \cdot U(s) - d(s)\} \cdot G_c(s) \quad (3.76)$$

ดังนั้น

$$U(s) = \frac{[R(s) - \hat{d}(s)] \cdot G_c(s)}{1 + [G_p(s) - \tilde{G}_p(s)] \cdot G_c(s)} \quad (3.77)$$

เนื่องจาก

$$Y(s) = G_p(s)U(s) + d(s)$$

ในทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันวงรอบปิดของ IMC นั้นสามารถแสดงได้ดังนี้

$$U(s) = \frac{[R(s) - d(s)]G_c(s)G_p(s)}{1 + [G_p(s) - \tilde{G}_p(s)] \cdot G_c(s)} + d(s) \quad (3.78)$$

หรือ

$$Y(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)R(s) + [1 - G_c(s)\tilde{G}_p(s)]d(s)}{1 + [G_p(s) - \tilde{G}_p(s)] \cdot G_c(s)} \quad (3.79)$$

จากการแสดงทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันวงรอบปิดนั้น จะเห็นได้ว่า $G_c(s) = \tilde{G}_p(s)^{-1}$ และถ้า $G_p(s) = \tilde{G}_p(s)$ ดังนั้นจะสามารถควบคุมกระบวนการให้ติดตามเอาต์พุตและกำจัดการรบกวนได้แต่อย่างไรก็ตามถ้า $G_p(s) \neq \tilde{G}_p(s)$ การรบกวนกระบวนการก็สามารถกำจัดออกไปได้โดยกำหนดให้ $G_c(s) = \tilde{G}_p(s)^{-1}$

การตรวจความคงทนของระบบนั้น เมื่อผลกระทบที่มีต่อกระบวนการมีน้อยมากและเมื่อแบบจำลองกระบวนการนั้นไม่ตรงกับกระบวนการจริง เนื่องจากความแตกต่างระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลองกระบวนการเกิดจากพฤติกรรมที่มีความถี่สูงเข้ามาในระบบ โดยปกติเราสามารถแก้ไขเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน $G_f(s)$ เข้าไปเพื่อแก้ปัญหาผลกระทบที่เกิดจากแบบจำลองกระบวนการที่ไม่ตรงกับกระบวนการจริง ซึ่งโดยปกติในการออกแบบตัวควบคุมแบบจำลองภายใน (Internal Model Controller) นั้น จะใช้ส่วนกลับของแบบจำลองกระบวนการมาอนุกรมกับตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยกำหนดให้ $G_{IMC}(s) = G_c(s)G_f(s)$ และดีกรีของตัวกรองความถี่นั้นโดยปกติจะเลือกค่าให้เหมาะสมกับ $G_c(s)G_f(s)$ ดังนั้นผลลัพธ์ของวงรอบปิดแสดงได้ดังสมการ 3.80

$$Y(s) = \frac{G_{IMC}(s)G_p(s)R(s) + [1 - G_{IMC}(s)\tilde{G}_p(s)]d(s)}{1 + [G_p(s) - \tilde{G}_p(s)]G_{IMC}(s)} \quad (3.80)$$

3.5.2 การออกแบบ IMC

การออกแบบ IMC นั้นสามารถเปรียบเทียบได้ง่ายได้โดยกำหนดให้แบบจำลองกระบวนการคือ $\tilde{G}_p(s)$ และกำหนดให้

$$\tilde{G}_p(s) = \tilde{G}_p^+(s)\tilde{G}_p^-(s) \quad (3.81)$$

โดยที่ $\tilde{G}_p^-(s)$ นั้นคือค่า Time-Delay และกำหนดให้ $G_c(s) = \tilde{G}_p^-(s)^{-1}$ และ $G_{IMC}(s) = G_c(s)G_f(s)$ เมื่อ $G_f(s)$ คือตัวกรองความถี่ต่ำ และกำหนดให้ $G_f(s) = \frac{1}{(1 + \tau_f s)^n}$ และ τ_f คือพารามิเตอร์ตัวกรองความถี่ และ n คืออันดับของตัวกรองความถี่

- ตัวอย่างการออกแบบ IMC

กำหนดให้แบบจำลองกระบวนการคือ $\tilde{G}_p(s) = \frac{2e^{-5s}}{1+20s}$ ดังนั้น จาก $\tilde{G}_p(s) = \tilde{G}_p^+(s)\tilde{G}_p^-(s)$ จะได้ว่า $\tilde{G}_p^+(s) = \frac{2}{1+20s}$ และ $\tilde{G}_p^-(s) = e^{-5s}$ จากนั้นทำการหาค่า $G_{IMC}(s)$ โดยใช้ส่วนกลับของ $\tilde{G}_p^+(s)$ อนุกรมกับตัวกรองความถี่ต่ำ $G_f(s)$ ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้มีค่า 1 ใน 2 เท่าของค่า Time Constant ดังนั้น $\tau_f = 10$ จะได้ว่า

$$G_{IMC}(s) = \frac{(1+20s)}{2(1+10s)} \quad (3.82)$$

ให้เราดูที่คุณสมบัติวงรอบปิดของระบบสมมุติว่า $G_p(s) = \tilde{G}_p(s)$ และแทนลงในสมการ

$$Y(s) = \frac{G_{IMC}(s)G_p(s)R(s) + [1 - G_{IMC}(s)\tilde{G}_p(s)]d(s)}{1 + [G_p(s) - \tilde{G}_p(s)]G_{IMC}(s)} \quad (3.83)$$

เมื่อกำหนดให้

$$Y(s) = \tilde{G}_p^+(s)^{-1}G_f(s)G_p(s)R(s) + [1 - \tilde{G}_p^+(s)^{-1}G_f(s)\tilde{G}_p(s)]d(s) \quad (3.84)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น

$$Y(s) = \tilde{G}_p^-(s) G_f(s) R(s) + [1 - \tilde{G}_p^-(s) G_f(s)] d(s) \quad (3.85)$$

หรือ

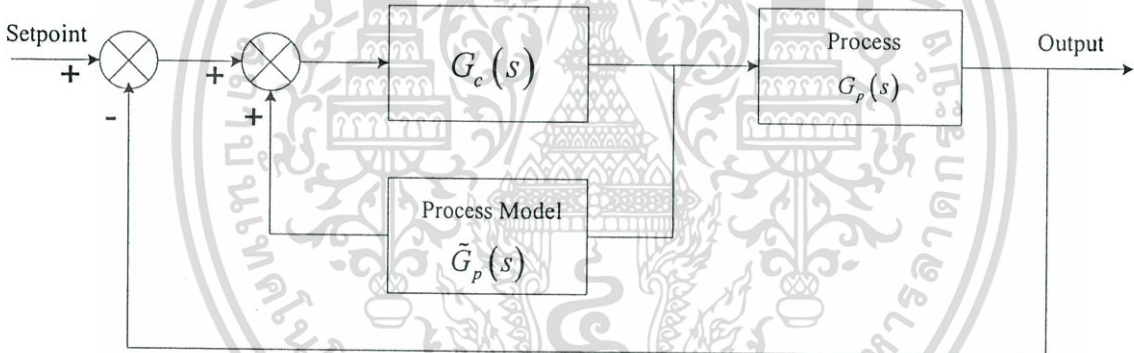
$$Y(s) = \frac{\exp(-5s)}{(1 + \tau_f s)} R(s) + \left[1 - \frac{\exp(-5s)}{(1 + \tau_f s)} \right] d(s) \quad (3.86)$$

ดังนั้นจะเห็นว่าโครงสร้างของ IMC มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ชดเชยค่า Time-Delay
2. ตัวกรองสามารถใช้ได้ทั้งแบบติดตามค่าเป้าหมายและแบบปฏิเสธผลตอบสนองจากสิ่งรบกวน
3. ที่สภาวะคงตัว ตัวควบคุมจะให้ผลตอบสนองที่อิสระ

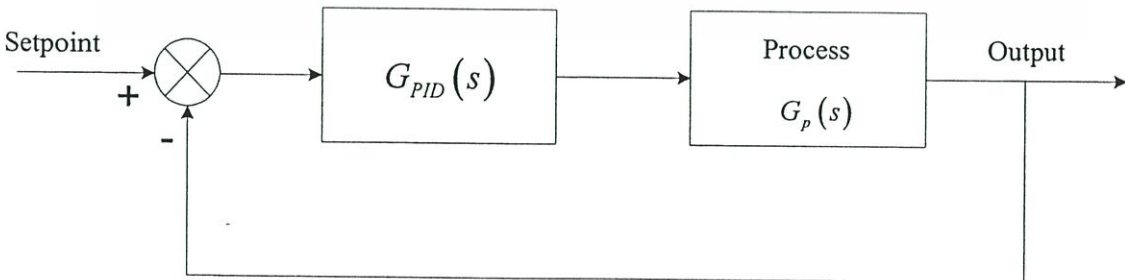
3.5.3 การใช้งาน IMC ร่วมกับตัวควบคุม PID

ปรัชญาของ IMC สามารถใช้สำหรับกำหนดค่าของควบคุมพีไอ หรือ พีไอดี ในรูปที่ 3.15 สามารถลดโครงสร้างวงรอบปิดได้ดังนี้



รูปที่ 3.16 การลดรูปโครงสร้างของ IMC

และจะได้



รูปที่ 3.17 โครงสร้างของกระบวนการหลังการลดรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$G_{PID}(s) = \frac{G_{MC}(s)}{1 - G_{MC}(s)\tilde{G}_p(s)} = \frac{\tilde{G}_p^+(s)^{-1}G_f(s)}{1 - \tilde{G}_p^-(s)^{-1}G_f(s)} \quad (3.87)$$

สมมุติว่ากระบวนการเป็นระบบอันดับหนึ่งที่มี Time-Delay ดังนั้น โมเดลจะเป็นดังนี้

$$\tilde{G}_p(s) = \frac{K \exp(-\theta s)}{1 + \tau s} \quad (3.88)$$

ถึงจุดนี้เราสามารถเลือกทำได้สองวิธีคือ

- ประมาณค่าแบบอนุกรมสำหรับ Time-Delay

เราสามารถประมาณเทอมของ Time-Delay โดยใช้สมการอันดับหนึ่ง ดังตัวอย่าง $\exp(-\theta s) \approx 1 - \theta s$ ดังนั้น

$$\tilde{G}_p(s) = \frac{K \exp(-\theta s)}{1 + \tau s} \approx \left(\frac{K}{1 + \tau s} \right) (1 - \theta s) \quad (3.89)$$

เมื่อ

$$\tilde{G}_p^+(s) = \frac{K}{1 + \tau s} \quad \text{และ} \quad \tilde{G}_p^-(s) = 1 - \theta s \quad (3.90)$$

และ

$$G_{PID}(s) = \frac{\tilde{G}_p^+(s)^{-1}G_f(s)}{1 - \tilde{G}_p^-(s)^{-1}G_f(s)} = \frac{(1 + \tau s) \cdot \frac{1}{1 + \tau_f s}}{K \cdot \frac{1 - \theta s}{1 + \tau_f s}} = \frac{(1 + \tau s)}{K(\tau_f + \theta)s} \quad (3.91)$$

สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$G_{PID}(s) = \frac{\tau}{K(\tau_f + \theta)} \left[1 + \frac{1}{\tau s} \right] \quad (3.92)$$

เปรียบเทียบกับสมการนี้กับตัวควบคุมพีไอดีในอุดมคติ $K_c \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right]$ จะได้ว่า

$$K_c = \frac{\tau}{K(\tau_f + \theta)} \quad \text{และ} \quad T_i = \tau \quad (3.93)$$

- ประมาณค่าแบบ Pade สำหรับ Time-Delay

เราสามารถเปลี่ยน Time-Delay ให้เป็นการประมาณแบบ Pade ดังนี้ $\exp(-\theta s) \approx \frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s}$

ในกรณีนี้

$$\tilde{G}_p(s) = \frac{K \exp(-\theta s)}{1 + \tau s} \approx \left(\frac{K}{1 + \tau s} \right) \left(\frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s} \right) \quad (3.94)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\tilde{G}_p^+(s) = \frac{K}{(1+\tau s)\left(1+\frac{\theta}{2}s\right)} \quad \text{และ} \quad \tilde{G}_p^-(s) = 1 - \frac{\theta}{2}s \quad (3.95)$$

ดังนั้น

$$G_{PID}(s) = \frac{\tilde{G}_p^+(s)^{-1} G_f(s)}{1 - \tilde{G}_p^-(s) G_f(s)} = \frac{(1+\tau s)\left(1+\frac{\theta}{2}s\right)}{K} \cdot \frac{1}{1+\tau_f s} \cdot \frac{1-\frac{\theta}{2}s}{1+\tau_f s} \quad (3.96)$$

เขียนอย่างง่ายได้ดังนี้

$$G_{PID}(s) = \frac{(1+\tau s)\left(1+\frac{\theta}{2}s\right)}{K\left(\tau_f + \frac{\theta}{2}\right)s} \quad (3.97)$$

เปรียบเทียบกับสมการนี้กับตัวควบคุมพีไอดีในอุดมคติ $K_c \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right]$ เราจะได้

$$K_c = \frac{(\tau + \theta/2)}{K(\tau_f + \theta/2)} \quad T_i = \frac{\theta}{2} + \tau \quad T_d = \frac{\tau\theta}{2\left(\frac{\theta}{2} + \tau\right)} \quad (3.98)$$

- ฟังก์ชันความไวของ IMC

เราจะพิจารณาฟังก์ชันความไวของ IMC และเปรียบเทียบกับระบบควบคุมป้อนกลับทั่วไป เราต้องการทำเช่นนี้เพื่อคุณการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระบบควบคุมเพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบระบบควบคุมที่คงทน เรียกว่า

$$\varepsilon(s) = \frac{E(s)}{R(s) - d(s)} = \frac{Y(s)}{d(s)} \quad (3.99)$$

สำหรับ IMC ตั้งแต่

$$Y(s) = \frac{G_{IMC}(s)G_p(s)R(s) + [1 - G_{IMC}(s)\tilde{G}_p(s)]d(s)}{1 + [G_p(s) - \tilde{G}_p(s)]G_{IMC}(s)} \quad (3.100)$$

$$\varepsilon(s) = \frac{Y(s)}{d(s)} = \frac{1 - G_{IMC}(s)\tilde{G}_p(s)}{1 + G_{IMC}(s)[G_p(s) - \tilde{G}_p(s)]} \quad (3.101)$$

หากว่า $G_p(s) = \tilde{G}_p(s)$ แล้ว

$$\tilde{\varepsilon}(s) = 1 - G_{IMC}(s)\tilde{G}_p(s) \quad (3.102)$$

และ

$$\tilde{\eta}(s) = G_{IMC}(s)\tilde{G}_p(s) \quad (3.103)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในกลยุทธ์ของ IMC ตัวควบคุมจะปรากฏขึ้นในฟังก์ชันเชิงเส้นที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเปรียบเทียบกับการทำงานที่สอดคล้องกันสำหรับโครงการควบคุมแบบดั้งเดิม

$$\varepsilon(s) = \frac{1}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad \text{และ} \quad \eta(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (3.104)$$

3.6 ทฤษฎีการหาแบบจำลองกระบวนการ

กระบวนการทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ นั้น พบว่าเป็นแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาหน่วง หรือที่เรียกว่า กระบวนการอันดับหนึ่งแบบมีเวลาหน่วง (First Order Plus Dead Time Process) โดยฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงดังสมการ 3.105

$$G_p = \frac{K_{ss}}{\tau s + 1} e^{-T_0 s} \quad (3.105)$$

เมื่อ K_{ss} = อัตราการขยายของกระบวนการในสภาวะหยุดนิ่ง

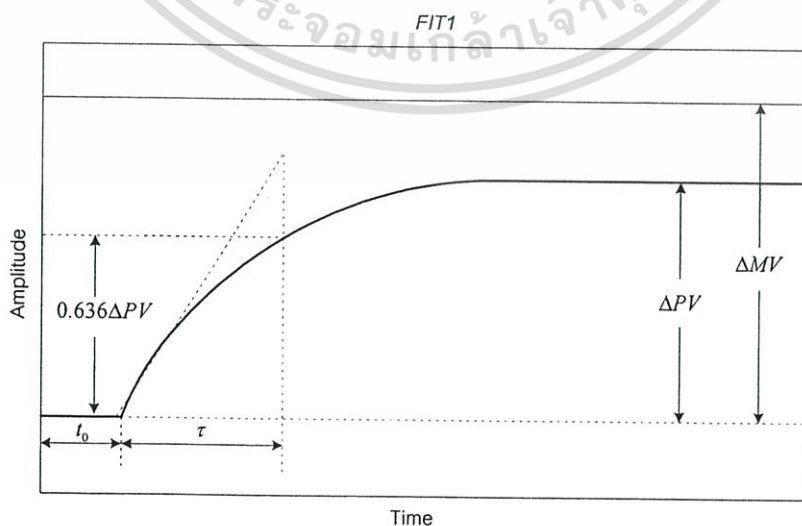
τ = ค่าคงที่ของกระบวนการ

T_0 = ค่าเวลาหน่วงของกระบวนการ (sec)

ขั้นตอนในการคำนวณหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการก็นำผลตอบสนองของกระบวนการในสภาวะวงรอบเปิดมาหาค่า K_{ss} , τ และ T_0 โดยคำนวณจากการประมาณค่า ซึ่งมีรูปแบบในการคำนวณทั้งหมด 3 รูปแบบดังนี้

3.6.1 รูปแบบเอ (Model A : FIT1)

หาค่าเวลาหน่วงโดยที่ค่าเวลาที่เอาต์พุตเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากสั่งอินพุตและค่าเวลาคงตัวหาได้จากเส้นสัมผัสที่มีความชันสูงสุดไปตัดกับเอาต์พุตเวลาที่เอาต์พุตมีค่า 0.632 เท่าของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสุดท้ายดังรูปที่ 3.18

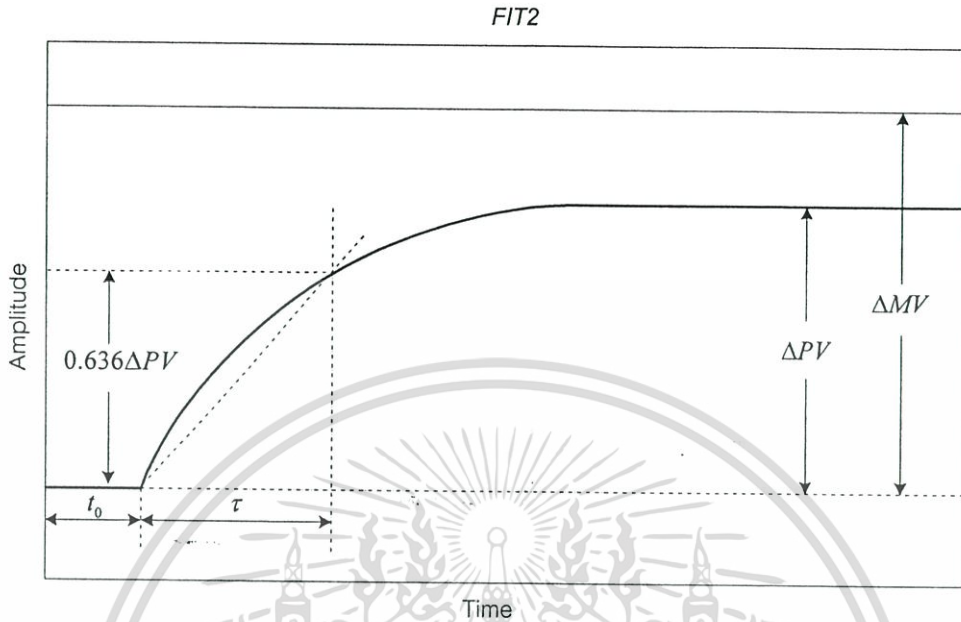


รูปที่ 3.18 การหาค่าต่างๆ จากผลตอบสนองแบบขั้นโดยใช้ Model A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 รูปแบบบี (Model B : FIT2)

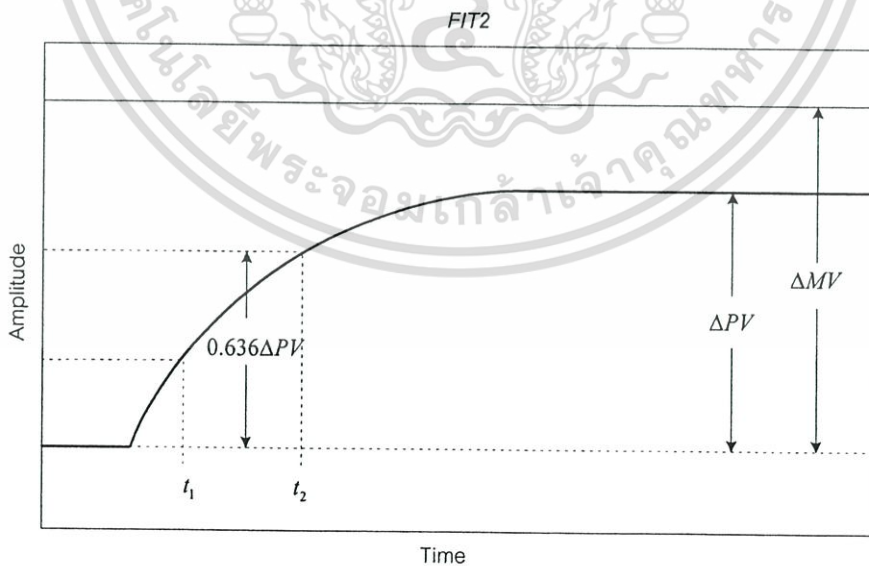
หาค่าหน่วยเหมือนกับโมเดล A แต่ค่าเวลาที่หามาได้นำมาหักจากค่าเวลาหน่วยเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การหาค่าต่างๆ จากผลตอบสนองแบบขั้นโดยใช้ Model B

3.6.3 รูปแบบซี (Model C : FIT3)

อ่านค่าเวลาเอาต์พุตมีค่า 0.238 เท่าของค่าสุดท้ายและค่าเวลา 0.632 เท่าของค่าสุดท้ายแล้ว นำมาคำนวณตามสมการ 3.106



รูปที่ 3.20 การหาค่าต่างๆ จากผลตอบสนองแบบขั้นโดยใช้ Model C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

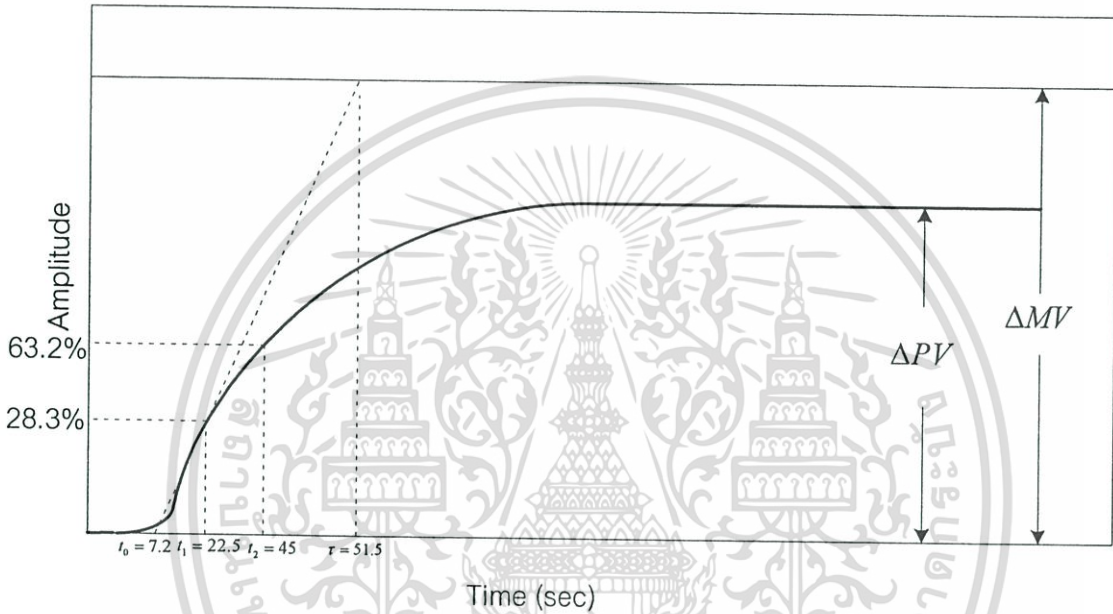
$$K_{ss} = \frac{\Delta PV}{\Delta MV} \%, \tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1), T_0 = t_1 - \tau \text{ sec} \quad (3.106)$$

เมื่อ t_1 คือ เวลาที่เอาต์พุตมีค่า 0.238 เท่าของค่าอินพุตที่ใหญ่หนึ่ง
 t_2 คือ เวลาที่เอาต์พุตมีค่า 0.632 เท่าของค่าอินพุตที่ใหญ่หนึ่ง

ตัวอย่างการโมเดลกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้ผลตอบสนองแบบขั้น [3]

$$K(s) = \frac{0.8}{(10s+1)(30s+1)(3s+1)} \quad (3.55)$$

Step Response



รูปที่ 3.21 โมเดลกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้ผลตอบสนองแบบขั้น

ตาราง 3.1 ค่าพารามิเตอร์ในการหาแบบจำลองของแต่ละโมเดล

	Model A	Model B	Model C
Process Gain : K_{ss}	0.8/1	0.8/1	0.8/1
Dead Time : T_0	7.2	7.2	45.0-33.8 = 11.2
Time Constant : τ	61.5-7.2 = 54.3	45.0-7.2 = 37.84	3/2(45.0-22.5)=33.8
อัตราส่วน : T_0/τ	0.133	0.19	0.331

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 บทสรุป

ทฤษฎีบทต่างๆ ถือเป็นหลักในการอ้างอิงสำหรับการทำงานวิจัย หากการทำวิจัยไม่มีทฤษฎีมารองรับก็ถือว่างานวิจัยนั้นไม่สมบูรณ์ ซึ่งในบทนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมเอาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งหมดมาอธิบายอย่างละเอียดเพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจถึงเหตุผลต่างๆ ในการนำทฤษฎีมาใช้และเพื่อยืนยันผลการทดลองว่าเป็นไปตามทฤษฎีบททั้งหมดที่กล่าวมา ดังนั้นทฤษฎีบทต่างๆ จึงมีความสำคัญกับงานวิจัยเป็นอย่างมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการออกแบบตัวควบคุม

4.1 กล่าวนำ

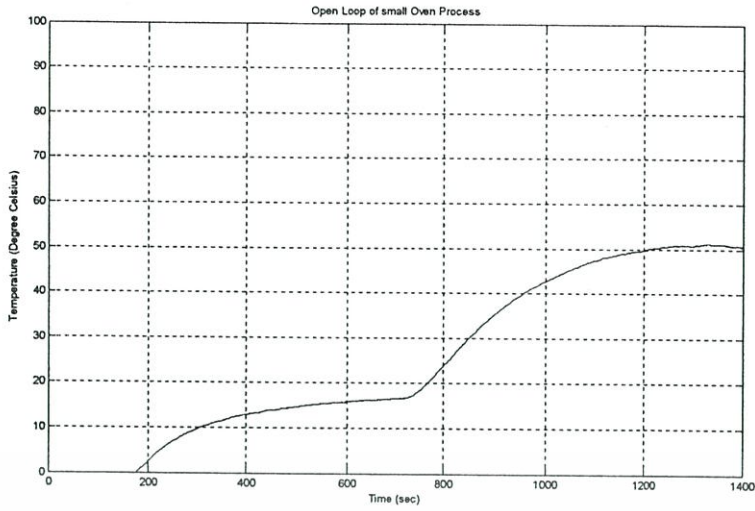
การออกแบบตัวควบคุมถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญสำหรับการทดลองนี้ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบจะถูกนำไปใช้ในการจำลองกระบวนการและนำไปใช้ในการทดลองกระบวนการจริงด้วย โดยในบทนี้จะแบ่งวิธีการออกแบบตัวควบคุมออกเป็น 3 หัวข้อ คือ 1. การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกก่อนที่จะออกแบบตัวควบคุมเนื่องจากว่าสมการคุณลักษณะที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป 2. การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี IMC-PI และ 3. การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM-PI ซึ่งรายละเอียดในแต่ละหัวข้อจะขอล่าวดังต่อไปนี้

4.2 การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ

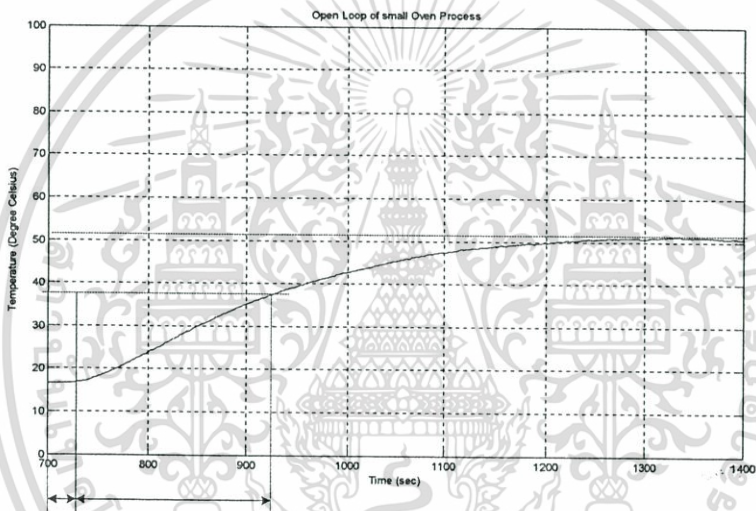
สำหรับการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการนั้นทำได้โดยการกำหนดจุดทำงานที่เราต้องการแล้วทดลองป้อนอินพุตที่กำหนดให้กับกระบวนการรอจนกว่าผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตคงที่จึงทำการเพิ่มแรงดันอินพุตรอจนกว่าผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตคงที่ สังเกตว่าเอาต์พุตถ้าเกินย่านที่เรากำหนดหรือเปลี่ยนแปลงน้อยเกินไปให้ทำการทดลองใหม่จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสม

ในรูปที่ 4.1 ผู้วิจัยได้ทำการป้อนค่าแรงดันอินพุต 1.5 V ให้กับกระบวนการ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 600 วินาที ผลตอบสนองทางเอาต์พุตคงที่ที่ค่า 16.6 องศา จากนั้นปล่อยให้ค่าผลตอบสนองเอาต์พุตของกระบวนการคงที่จนถึงเวลา 700 วินาที ทำการเพิ่มแรงดันอินพุตเป็น 2 V ให้กับกระบวนการเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1250 วินาที ผลตอบสนองทางเอาต์พุตของกระบวนการเริ่มคงที่ที่ค่า 51 องศา

การทดลองดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งของการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ โดยในช่วงเวลา 0 - 700 วินาที จะไม่นำมาคิดเนื่องจากการกำหนดค่าเริ่มต้นเท่านั้น เราจะเริ่มนำค่าผลตอบสนองทางเอาต์พุตของกระบวนการตั้งแต่เวลา 700 วินาที เป็นต้นไปมาทำการคำนวณหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ โดยใช้ทฤษฎีในการหาสมการคุณลักษณะในบทที่ 3 มาช่วย



รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองทางเอาต์พุตของกระบวนการเตาอบขนาดเล็กแบบวงรอบเปิด



รูปที่ 4.2 การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ

จากรูปที่ 4.2 จะได้สมการคุณลักษณะดังสมการ 4.1

$$G_p(s) = \frac{1.372}{190s+1} e^{-30s} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบ IMC-PI

จากสมการคุณลักษณะของกระบวนการตามสมการ 4.1 นำมาออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีของ IMC ได้ดังต่อไปนี้

จากสมการ 3.81 จะได้ว่า

$$\tilde{G}_p^+(s) = \frac{1.372}{190s+1} \quad (4.2)$$

และ

$$\tilde{G}_p^-(s) = e^{-30s} \quad (4.3)$$

โดยที่

$$G_c(s) = \tilde{G}_p^+(s)^{-1} \quad (4.4)$$

จะได้

$$G_c(s) = \frac{190s+1}{1.372} \quad (4.5)$$

และ

$$G_{IMC}(s) = G_c(s)G_f(s) \quad (4.6)$$

กำหนดให้ $\tau_f = 95$ จะได้ว่า

$$G_{IMC}(s) = \frac{(190s+1)}{1.732(95s+1)} \quad (4.7)$$

4.4 การออกแบบ CDM-PI

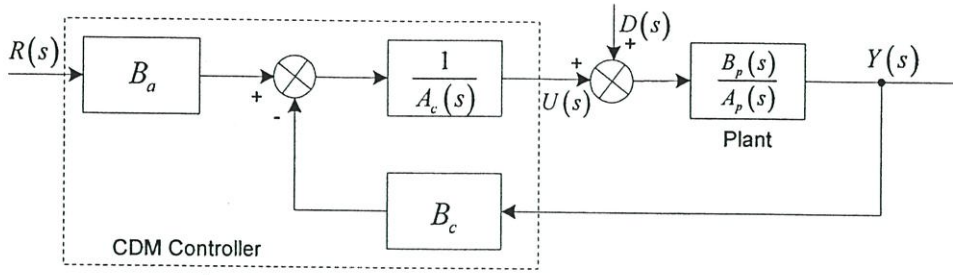
จากสมการที่ 4.1 เมื่อจัดให้อยู่ในรูปแบบของ Smith Predictor แล้ว สามารถประมาณค่าให้ค่า Delay Time ของกระบวนการจริงกับโมเดลของกระบวนการมีค่าเดียวกัน ดังนั้นจึงไม่ต้องนำค่า Delay Time มาร่วมหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมซึ่งสามารถเขียนค่าโมเดลกระบวนการได้ดังสมการ 4.8

$$G_p(s) = \frac{1.372}{190s+1} \quad (4.8)$$

หรือ

$$G_p(s) = \frac{0.0072}{s+0.0052} \quad (4.9)$$

จากโครงสร้างมาตรฐานของวิธีแผนผังสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method) ดังรูป 4.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างมาตรฐานของวิธีแผนผังสัมประสิทธิ์

จากนั้นออกแบบตัวควบคุมด้วยสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมป้อนกลับ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการพหุนามคุณลักษณะดังนี้

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ &= a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \\ &= a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

โดยที่

$$A_p(s) = s + 0.0052$$

$$B_p(s) = 0.0072$$

$$A_c(s) = s$$

$$B_c(s) = K_p s + K_i$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$\begin{aligned} P(s) &= s(s + 0.0052) + 0.0072(K_p s + K_i) \\ &= s^2 + (0.0052 + 0.0072K_p)s + 0.0072K_i \end{aligned} \quad (4.11)$$

เทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการ 4.10 กับ 4.11 จะได้

$$a_0 = 0.0072K_i$$

$$a_1 = 0.0052 + 0.0072K_p$$

$$a_2 = 1$$

จาก $\tau = \frac{a_1}{a_0}$ และ $\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i-1}a_{i+1}}$ กำหนดให้ $\tau = 200$, $\gamma_1 = 2.5$ จะได้ว่า

$$a_1 = 200a_0 \quad (4.12)$$

และ

$$a_1^2 = 2.5a_0 \quad (4.13)$$

โดยที่

$$(200a_0)^2 = 2.5a_0 \quad (4.14)$$

$$a^2 = \frac{2.5}{40000} a_0 \quad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จะได้ } a_0 = 0.0000625 \quad (4.16)$$

$$\text{และ } a_1 = 200a_0 = 0.0125 \quad (4.17)$$

จาก $a_0 = 0.0072K_i$ แทนค่า a_0 จากสมการ 4.16 จะได้

$$K_i = \frac{0.0000625}{0.0072} = 0.0086 \quad (4.18)$$

และจาก $a_1 = 0.0052 + 0.0072K_p$ แทนค่า a_1 จากสมการ 4.17 จะได้

$$K_p = \frac{0.0125 - 0.0052}{0.0072} = 1.013 \quad (4.19)$$

จากขั้นตอนในการคำนวณข้างต้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการกำหนดค่า τ ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 200 แล้วทำการปรับค่า γ ให้เปลี่ยนไปดังนี้ 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 แล้วคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม K_p และ K_i ซึ่งค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบ CDM-PI

Stability index	K_p	K_i
$\gamma_1 = 2.5$	0.187	0.001
$\gamma_1 = 5.0$	0.39	0.002
$\gamma_1 = 7.5$	0.59	0.003
$\gamma_1 = 10.0$	0.79	0.004

4.5 สรุป

ในบทที่ 4 นี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมที่จะใช้ในการจำลองและทดลองในบทที่ 5 โดยใช้ทฤษฎีจากบทที่ 3 และแบบจำลองกระบวนการจากบทที่ 2 มาทำการออกแบบ โดยได้ดำเนินการออกแบบหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม 2 แบบ คือ การออกแบบตัวควบคุมแบบ IMC-PI และการออกแบบตัวควบคุมแบบ CDM-PI เพื่อที่จะนำพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ ไปทำการทดลองควบคุมกระบวนการในบทที่ 5 และนำผลการทดลองทั้ง 2 วิธี มาทำการเปรียบเทียบกัน เพราะฉะนั้นการออกแบบจะต้องกระทำอย่างระมัดระวังเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาด ซึ่งจะส่งผลต่อการจำลองและการทดลองด้วย

บทที่ 5

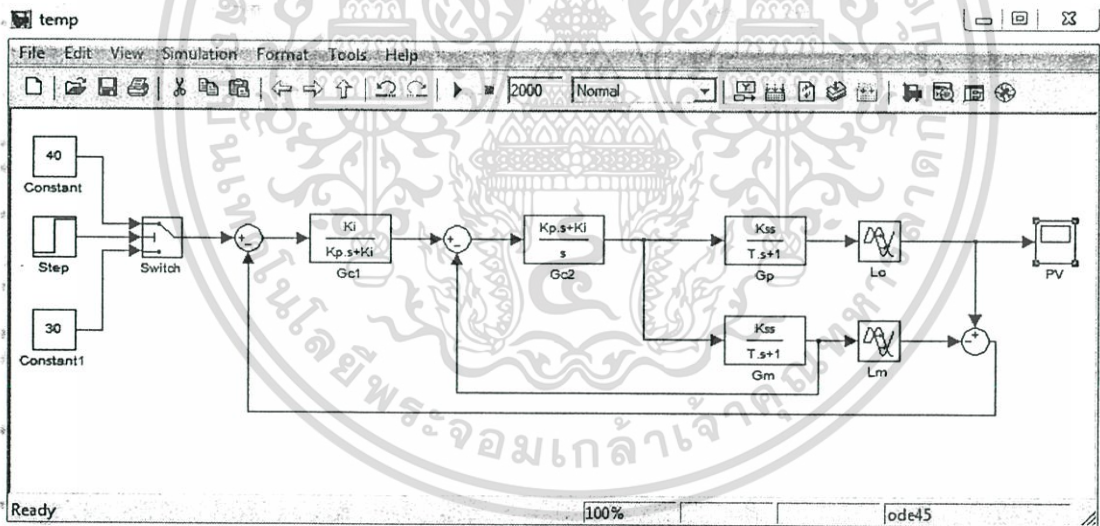
การจำลองและการทดลอง

5.1 กล่าวนำ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะว่าด้วยเรื่องเกี่ยวกับการจำลองและการทดลองกระบวนการซึ่งจะนำเอาทฤษฎีทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วรวมทั้งเรื่องฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์มาช่วยในการหาจุดทำงานและหาสมการคุณลักษณะหรือโมเดลของกระบวนการ หลังจากได้สมการคุณลักษณะหรือโมเดลของกระบวนการมาแล้ว การทดลองแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อใหญ่ๆ คือ การจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม MATLAB และการทดลองควบคุมกระบวนการจริงด้วยโปรแกรม LabVIEW ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวไว้ดังนี้

5.2 การจำลองกระบวนการ

หลังจากได้สมการคุณลักษณะของกระบวนการ 5.1 แล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปในการวิจัยคือ การจำลองกระบวนการ โดยใช้โปรแกรม Simulink เป็นโปรแกรมในการจำลองกระบวนการ โดยโปรแกรมในการจำลองกระบวนการแสดงดังรูปที่ 5.1

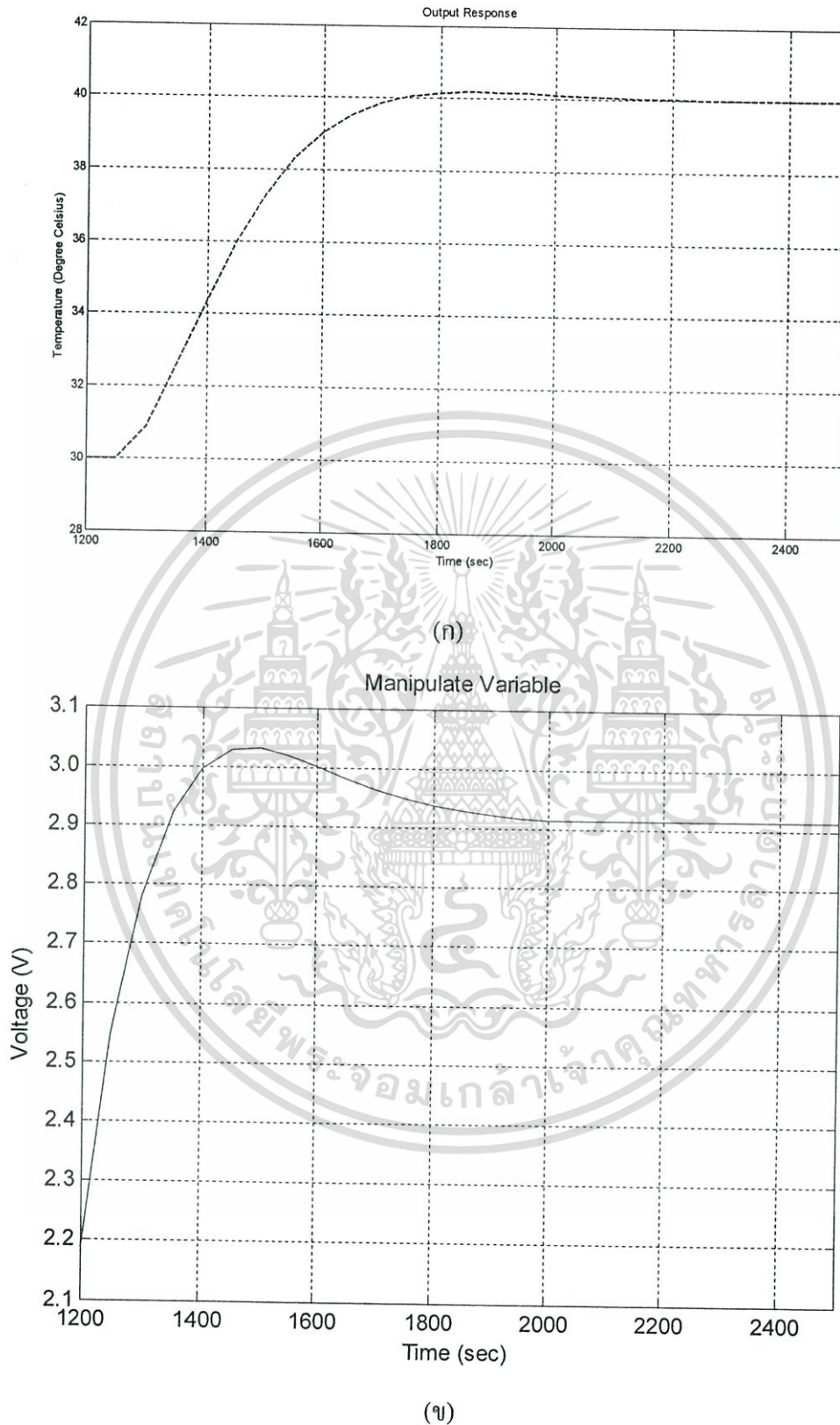


รูปที่ 5.1 โปรแกรมในการจำลองกระบวนการ

5.2.1 การจำลองเมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ CDM-PI

การจำลองจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามตารางที่ 4.1 โดยกำหนดให้ τ มีค่าคงที่เท่ากับ 200 และทำการเปลี่ยนค่าแกรมมาไป ซึ่งผลการจำลองที่ได้เป็นดังนี้

เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 2.5$ จะได้ $K_p = 0.187$ และ $K_i = 0.001$ ซึ่งผลการจำลองเป็นดังนี้

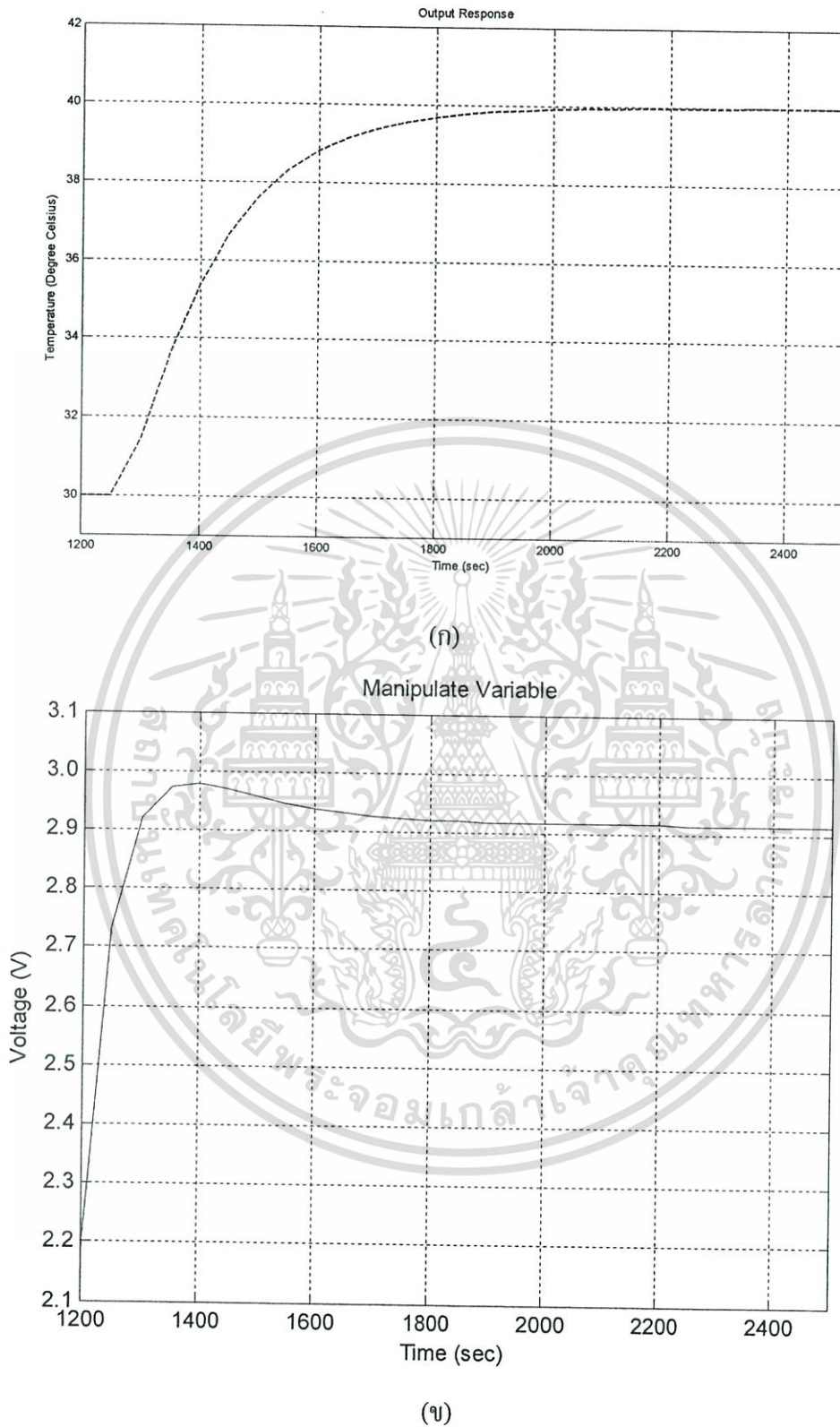


รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 2.5$

(ก) คือ Process Variable (ข) คือ Manipulate Variable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 5$ จะได้ $K_p = 0.39$ และ $K_i = 0.002$ ซึ่งผลการจำลองเป็นดังนี้



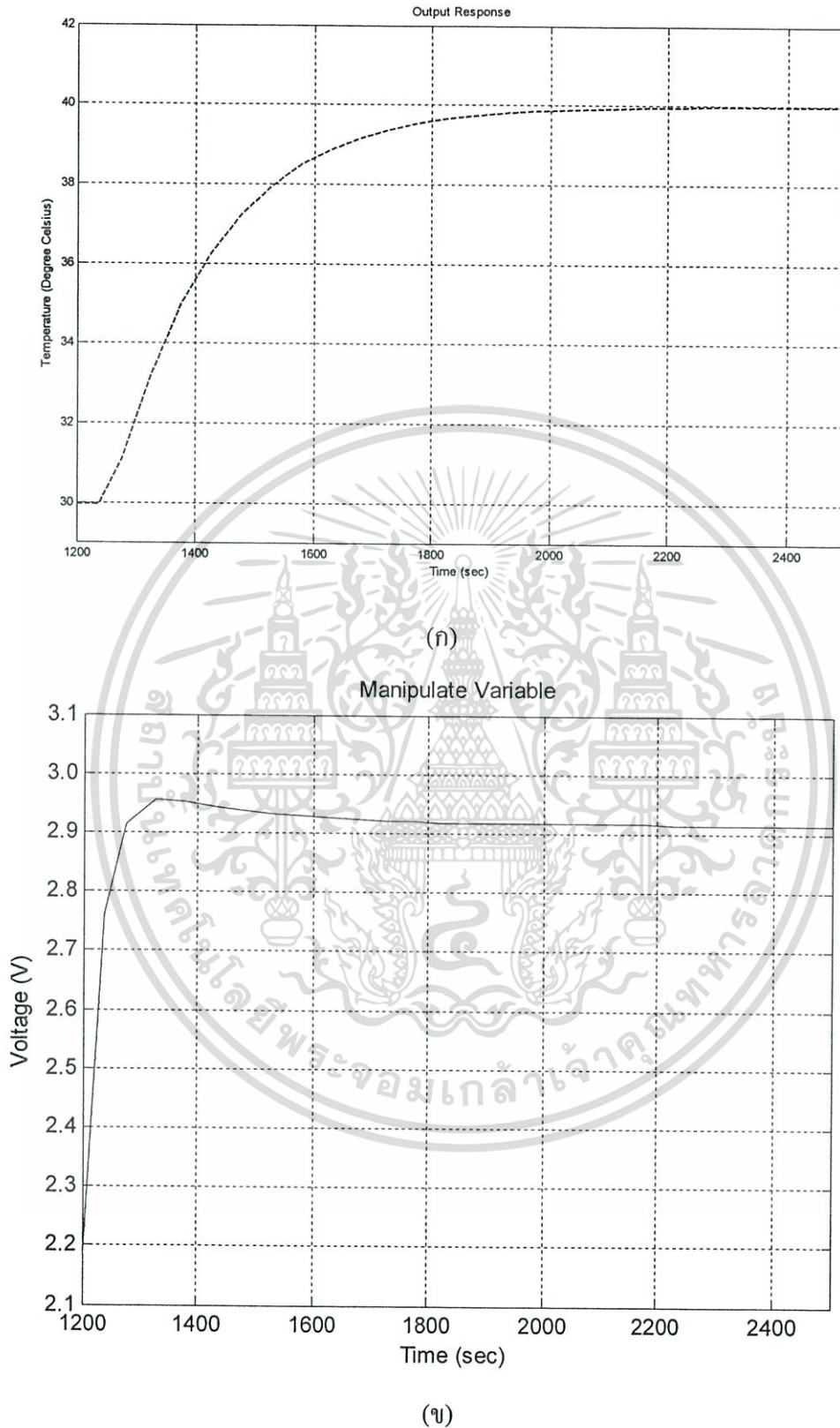
รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 5$

(ก) คือ Process Variable (ข) คือ Manipulate Variable

(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 7.5$ จะได้ $K_p = 0.59$ และ $K_i = 0.003$ ซึ่งผลการจำลองเป็นดังนี้

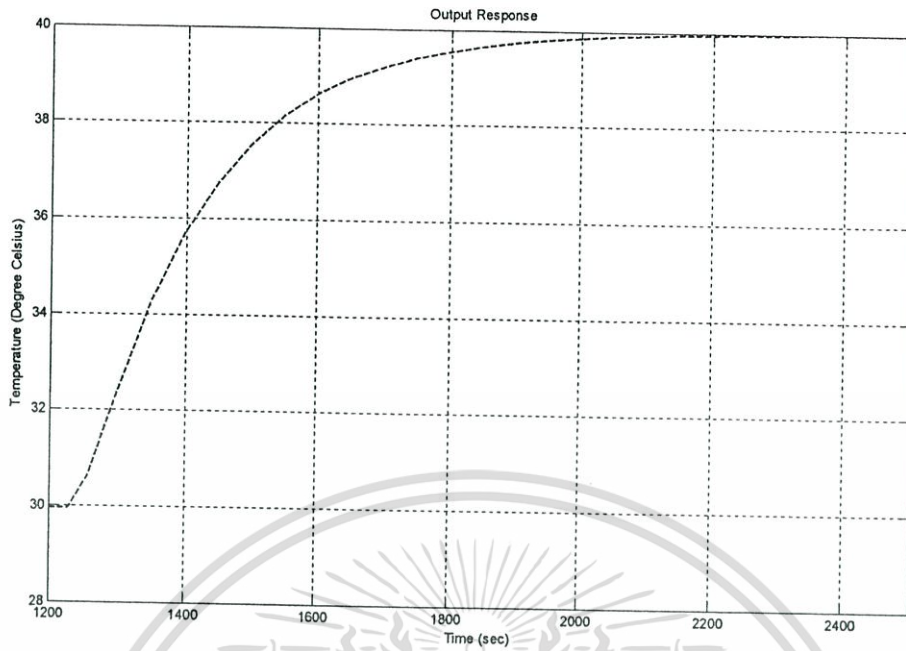


รูปที่ 5.4 ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 7.5$

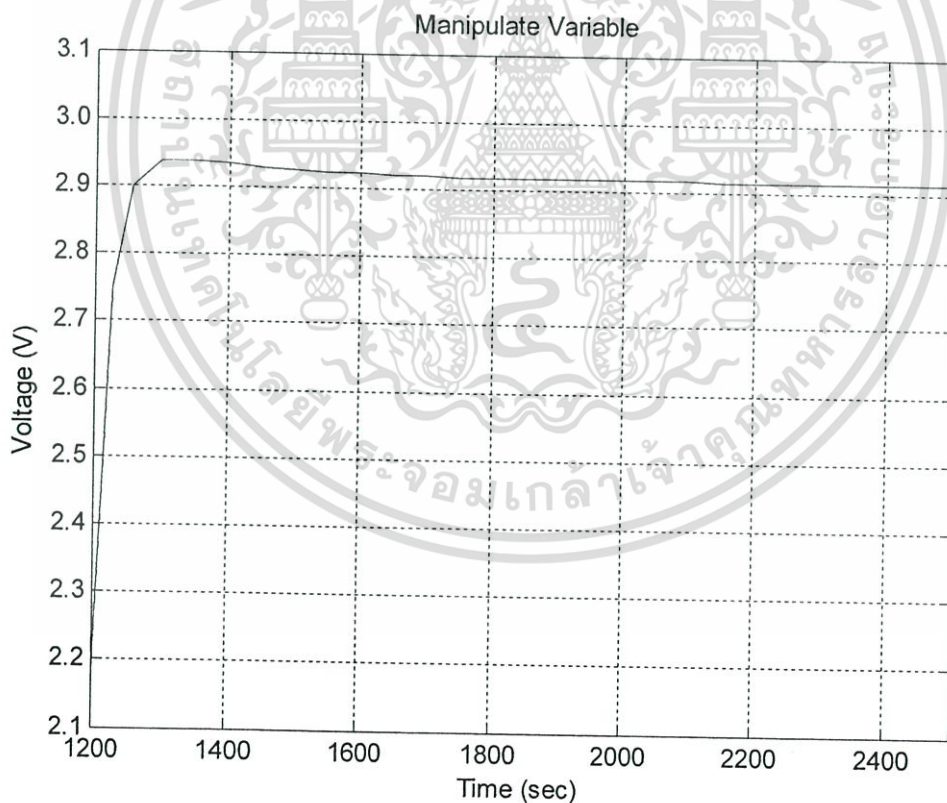
(ก) คือ Process Variable (ข) คือ Manipulate Variable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 10$ จะได้ $K_p = 0.79$ และ $K_i = 0.004$ ซึ่งผลการจำลองเป็นดังนี้



(ก)



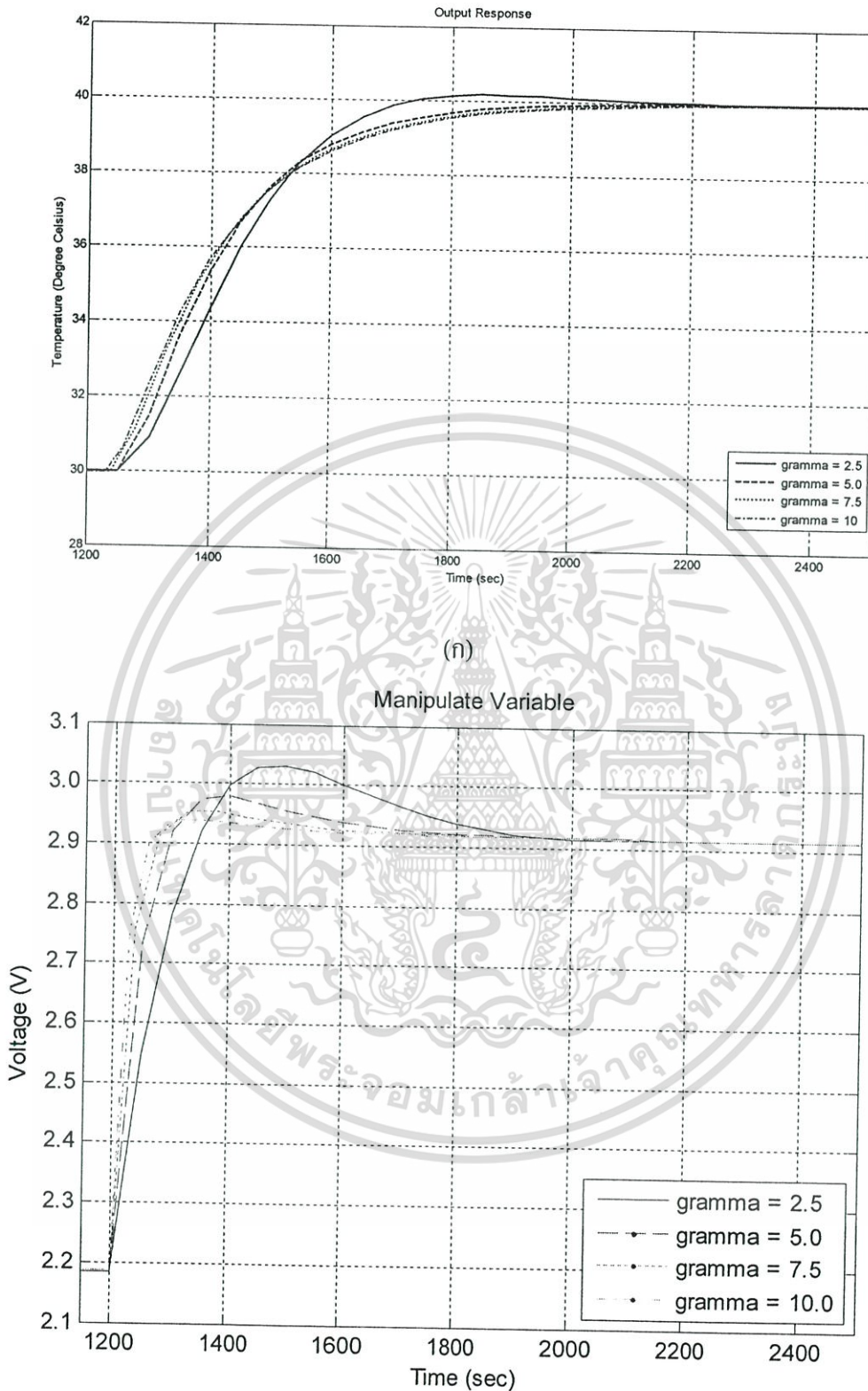
(ข)

รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 10$

(ก) คือ Process Variable (ข) คือ Manipulate Variable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบเมื่อค่า γ เปลี่ยนไป



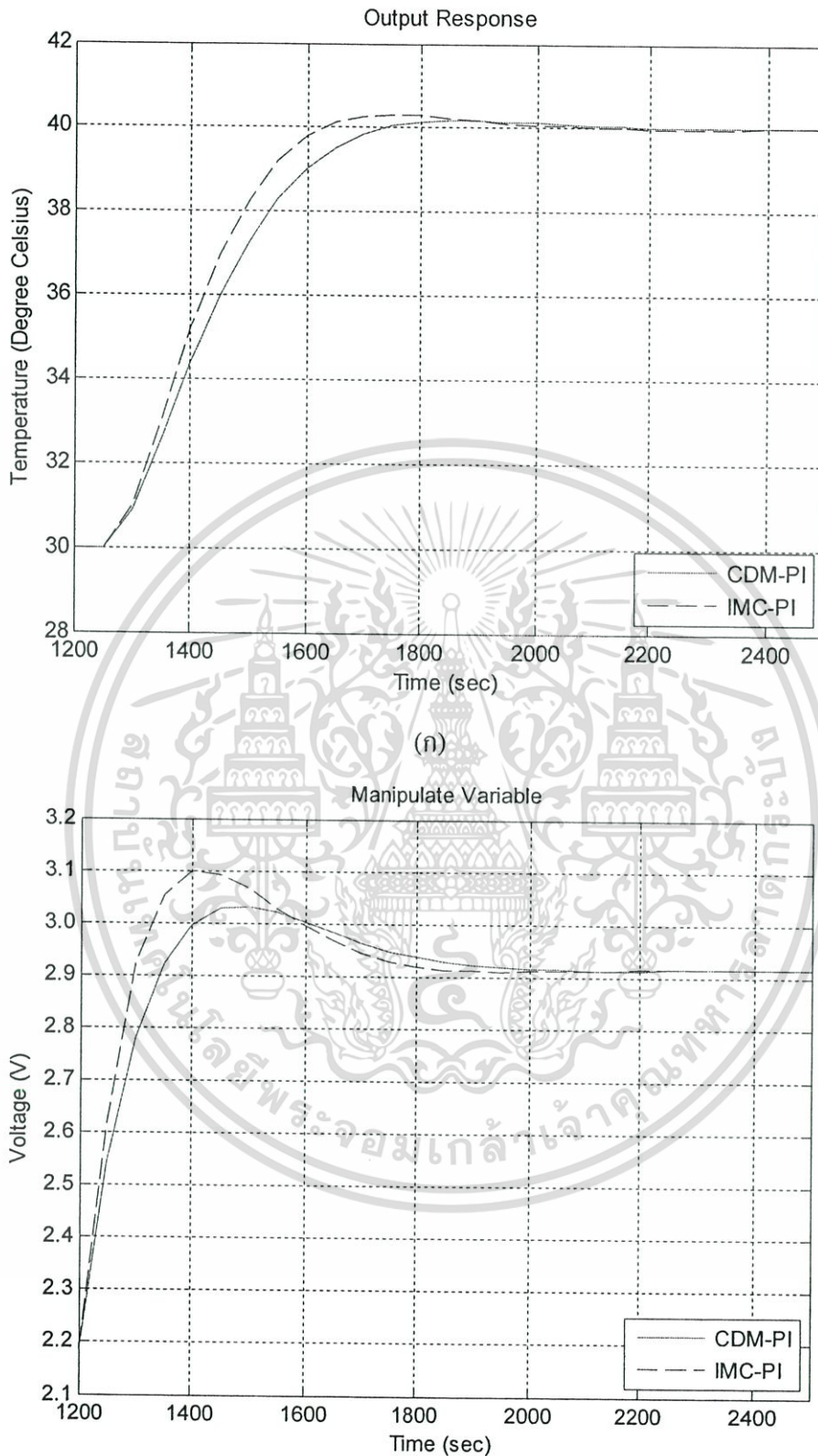
(จ)

รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$

$\gamma = 2.5, 5, 7.5$ และ 10 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบระหว่าง CDM-PI กับ IMC-PI

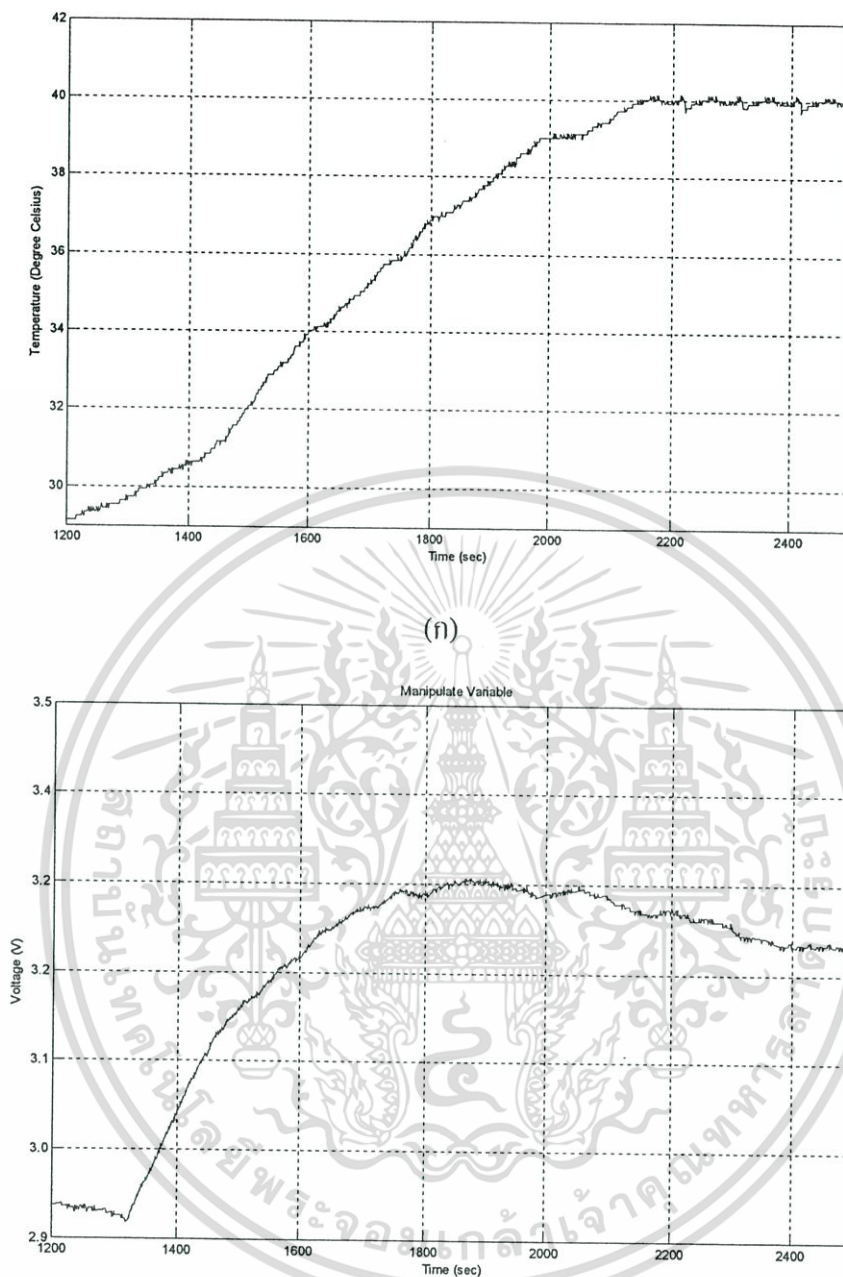


รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่าง CDM-PI กับ IMC-PI

เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 2.5$ จะได้ $K_p = 0.187$ และ $K_i = 0.001$ ซึ่งผลการจำลองเป็นดังนี้

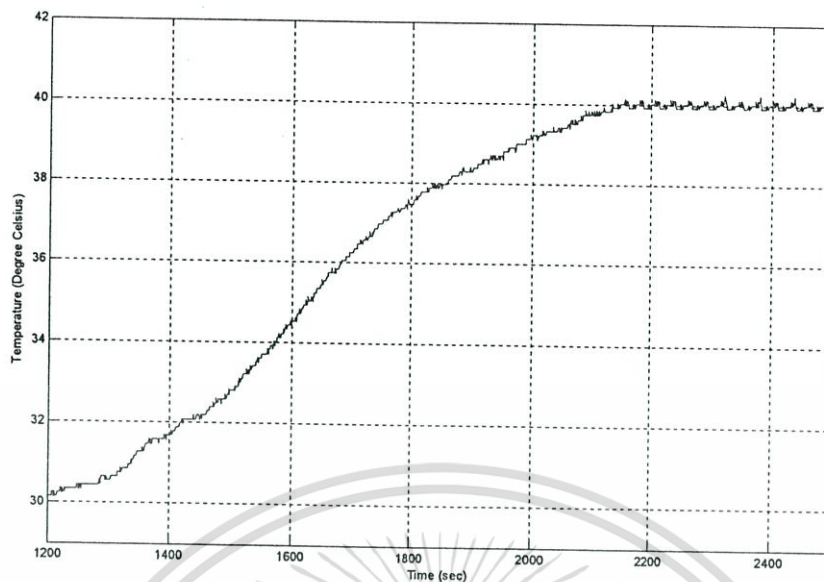


รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 2.5$

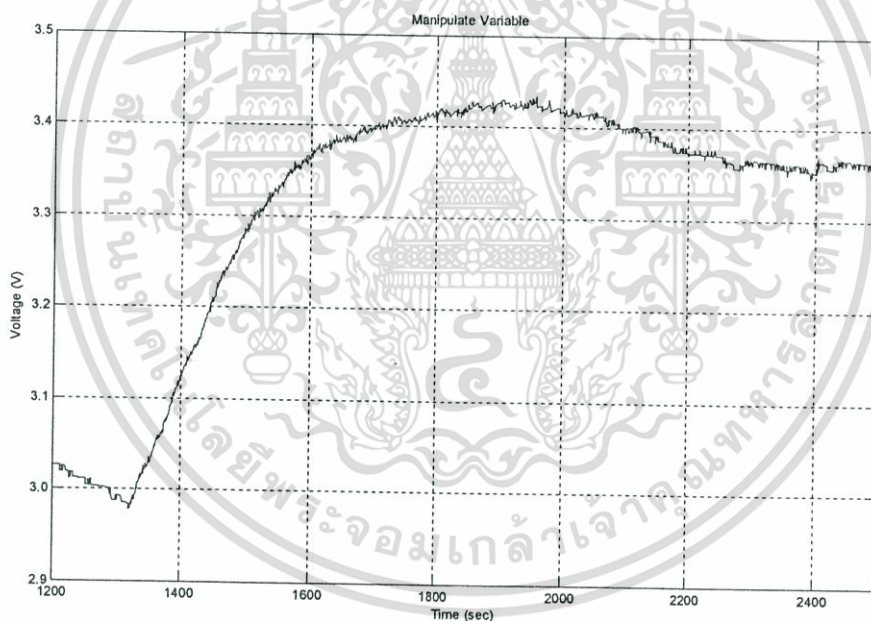
(ก) คือ Process Variable (ข) คือ Mainipulate Variable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 5$ จะได้ $K_p = 0.39$ และ $K_i = 0.002$ ซึ่งผลการจำลองเป็นดังนี้



(ก)



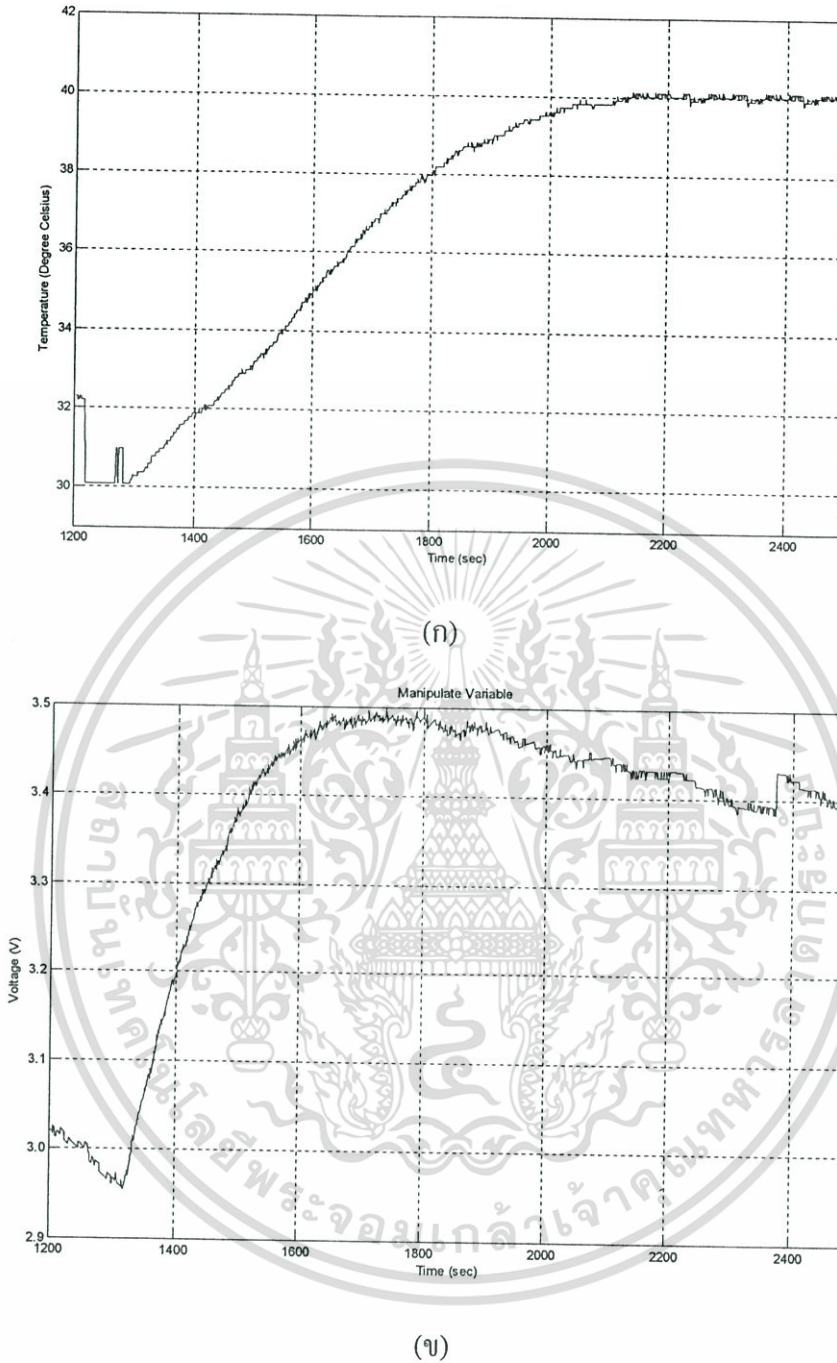
(ข)

รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 5$

(ก) คือ Process Variable (ข) คือ Manipulate Variable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 7.5$ จะได้ $K_p = 0.59$ และ $K_i = 0.003$ ซึ่งผลการจำลองเป็นดังนี้

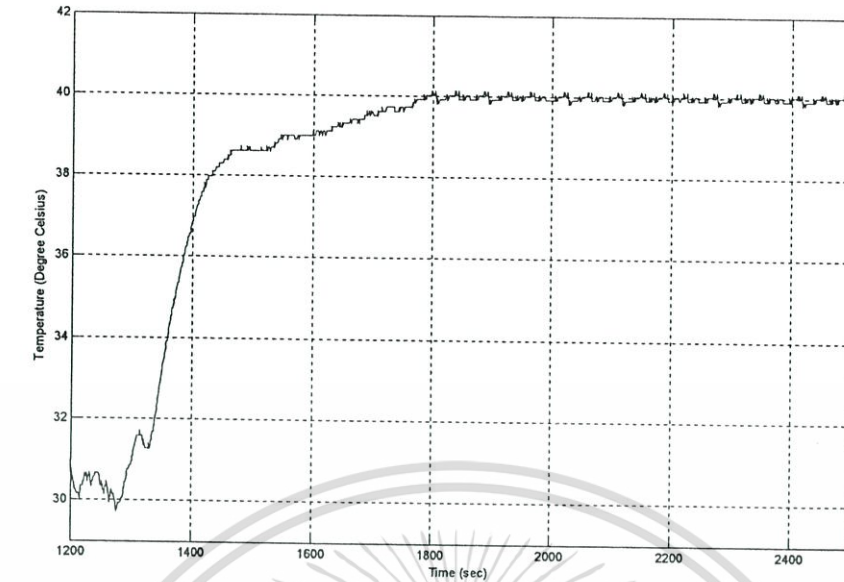


รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 7.5$

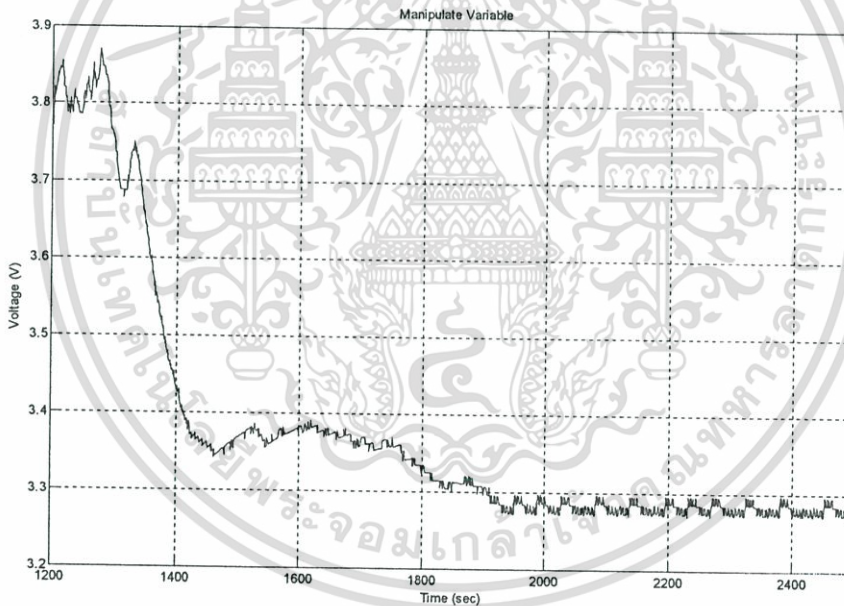
(ก) คือ Process Variable (ข) คือ Mainipulate Variable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 10$ จะได้ $K_p = 0.79$ และ $K_i = 0.004$ ซึ่งผลการจำลองเป็นดังนี้



(ก)



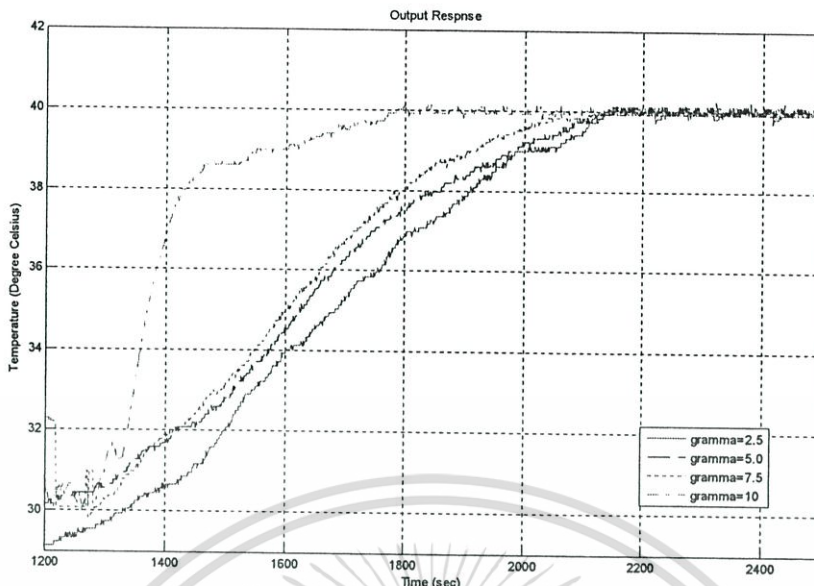
(ข)

รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 10$

(ก) คือ Process Variable (ข) คือ Mainipulate Variable

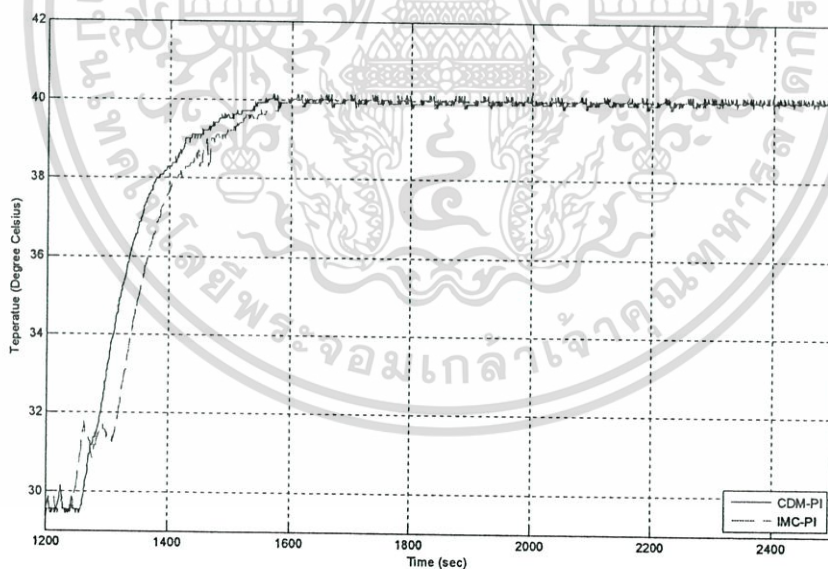
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบเมื่อค่า γ เปลี่ยนไป



รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบ เมื่อ $\tau = 200$
 $\gamma = 2.5, 5, 7.5$ และ 10 ตามลำดับ

เปรียบเทียบระหว่าง CDM-PI กับ IMC-PI

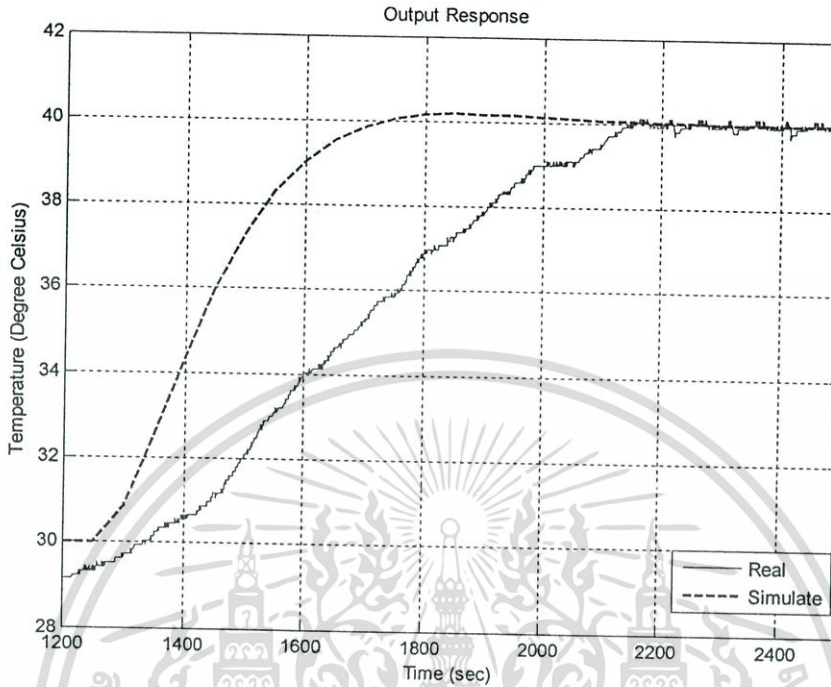


รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่าง CDM-PI กับ IMC-PI
 เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

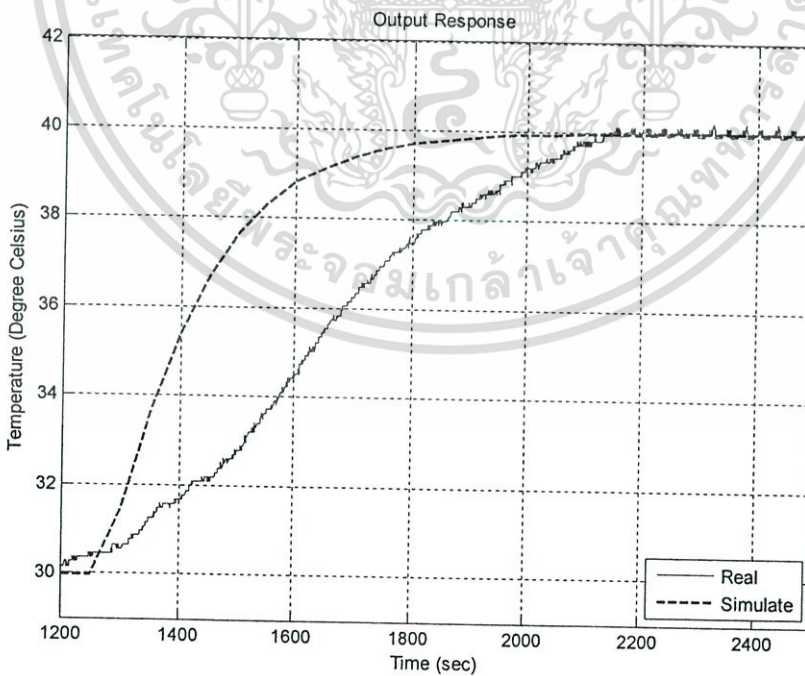
5.4 เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง

เพื่อแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองทางเอาต์พุตของการจำลองกระบวนการเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองจริง ผู้วิจัยได้นำกราฟเอาต์พุตมาแสดงเปรียบเทียบกัน ดังนี้



รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง

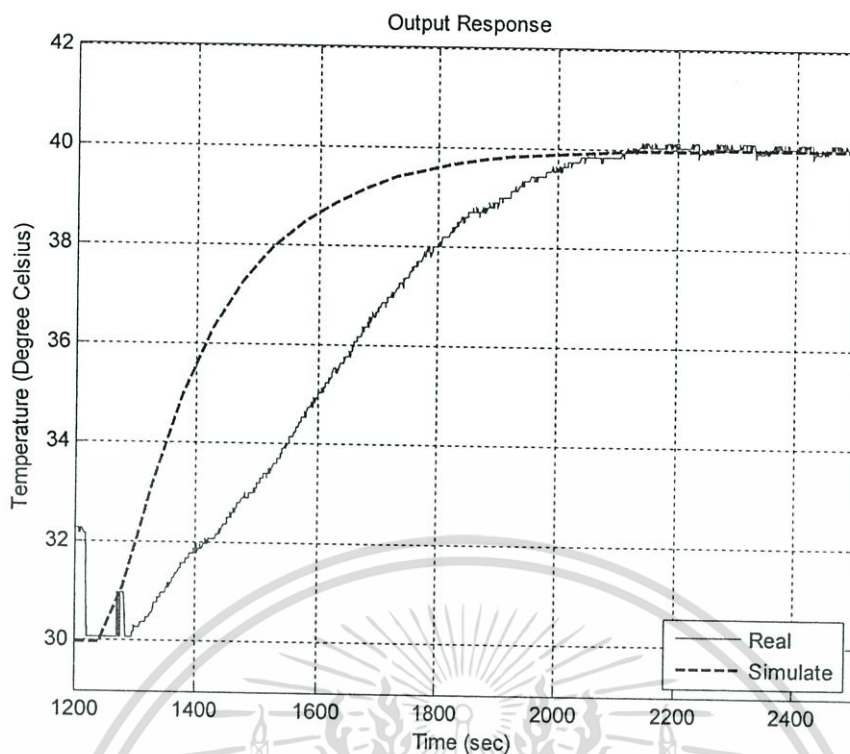
เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 2.5$



รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง

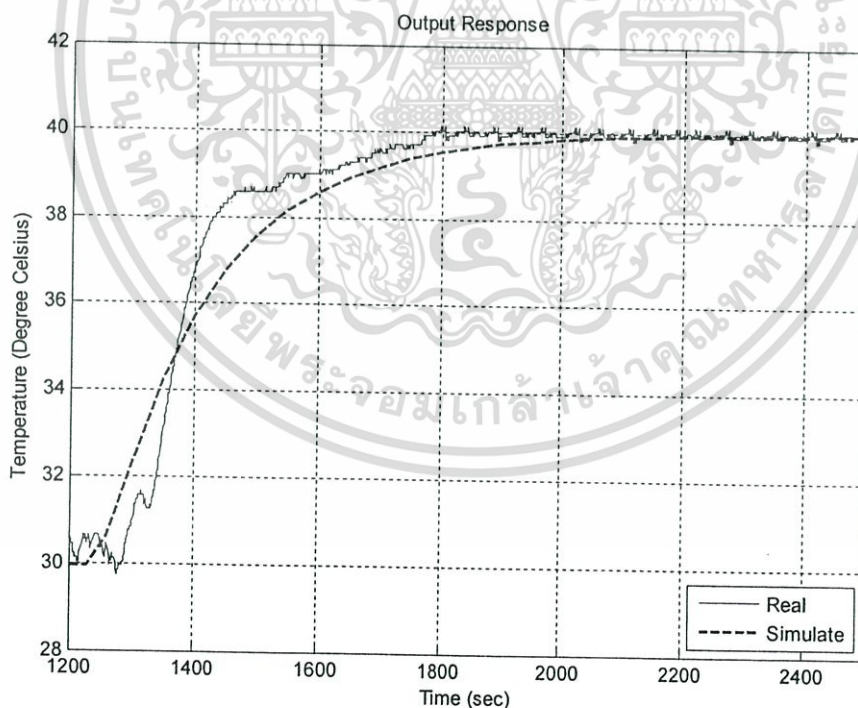
เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 5.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง

เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 7.5$



รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง

เมื่อ $\tau = 200$, $\gamma = 10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.15 ถึง 5.18 เป็นผลตอบสนองทางเอาต์พุตที่จากการจำลองกระบวนการเทียบกับผลตอบสนองเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองกระบวนการจริง โดยที่เส้นกราฟสีน้ำเงินทึบเป็นกราฟเอาต์พุตของกระบวนการจริง ส่วนกราฟเส้นประสีแดงเป็นกราฟเอาต์พุตของการจำลองกระบวนการ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าผลตอบสนองของการจำลองกับการทดลองจะเกิดความผิดพลาดในทาง Dynamic แต่ในทาง Static ไม่ได้เกิดข้อผิดพลาดขึ้น ซึ่งในการวิจัยนี้ยอมรับความผิดพลาดทาง Dynamic ได้

5.5 บทสรุป

ในบทที่ 5 นี้ได้ทำการจำลองและทดลองกระบวนการโดยใช้พารามิเตอร์จากบทที่ 4 โดยการทดลองแบบออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Simulink และการทดลองกระบวนการจริงโดยใช้โปรแกรม LabVIEW จากการทดลองด้วยพารามิเตอร์แบบ CDM-PI ปรากฏว่าผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎี คือ เมื่อค่าแกมมาเพิ่มขึ้น ค่า settling time จะมีค่าน้อยลง นั่นหมายความว่าระบบจะเข้าสู่ค่าเป้าหมายเร็วขึ้น (ดังรูป 5.13) และเมื่อนำผลการทดลองของแบบ CDM-PI มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของแบบ IMC-PI (ดังรูปที่ 5.14) ที่ค่า $\tau = 200$, $\gamma = 10$ เท่ากันจะเห็นว่าวิธี CDM-PI จะให้ผลตอบสนองที่เร็วกว่าวิธี IMC-PI

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในปัจจุบันระบบการวัดและควบคุมในอุตสาหกรรมได้พัฒนาไปมาก ก้าวสู่ยุคดิจิทัลมากขึ้น ดังนั้นตัวควบคุมที่ใช้ส่วนใหญ่ในปัจจุบันนี้จึงเปลี่ยนจากตัวควบคุมแบบอนาล็อกไปเป็นตัวควบคุมแบบดิจิทัล ซึ่งจะมีตัวกลางในการแปลงข้อมูล คือ เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมต่างๆ เขียนหรือสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ขึ้นมา เพื่อใช้คำนวณค่าพารามิเตอร์แล้วนำค่าที่ได้ไปกำหนดสัญญาณควบคุมอุปกรณ์ภายนอก ในงานวิจัยนี้จะเห็นได้ชัดถึงการควบคุมระบบด้วยวิธีการวัดและควบคุมแบบดิจิทัล โดยใช้โปรแกรม Matlab และ โปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้เป็นตัวกลางในการกำหนดสัญญาณภายนอก ซึ่งข้อดีในการใช้โปรแกรม LabVIEW คือ เป็นโปรแกรมแบบกราฟฟิกโหมด มีความยืดหยุ่นง่ายต่อการพัฒนาโปรแกรม สามารถนำไปใช้งานได้จริง สามารถนำมาใช้ควบคุมกระบวนการแบบ Real Time ได้

ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI โดยใช้วิธีแผนผังสัมประสิทธิ์ (CDM : Coefficient Diagram Method) นั้น ก่อนคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต้องหาผลตอบสนองในรูป S-CURVE ของกระบวนการในสถานะ open loop ก่อน เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ t_d , T , gain ที่ได้จาก ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i ด้วยวิธีแผนผังสัมประสิทธิ์ (CDM : Coefficient Diagram Method) และวิธีแบบจำลองภายใน (IMC : Internal Model Control) ภายใต้โครงสร้างแบบ Smith Predictor จากนั้นนำค่าที่ได้ไปทำการทดลองควบคุมกระบวนการ

ในการจำลองกระบวนการนั้นได้ใช้โปรแกรม Simulink ส่วนการทดลองนั้นใช้โปรแกรม LabVIEW ในการควบคุมกระบวนการ ข้อดีของโปรแกรม LabVIEW คือ เป็นโปรแกรมแบบ GUI (Graphic User Interface) แต่ข้อเสียคือรูปภาพที่จะนำเสนอไม่สามารถแก้ไขได้ ซึ่งบางครั้งอาจทำให้มองไม่เห็นในรายละเอียด ผู้วิจัยจึงได้นำค่าที่ได้จากการทดลองจากโปรแกรม LabVIEW ไปพล็อตในโปรแกรม Matlab จึงทำให้ได้ผลการทดลองดังรูปในบทที่ 5 ในการทดลองได้ทำการปรับค่าแอมพลิจูดตามตารางที่ 4.1 และได้เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างวิธี CDM-PI กับ IMC-PI ซึ่งวิธี CDM-PI ให้ผลตอบสนองที่เร็วกว่าวิธี IMC-PI

6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

1. กระบวนการเตาอบเป็นกระบวนการที่ช้า ดังนั้นในการทดลองแต่ละ Set point จะใช้เวลานาน ทำให้การทดลองมีความลำบาก เนื่องจากอุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลาจะมีผลต่อการตั้งค่าสำหรับการทดลอง ดังนั้นก่อนการทดลองควรมีการเตรียมความพร้อมและออกแบบวิธีการทดลองให้ครบทุกขั้นตอนในการทดลองเพื่อไม่ให้เสียเวลาในการทดลอง
2. เมื่อทำการทดลองเสร็จหนึ่ง Set point แล้วไม่สามารถทำการทดลอง Set point ต่อไปได้ทันที เนื่องจากต้องรอให้อุณหภูมิลดลงให้เท่ากับอุณหภูมิห้องเสียก่อน แนวทางการแก้ไขอาจใช้พัดลมมาช่วยในการลดอุณหภูมิเมื่อต้องการทดลองใหม่หรือเปลี่ยน Set point ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิลดได้เร็วยิ่งขึ้น
3. โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่มีขนาดใหญ่ และใช้ทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์มาก ดังนั้นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการลงโปรแกรม จึงต้องมีคุณสมบัติด้านความเร็วในการประมวลผลที่สูง ซึ่งก็จะมีราคาแพงตามไปด้วย แนวทางการแก้ไขคือลงโปรแกรมเวอร์ชันที่ไม่สูงมาก (ขนาดจะเล็กกว่าเวอร์ชันสูงๆ) และเลือกลงโปรแกรมเท่าที่จะเป็นต้องใช้เท่านั้น

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา

การนำเอาวิธี CDM-PI มาช่วยออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมอุณหภูมิในเตาอบภายใต้โครงสร้างแบบ Smith Predictor ถือว่าเป็นต้นแบบที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมกระบวนการที่มีค่า Delay Time ได้ ซึ่งผู้วิจัยคิดว่าหากนำไปใช้กับกระบวนการอื่นที่ Delay Time ก็น่าจะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการแก้ปัญหาได้ดี

การทดลองนี้เป็นการทดลองโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมซึ่งแนวทางการพัฒนาต่อไปอาจจะนำโปรแกรมไปเขียนลงในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้สามารถใช้งานแบบ Stand Alone ได้ก็น่าจะเป็นแนวทางในการพัฒนาที่ดี

บรรณานุกรม

- [1] O.J. Smith , “A controller to overcome dead time” ISA , J. , vol.6 , no.2 , pp28-33 , 1959.
- [2] F. Furukawa and E. Shimemura , “Predictive control for systems with time delay” , Int. J. Control 37(2) , pp.399-412.
- [3] K. Watanabe and M. Ito, “A process-Model control for linear systems with delay ” , IEEE Trans. AC-26(6) , pp.1261-1269 , 1981.
- [4] P.J. Gawthrop , “ Some interpretations of the self-tuning controller ” , Proc.IEE , 124(10) , pp. 889-894 , 1977.
- [5] E.F. Camacho and J.M. Quero, “Precomputation of generalized predictive self-tuning controllers” IEEE Transactions on Automatic Control ,vol.36 , no.7 , July 1991.
- [6] T. Hagglund, “A predictive PI controller for processes with long dead times” IEEE Control System Magazine, 12 (1) pp 57-60, 1992.
- [7] S.E. Hamamchi , I. Kaya and D.P. Atherton, “mith Predictor design by CDM” Proc. European Control Conference , ECC'01 , 2001.
- [8] L. Samaranayake , S. Alahakoon and Kirithi Walgama, “Speed Controller Strategies for Distributed Motion Control via Ethernet” Proc. Int. Symposium on Intelligent Control, Texas pp.322-327, 2003
- [9] S. Manabe , “Coefficient Diagram Method” , 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace , Seoul , pp.199-210 ,1998.
- [10] Modern control system analysis and design using MATLAB, Robert H.Bishop
- [11] Matlab tools for control system analysis and design, Benjamin C. Kuo, Duane C. Hanselman
- [12] The art of control engineering, Ken Dutton
- [13] Control system Engineering, Norman S. Nise
- [14] Rpbert H.bishop. “LabVIEW 7 express” student edition : NJ : Prentice Hall PTR, c 2006.
- [15] Lisa K. Wells. “LabVIEW for everyone” graphical programming made even easier, NJ : Prentice Hall PTR, c 1997.
- [16] Okata M. “Modern Control Engineering” 3rdEdition. : Prentice-Hall, int 1997. .
- [17] Erickson C. James. “Handbook of Electrical Heating for Indistry” New York : IEEE, Inc.1995.
- [18] H. Saadat, Power System Analysis, McGraw-Hill, 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] S. Sujitjorn, C. U-Thaiwasin and Y. Prempraneerat, "Torsional Resonance Suppression via Pole-Zero Assignment", Proc.19th IASTED Int.Conf.Modelling, Identification and Control, Feb. 14-17, 2000, pp. 288-292.
- [20] H. Waagen, "Reduce Torsional Resonance in Incremental Motion Servo" Control Engineering , vol. 16, no.14,1969,pp. 85-88.
- [21] J. Tal and B.C. Kuo(Ed.), Incremental Motion Control : Torsional Resonance in High Performance Incremental Motion Systems , S.R.L.Publishing,vol.1,1978,pp.110-128.
- [22] W.G. Hurley and W.H. Wolfe, "Electromagnetic Design of a Magnetic Suspension System" IEEE Trans.Educ.,vol.40,no.2,1997,pp.124-130.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Pruetti Puawade, Vichitpon Boonpranchoo, Vittaya Tipsuwanporn and Arjin Numsomran, "Smith Predictor Design by CDM for Temperature Control System," International Conference on Control, Automation and System 2010 (ICCAS 2010), pp. 1522-1526, Gyeonggi-do, Korea, October 27-30, 2010.

Smith Predictor Design by CDM for Temperature Control System

Pruetti Puawade¹, Vichitpon Boonpranchoo¹, Vittaya Tipsuwannaporn¹ and
Arjin Numsomran¹

¹Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.
(Tel : +66-81-915-0356; E-mail: arjin@kmitl.ac.th)

Abstract: Smith Predictor control is theoretically a good solution to the problem of controlling the time delay systems. However, it seldom gets use because it is almost impossible to find out a precise mathematical model of the practical system and very sensitive to uncertain system with variable time-delay. In this paper is concerned with a design method of smith predictor for temperature control system by Coefficient Diagram Method (CDM). The simulation results show that the control system with smith predictor design by CDM is stable and robust whilst giving the desired time domain system performance.

Keywords: CDM, Smith Predictor, temperature process

1. INTRODUCTION

The Smith Predictor [1] is a popular and very effective long dead-time compensator for stable processes. The main advantage of the Smith Predictor method is that the time delay is effectively taken outside the control loop in the transfer function relating the process output to setpoint. However, this method introduces extreme instability into the system for the uncertain system, unstable system and variable delay system. Furnkawa and Shimemura [2] augmented the scheme with an observer, Watanabe and Ito [3] deliberately replaced the known process by a mismatched process model, Gawthrop [4] used an adaptive least-square predictor. A simple algorithm of implementing self-tuning controller for first order system was present based on Smith Predictor control structure [5]. Huang [6] did the similar studies of self-tuning controller design, which used the infinite time integration of a quadratic function as the system performance index. These cited authors have thus solved the stabilization problem by involving greater complexity than the Smith Predictor. Also Hamamchi *et al* [7] proposed a Smith Predictor design by Coefficient Diagram Method (CDM) to achieve a better performance. [8]

Coefficient Diagram Method (CDM) [9] is a method where by the designer can obtain the characteristic polynomial of the closed loop system efficiently taking a good balance of stability, response and robustness. The strength of CDM lies in that the simplest and robust controller under practical limitations can be found for any plant [9]-[10]. Such, CDM is less sensitive to disturbances and bounded uncertainties resulted from parameter variations [11]-[12].

The rest of the paper organized as follows. In section II, gives overview of the traditional of Smith Predictor. Section III, explain concept of CDM design procedure. Section IV; introduce structure of Modified Smith Predictor design by CDM. Then simulation results are giving to illustrate the performance of method proposed

for temperature control system in section V. Finally, conclusions are giving in section VI

2. OVERVIEW OF SMITH PREDICTOR

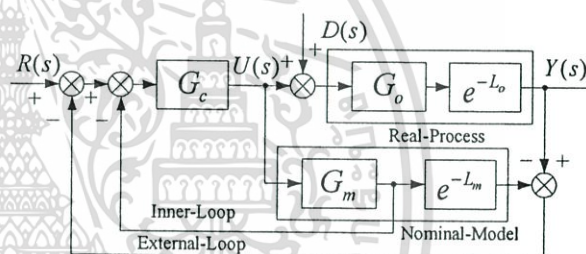


Fig.1 The conventional Smith Predictor structure

Smith Predictor control [1] is a feedback control scheme that has an inner loop as shown in Fig.1. G_o denotes a stable, strictly proper rational function characterizing the delay-free part of the plant. L_o denotes p positive constant standing for the time-delay. G_m and L_m are nominal model of G_o and L_o , respectively, obtained through modeling process. G_c denotes a rational function characterizing the compensator called primary controller. The inner loop works to eliminate the actual delayed output as well as to feed the predicted output to the primary controller. This makes it possible to design the primary controller assuming no time-delay in the control loop. From Fig.1, transfer function of conventional Smith Predictor can be writing as:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_o(s)e^{-L_o s}}{1 + G_c(s)G_m(s) + G_c(s)[G_o(s)e^{-L_o s} - G_m(s)e^{-L_m s}]} \quad (1)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_o(s)e^{-L_o s}[1 + G_c(s)G_m(s)(1 - e^{-L_m s})]}{1 + G_c(s)G_m(s) + G_c(s)[G_o(s)e^{-L_o s} - G_m(s)e^{-L_m s}]} \quad (2)$$

In the case of $G_o = G_m$ and $L_o = L_m$ the transfer

function can be writing as:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_o(s)e^{-L_o s}}{1+G_c(s)G_m(s)} \quad (3)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_o(s)e^{-L_o s}[1+G_c(s)G_m(s)(1-e^{-L_m s})]}{1+G_c(s)G_m(s)} \quad (4)$$

3. CONCEPT OF CDM

The CDM [9] is one of the methods of a controller design using polynomial approach. This method uses polynomials for system representation. By denominator and numerator of the transfer function are consider independently from each other. The CDM is a technique to arrange the poles of a closed loop transfer function, in order to get wanted response in the time domain. The arrangement of a suitable pole is get using to design parameter, stability index (γ_i) and equivalent time constant (τ).

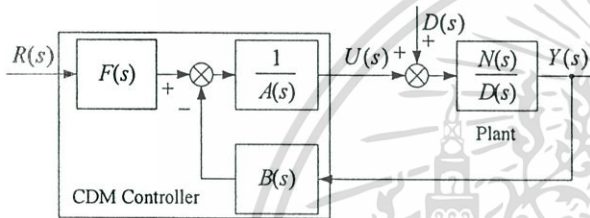


Fig.2 Standard block diagram of CDM control system

Fig. 2 represents the standard block diagram of control system designed by CDM. It is composed of plant and CDM controller. The polynomials form of the plant and the controller generally is write respectively in the form [9].

$$D(s) = a_n s^n + a_{n-1} + \dots + a_0 \quad (5)$$

$$N(s) = b_m s^m + b_{m-1} + \dots + b_0$$

and

$$A(s) = l_i s^i + l_{i-1} s^{i-1} + \dots + l_0$$

$$B(s) = k_j s^j + k_{j-1} s^{j-1} + \dots + k_0 \quad (6)$$

$$F(s) = k_0$$

where $m \leq n$ and $i \leq n$

From Fig. 2 the characteristic polynomial define as

$$P(s) = A(s)D(s) + B(s)N(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \quad (7)$$

where a_0, a_1, \dots, a_n are the real coefficients.

And the stability index (γ_i), the equivalent time constant (τ) and the stability limit (γ_i^*) are defined as

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{(a_{i-1} a_{i+1})} ; i = 1, \dots, n-1 \quad (8)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (9)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} ; \gamma_o = \gamma_n = \infty \quad (10)$$

The equivalent time constant determines the time response speed. The relation between the settling time and the equivalent time constant is consider according to the standard Manabe form [9]. If t_s denotes the desired settling time, this relation expresses the choice of τ by $\tau = t_s / (2.5 \sim 3)$. The stability index specifies the stability and the waveform of the time response. The variation of the stability index due to plant parameter variation designates the robustness property [9]. According to the Manabe form, the stability index are chosen as

$$\gamma_i = 2.5, \gamma_i = 2 ; i = 2 \sim (n-1), \gamma_o = \gamma_n = \infty \quad (11)$$

The standard values of stability index according Manabe form in Eq. (11) can be use to design the controller if the following condition is satisfied.

$$p_k / p_{k-1} > \tau / (\gamma_{n-1} \gamma_{n-2}, \dots, \gamma_1) \quad (12)$$

Where p_k and p_{k-1} are the coefficients of the plant at order k^{th} and $(k-1)^{th}$. If the above condition is not satisfied, we can first increase γ_{n-1} then γ_{n-2} and so on, until Eq. (12) is satisfied. From Eqs. (8) ~ (10), the characteristic polynomial to be used to design the parameters of a controller is

$$P_i(s) = a_0 \left\{ \left[\sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}} \right) (\tau s)^i \right] + \tau s + 1 \right\} \quad (13)$$

By equating the characteristic polynomial (7) with a controller included to the characteristic polynomial (13) resulting from the known equivalent time constant (τ) and stability index (γ_i), the parameters of a controller are then obtained.

From the CDM standard block diagram, it can be rearranged in structure of two degree of freedom [13] as shown in Fig. 3 where the controller $G_c(s)$ and the pre-filter $G_f(s)$ are

$$G_c(s) = \frac{B(s)}{A(s)} \quad (14)$$

$$G_f(s) = \frac{F(s)}{B(s)} \quad (15)$$

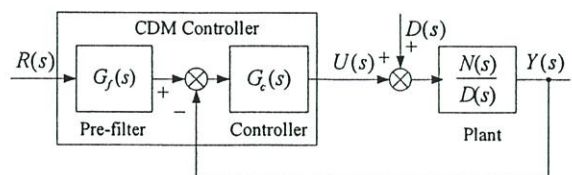


Fig. 3 Rearranged block diagram of CDM control systems.

4. MODIFIED SMITH PREDICTOR USING CDM

From Fig.4 represents the Modified Smith Predictor using CDM. It is composed pre-filter $G_{c1}(s)$, controller $G_{c2}(s)$ in forward-loop and controller $G_{c3}(s)$ in inner-loop. Assuming the real-process and nominal-model match exactly, the closed loop transfer function of the Modified Smith Predictor using CDM as per the Fig.4 is given by

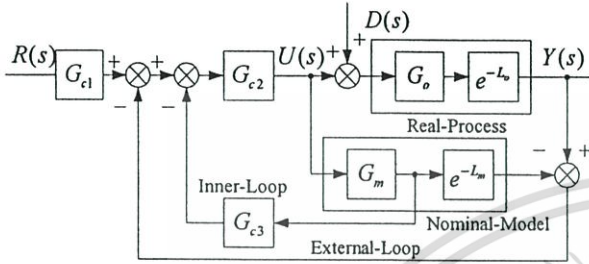


Fig.4 Modified Smith Predictor using CDM

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_o(s)e^{-L_o s}}{1 + G_{c2}(s)G_{c3}(s)G_m(s)} \tag{16}$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_o(s)e^{-L_o s} [1 + G_{c2}(s)G_m(s)(1 - e^{-L_m s})]}{1 + G_{c2}(s)G_{c3}(s)G_m(s)} \tag{17}$$

Where $G_{c1}(s) = F(s)$, $G_{c2}(s) = 1/A(s)$ and $G_{c3}(s) = B(s)$. As it is seen from Eqs. (16) ~ (17), the characteristic polynomial of closed loop system is time delay free. Hence, the controller parameters of $G_{c1}(s)$, $G_{c2}(s)$ and $G_{c3}(s)$ can be found using only the time delay free part of plant transfer function. According structure of two degree of freedom in Fig.3 and Eqs. (14) ~ (15), the closed loop transfer function can be writing as :

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_f(s)G_c(s)G_o(s)e^{-L_o s}}{1 + G_c(s)G_m(s)} \tag{18}$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_o(s)e^{-L_o s} [1 + G_c(s)G_m(s)(1 - e^{-L_m s})]}{1 + G_{c2}(s)G_m(s)} \tag{19}$$

5. EXPERIMENTAL RESULTS

In this section, the experimental system of the Modified Smith Predictor design by CDM use to control the temperature of oven process in laboratory show in Fig.5. By changing the control signal 12.5% from 2.5 to 3 volts. The open-loop response of the temperature process obtained from the experiment is show in Fig.6 and its transfer function found that

$$G_p(s) = \frac{B_p(s)}{A_p(s)} = \frac{K}{Ts + 1} e^{-L_o s} = \frac{62.78}{1020s + 1} e^{-30s} \tag{20}$$

where T , L_o and K are the time constant, dead time and gain of the process respectively.

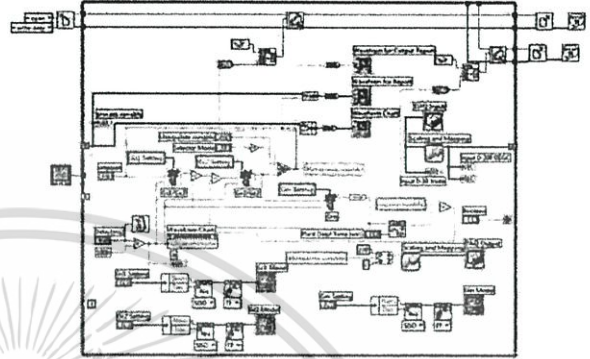
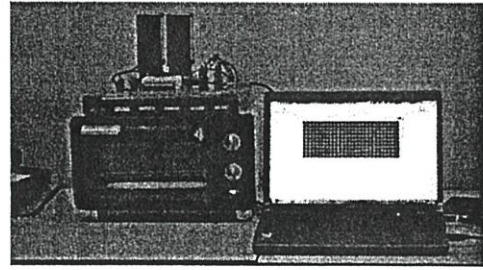


Fig. 5 Temperature process and Experimental System

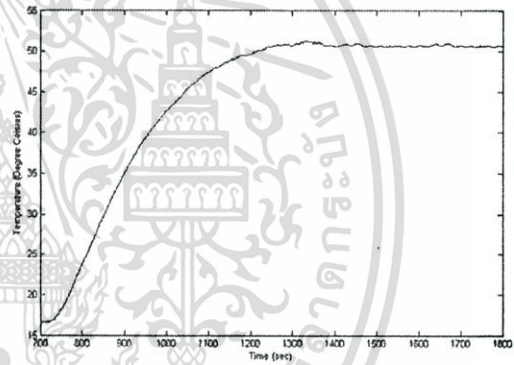


Fig. 6 Open-Loop response

In the following examples, the temperature of oven process to be controlled is 40°C started at 1300 sec and the results will be show in three parts. First is the system performance of the temperature process for various stability index (γ_l). Next, the step response due to comparison between proposed system and internal model control (IMC).

5.1 System Performance

According to design procedure in section III and IV, the model in Eq. (20) is use to design CDM controller by neglect dead time. Therefore, parameter of CDM controller for this case is equivalent with PI controller. Then design CDM controller by define desired settling time $t_s = 1,000$ sec, so as the equivalent time constant $\tau = 200$. Next, define stability index corresponding stability limit condition in Eq. (10). In this case, the comparison performance for various values of stability index is show that by define $\gamma_l = 2.5, 5, 7.5, 10$ respectively.

Table 1 Coefficients of CDM-PI Controller for Various Values of Stability Index

Stability index	K_p	K_i
$\gamma_l = 2.5$	0.187	0.001
$\gamma_l = 5$	0.39	0.002
$\gamma_l = 7.5$	0.59	0.003
$\gamma_l = 10$	0.79	0.004

The step responses of Modified Smith Predictor using CDM-PI for various values of stability index are show in Fig.7, and the control signals are show in Fig. 8. It is apparent that parameter assignment according to the standard Manabe form satisfied for case of settling time while overshoot is 0 %. The coefficient of CDM-PI controller and performances values of time response for various stability index are also summarized in Table I and II respectively.

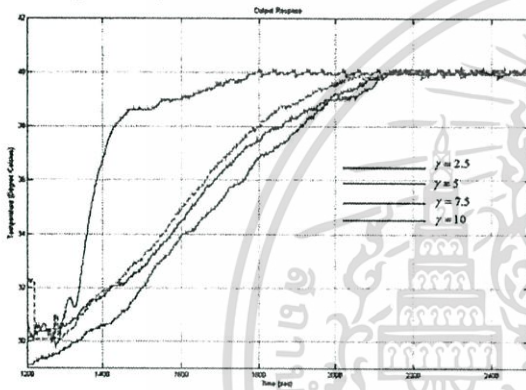


Fig. 7 Step response of system with various stability index

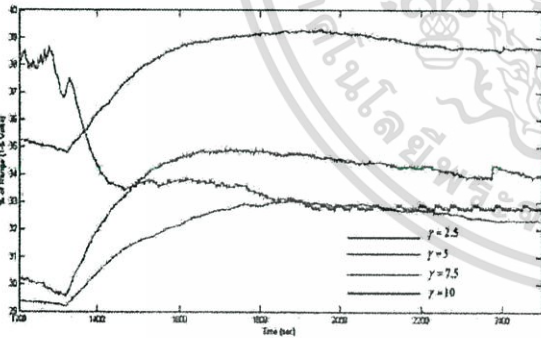


Fig. 8 Control signal of system with various stability index

Table 2 Comparison Performance Values of The Time Response Curves Shown in Fig. 7 and 8

Stability index	settling time	max overshoot	max u
$\gamma_l = 2.5$	807 s	0 %	2.32 V
$\gamma_l = 5$	762 s	0 %	2.57 V
$\gamma_l = 7.5$	714 s	0 %	2.39 V
$\gamma_l = 10$	397 s	0 %	2.55 V

5.2 Comparison Between CDM-PI and IMC-PI

In this part, the performance comparison between CDM-PI and IMC-PI is show that. In this case, IMC-PI controller is design by conventional method that approximate $e^{-Ls} \approx 1-Ls$ and define filter parameter (τ_f) to be five as fast as the open loop response. Hence, from Eq. (20) $\tau_f = 204$ and parameter of PI controller is $K_p = 0.0693$ $K_i = 6.7984 \times 10^{-5}$. According to concept of CDM in section III, stability index is specifies the robustness property. Therefore, choose parameter design of CDM-PI controller $\gamma_l = 10$ and $\tau = 200$ which obtained $K_p = 0.79$ $K_i = 0.004$ for comparison with IMC-PI controller.

The step responses of Modified Smith Predictor using CDM-PI compare with IMC-PI are show in Fig.9, and the control signals are show in Fig. 10. It is obvious that CDM-PI controller produces a step response without an overshoot, fast settling time and this is achieved by a control signal having a smaller magnitude when comparison with IMC-PI. Table III represents the performance values of the control system in Fig. 9 and 10.

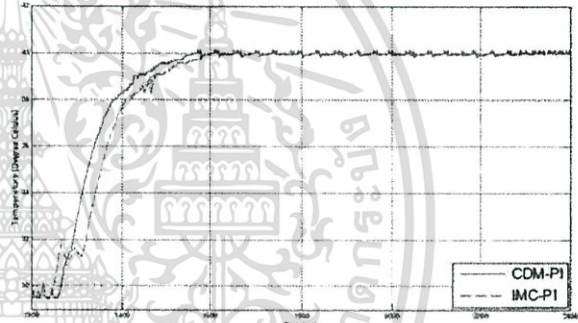


Fig.9 Step response for comparison between CDM-PI and IMC-PI

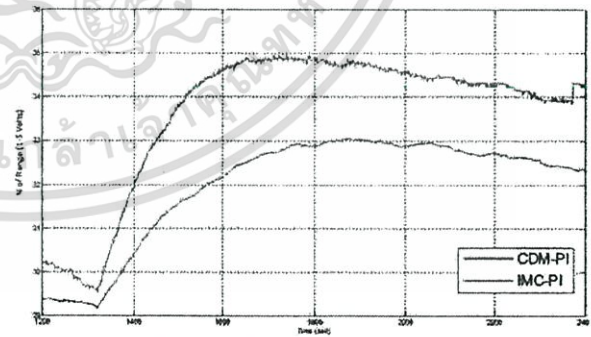


Fig.10 Control Signal for comparison between CDM-PI and IMC-PI

Table 3 Performance Values of the Time Response Curves Shown in Fig. 9 and 10.

Methods	settling time	max overshoot	max u
CDM-PI	190 s	0 %	2.32 V
IMC-PI	210 s	0 %	2.396 V

5. CONCLUSION

In this study, the smith predictor design by CDM for the temperature control system has been proposed in this paper. The control system is tested with LabView program and the time domain characteristics are compared with IMC method based on PI controller. It has been show that the proposed method is successful in the controller design than the IMC method for the temperature control to overcome the effects of plant perturbations. Moreover, the proposed method can be neglect dead time which cause of easily and flexible for controller design.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to acknowledge her sincere thank to the Industry/University Cooperative Research Center in Data Storage Technology and Application, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and National Electronics and Computer Technology Center, National Science and Technology Development Agency.

REFERENCES

- [1] O.J.Smith, "A controller to overcome dead time," ISA, J., vol.6, no.2, pp 28-33, 1959.
- [2] F. Furukawa and E. Shimemura, "Predictive control for systems with time delay," Int. J. Control, 37 (2), pp. 399-412
- [3] K. Watanabe and M. Ito, "A process-Model control for linear systems with delay," IEEE Trans., AC-26 (6), pp.1261-1269, 1981
- [4] P.J. Gawthrop, "Some interpretations of the self-tuning controller," Proc. IEE, 124 (10), pp.889-894, 1977
- [5] E.F.Camacho and J.M.Quero, "Precomputation of generalized predictive self-tuning controllers," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.36, no.7, July 1991.
- [6] T. Hagglund, "A predictive PI controller for processes with long dead times," IEEE Control System Magazine, 12 (1) pp57-60, 1992.
- [7] S. E. Hamamchi, I. Kaya and D. P. Atherton, "Smith Predictor design by CDM," Proc. European Control Conference, ECC'01, 2001
- [8] L. Samaranayake, S. Alahakoon and Kirithi Walgama, "Speed Controller Strategies for Distributed Motion Control via Ethernet," Proc. Int. Symposium on Intelligent Control, Texas pp. 322-327, 2003
- [9] S. Manabe, "Coefficient Diagram Method," 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Seoul, pp.199-210, 1998.
- [10] S.E. Hamamci, I. Kaya and M. Koksai, "Improving performance for a class of processes using coefficient diagram method," 9th Mediterranean Conf. on Control and Automation, MED'01, Croatia, 2001
- [11] S.E. Hamamci and A. Uçar, "A model based CDM controller for uncertain systems," 16th IFAC

Workshop on Distributed Computer Control Systems, Australia, 2000

- [12] S.E. Hamamci and M. Koksai, "Robust Control of a DC Motor by Coefficient Diagram Method," 9th Mediterranean Conf. on Control and Automation, MED'01, Croatia, 2001

ประวัติผู้เขียน

นายพฤติ พัวเวส เกิดเมื่อวันที่ 30 ตุลาคม พ.ศ.2522 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ จากภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551 ประวัติการทำงาน ได้เข้าเป็นพนักงานของบริษัทฮิตาชิ โกลบอล สโตเรจเทค โนโลยีส์ ตั้งแต่ปี 2545 จนถึงปัจจุบันและทำงานในหน้าที่วิศวกรฮาร์ดดิสก์ในแผนก Servo Track Writer และเป็นเจ้าหน้าที่ประสานงานฝ่ายเทคนิคภายใต้บันทึกความร่วมมือระหว่างสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ บริษัทฮิตาชิ โกลบอล สโตเรจเทค โนโลยีส์ ใน Research unit on Servo Track Writing in Hard Disk Drive Process.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้