

การควบคุมกระบวนการที่มีเวลาไร้การตอบสนอง  
Controlling a Process with Dead-time



โดย

นางสาวสุภัทรา  
นางสาวสุรวีย์

ลิลาศิริวิชัย  
ชัยธำรงค์กุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน... 36865  
วัน, เดือน, ปี... 29 ส.ค. 2543

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมกระบวนการที่มีเวลาไ้การตอบสนอง  
Controlling a Process with Dead-time

โดย

นางสาวสุภัทรา ลีลาศิริวิณิชย์  
นางสาวสุรวีย์ ชัยธำรงค์กุล

อาจารย์ที่ปรึกษา  
รองศาสตราจารย์ ดร.จنگกล งามวิวิทย์

ริยฐานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ 2542

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมกระบวนการที่มีเวลาไร้การตอบสนอง

ผู้จัดทำ

1. นางสาวสุภัทรา ลีลาศิริวณิชย์ 39014600

2. นางสาวสุรวีย์ ชัยธำรงค์กุล 39014608

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จنگล งามวิวิทย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การควบคุมกระบวนการที่มีเวลาไร้การตอบสนอง

โดย

นางสาวสุภัทรา ลีลาศิริวณิชย์

นางสาวสุรวีย์ ชัยอำรงค์กุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.จกมล

งามวิวิทย์

ปีการศึกษา 2542

### บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการออกแบบและปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมที่มีกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ หรืออันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้การตอบสนอง เมื่อกระบวนการมีเวลาไร้การตอบสนองยาวนานขึ้นจะทำให้ระบบมีสมรรถนะลดลง วิธีของ Smith Predictor เป็นวิธีการชดเชยผลของเวลาไร้การตอบสนองที่มีประสิทธิภาพ แต่ไม่สามารถใช้ได้กับกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนองเนื่องจากผลของตัวรบกวนจะทำให้เกิดออฟเซตขึ้น ดังนั้น Watanabe จึงได้ปรับปรุงโครงสร้างของตัวชดเชยทำให้สามารถกำจัดผลของออฟเซตได้ และสามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบควบคุมได้โดยการเพิ่มพีดีเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Controlling a Process with Dead Time

By

Ms. Supattra Leelesirivanich

Ms. Surawee Chaithumrongkool

Advisor

Assoc.Prof.Dr. Jongkol Ngamwiwit

Academic Year: 1999

### Abstract

Designing and tuning the controller gain for controlling a process with an integrator or first-order lag and dead time are studied in this thesis. The system response has inferior performance when a process has long dead time. The Smith Predictor is an effective dead-time compensator but it cannot be used for processes with an integrator and dead time since disturbance will result an offset. Watanabe has proposed a modified controller that can reject an offset. Furthermore, a better performance can be obtained by including a pre-filter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาจาก รศ.ดร. จงกล งามวิจิตรย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ท่านเปิดโอกาสให้ทำโครงการนี้และให้ความกรุณาแนะนำ พร้อมทั้งให้คำปรึกษาแก่คณะผู้จัดทำตลอดมา คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคำปรึกษา พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ แก่คณะผู้จัดทำ

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ของคณะผู้จัดทำที่ได้อุปการะผู้จัดทำ ทั้งยังเป็นผู้ให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ช่วยกันแลกเปลี่ยนความคิดเห็น พร้อมทั้งให้กำลังใจในการทำงาน

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	
สารบัญ	
สารบัญภาพ	
สารบัญตาราง	
กิตติกรรมประกาศ	
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิด	5
2.2 ระบบควบคุมแบบวงปิด	5
2.3 หลักการออกแบบระบบควบคุม	7
2.4 ชนิดของตัวควบคุม	8
2.4.1 การควบคุมแบบ Proportional Controller (P)	8
2.4.2 การควบคุมแบบ Proportional Integral Controller (PI)	9
2.4.3 การควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative Controller (PID)	11
2.5 ความยากง่ายในการควบคุมกระบวนการ	12
2.6 สาเหตุของการขาดเสถียรภาพในระบบ	13
2.7 กระบวนการแบบอันดับหนึ่ง	14
2.8 เวลาไร้การตอบสนอง	17
บทที่ 3 การออกแบบและการทดลอง	22
3.1 กระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง	22
3.2 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้การตอบสนอง	26
3.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม	30
3.3.1 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI โดยวิธีของ Refined Ziegler-Nichols	31
3.3.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID โดยวิธีของ	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ (1<sup>st</sup> Method) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	34
4.1 กระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์มีเวลาไ้การตอบสนอง	34
4.1.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI	34
4.1.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID	36
4.1.3 การปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์ (FINE TUNING)	39
4.1.4 กระบวนการที่ระบุ (nominal process)	43
4.1.5 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อมีการรบกวนจากภายนอก	45
4.1.6 การปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม	47
4.2 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนอง	51
4.2.1 ผลตอบสนองของระบบ PI แบบ Watanabe	51
4.2.1.1 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนองคงที่	51
4.2.1.2 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนอง	56
ต่างกัน	
4.2.2 ผลตอบสนองของระบบ PID แบบ Watanabe	62
4.2.2.1 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนองคงที่	62
4.2.2.2 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนอง	68
ต่างกัน	
4.2.3 ผลตอบสนองของระบบ PI แบบ Watanabe เมื่อมีการรบกวน	75
จากภายนอก	
4.2.3.1 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนองคงที่	75
4.2.3.2 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนอง	79
ต่างกัน	
4.2.4 ผลตอบสนองของระบบ PI แบบ Watanabe เมื่อมีการรบกวน	84
จากภายนอก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4.1 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนองคงที่	84
4.2.4.2 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนอง ต่างกัน	88
4.2.5 การปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม	93
บทที่ 5 บทสรุป	96
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก.	
ภาคผนวก ข.	
หนังสืออ้างอิง	100



## สารบัญญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบวงเปิด	5
2.2	แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบวงปิด	6
2.3	แสดงแผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบ P	9
2.4	แสดงแผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบ PI	10
2.5	แสดงแผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบ PID	11
2.6	แผนภาพบล็อกของระบบอันดับหนึ่ง	14
2.7	แสดงตำแหน่งของโพลบน S-plane	15
2.8	แสดงผลตอบสนองเชิงเวลาของ $1^{\text{st}}$ order lag	16
2.9	แสดงปัญหาของการขนส่งเนื่องจากเวลาไร้การตอบสนอง	18
2.10	แสดงการหน่วงเวลาเนื่องจากเวลาไร้การตอบสนอง	19
2.11	แสดงอินพุทแบบไซน์ที่เข้าสู่กระบวนการ	20
3.1	แสดงแผนภาคบล็อกของ Watanabe กระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์	22
3.2	แสดงแผนภาคบล็อกของ Watanabe กระบวนการแบบอันดับหนึ่ง	26
3.3	แสดงการปรับค่า $K_p$ ผลตอบสนองเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง	31
3.4	แสดงวิธีการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID โดยการทดลอง ผลตอบสนองส่วนที่แปรตามเวลาที่มีอินพุทแบบขั้นบันได	32
4.1	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง	34
4.2	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบดั้งเดิม ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง	35
4.3	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง	37
4.4	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบดั้งเดิม ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ที่ได้รับการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์แล้วในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไ้การตอบสนอง	41
4.6	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ที่ได้รับการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์แล้วในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไ้การตอบสนอง	41
4.7	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากกระบวนการที่ระบุ	43
4.8	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากกระบวนการที่ระบุ	44
4.9	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก	45
4.10	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก	46
4.11	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์แล้ว เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก	46
4.12	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์แล้ว เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก	47
4.13	แผนภาพบล็อกของ Watanabe and Ito'SP with the proposed filter	48
4.14	แสดงการเปรียบเทียบระบบควบคุมแบบ PI แบบ Watanabe and Ito'SP with the proposed filter กับระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไ้การตอบสนอง	50
4.15	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที	51

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 5 วินาที	52
4.17 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที	52
4.18 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที	53
4.19 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที	53
4.20 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที	54
4.21 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที	54
4.22 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เวลาใ้การตอบสนองต่างกัน	56
4.23 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 5 วินาที เวลาใ้การตอบสนองต่างกัน	57
4.24 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที เวลาใ้การตอบสนองต่างกัน	57
4.25 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที เวลาใ้การตอบสนองต่างกัน	58
4.26 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที เวลาใ้การตอบสนองต่างกัน	58
4.27 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที เวลาใ้การตอบสนองต่างกัน	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.28	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน	59
4.29	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที	62
4.30	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 5 วินาที	63
4.31	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที	63
4.32	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที	64
4.33	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที	64
4.34	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที	65
4.35	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที	65
4.36	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2 วินาที	67
4.37	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน	68
4.38	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 5 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน	69
4.39	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.40	70
แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน	
4.41	70
แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน	
4.42	71
แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน	
4.43	71
แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน	
4.44	75
แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	
4.45	76
แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 5 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	
4.46	76
แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	
4.47	77
แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	
4.48	77
แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	
4.49	78
แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 1 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.50	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	78
4.51	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	79
4.52	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 5 วินาที เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	80
4.53	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	80
4.54	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	81
4.55	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	81
4.56	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	82
4.57	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.58	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	84
4.59	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 5 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	85
4.60	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	85
4.61	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	86
4.62	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	86
4.63	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 1 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	87
4.64	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต	87
4.65	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.66	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 5 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	89
4.67	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	90
4.68	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	90
4.69	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	91
4.70	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	91
4.71	แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ใน กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน	92
4.72	แผนภาพบล็อกของ Watanabe เมื่อเพิ่มพรีฟิลเตอร์ในกระบวนการอันดับหนึ่ง	93
4.73	แสดงการเปรียบเทียบระบบควบคุมแบบ PI แบบ Watanabe ที่มีพรีฟิลเตอร์ กับระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่ง ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง	94
4.74	แสดงการเปรียบเทียบระบบควบคุมแบบ PID แบบ Watanabe ที่มีพรีฟิลเตอร์ กับระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่ง ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.75	95

แสดงการเปรียบเทียบระบบควบคุม PID แบบ Watanabe กับ ระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ที่มีพีรีฟิเตอร์ ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่ง มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เวลาไร้การตอบสนอง 5 วินาที  $\alpha=0.4$



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงการเลือกใช้แบบควบคุม	13
2.2	แสดงค่ามุมเฟสในหน่วยองศาและเรเดียน	20
3.1	แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols	32
3.2	แสดงการหาค่าพารามิเตอร์ $a$ และ $L$ ของระบบ	33
4.1	แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe กับระบบควบคุม PI แบบดั้งเดิมในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate	36
4.2	แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe กับระบบควบคุม PID แบบดั้งเดิมในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate	39
4.3	แสดงค่าพารามิเตอร์และสมรรถนะของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ที่ได้รับการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์แล้วในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง	42
4.4	แสดงค่าพารามิเตอร์และสมรรถนะของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ที่ได้รับการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์แล้วในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง	42
4.5	แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง 1 วินาที	55
4.6	แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาคงที่ เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน	60
4.7	แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง 1 วินาที	66
4.8	แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 2 วินาที	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

- 4.9 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe  
ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาคงที่  
เวลาไร้การตอบสนองเป็น 0.1, 0.5, 1 และ 5 วินาที

73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

เป้าหมายสูงสุดของการออกแบบระบบควบคุม คือ การสร้างระบบควบคุมที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ในกระบวนการส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ตัวแปรหรือค่าเอาต์พุทของระบบจะต้องถูกควบคุมเพื่อทำให้เกิดสมรรถนะตามต้องการ เช่น ค่าอัตราการไหล (Flow) , ค่าระดับ (Level) , ค่าความเร็ว (Speed) เป็นต้น แต่ในการควบคุมค่าเอาต์พุทเหล่านี้มักมีผลของเวลาไร้การตอบสนองมาเกี่ยวข้องด้วย เราจึงจะทำการศึกษาลักษณะของเวลาไร้การตอบสนองที่มีต่อระบบ

ในการศึกษาเราทำการศึกษาระบบที่มีกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ (integrator) มีเวลาไร้การตอบสนองก่อน ซึ่ง Smith Predictor เป็นวิธีที่รู้กันว่าสามารถชดเชยผลของเวลาไร้การตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพอยู่แม้ว่ากระบวนการจะมีเวลาไร้การตอบสนองที่ยาวนานขึ้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวไม่สามารถใช้ได้กับกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง เนื่องจากตัวรบกวนจะมีผลต่อค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว

Watanabe จึงได้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นโดยทำการปรับปรุงส่วนของตัวควบคุม  $C_1(s)$  โดยมีส่วนของการป้อนกลับเพิ่มเข้ามา แต่ตัวควบคุมหลักยังคงเป็นแบบ PI และ PID แบบดั้งเดิม เราจึงทำการศึกษาระบบควบคุมแบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง จะสามารถให้สมรรถนะของระบบที่ดีกว่าระบบควบคุมแบบดั้งเดิม ไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของเวลาไร้การตอบสนองเท่าใดก็ตาม แล้วนำผลการศึกษาที่ได้มาวิเคราะห์กับระบบที่มีกระบวนการแบบอันดับหนึ่ง (first-order Lag) มีเวลาไร้การตอบสนอง ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

กระบวนการทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้การควบคุมแบบต่อเนื่อง ค่าตัวแปรควบคุมจะเป็นแบบอะนาลอก (analog controller) ซึ่งจะถูกปรับอย่างต่อเนื่อง ถือเป็นข้อดีที่เด่นชัดที่สามารถกำจัดปัญหาการเปลี่ยนแปลงขึ้น/ลงของค่าตัวแปรควบคุมที่เกิดขึ้นในตัวควบคุมแบบเปิด/ปิด (on/off controller) ได้ ตัวควบคุมแบบอะนาลอกที่ใช้ในอุตสาหกรรมทุกวันนี้จะเป็นแบบ P, PI หรือ PID โดยผลของตัวควบคุมแต่ละแบบเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P (proportional controller) ตัวควบคุมแบบนี้ค่าเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นตัวควบคุมแบบ P นี้จะทำให้เกิดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวขึ้น เราจึงไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างเที่ยงตรง

PI (proportional plus integrator controller) ในเบื้องต้นการปฏิบัติแบบอินทิกรัลจะถูกเพิ่มให้กับตัวควบคุมแบบ P เพื่อแก้ปัญหาค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว พร้อมจะกำจัดความต้องการค่าออฟเซต เนื่องจากค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นค่าที่ถูกสะสมอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ทำให้ค่าตัวแปรควบคุมของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลนี้เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตรงเท่าที่ความผิดพลาดยังไม่เป็นศูนย์ และจะหยุดเมื่อค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ ถ้ากระบวนการที่ถูกควบคุมมีเสถียรภาพ ตัวควบคุมแบบ PI นี้จะรับประกันได้ว่าค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวจะเป็นศูนย์

PID (proportional plus integrator plus derivative controller) ตัวควบคุมแบบ PID จะมีผลกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีผลกระทบต่อ การลดค่าตัวแปรควบคุมเพื่อทำให้เกิดค่าพุ่งเกินน้อยที่สุด นั้นหมายถึง กระบวนการจะเข้าถึงค่าเป้าหมายได้ในไม่ช้า

การเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดระหว่างระบบที่มีตัวควบคุมเป็นแบบ PI และ PID ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง โดยระบบควบคุมแบบ Watanabe และระบบควบคุมแบบดั้งเดิมได้แสดงไว้ในบททดลอง จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาไร้การตอบสนองยาวนานขึ้น สมรรถนะของระบบจะลดลง แต่ ณ. เวลาไร้การตอบสนองเดียวกัน ระบบควบคุมแบบ Watanabe จะมีสมรรถนะที่ดีกว่าระบบควบคุมแบบดั้งเดิม โดยพิจารณาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน ( $M_o$ ), ค่าช่วงเวลาขึ้น ( $t_r$ ), ค่าช่วงเวลาเข้าที่ ( $t_s$ ) แต่อย่างไรก็ตามผลตอบสนองของระบบควบคุม Watanabe โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols with process reaction rate ที่นำเสนอในบททดลองนี้ยังให้สมรรถนะที่ไม่ค่อยดีนัก เนื่องจากยังมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่สูงอยู่มาก จึงต้องมีการปรับแต่งละเอียดค่าพารามิเตอร์ (fine-tune) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้เอาต์พุตของระบบควบคุมแบบ Watanabe มีผลการตอบสนองที่ดี มีสมรรถนะสอดคล้องความต้องการ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบโดยไม่ต้องทำการปรับหาค่าพารามิเตอร์ใหม่ เพียงแต่ทำการปรับปรุงโครงสร้างในส่วนป้อนกลับของตัวควบคุมพร้อมทั้งใส่ฟีดแบ็คเข้าไปที่อินพุตด้วยก็จะช่วยปรับปรุงสมรรถนะของระบบที่กระบวนการเป็นแบบอินทิเกรเตอร์มีเวลาไร้การตอบสนองให้ดีขึ้นได้โดย

จะเห็นได้จากค่าพุ่งเกินที่ลดลงจนสามารถเป็นที่ยอมรับได้โดยไม่ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่อีก เป็นการอำนวยความสะดวกให้เป็นอย่างมาก

สำหรับผลการตอบสนองต่ออินพุทแบบขั้นบันไดของระบบที่ตัวควบคุมแบบ PI หรือ PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า ณ. ค่าคงตัวเวลาค่าหนึ่งขณะที่เวลาไถ่การตอบสนองยาวนานขึ้นสมรรถนะของระบบจะลดลงเหมือนผลตอบสนองเมื่อกระบวนการเป็นแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง เราสามารถพิจารณาความยากง่ายในการควบคุมและเลือกใช้ตัวควบคุมของกระบวนการแบบอันดับหนึ่งได้จากการพิจารณาอัตราส่วน  $L/c$  ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 นอกจากนี้ยังได้เสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบที่มีกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง โดยการใส่พีดีเฟดแบ็คเข้าไปก็จะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้นโดยไม่ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่อีกต่อไป

### วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาผลกระทบของเวลาไถ่การตอบสนองต่อระบบที่มีกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง วิธีของ Smith Predictor ซึ่งเป็นที่ยอมรับว่าสามารถชดเชยผลของเวลาไถ่การตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่วิธีของ Smith Predictor ไม่สามารถใช้ได้กับกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนองได้ เนื่องจากเมื่อมีตัวรบกวนแบบคงที่เข้ามาที่เอาต์พุท (constant disturbance output) พบว่า ผลของตัวรบกวนจะก่อให้เกิดออฟเซต (offset) และเมื่อได้ทดลองพบว่า หลักการของ Watanabe สามารถแก้ปัญหาการเกิดออฟเซตดังกล่าวได้ จึงได้นำหลักการของ Watanabe มาศึกษาระบบที่มีกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ต่อไป

### ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาวิธีการของ Watanabe เพื่อพิสูจน์ว่าสามารถแก้ปัญหาการเกิดออฟเซตจากวิธีของ Smith Predictor ได้จริง โดยพิจารณาจากผลของตัวรบกวนขณะที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง
2. ศึกษาผลตอบสนองของระบบที่มีตัวควบคุมหลัก (main controller) แบบ PI หรือ PID และกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบควบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุมแบบ Watanabe กับระบบควบคุมแบบดั้งเดิม (conventional controller) ขณะมีเวลาไ้การตอบสนองมากและน้อยว่าให้ผลตอบสนองแตกต่างกันอย่างไร

3. ศึกษาผลกระทบของเวลาไ้การตอบสนองที่มีผลต่อพารามิเตอร์ของตัวควบคุม และเมื่อเวลาไ้การตอบสนองเปลี่ยนไปจะมีผลกระทบต่อพารามิเตอร์ของตัวควบคุมหรือไม่อย่างไร

4. ศึกษาระบบควบคุมที่ตัวควบคุมหลักเป็นแบบ PI หรือ PID มีโครงสร้างแบบ Watanabe และกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนองว่าได้ผลตอบสนองอย่างไร

5. ศึกษาวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบที่ตัวควบคุมหลักเป็นแบบ PI หรือ PID มีโครงสร้างแบบ Watanabe และกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ โดยการเพิ่มพรีฟิลเตอร์ (pre-filter) เข้าไปแล้วระบบให้ผลตอบสนองเป็นอย่างไร

6. ศึกษาโปรแกรม MATLAB โดยเขียน M-file เพื่อใช้ในการคำนวณค่าผลตอบสนองชั่วคราวของระบบ และคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีต่างๆ

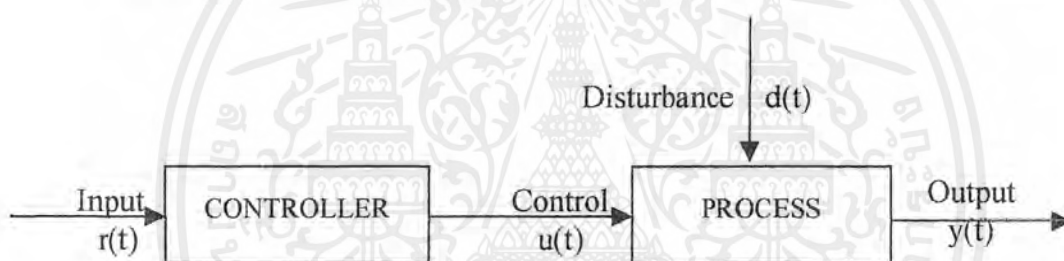
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

ในการออกแบบระบบควบคุม จะต้องอาศัยความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบควบคุม เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจโครงสร้างและหลักการทำงานของระบบควบคุม และเพื่อใช้ในการกำหนดโครงสร้างและวิธีการออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับระบบควบคุม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop Control System)

ลักษณะโดยทั่วไปของระบบควบคุมวงเปิด แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบวงเปิด

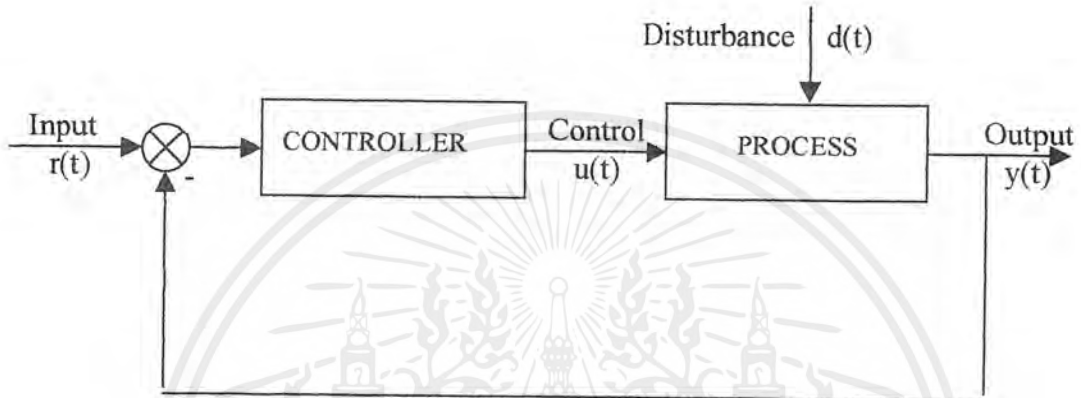
การเลือกสัญญาณเข้า (input)  $r(t)$  หรือสัญญาณควบคุม (control)  $u(t)$  ขึ้นกับเป้าหมายของระบบ และการรู้ลักษณะทั่วไปของระบบ สัญญาณออก (output)  $y(t)$  ไม่มีอิทธิพลต่อสัญญาณเข้า เนื่องจากไม่มีการป้อนกลับ ถ้ามีตัวรบกวน (disturbance)  $d(t)$  ในระบบ หรือไม่รู้ลักษณะทั่วไปของระบบอย่างสมบูรณ์ สัญญาณออกก็จะไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ข้อดีของระบบวงเปิดคือความง่าย ระบบนี้ควรเลือกใช้ในกรณีที่รู้สัญญาณเข้าที่ให้กับระบบ และรู้พารามิเตอร์ของระบบเป็นอย่างดี

#### 2.2 ระบบควบคุมแบบวงปิด ( Closed-loop Control System )

ระบบควบคุมแบบวงปิดเป็นระบบควบคุมที่สัญญาณเอาต์พุตจะมีผลโดยตรงต่อการควบคุม ดังนั้นระบบควบคุมแบบวงปิด ก็คือระบบควบคุมแบบป้อนกลับนั่นเอง สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน (actuating error signal) ซึ่งเป็นสัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุทกับสัญญาณป้อนกลับ (feedback signal) จะถูกป้อนกลับให้ตัวควบคุม (controller) เพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยลงและทำให้เอาต์พุทของระบบมีค่าตามที่ต้องการ รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพบล็อก (Block diagram) ของระบบควบคุมแบบวงปิด



รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบวงปิด

ข้อดีของระบบควบคุมแบบวงปิดอย่างหนึ่งก็คือการใช้วิธีป้อนกลับนำเอาสัญญาณเอาต์พุทที่ต้องการ ดังนั้นจึงสามารถจะกำจัดหรือลดผลของตัวรบกวนจากภายนอกหรือผลของตัวรบกวนจากภายในที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ของระบบให้น้อยลงได้ ในบางครั้งจึงไม่จำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงและมีราคาแพงแต่อย่างใด แต่ในกรณีของระบบวงเปิดจะไม่เป็นเช่นนั้น กล่าวคือถ้ามีตัวรบกวนเกิดขึ้นก็จะต้องทำการปรับอินพุทหรือพยายามกำจัดสิ่งรบกวนนั้นทิ้งไปเพื่อให้เอาต์พุทมีค่าคงเดิมตามที่ต้องการ อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ก็ต้องมีความเที่ยงตรงสูง

สำหรับในแง่ของเสถียรภาพแล้ว ปัญหาของเสถียรภาพไม่ใช่ปัญหาใหญ่ของระบบควบคุมแบบวงเปิดเพราะสามารถจะเห็นได้ทันทีว่าระบบวงเปิดจะเสถียร (stable) หรือไม่เสถียร (unstable) ต่ออินพุทที่มากกระทำ ดังนั้นการทำให้ระบบวงเปิดเป็นระบบที่เสถียรจึงเป็นสิ่งที่ทำได้ไม่ยาก แต่สำหรับระบบควบคุมแบบวงปิดนั้นเสถียรภาพเป็นปัญหาที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง ทั้งนี้เพราะมีการนำเอาสัญญาณเอาต์พุทมาเปรียบเทียบกับอินพุทมาเปรียบเทียบกับอินพุทเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งอาจทำให้เกิดการแกว่ง (oscillate) ต่อเนื่องกันไปหรือขนาด (amplitude) เปลี่ยนแปลงค่าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้น การป้อนกลับยังช่วยปรับปรุงผลตอบสนองชั่วคราวและความผิดพลาดในสถานะคงตัว ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าผลของการป้อนกลับมีดังนี้

1. ลดผลกระทบของการแปรผันของพารามิเตอร์
2. ลดผลกระทบของตัวรบกวน
3. ปรับปรุงผลตอบสนองชั่วคราว (transient response)
4. ลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (steady state error)

ฉะนั้นสำหรับระบบที่ทราบว่าคุณสมบัติของระบบจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไรและแน่ใจว่าไม่มีตัวรบกวนแล้ว การควบคุมระบบนี้จะใช้การควบคุมแบบวงเปิด สำหรับการควบคุมแบบวงปิดจะใช้เมื่อไม่ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติตามเวลา หรือในกรณีที่ไม่มีตัวรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงค่าของอุปกรณ์ในระบบโดยไม่คาดคิดมาก่อน ในบางกรณีระบบใด ๆ อาจจะมีการควบคุมแบบวงเปิดและการควบคุมแบบวงปิดรวมกันก็ได้เพื่อให้ระบบทั้งหมดมีสมรรถนะตามต้องการ

## 2.3 หลักการออกแบบระบบควบคุม

สิ่งที่ต้องการเป็นอันดับแรกสำหรับระบบควบคุม ก็คือระบบนั้นๆจะต้องเป็นระบบที่เสถียร ซึ่งจะต้องพิจารณาถึงเสถียรภาพสัมบูรณ์ (absolute stability) และเสถียรภาพสัมพัทธ์ (relative stability) ด้วย ระบบที่มีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่นั่นความเร็วของผลตอบสนองของระบบจะต้องเร็วพอสมควร และการหน่วงก็ควรมีค่าไม่น้อยจนเกินไป นอกจากนี้แล้วระบบยังจะต้องสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนของระบบให้มีค่าเป็นศูนย์หรือมีค่าน้อยที่สุดที่สามารถยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตามความต้องการทั้งสองกรณีนี้คือต้องการให้เสถียรภาพสัมพัทธ์ดีและมีความเที่ยงตรงสูงที่สภาวะคงตัวนั้นเป็นสิ่งที่มักจะขัดแย้งกันเสมอ เช่นถ้าออกแบบให้ระบบมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ที่ดี ค่าความเที่ยงตรงที่สภาวะคงตัวก็อาจจะลดน้อยลง เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่จะประนีประนอมความต้องการทั้งสองกรณีนี้ให้ยอมรับได้

ในการออกแบบระบบควบคุมใดๆ นั้นมักจะมีวิธีการลองผิดลองถูกมาเกี่ยวข้องด้วยเสมอ สำหรับการ Synthesis ก็เป็นทฤษฎีของระบบควบคุมเชิงเส้นที่เป็นไปได้ และวิศวกรรมระบบควบคุมจะต้องสามารถหาอุปกรณ์ที่จำเป็นจะต้องใช้เพื่อให้ระบบทำงานได้ตามที่คำนวณไว้ แต่อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้ว ระบบนั้นอาจมีเงื่อนไขข้อบังคับหลายอย่างหรืออาจเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในแต่ละกรณีไม่สามารถใช้วิธีการ Synthesis ได้ และนอกจากนี้ การวิเคราะห์หา

คุณลักษณะของอุปกรณ์แต่ละชนิดอาจทำได้ไม่แม่นยำนัก ดังนั้นโดยทั่วไปจึงนิยมออกแบบระบบโดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก

โดยทั่วไปแล้วขั้นตอนในการออกแบบจะเป็นดังนี้ คือ ขั้นแรกวิศวกรจะต้องรู้ถึงข้อกำหนดหรือดัชนีที่แสดงสมรรถนะ คุณสมบัติไดนามิกของกระบวนการที่กำหนด คุณสมบัติไดนามิกของอุปกรณ์ การประยุกต์ใช้วิธีการ Synthesis ถ้าสามารถทำได้ ตลอดจนเทคนิคอื่นๆ เพื่อสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของระบบทางกายภาพนั้นๆ ขึ้นมา เมื่อได้รูปแบบทางคณิตศาสตร์แล้ววิศวกรผู้ออกแบบก็สามารถหาคำตอบของระบบนั้นๆ ได้โดยการหาคำตอบทางคณิตศาสตร์ วิธีที่นิยมใช้ก็คือการจำลอง (simulate) รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของระบบนั้นๆ ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบหาพฤติกรรมของระบบต่อสัญญาณหลายๆแบบรวมทั้งตัวรบกวนด้วย เมื่อการวิเคราะห์ระบบนี้เสร็จสิ้นแล้วจะต้องทำการออกแบบระบบใหม่เพื่อให้ระบบมีข้อกำหนดหรือสมรรถนะตามต้องการ จากนั้นนำระบบที่ออกแบบแล้วมาวิเคราะห์ใหม่ และทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ระบบที่ต้องการ

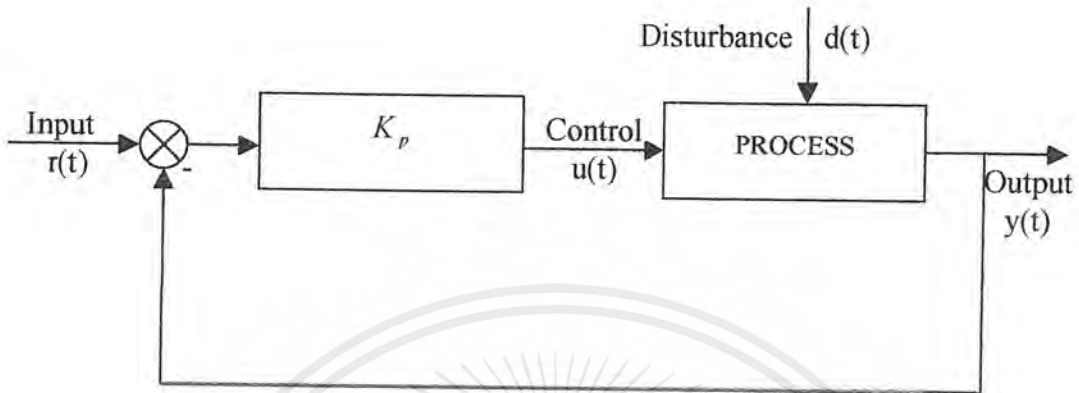
ขั้นตอนต่อไปก็คือการสร้างต้นแบบ (prototype) ของระบบทางกายภาพขึ้นมาจากรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ออกแบบได้ข้างต้น ซึ่งจะเห็นว่าขั้นตอนนี้จะตรงกันข้ามกับการหารูปแบบทางคณิตศาสตร์ในตอนแรก ต้นแบบของระบบทางกายภาพที่สร้างขึ้นมานี้จะใช้แสดงถึงรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีความเที่ยงตรงแม่นยำ อย่างไรก็ตามวิศวกรจะต้องทำการทดสอบการทำงานของระบบทางกายภาพด้วยว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจหรือไม่ ถ้าผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ การออกแบบก็เสร็จสมบูรณ์ แต่ถ้าผลที่ได้ยังไม่ดีพอก็จะต้องทำการแก้ไขต้นฉบับใหม่และทำการทดลองอีกจนกว่าจะได้ต้นแบบที่ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

## 2.4 ชนิดของตัวควบคุม

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงชนิดของตัวควบคุมซึ่งมีอยู่หลายแบบ แต่ละแบบมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป ในการออกแบบจึงต้องเลือกตัวควบคุมที่เหมาะสมจึงจะได้ระบบที่มีเสถียรภาพ

### 2.4.1 ตัวควบคุมแบบ Proportional Controller (P)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนนี้เป็นชนิดที่ง่ายที่สุดของตัวควบคุม โดยการควบคุมจะใช้อัตราขยาย (gain) เป็นพารามิเตอร์ในการควบคุม รูปที่ 2.3 แสดงถึงการควบคุมแบบ P



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบ P

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม คือ

$$G_c(s) = K_p$$

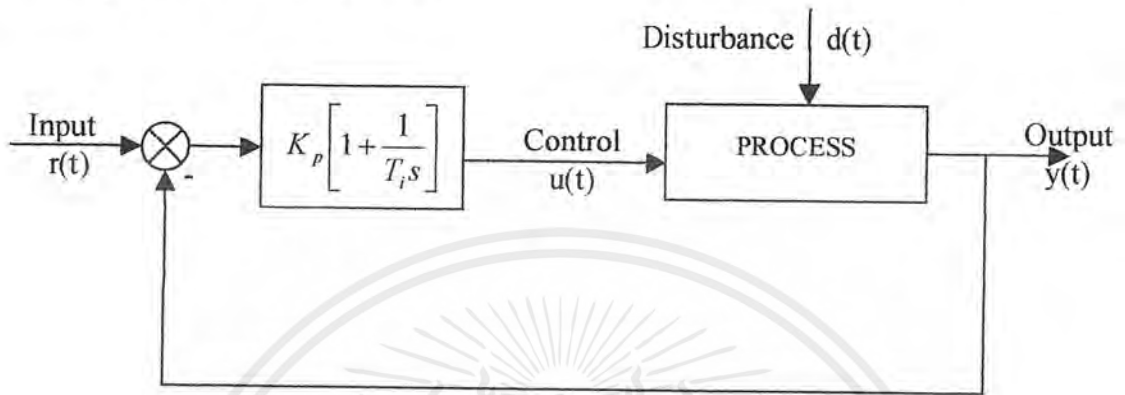
#### คุณสมบัติของ Proportional Action

- เมื่อโหลดของกระบวนการมีสภาพแวดล้อมและสภาพการทำงานเปลี่ยนไปจากเดิม สัญญาณวัดจะมีค่าต่างไปจากค่าเป้าหมายที่สภาวะคงตัวค่าใหม่ ค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณวัดกับค่าเป้าหมายที่สภาวะคงตัวนี้ เราเรียกว่าออฟเซต ขนาดของออฟเซตนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของตัวรบกวน และเมื่อเพิ่มค่า  $K_p$  ให้มีค่ามากขึ้นออฟเซตจะยังมีค่าน้อยลง แต่ว่าถ้ามีมากเกินไปจะทำให้สัญญาณเกิดการแกว่ง กล่าวโดยสรุปตัวควบคุมแบบสัดส่วนนี้จะไม่แกว่งถ้าเราสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้เหมาะสม ซึ่งทำให้ดีกว่าการควบคุมแบบปิด-เปิด (On-Off Controller) ซึ่งมีการแกว่งรอบค่าเป้าหมาย
- ตัวควบคุมแบบนี้เหมาะสำหรับกระบวนการที่มีตัวรบกวนไม่มาก มีเวลาไครการตอบสนองไม่มากนักและมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนเกินไป

#### 2.4.2 ตัวควบคุมแบบ Proportional Integral Controller (PI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุมอีกแบบหนึ่ง ที่นิยมใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน คือ ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล ซึ่งจะสร้างสัญญาณที่มีค่าเท่ากับการอินทิกรัลของค่าความคลาดเคลื่อน รูปที่ 2.4 แสดงถึงรูปแบบของการควบคุมแบบ PI



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบ PI

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม คือ

$$G_c(s) = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} \right]$$

ผลของการควบคุมแบบอินทิกรัลก็คือ เพิ่มอันดับของระบบขึ้นอีกหนึ่งอันดับ หรือเพิ่มชนิดของระบบ (type of system) ขึ้นด้วยหนึ่ง นั่นก็คือค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวของระบบเดิมที่ไม่สามารถควบคุมแบบอินทิกรัลจะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วยอันดับที่เพิ่มมานี้ หรืออีกนัยหนึ่ง ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวของระบบต่ออินพุตที่กำหนดให้มีค่าคงที่ เมื่อเพิ่มตัวแปรควบคุมแบบอินทิกรัลเข้าไปมันจะทำให้ความคลาดเคลื่อนนี้มีค่าเป็นศูนย์

เนื่องจากตัวควบคุมแบบอินทิกรัลนั้นไปทำให้อันดับของระบบเดิมเพิ่มขึ้นดังนั้นระบบจะมีเสถียรภาพน้อยลงเมื่อเทียบกับระบบเดิมหรืออาจจะไม่เสถียรเลยก็ได้

ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลนี้บางครั้งเรียกว่า reset control การควบคุมแบบนี้สัญญาณควบคุมจะแปรค่าตามอินทิกรัลต่อเวลาของผลต่าง เมื่อผลต่างเปลี่ยนเป็นแบบ ขึ้นบ้างได้ สัญญาณควบคุมจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามค่าของเวลา ตามความหมายของเวลาอินทิกรัล (Integral Time) ( $T_i$ ) คือ เวลาที่มีการใช้ไปในการเพิ่มค่าของสัญญาณควบคุมจนมีขนาดเท่ากับผลต่าง  $e(t)$  ที่เปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อ  $T_i$  มีค่ามากผลของอินทิกรัล จะมากกว่าเมื่อค่าของ  $T_i$  มีค่าน้อย

#### คุณสมบัติของ Proportional Integral Action

- ออฟเซต ที่เกิดขึ้นจาก P Action จะถูกผลของอินทิกรัลแก้ไขหมด

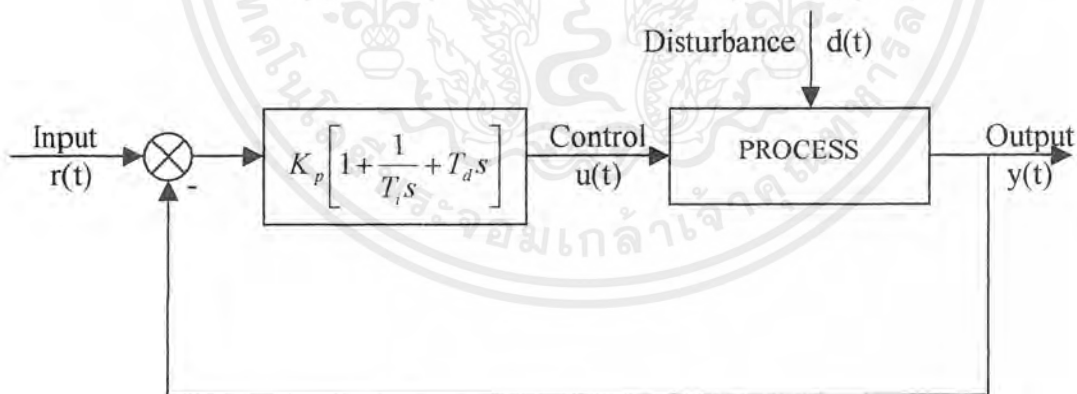
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อมีค่า  $T_i$  มาก ผลของอินทิกรัลจะมากทำให้เกิดการแกว่งได้ซึ่งจะมีผลให้ระบบขาดเสถียรภาพ
- การควบคุมแบบนี้เหมาะสำหรับกระบวนการที่ค่อนข้างไวอยู่แล้ว คือ ระบบที่มีเวลาไ้การตอบสนองน้อยและระบบที่มีค่าคงตัวเวลาน้อย

### 2.4.3 ตัวควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative Controller (PID)

ตัวควบคุมแบบ PD จะทำให้อัตราการหวนมีค่ามากขึ้น และส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ดีขึ้น แต่ไม่มีผลโดยตรงต่อผลตอบสนองที่สภาวะคงตัว ส่วนตัวควบคุมแบบ PI นั้นจะทำให้อัตราการหวนมีค่าเพิ่มขึ้นพร้อมกับทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวที่ลดลงหรือหมดไป แต่ทำให้ Rise Time และ Settling Time มีค่ามากขึ้น ดังนั้น บางครั้งจึงจำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมแบบ PID เพื่อทำให้ระบบที่ควบคุมมีสมรรถนะตามต้องการ

การควบคุมแบบ PID นั้นสามารถที่จะทำได้จากการรวมเอากริยาการควบคุมแบบ Proportional ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ กริยาการควบคุมแบบ Integral ซึ่งสามารถแก้ค่า ออฟเซต และ Overshoot ที่จะทำให้เกิดการแกว่งและกริยาการควบคุมแบบ Derivative จะทำให้เกิดผลตอบสนองได้รวดเร็ว รูปที่ 2.5 แสดงถึงรูปแบบของการควบคุมแบบ PID



รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบ PID

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมคือ

$$G_c(s) = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คุณสมบัติของ Proportional Integral Derivative Action

- ตัวควบคุมแบบ PID จะควบคุมการตอบสนองต่อตัวรบกวนไว้ขึ้น ทำให้เสถียรภาพในการควบคุมดีขึ้นกว่าตัวควบคุมแบบ สำหรับกระบวนการที่ตอบสนองช้า
- ตัวควบคุมแบบ PID นี้เหมาะสมสำหรับกระบวนการที่มีค่าคงตัวเวลามากและค่าเวลาไถ่การตอบสนองไม่มากนัก
- ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PID จะประกอบไปด้วยส่วนของตัวควบคุม PI และ PD
- เทอมของตัวควบคุมแบบ PI จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวลดลงหรือเป็นศูนย์ ดังนั้นจะพิจารณาเลือกค่าของ  $K_p$  ที่ทำให้ Rise Time และ Settling Time เป็นไปตามต้องการโดยจะไม่คำนึงถึง Maximum Overshoot ว่า จะมากหรือน้อยเพียงใด (ส่วนใหญ่จะมาก)
- เทอมของตัวควบคุมแบบ PD จะพิจารณาเลือกค่าของ  $K_d$  ที่จะทำให้อัตราการหมุน หรือ Maximum Overshoot เป็นไปตามที่ต้องการ

วิธีอื่นที่ใช้ได้เช่นกัน คือ เริ่มออกแบบส่วนของตัวควบคุมแบบ PD ก่อนเพื่อหาค่าเหมาะสม ถ้าตัวควบคุมแบบ PD ทำให้ระบบที่ถูกควบคุมมีสมรรถนะตามต้องการ การออกแบบก็เสร็จสิ้น ถ้าตัวควบคุมแบบ PD ยังให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจ จึงเพิ่มตัวควบคุมแบบ PI เข้ามา

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของการควบคุมชนิดต่างๆเหล่านี้จึงพอสรุปได้ว่า ระบบการควบคุมที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ คือ

1. มีเสถียรภาพ ไม่เกิดการแกว่งเมื่อถูกกระตุ้น
2. ตอบรับการเปลี่ยนแปลงเป้าหมายหรือตัวรบกวนได้อย่างรวดเร็ว
3. ไม่เกิด ออฟเซต

### 2.5 ความยากง่ายในการควบคุมกระบวนการ

ลักษณะโดยทั่วไปของกระบวนการนั้นจะมีเวลาไถ่การตอบสนองของกระบวนการต่ออินพุทแบบขั้นบันได (Step Input) เราสามารถหาค่าเวลาไถ่การตอบสนองและค่าคงตัวเวลาโดยประมาณได้

อัตราส่วน  $L/\tau$  นี้จะเป็นค่าที่ใช้ประเมินความยากง่ายในการควบคุมและใช้เลือกแบบการควบคุม พิจารณาตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการเลือกใช้แบบควบคุม

$L/\tau$	แบบการควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการ
$L/\tau < 0.2$	ON/OFF, P, PI
$0.2 < L/\tau < 1.0$	PI, PID
$1.0 < L/\tau$	Feedforward, Computer control

## 2.6 สาเหตุของการขาดเสถียรภาพในระบบ

1. ผลของระบบควบคุมข้างเดียว หรืออื่นๆ
2. ตัวรบกวนเป็นสัญญาณที่เป็นคาบ (Periodic)
3. ระบบมี Non-linear element เช่น ความผิดพลาด dead band เป็นต้น
4. ค่าอัตราขยายของกระบวนการ (Process Gain) หรือค่าอัตราขยายของลูป (Loop Gain) มีค่าสูงเกินไป

ในการพิจารณาระบบโดยทั่วไปว่า มีประสิทธิภาพดีหรือไม่ เราจะพิจารณาจากค่าดังต่อไปนี้

1. ค่า Error เป็นค่าที่แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าสุดท้ายของผลตอบสนองของระบบกับค่าที่ต้องการ
2. ค่าช่วงเวลานขึ้น (Rise Time- $t_r$ ) เป็นค่าของเวลาที่ผลตอบสนองใช้ในการที่จะเพิ่มจาก 10% - 90% หรือ 0% - 100% ของค่าสุดท้าย โดยปกติแล้วในระบบอันดับสอง (Second Order) ถ้าเป็นการตอบสนองแบบหน่วงขาด (Underdamped) มักนิยมใช้ค่า 0% - 100% แต่ถ้าเป็นการตอบสนองแบบหน่วงเกิน (Overdamped) จะนิยมใช้ค่า 10% - 90%
3. ค่าช่วงเวลาสูงสุด (Peak Time- $t_p$ ) เป็นค่าของเวลาที่ผลตอบสนองใช้ในการขึ้นถึงค่าสูงสุดของค่าพุ่งเกิน (Overshoot)
4. ค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Maximum percent overshoot- $M_o$ ) ของค่าพุ่งเกินที่วัดขึ้นจากค่าสุดท้ายของระบบ
5. ค่าช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time- $t_s$ ) เป็นค่าของเวลาที่ผลตอบสนองใช้ในการเข้าถึงช่วงที่ใกล้เคียงค่าสุดท้ายโดยจะกำหนดค่าโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าสุดท้าย (ปกติใช้ 2% หรือ 5%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 กระบวนการแบบอันดับหนึ่ง

การวิเคราะห์ระบบในงานควบคุม ส่วนใหญ่พิจารณากระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีสมการอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (1<sup>st</sup> order differential equation) ที่ใช้อธิบายคุณลักษณะ คือ

$$\frac{dc(t)}{dt} + c(t) = Ar(t) \quad (2.1)$$

พารามิเตอร์ของระบบอันดับหนึ่งมีสองค่า คือ

1. ค่าคงตัวเวลา (time constant)  $\tau$  เป็นค่าที่กำหนดความเร็วในการตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง
2. ค่าอัตราขยาย A เป็นค่าที่บอกถึงค่าสุดท้าย (Final Value) ของผลตอบสนองของระบบต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของระบบที่แสดงคุณลักษณะด้วยสมการอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง คือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{A/\tau}{s + 1/\tau} \quad (2.2)$$

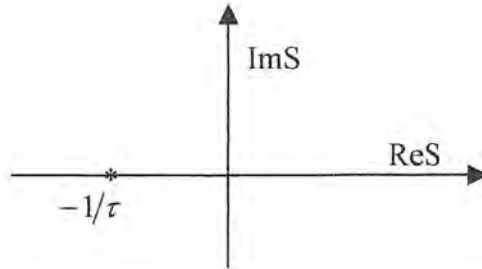
หรือแสดงในรูปของแผนภาพบล็อกได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 แผนภาพบล็อกของระบบอันดับหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบนี้มีโพลเพียงโพลเดียว อยู่ที่ตำแหน่ง  $s = -1/\tau$



รูปที่ 2.7 แสดงตำแหน่งของโพลบน S-plane

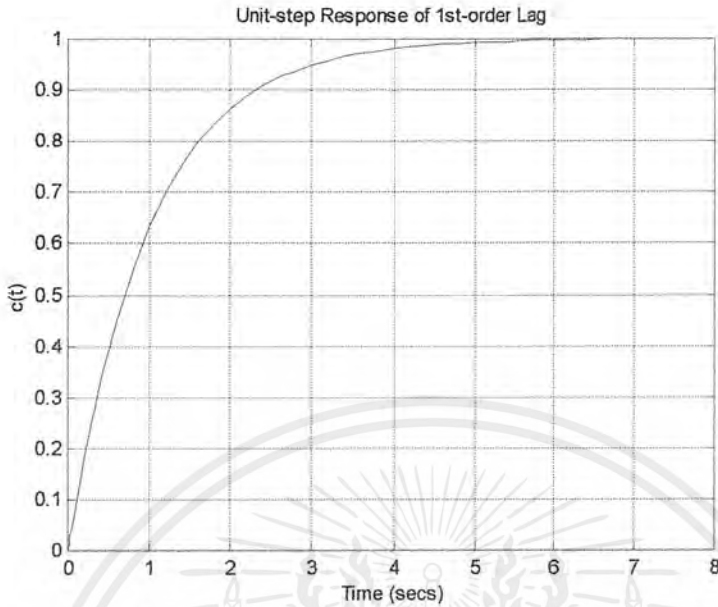
เมื่อให้สัญญาณอินพุต  $r(t)$  เป็นสัญญาณแบบขั้นบันได หรือ  $R(s) = \frac{1}{s}$  และหาสัญญาณเอาต์พุต  $C(s)$

$$C(s) = R(s)G(s) = \frac{A/\tau}{s(s+1/\tau)} = \frac{A}{s} - \frac{A}{s+1/\tau} \quad (2.3)$$

แปลงลาปลาซผกผัน (inverse laplace transform) สมการที่(2.3) ได้ผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดของกระบวนการแบบอันดับหนึ่งเท่ากับ

$$C(s) = A(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.4)$$

เมื่อทำการพล็อตผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดของกระบวนการแบบอันดับหนึ่ง ในสมการที่ (2.4) โดยให้ค่า  $A=1$  และ  $\tau=1$  โดยคำนวณค่า  $C(t)$  จะได้กราฟดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงผลตอบสนองเชิงเวลาของ 1<sup>st</sup> order lag

สำหรับการหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการแบบอันดับหนึ่ง ดังต่อไปนี้

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2.5)$$

เมื่อแทน  $s = -j\omega$  จะได้ว่า

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega\tau + 1} \quad (2.6)$$

ซึ่งจะหาขนาดของ  $G(j\omega)$  ได้เป็น

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\omega^2\tau^2 + 1}} \quad (2.7)$$

และมุมเฟสเป็น

$$\phi = -\tan^{-1} \omega\tau \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.3) สมมติให้  $a = 1/\tau$  และไม่พิจารณาค่าอัตราขยายจะได้ว่า

$$T.F. = \frac{1}{s + a} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า  $1/a$  เท่ากับค่าคงตัวเวลาของผลตอบสนอง ซึ่งคือเวลาที่ทำให้  $e^{-at}$  มีค่า 37% ของค่าที่กำหนดหรือคือเวลาที่กำหนดหรือ คือเวลาที่ทำให้ ผลตอบสนองของระบบขึ้นถึง 63% ของค่าสุดท้ายแสดงดังรูปที่ 2.8

ส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาจะเป็นค่าของความถี่ ซึ่งเราสามารถเรียกค่า  $a$  ว่าเป็นค่า exponential frequency ซึ่งอนุพันธ์ของ  $e^{-at}$  จะเท่ากับ  $-a$  เมื่อ  $t = 0$

ค่าคงตัวเวลาสามารถประมาณได้จากการพล็อตค่าโพล ซึ่งโพลจะอยู่ที่  $-a$  ซึ่งถ้าโพลยิ่งไกลจากแกนจินตภาพเท่าไร ค่าผลตอบสนองชั่วคราวก็จะยิ่งเพิ่มเร็วขึ้น

### ค่าช่วงเวลาขึ้น ( $t_r$ )

ค่าช่วงเวลาขึ้นเป็นเวลาที่ผลตอบสนองมีค่าจาก 10% ไปจนถึง 90% ของค่าสุดท้าย ซึ่งหาได้จากการแก้สมการ

$$c(t) = 1 - e^{-at} \quad (2.10)$$

โดยแทนค่า  $c(t) = 0.9$  และ  $c(t) = 0.1$  จะได้

$$\begin{aligned} t_r &= \frac{2.31}{a} - \frac{0.11}{a} \\ &= \frac{2.2}{a} \end{aligned}$$

### ค่าช่วงเวลาเข้าที่ ( $t_s$ )

ค่าช่วงเวลาเข้าที่เป็นเวลาที่ผลตอบสนองไปถึงและมีค่าอยู่ในช่วง 2% ของค่าสุดท้ายโดยแทนค่า  $c(t)$  ด้วย 0.98 ในสมการ (2.10) เพื่อหาค่า  $t$  จะได้

$$t_s = \frac{4}{a}$$

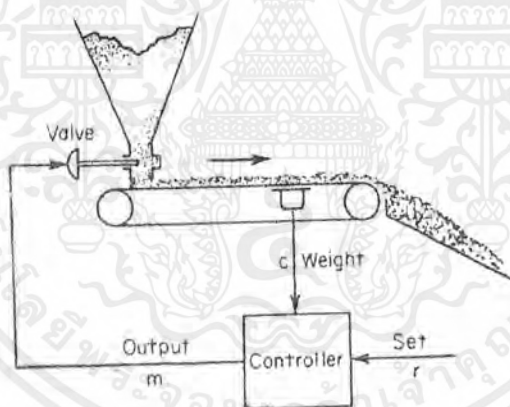
## 2.8 เวลาไร้การตอบสนอง

เวลาไร้การตอบสนองเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของระบบ ซึ่งผลตอบสนองของมันต่ออินพุทจะถูกล่าช้า (delay) ไป กล่าวคือ เวลาไร้การตอบสนองเป็นช่วงเวลาหลังจากที่มีการใส่อินพุทเข้าไปในระบบแล้วแต่ยังไม่มีผลตอบสนองที่สามารถสังเกตเห็นได้ คุณสมบัตินี้ไม่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของอินพุท คือ ไม่ว่าจะอย่างไรเวลาไร้การตอบสนองก็จะมีผลปรากฏอยู่เสมอโดยขนาด (dimension) ของมันเป็นหน่วยของเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาไร้การตอบสนองจะเกิดขึ้นในระบบที่มีการขนส่งมวลหรือพลังงานผ่านไปตามทาง ค่าความยาวของระยะทางและความเร็วในการเคลื่อนที่เหล่านี้จะทำให้เกิดการหน่วงในบางครั้งเราเรียกเวลาไร้การตอบสนองว่า pure delay, transport lag, distance-velocity lag โดยที่คุณสมบัติของมันเหมือนองค์ประกอบพื้นฐานอื่นๆ คือ มันแทบจะไม่เกิดขึ้นเพียงลำพังในกระบวนการจริง แต่ก็มีบางกรณีซึ่งจะเป็นกระบวนการที่ไม่อยู่ในรูปแบบทั่วไป จากการที่มีเวลาไร้การตอบสนองนี้ เราจึงต้องมีเทคนิคในการออกแบบระบบควบคุมของเราให้สามารถปฏิบัติการอยู่ได้เมื่อมีผลของเวลาไร้การตอบสนอง

ตัวอย่างของกระบวนการที่มีเวลาไร้การตอบสนองเพียงอย่างเดียว คือ กระบวนการควบคุมน้ำหนักที่ถูกขนส่งด้วยสายพาน (conveyor) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าเวลาไร้การตอบสนองจะเกิดขึ้นระหว่าง action ของวาล์ว (valve) กับผลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่เกิดขึ้น ซึ่งก็คือระยะทางระหว่างวาล์วและเซลล์ (cell) (ฟุต) หารด้วยความเร็วของสายพาน (ฟุต/นาที) เวลาไร้การตอบสนองเป็นปัญหาของการขนส่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้

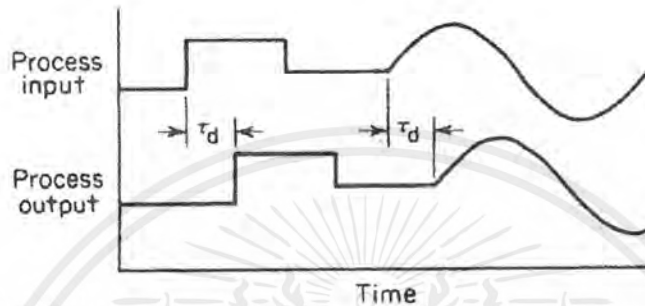


รูปที่ 2.9 แสดงปัญหาของการขนส่งเนื่องจากเวลาไร้การตอบสนอง

กระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับเป็น action ที่ใช้เพื่อแก้ไขค่าอินพุตที่เข้าสู่กระบวนการให้ถูกต้องซึ่งมีพื้นฐานค่าเอาท์พุตปัจจุบันของมัน ในกรณีนี้ action ของการปรับแก้ถูกดำเนินการจากการสังเกตผลกระทบที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่มีเวลาไร้การตอบสนองซึ่งจะทำให้ไม่สามารถสังเกตผลกระทบที่เกิดขึ้นในทันทีทันใดได้ ดังนั้น action ของการควบคุมจะต้องสามารถหลีกเลี่ยงผลของการหน่วงได้ เวลาไร้การตอบสนองจึงเป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นองค์ประกอบทางไดนามิกที่ควบคุมได้ยากที่สุดซึ่งจะเกิดขึ้นในระบบที่มีคุณสมบัติทางกายภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าระบบไม่มี

การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบอัตโนมัติ (automatic controller) ดังนั้นจึงทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาไร้การตอบสนองที่มีต่อการจำกัดผลของตัวควบคุมแบบอัตโนมัติในกระบวนการจริง

ผลตอบสนองของเวลาไร้การตอบสนองต่อสัญญาณใดๆก็ตามจะเป็นไปในทำนองเดียวกัน คือ สัญญาณนั้นจะถูกหน่วงไปด้วยขนาดของเวลาไร้การตอบสนอง ดังแสดงในรูปที่ 2.10

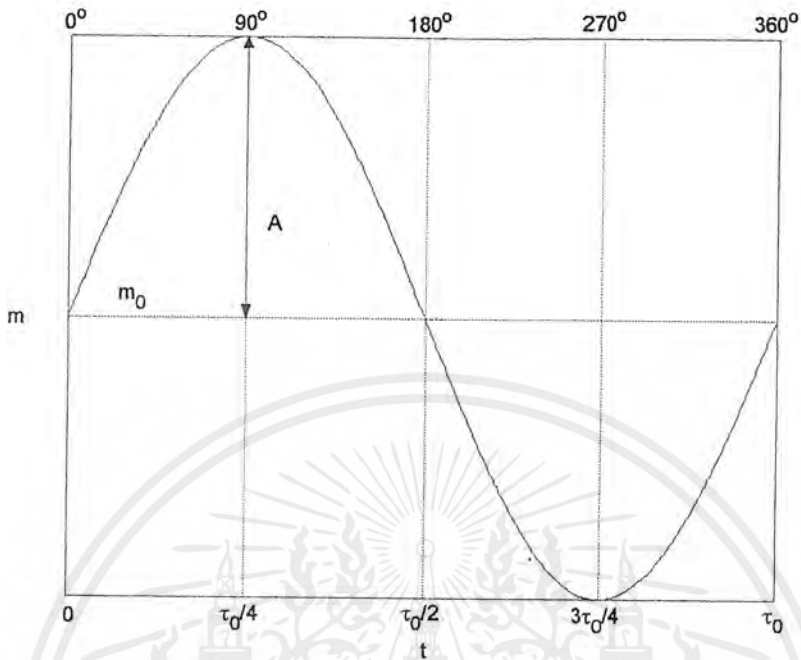


รูปที่ 2.10 แสดงการหน่วงเวลาเนื่องจากเวลาไร้การตอบสนอง

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าผลตอบสนองเวลาไร้การตอบสนองต่ออินพุตแบบไซน์ (sine) จะมีค่าการหน่วงเกิดขึ้นซึ่งก่อให้เกิดมูเลชั่น (phase shift) ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต เนื่องจากคุณสมบัติของรูปแบบป้อนกลับจะมีแนวโน้มเข้าสู่การแกว่ง ดังนั้นคุณสมบัติของมูเลชั่นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณา

#### มูเลชั่นของเวลาไร้การตอบสนอง

พิจารณาคอนสแตนต์มูเลชั่นขององค์ประกอบที่คาบของการแกว่งของรูป (period of oscillation) เริ่มต้นด้วยการสมมติว่ากระบวนการควบคุมแบบวงปิดมีเวลาไร้การตอบสนองซึ่งทำให้เกิดการแกว่งอย่างสม่ำเสมอ (Uniform Oscillation) สมมติว่าอินพุตที่เข้าสู่กระบวนการเป็นแบบไซน์ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงอินพุทแบบไซน์ที่เข้าสู่กระบวนการ

$$m = A \sin \pi \frac{t}{\tau_0} + m_0$$

$m$  = ตัวแปรจัดการ (manipulated variable)

$m_0$  = ค่าเฉลี่ยของตัวแปรจัดการ (average component of  $m$ )

$t$  = เวลา (time)

$\tau_0$  = คาบของการแกว่ง (period of oscillation)

แสดงค่ามุมเฟส (phase angle) ในหน่วยองศาและเรเดียนในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่ามุมเฟสในหน่วยองศาและเรเดียน

$t/\tau_0$	$2\pi t/\tau_0$		$\sin 2\pi t/\tau_0$
	Degrees	Radians	
0	0	0	0
1/4	90	$\pi/2$	+1
1/2	180	$\pi$	0
3/4	270	$3\pi/2$	-1
1	360	$2\pi$	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสัญญาณนี้ผ่านองค์ประกอบของเวลาไว้การตอบสนอง ดังนั้นมันจะถูกหน่วงไปด้วยขนาด  $L$  แต่ขนาดของมันไม่ได้ลดลงแต่อย่างใด ดังนั้นจะมีเอาท์พุทเป็น

$$C = K_p \left( A \sin 2\pi \frac{t-L}{\tau_0} + m_0 \right)$$

ค่าอัตราขยายของกระบวนการเป็นอัตราส่วนของแอมพลิจูดของเอาท์พุทต่อแอมพลิจูดของอินพุท ณ คาบของการแกว่ง

$$K_p g_L = \frac{dc(\tau_0)}{dm(\tau_0)} = \frac{K_p A (\sin 2\pi(t-L)/\tau_0)}{A \sin 2\pi t / \tau_0}$$

เกิดแอมพลิจูดตัวที่ 3 ซึ่งขนาดของมันเป็นอัตราส่วนของขนาดของสัญญาณ และ มุมเฟสของมันคือผลต่างระหว่างมุมเฟสของแอมพลิจูดทั้ง 2 ดังนั้นอัตราขยายเชิงสเกลาร์ (scalar gain) ของ  $g_L$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$G_L = \frac{A}{A} = 1$$

และมุมเฟส

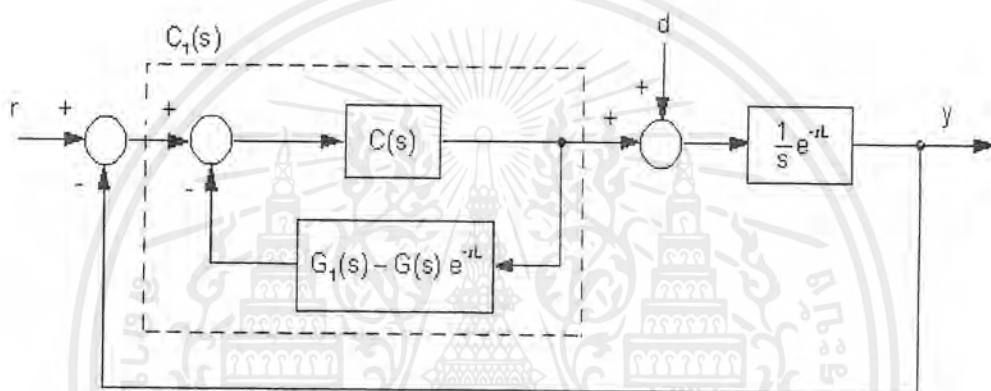
$$\phi_L = \left( 2\pi \frac{t-L}{\tau_0} \right) - \left( 2\pi \frac{t}{\tau_0} \right) = -2\pi \frac{L}{\tau_0} = -360^\circ \frac{L}{\tau_0}$$

## บทที่ 3

### การออกแบบการทดลอง

#### 3.1 กระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์มีเวลาไคร่การตอบสนอง

แผนภาคบล็อกของ Watanabe ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาคบล็อกของ Watanabe กระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์

โดยที่ตัวควบคุมหลัก  $C(s)$  ยังคงเป็นแบบ PI หรือ PID ตั้งเดิมอยู่ มีฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ คือ

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s)e^{-sL}$$

โดยสมมติให้

$$G(s) = \frac{1}{s}$$

จากวิธีการของ Smith Predictor กำหนดให้  $G_1(s) = G(s)$  โดยการปรับปรุงโครงสร้างตัวควบคุมของ Watanabe กำหนดให้

$$G_1(s) = \frac{G(s)}{1 + sL}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $L$  เป็นเวลาไครการตอบสนองของกระบวนการ

### ตัวควบคุมหลักแบบ PI

เมื่อระบบมีตัวควบคุมหลักแบบ PI จะมีฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

เมื่อ  $K_p$  และ  $T_i$  คือ proportional gain และ integral time ตามลำดับ โดยวิธีของ Watanabe จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตต่ออินพุต คือ

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s)e^{-sL}$$

$$G(s) = \frac{1}{s}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C_1(s) \frac{1}{s} e^{-sL}}{1 + C_1(s) \frac{1}{s} e^{-sL}} = \frac{C_1(s) e^{-sL}}{s + C_1(s) e^{-sL}}$$

$$C_1(s) = \frac{C(s)}{1 + (G_1(s) - G(s)e^{-sL})(C(s))}$$

$$G_1(s) = \frac{G(s)}{1 + sL}$$

$$G_1(s) - G(s)e^{-sL} = G(s) \left[ \frac{1}{1 + sL} - e^{-sL} \right]$$

$$C(s)[G_1(s) - G(s)e^{-sL}] = \frac{K_p(T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}{T_i s^2(1 + sL)}$$

$$1 + C(s)[G_1(s) - G(s)e^{-sL}] = \frac{LT_i s^3 + T_i s^2 + K_p(T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}{LT_i s^3 + T_i s^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_1(s)e^{-sL} = \frac{K_p(T_i s + 1)(Ls + 1)e^{-sL}}{LT_i s^3 + T_i s^2 + K_p(T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K_p(s + \frac{1}{T_i})(s + \frac{1}{L})e^{-sL}}{s^3 + \frac{1}{L}s^2 + \frac{K_p}{L}s + \frac{K_p}{LT_i}}$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตต่อตัวรบกวน คือ

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G(s)e^{-sL}}{1 + C_1(s)G(s)e^{-sL}}$$

$$G(s) = \frac{1}{s}$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{\frac{1}{s}e^{-sL}}{1 + C_1(s)\frac{1}{s}e^{-sL}}$$

$$= \frac{e^{-sL}}{s + C_1(s)e^{-sL}}$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{LT_i s^3 + T_i s^2 + K_p(T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})e^{-sL}}{LT_i s^4 + T_i s^3 + K_p s(T_i s + 1)}$$

### ตัวควบคุมหลักแบบ PID

เมื่อ ตัวควบคุมหลักเป็นแบบ PID จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + sT_d \right)$$

เมื่อ  $K_p, T_i, T_d$  คือ proportional gain, integral time และ derivative time ตามลำดับ

โดยวิธีของ Watanabe จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตต่ออินพุต คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C_1(s)e^{-sL}}{s + C_1(s)e^{-sL}}$$

$$C_1(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)(G_1(s) - G(s)e^{-sL})}$$

$$G_1(s) = \frac{G(s)}{1 + sL}$$

$$G_1(s) - G(s)e^{-sL} = G(s) \left[ \frac{1}{1 + sL} - e^{-sL} \right]$$

$$C(s)[G_1(s) - G(s)e^{-sL}] = \frac{K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}{T_i s^2 (sL + 1)}$$

$$1 + C(s)[G_1(s) - G(s)e^{-sL}] = \frac{LT_i s^3 + T_i s^2 + K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}{T_i s^2 (sL + 1)}$$

$$C_1(s)e^{-sL} = \frac{K_p s(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(1 + sL)e^{-sL}}{LT_i s^3 + T_i s^2 + K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K_p s(s + \frac{1}{L})(T_d s^2 + s + \frac{1}{T_i})e^{-sL}}{s^3 + \frac{K_p T_d + 1}{L} s^2 + \frac{K_p}{L} s + \frac{K_p}{LT_i}}$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตต่อตัวรบกวน คือ

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G(s)e^{-sL}}{1 + C_1(s)G(s)e^{-sL}}$$

$$G(s) = \frac{1}{s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{\frac{1}{s}e^{-sL}}{1 + C_1(s)\frac{1}{s}e^{-sL}}$$

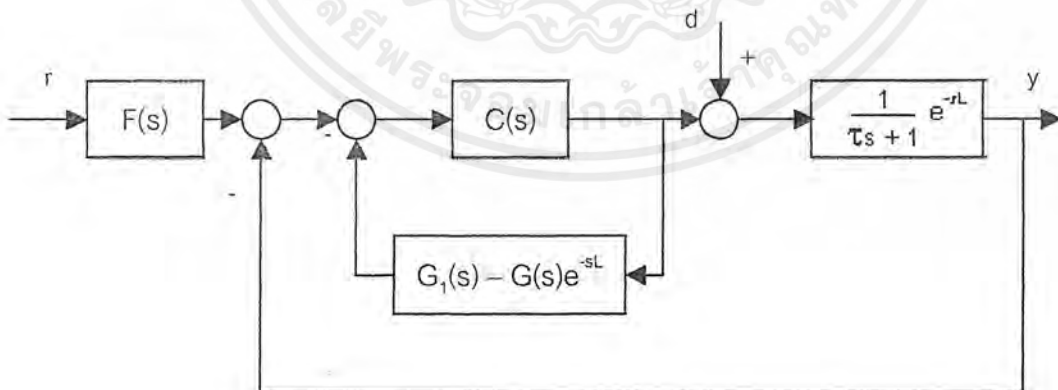
$$= \frac{e^{-sL}}{s + C_1(s)e^{-sL}}$$

$$s + C_1(s)e^{-sL} = \frac{LT_i s^4 + T_i s^3 + K_p s(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)}{LT_i s^3 + T_i s^2 + K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{LT_i s^3 + T_i s^2 + K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})e^{-sL}}{LT_i s^4 + T_i s^3 + K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)}$$

### 3.2 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีเวลาไ้การตอบสนอง

แผนภาคบล็อกของ Watanabe ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาคบล็อกของ Watanabe

โดยที่ตัวควบคุมหลัก  $C(s)$  ยังคงเป็นแบบ PI หรือ PID ดั้งเดิมอยู่ มีฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s)e^{-sL}$$

โดยสมมติให้

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

จากวิธีการของ Smith Predictor กำหนดให้  $G_1(s) = G(s)$  โดยการปรับปรุงโครงสร้างตัวควบคุมของ Watanabe กำหนดให้

$$G_1(s) = \frac{G(s)}{1 + sL}$$

เมื่อ  $L$  เป็นเวลาไร้การตอบสนองของกระบวนการ

### ตัวควบคุมหลักแบบ PI

เมื่อระบบมีตัวควบคุมหลักแบบ PI จะมีฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

เมื่อ  $K_p$  และ  $T_i$  คือ proportional gain และ integral time ตามลำดับ โดยวิธีของ Watanabe จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตต่ออินพุต คือ

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s)e^{-sL}$$

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C_1(s)e^{-sL}}{\tau s + 1 + C_1(s)e^{-sL}}$$

$$C_1(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)(G_1(s) - G(s)e^{-sL})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_1(s) = \frac{G(s)}{1 + Ls}$$

$$G_1(s) - G(s)e^{-sL} = G(s) \left[ \frac{1}{1 + sL} - e^{-sL} \right]$$

$$C(s)[G_1(s) - G(s)e^{-sL}] = \frac{K_p [T_i s + 1] [1 - e^{-sL} - sLe^{-sL}]}{(T_i s)(\tau s + 1)(Ls + 1)}$$

$$1 + C(s)[G_1(s) - G(s)e^{-sL}] = \frac{L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s + K_p (T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}{L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s}$$

$$\frac{C_1(s)e^{-sL}}{\tau s + 1 + C_1(s)e^{-sL}} = \frac{K_p (T_i s + 1)(Ls + 1)e^{-sL}}{L\tau T_i s^3 + (L + \tau)s^2 + T_i s + K_p (T_i s + 1)}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_p}{\tau} \left(s + \frac{1}{T_i}\right) \left(s + \frac{1}{L}\right) e^{-sL}}{s^3 + \left(\frac{L + \tau}{L\tau}\right) s^2 + \left(\frac{K_p + 1}{L\tau}\right) s + \frac{K_p}{L\tau T_i}}$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตต่อตัวรบกวน คือ

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G(s)e^{-sL}}{1 + C_1(s)G(s)e^{-sL}}$$

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{e^{-sL}}{\tau s + 1 + C_1(s)e^{-sL}}$$

$$\tau s + 1 + C_1(s)e^{-sL} = \frac{(\tau s + 1)(L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s + K_p (T_i s + 1))}{L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s + K_p (T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{(L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s + K_p(T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL}))e^{-sL}}{(\tau s + 1)(L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s + K_p(T_i s + 1))}$$

### ตัวควบคุมหลักแบบ PID

เมื่อ ตัวควบคุมหลักเป็นแบบ PID จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + sT_d \right)$$

เมื่อ  $K_p, T_i, T_d$  คือ proportional gain , integral time และ derivative time ตามลำดับ โดยวิธีของ Watanabe จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตต่ออินพุต คือ

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C_1(s)e^{-sL}}{\tau s + 1 + C_1(s)e^{-sL}}$$

$$C_1(s) = \frac{C(s)}{1 + (G_1(s) - G(s)e^{-sL})C(s)}$$

$$G_1(s) = \frac{G(s)}{1 + sL}$$

$$G_1(s) - G(s)e^{-sL} = G(s) \left[ \frac{1}{1 + sL} - e^{-sL} \right]$$

$$C(s)[G_1(s) - G(s)e^{-sL}] = \frac{K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}{L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s}$$

$$1 + C(s)[G_1(s) - G(s)e^{-sL}] = \frac{L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s + K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}{L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s}$$

$$C_1(s)e^{-sL} = \frac{K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(L\tau^2 + (L + \tau)s + 1)e^{-sL}}{L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s + K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{C_1(s)e^{-sL}}{\tau s + 1 + C_1(s)e^{-sL}} = \frac{K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(Ls + 1)e^{-sL}}{L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s + K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_p}{\tau}(T_d s^2 + s + \frac{1}{T_i})(s + \frac{1}{L})e^{-sL}}{s^3 + (\frac{L + \tau + K_p T_d}{L\tau})s^2 + (\frac{K_p + 1}{L\tau})s + \frac{K_p}{L\tau T_i}}$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตต่อตัวควบคุม คือ

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G(s)e^{-sL}}{1 + C_1(s)G(s)e^{-sL}}$$

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{e^{-sL}}{\tau s + 1 + C_1(s)e^{-sL}}$$

$$\tau s + 1 + C_1(s)e^{-sL} = \frac{(\tau s + 1)(L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s + K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1))}{L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s + K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL})}$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{(L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s + K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1)(1 - e^{-sL} - sLe^{-sL}))e^{-sL}}{(\tau s + 1)(L\tau T_i s^3 + (L + \tau)T_i s^2 + T_i s + K_p(T_i T_d s^2 + T_i s + 1))}$$

### 3.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้การควบคุมที่ดีที่สุด ซึ่งทำได้หลายวิธี บางวิธีจะพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบและอาศัยประสบการณ์ บางวิธีจะอาศัย

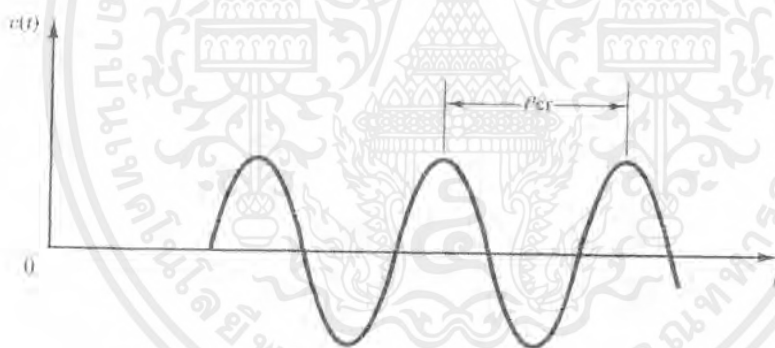
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณิตศาสตร์ และส่วนใหญ่จะพิจารณาจากเงื่อนไขในโดเมนเวลามากกว่าในโดเมนความถี่ ในปริภูมิพหุนามนี้ จะนำเสนอวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยวิธีของ Ziegler-Nichols ซึ่งให้ผลตอบสนองที่ดี มีหลักการดังต่อไปนี้

### 3.3.1 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI โดยวิธีของ Refined Ziegler-Nichols

การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ที่เป็นที่รู้จักกันดี และมีประสิทธิภาพสูงของ Refined Ziegler-Nichols มีหลักการดังต่อไปนี้

1. ทำการ closed loop กระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ P ต่ออินพุตแบบ unit step
2. ทำการปรับค่า  $K_p$  ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งผลตอบสนองเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Uniform Oscillations) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการปรับค่า  $K_p$  จนกระทั่งผลตอบสนองเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง

จากรูป 3.3 ให้ค่า  $K_p$  ที่ทำให้เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องนี้มีค่าเท่ากับ  $K_{cr}$

3. จัดคาบเวลาของการแกว่งอย่างต่อเนื่อง ให้มีค่าเท่ากับ  $P_{cr}$  ดังรูป 3.3

เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ตามวิธีของ Refined Ziegler-Nichols ได้ตามตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ตามวิธีของ Refined Ziegler-nichols

Refined Ziegler-Nichols	$K_p$	$T_i$
PI	$\frac{5K_{cr}}{6} \left[ \frac{12 + K_{cr}}{15 + 14K_{cr}} \right]$	$\frac{P_{cr}}{5} \left[ \frac{4}{15} K_{cr} + 1 \right]$

### 3.3.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID โดยวิธีของ Ziegler-Nichols (1<sup>st</sup> Method)

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ของ Ziegler-Nichols นี้ มีพื้นฐานมาจากการทดลองผลตอบสนองส่วนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบ ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ที่มีต่ออินพุตที่เป็นแบบขั้นบันได ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงวิธีการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID โดยการทดลองผลตอบสนองส่วนที่แปรตามเวลาที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันได

จากรูปที่ 3.4 สามารถประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$G(s) = \frac{k}{1 + s\tau} e^{-sL}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีดังกล่าวนี้ใช้หาพารามิเตอร์เพียง 2 ตัวคือ  $a$  และ  $L$  เท่านั้น ในการปรับค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงการหาค่าพารามิเตอร์  $a$  และ  $L$  ของระบบ

Controller	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$1/m$		
PI	$0.9/m$	$3L$	
PID	$1.25/m$	$2L$	$L/2$

$k$  = static gain  
 $L$  = dead time  
 $\tau$  = Time Constant  
 $a = \frac{kL}{\tau}$

กฎการปรับค่าพารามิเตอร์ของ Ziegler-Nichols ได้ถูกพัฒนามาจากการสังเกตและประสบการณ์ ของระบบที่แตกต่างกันหลายระบบ กฎที่ตั้งขึ้นมีข้อเสียตรงที่ว่า มันให้ระบบควบคุมวงปิดที่ขาดการ damp อยู่บ่อยครั้ง เราสามารถปรับปรุงค่าเชิงตัวเลขในตารางที่ 3.2 เพื่อให้ระบบมีการ damp ที่ดียิ่งขึ้น โดยการแทนค่าพารามิเตอร์อื่นที่นอกเหนือจากนี้ก็ไม่ได้ ถ้ากฎการปรับค่าพารามิเตอร์ของ Ziegler-Nichols สามารถประยุกต์ใช้ได้

เช่น กรณีที่เรารู้ค่า ค่าคงตัวเวลา ( $\tau$ ) ของระบบ เราสามารถใช้กฎการปรับค่าพารามิเตอร์ของ Ziegler-Nichols มาประยุกต์ใช้โดยพิจารณาจาก  $0.1 < L/\tau < 1$

ถ้า  $L/\tau$  มีค่ามากๆ จะเป็นข้อได้เปรียบในการใช้กฎการปรับค่าพารามิเตอร์นี้ในการชดเชยค่าเวลาไว้การตอบสนอง

ถ้า  $L/\tau$  มีค่าน้อยๆ อาจทำการปรับปรุงสมรรถนะของระบบได้โดยการใช้ตัวชดเชยที่มีอันดับสูงกว่านี้ หรือ อาจใช้กฎการปรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ซับซ้อนกว่านี้ เช่น กฎการปรับค่าพารามิเตอร์ที่มีพื้นฐานอยู่บน 3 พารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 กระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์มีเวลาไ้การตอบสนอง

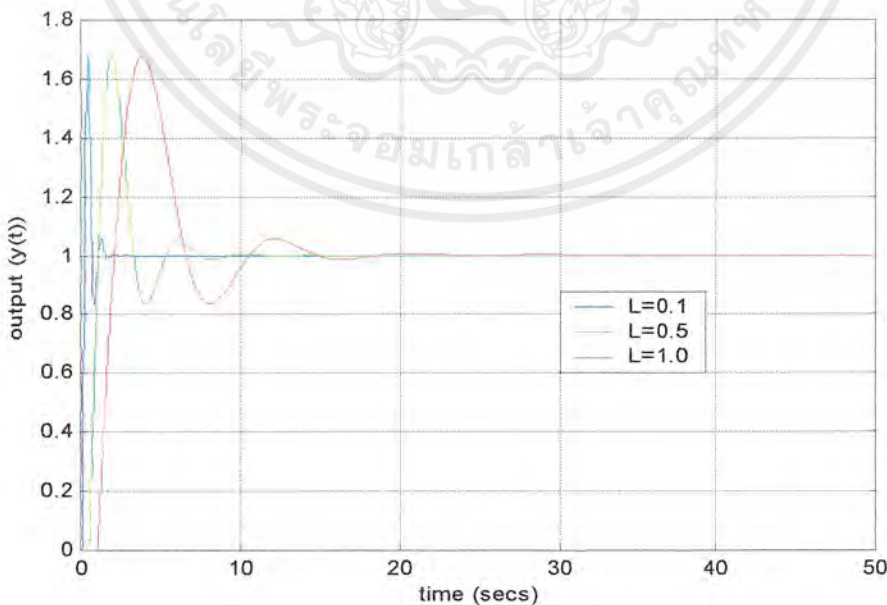
##### 4.1.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI

ทำการศึกษาผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไ้การตอบสนอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate คือ

$$K_p = \frac{0.9}{RL}$$

$$T_i = 3.3L$$

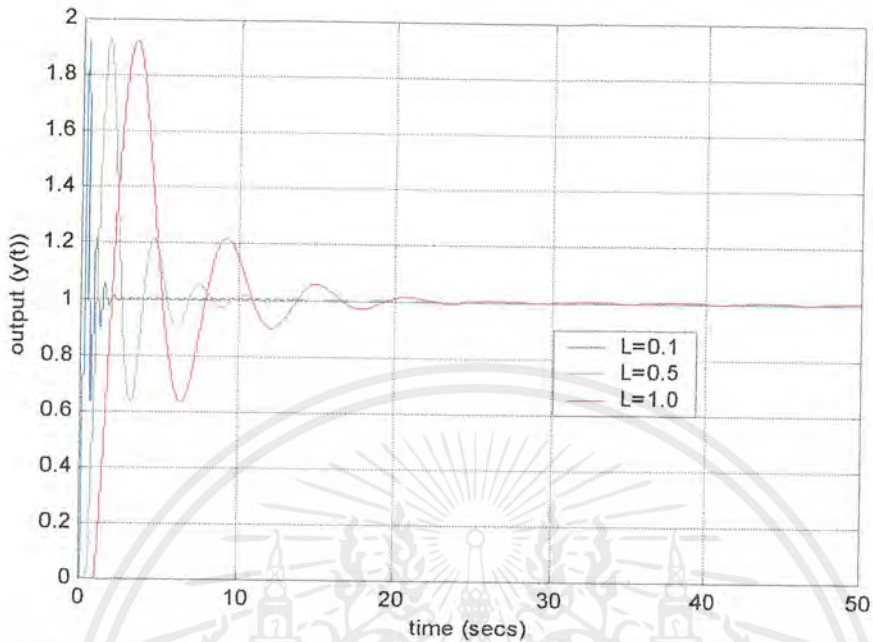
โดยที่  $R$  เป็น process reaction rate,  $L$  เป็นเวลาไ้การตอบสนอง ทำการวิเคราะห์ที่เวลาไ้การตอบสนองเป็น 0.1, 0.5 และ 1 วินาที ตามลำดับ แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe กับระบบควบคุม PI แบบดั้งเดิม ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอินทิ

เกรเตอร์ที่มีเวลาไ้การตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบดั้งเดิม ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ ที่มีเวลาไครการตอบสนอง

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า เมื่อเวลาไครการตอบสนองยาวนานขึ้น จะส่งผลให้ระบบมีผลตอบสนองช้าลง นั่นคือ สมรรถนะของระบบจะลดลง ไม่ว่าจะเป็ระบบควบคุม PI แบบ Watanabe หรือระบบควบคุม PI แบบดั้งเดิมก็ตาม ต่อไปเราจะมาทำการศึกษาว่าระบบควบคุม PI แบบ Watanabe จะให้สมรรถนะที่ดีขึ้นหรือไม่โดยทำการเปรียบเทียบกับระบบควบคุม PI แบบดั้งเดิม แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe กับระบบควบคุม PI แบบดั้งเดิมต่ออินพุตแบบขั้นบันไดในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไครการตอบสนอง โดยแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน  $M_o$  , ค่าช่วงเวลาขึ้น  $t_r$  , ค่าช่วงเวลาเข้าที่  $t_s$  และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว  $e_{ss}$  ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe กับระบบควบคุม PI แบบดั้งเดิมในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ ที่มีเวลาไถ่การตอบสนองโดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate

Dead Time (secs)	PI CONTROLLER	$M_o$ (%)	$t_r$ (secs)	$t_s$ (secs)	$e_{ss}$ (%)
0.1	Watanabe	67.7658	0.0870	1.3974	0
	ดั้งเดิม	92.4167	0.0770	1.8634	0
0.5	Watanabe	67.7656	0.4350	6.9852	0
	ดั้งเดิม	92.4174	0.3870	9.3168	0
1	Watanabe	67.7645	0.8710	13.9716	0
	ดั้งเดิม	92.4125	0.7730	18.6336	0

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ผลการทดลองควบคุมกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง ด้วยตัวควบคุม PI แบบ Watanabe และควบคุมด้วยตัวควบคุม PI แบบดั้งเดิม พบว่า ในช่วงเวลาสถานะชั่วคราว ระบบควบคุม PI แบบ Watanabe สามารถควบคุมให้ระบบมีค่าพุ่งเกิน  $M_o$  ที่น้อยกว่าระบบควบคุม PI แบบดั้งเดิม และช่วงเวลายื่น  $t_r$  ของระบบควบคุมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงสถานะอยู่ตัวระบบควบคุม PI แบบดั้งเดิมสามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สถานะอยู่ตัว หรือกล่าวคือมีค่าช่วงเวลายื่นที่  $t_s$  ที่เร็วกว่าระบบควบคุม PI แบบ Watanabe โดยที่ค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวของระบบควบคุมทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์

#### 4.1.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID

ในทำนองเดียวกัน ทำการศึกษาผลตอบสนองของระบบควบคุม PID ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_p = \frac{1.3}{RL}$$

$$T_i = 2.2L$$

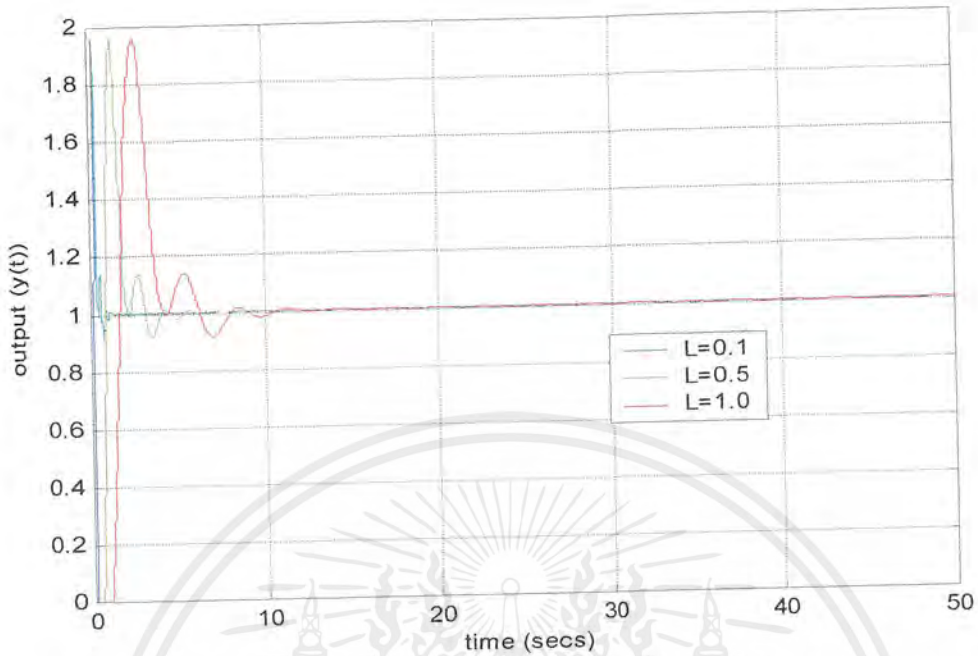
$$T_d = 0.45L$$

เมื่อ  $R$  เป็น process reaction rate,  $L$  เป็นเวลาไร้การตอบสนอง ทำการพิจารณาผลตอบสนองที่เวลาไร้การตอบสนองเป็น 0.1, 0.5 และ 1 วินาที ตามลำดับ แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe กับระบบควบคุม PI แบบดั้งเดิม ในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบดั้งเดิม ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไคร่การตอบสนอง

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่าสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้เหมือนเมื่อตัวควบคุมหลักเป็นแบบ PI คือเมื่อเวลาไคร่การตอบสนองยาวนานขึ้น ทั้งระบบควบคุม PID แบบ Watanabe และระบบควบคุม PID แบบดั้งเดิมจะให้สมรรถนะของระบบลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบต่ออินพุตที่เป็นแบบขั้นบันได ระหว่างระบบควบคุม PID แบบ Watanabe กับระบบควบคุม PID แบบดั้งเดิม ทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุม PID แบบ Watanabe กับระบบควบคุม PID แบบดั้งเดิมดังแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน  $M_o$  , ค่าช่วงเวลานั้น  $t_r$  , ค่าช่วงเวลาที่  $t_s$  และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว  $e_{ss}$  ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe กับระบบควบคุม PID แบบดั้งเดิมในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ ที่มีเวลาไถ่การตอบสนองโดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate

Dead Time (sec)	PID CONTROLLER	$M_o$ (%)	$t_r$ (sec)	$t_s$ (sec)	$e_{ss}$ (%)
0.1	Watanabe	68.4437	0.0750	1.4126	0
	ดั้งเดิม	95.7651	0.0530	0.7820	0
0.5	Watanabe	68.3844	0.3720	7.0786	0
	ดั้งเดิม	95.6795	0.2670	3.9070	0
1	Watanabe	68.3725	0.7430	14.1536	0
	ดั้งเดิม	95.6688	0.5330	7.8140	0

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ผลการทดลองควบคุมกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง ด้วยตัวควบคุม PID แบบ Watanabe และควบคุมด้วยตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม พบว่า ในช่วงเวลาสถานะชั่วคราว ระบบควบคุม PID แบบ Watanabe สามารถควบคุมให้ระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน  $M_o$  ที่น้อยกว่าระบบควบคุม PID แบบดั้งเดิม และช่วงเวลานั้น  $t_r$  ของระบบควบคุมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงสถานะอยู่ตัวระบบควบคุม PID แบบดั้งเดิมสามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สถานะอยู่ตัว หรือกล่าวคือมีค่าช่วงเวลาเข้าที่  $t_s$  ที่เร็วกว่าระบบควบคุม PID แบบ Watanabe โดยที่ค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวของระบบควบคุมทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ เช่นเดียวกับผลที่ได้เมื่อ ตัวควบคุมหลัก เป็นแบบ PI

#### 4.1.3 การปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์ (FINE TUNING)

จากผลการจำลองระบบควบคุมแบบ PI หรือ PID ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate พบว่าในช่วงเวลาสถานะชั่วคราว ระบบควบคุม PI แบบ Watanabe สามารถควบคุมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

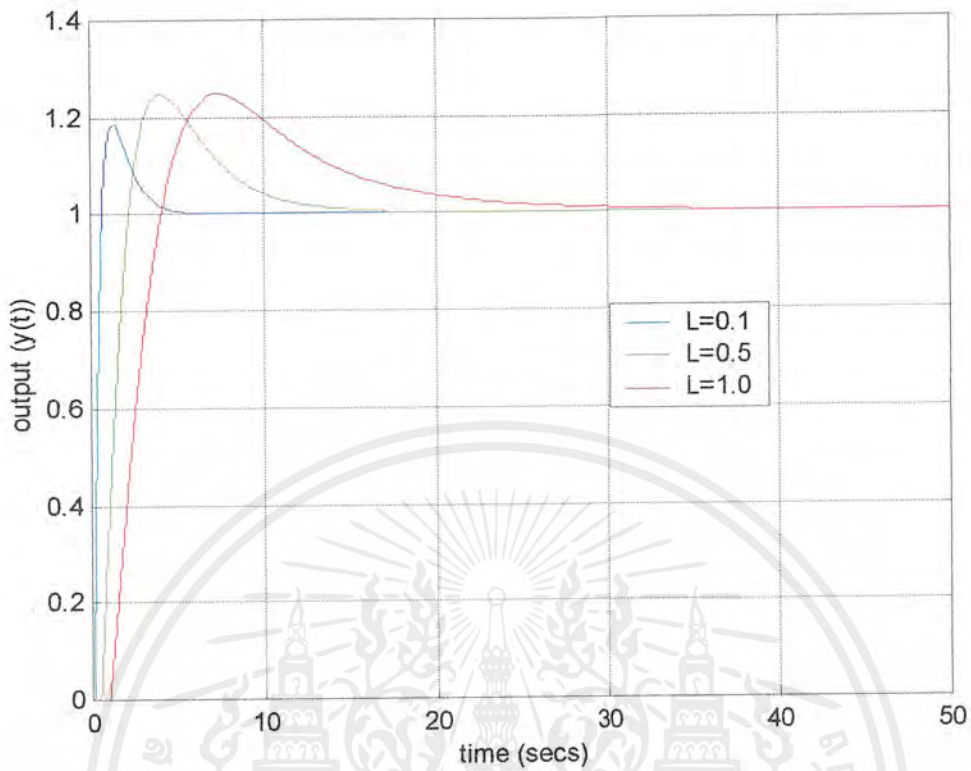
ให้ระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน  $M_o$  ที่น้อยกว่าระบบควบคุม PI แบบดั้งเดิม แต่ด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate ที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้นยังให้ผลตอบสนองที่ไม่ค่อยดีนัก เนื่องจากยังมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน  $M_o$  ที่สูงอยู่มาก เพื่อให้ระบบมีผลตอบสนองเป็นที่ยอมรับได้และสอดคล้องกับความต้องการคือ

- ☞ ค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน  $M_o$  ไม่เกิน 25%
- ☞ ค่าช่วงเวลาเข้าที่  $t_s$  อยู่ภายใน 2% criterion

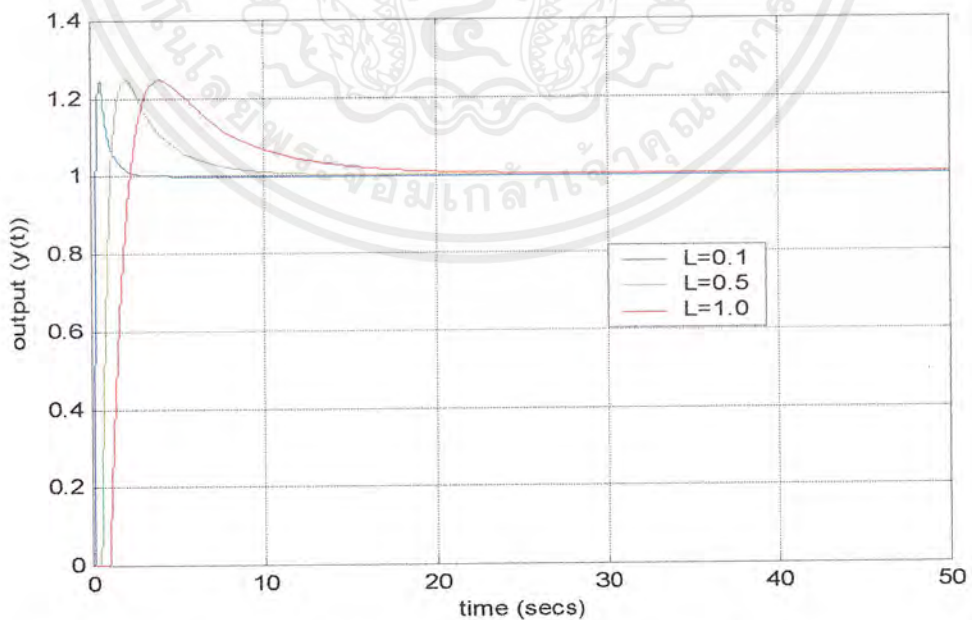
เราจึงทำการปรับค่าพารามิเตอร์ (fine tune) โดยมีหลักการพอสังเขป ดังนี้

1.  $K_p$  เมื่อทำการเพิ่มค่า  $K_p$  นี้ระบบจะให้ผลตอบสนองคือ
  - ☞ ให้ transient ดี กล่าวคือ เป็นเชิงเส้น ละเอียด ราบเรียบยิ่งขึ้น
  - ☞ เมื่อเพิ่ม  $K_p$  สามารถลดออฟเซตได้ แต่ถ้าเพิ่ม  $K_p$  มากจนเกินไป จะทำให้เกิดการแกว่ง ดังนั้นจะใช้หลักการปรับค่า  $K_p$  ให้ได้มากที่สุด ในขณะที่ยังไม่เกิดการแกว่ง
2.  $K_i$  เมื่อทำการเพิ่มค่า  $K_i$  จะช่วยกำจัดออฟเซตของระบบได้
3.  $K_d$  เมื่อทำการเพิ่มค่า  $K_d$  นี้ ระบบจะให้ผลตอบสนองคือ
  - ☞ ช่วยลดค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน
  - ☞ ทำให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมั่นคง
  - ☞ ช่วยให้ระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้

หลังจากทำการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไ้การตอบสนองด้วยหลักการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ให้เอาท์พุทของระบบมีผลการตอบสนองที่ดีสอดคล้องกับความต้องการ และสามารถเป็นที่ยอมรับได้ นำเสนอค่าพารามิเตอร์และผลตอบสนองต่อระบบควบคุมแบบ PI และ PID ด้รับการปรับค่าพารามิเตอร์ ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ที่ได้รับการปรับละเอียด ค่าพารามิเตอร์แล้วในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง



รูปที่ 4.6 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ที่ได้รับการปรับละเอียด ค่าพารามิเตอร์แล้วในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 วิเคราะห์ได้ว่า เวลาไร้การตอบสนองมีผลต่อการปรับค่าพารามิเตอร์ โดยเมื่อเวลาไร้การตอบสนองน้อยจะมีผลต่อการปรับค่าพารามิเตอร์น้อย และเมื่อเวลาไร้การตอบสนองยาวนานขึ้นก็จะมีผลต่อการปรับค่าพารามิเตอร์มากขึ้นตามลำดับ แสดงค่าพารามิเตอร์และค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน  $M_o$  , ค่าช่วงเวลาขึ้น  $t_r$  , ค่าช่วงเวลาเข้าที่  $t_s$  และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว  $e_{ss}$  ของระบบควบคุมแบบ PI หรือ PID ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง ในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์และสมรรถนะของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ที่ได้รับการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์แล้วในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง

Dead time (secs)	$K_p$	$K_i$	$M_o$ (%)	$t_r$ (secs)	$t_s$ (secs)	$e_{ss}$ (%)
0.1	2.5	1.6667	18.5005	0.4250	3.8973	0
0.5	0.73	0.1521	24.7209	1.2990	12.1596	0
1	0.4	0.1412	24.7928	2.3650	23.9651	0

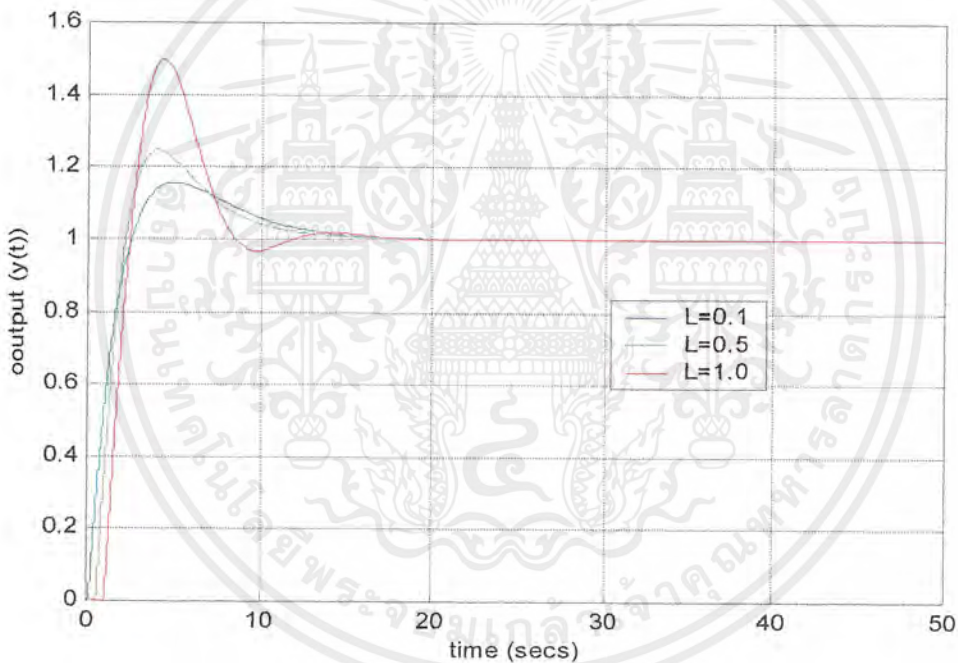
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์และสมรรถนะของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ที่ได้รับการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์แล้วในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง

Dead time (secs)	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$M_o$ (%)	$t_r$ (secs)	$t_s$ (secs)	$e_{ss}$ (%)
0.1	8	10	0.4	24.5642	0.1400	1.8863	0
0.5	2.45	0.7	0.8	24.7233	0.4968	8.2443	0
1	1.3	0.2	0.919	24.7412	0.9660	15.7463	0

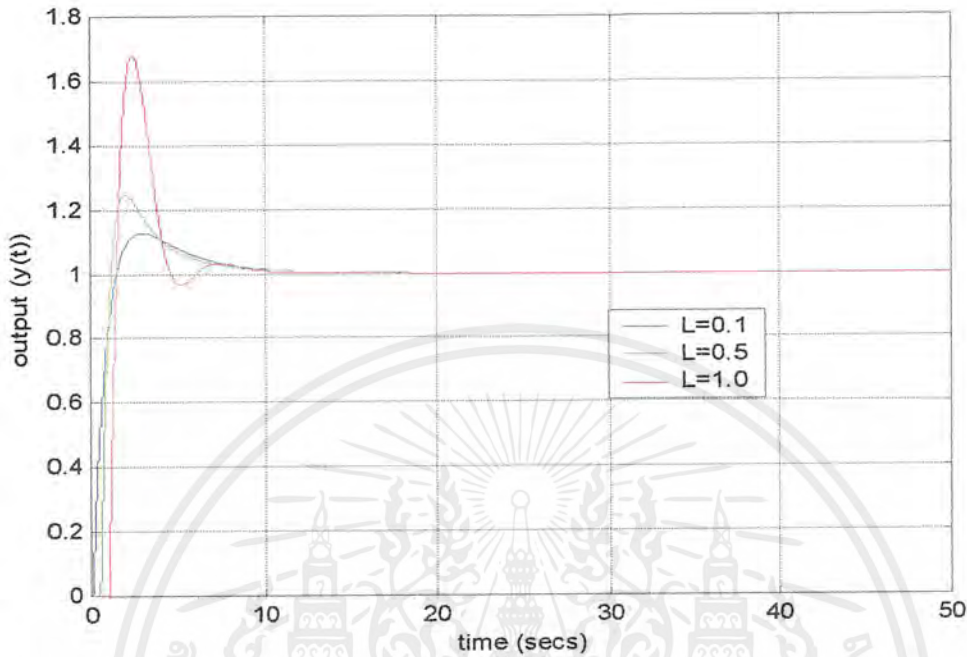
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 กระบวนการที่ระบุ (nominal process)

ต่อไปทำการทดลอง โดยให้กระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่เวลาไ้ตอบสนอง 0.5 วินาที เป็น nominal process แล้วนำเอาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของกระบวนการที่ระบุไปเป็นค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการที่เวลาไ้การตอบสนองลดลงและเพิ่มขึ้นจากกระบวนการที่ระบุ คือ ที่เวลาไ้การตอบสนอง 0.1 และ 1 วินาที ตามลำดับ แสดงผลการทดลองเมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PI หรือ PID ในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากกระบวนการที่ระบุ ( $K_p = 0.73$  ,  $K_i = 0.1521$ )

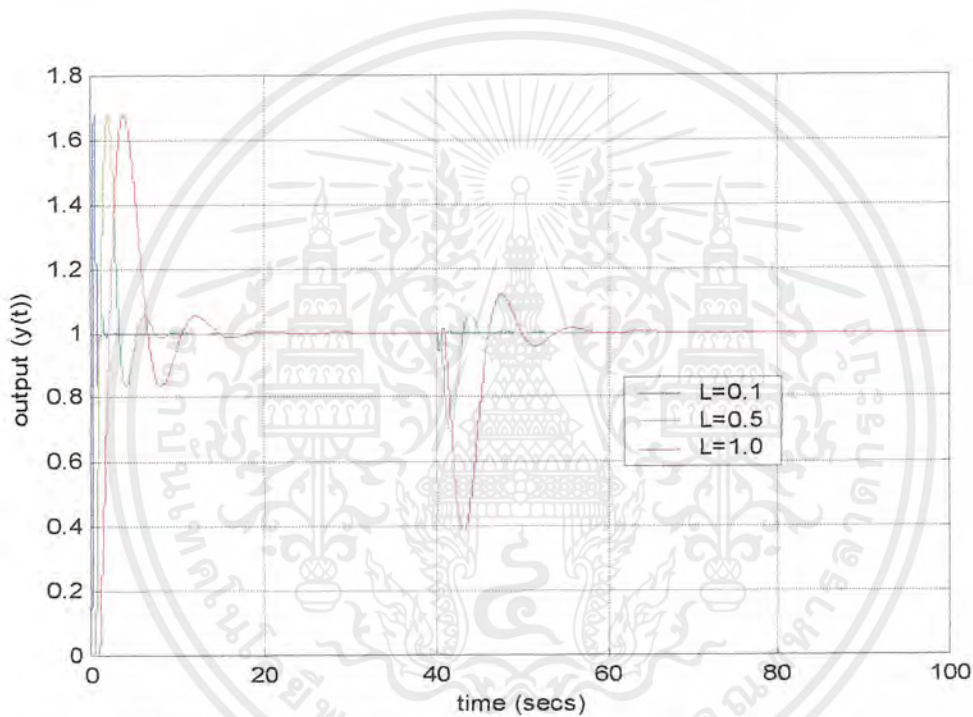


รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากกระบวนการที่ระบุ ( $K_p=2.45$ ,  $K_i=0.7$ ,  $K_d=0.8$ )

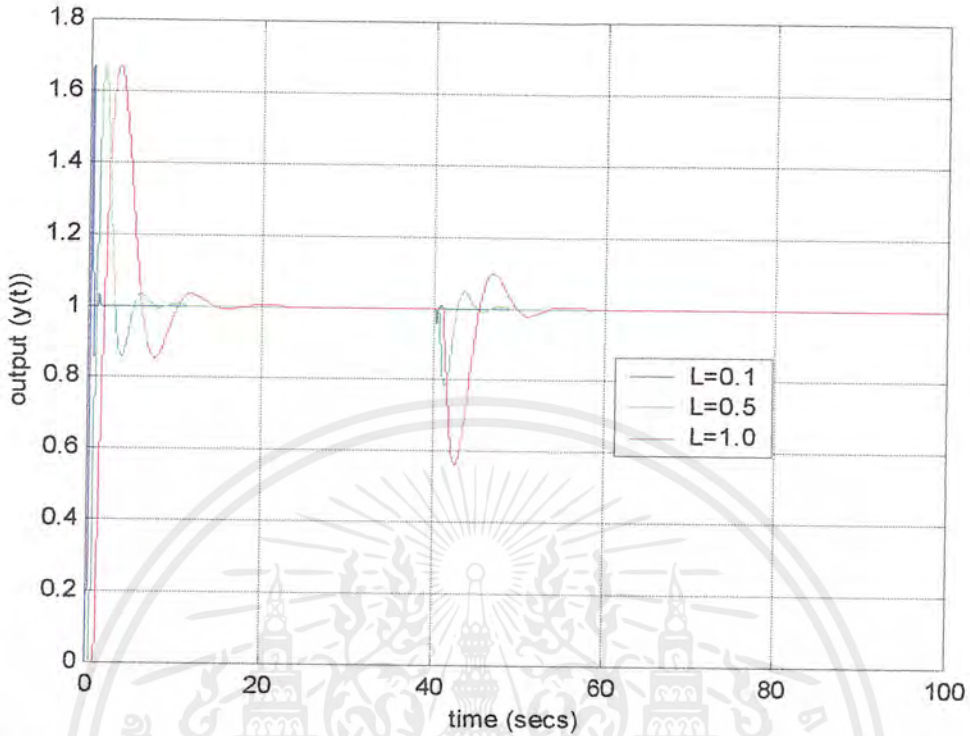
จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าระบบควบคุมที่มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเดียวกันนี้ เมื่อกระบวนการมีเวลาไถ่การตอบสนองเปลี่ยนแปลงไป เช่น ที่กระบวนการมีเวลาไถ่การตอบสนองยาวนานขึ้น ผลกระทบของเวลาไถ่การตอบสนองต่อผลตอบสนองของระบบจะมากขึ้น ดังแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PI หรือ PID ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง 0.5 วินาที โดย ใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากกระบวนการที่ระบุ พบว่าระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่สูงมาก แสดงว่าเวลาไถ่การตอบสนองมีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ นั่นคือ เมื่อกระบวนการมีเวลาไถ่การตอบสนองเปลี่ยนแปลงไปจะต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบเป็นที่ยอมรับได้ที่เวลาไถ่การตอบสนองนั้นๆ

#### 4.1.5 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อมีการรบกวนจากภายนอก

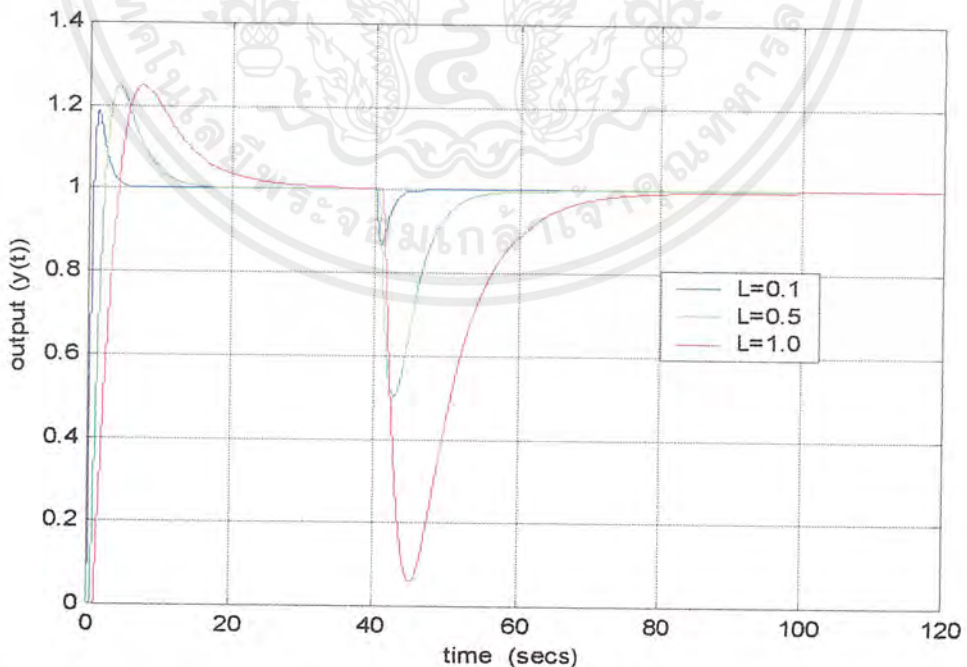
พิจารณาผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PI หรือ PID แบบ Watanabe เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต โดยแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PI หรือ PID โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate หรือ มีค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์แล้วในรูปที่ 4.9, 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก

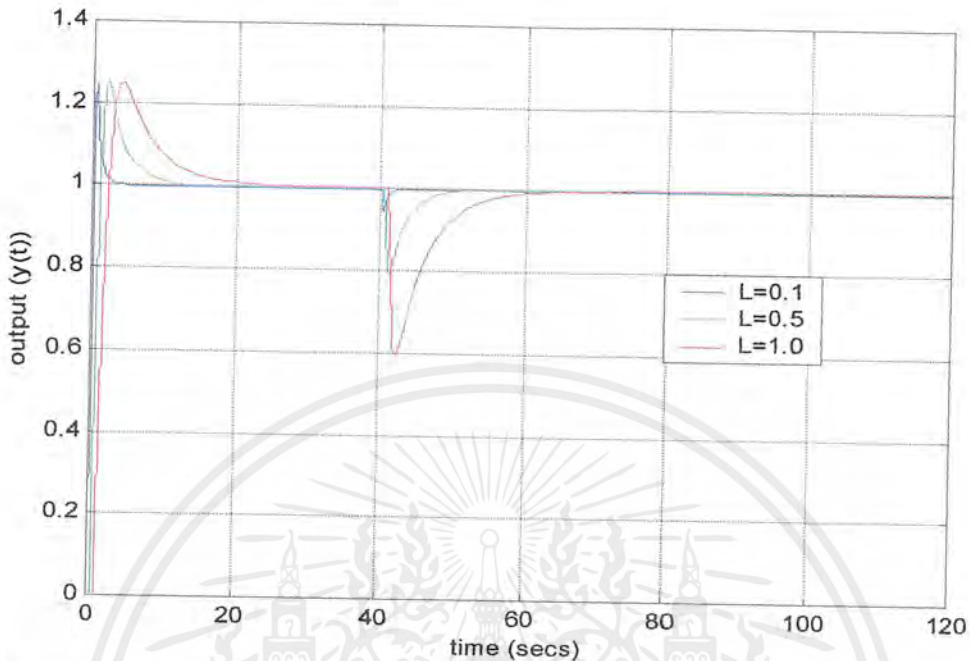


รูปที่ 4.10 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก



รูปที่ 4.11 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์แล้ว เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



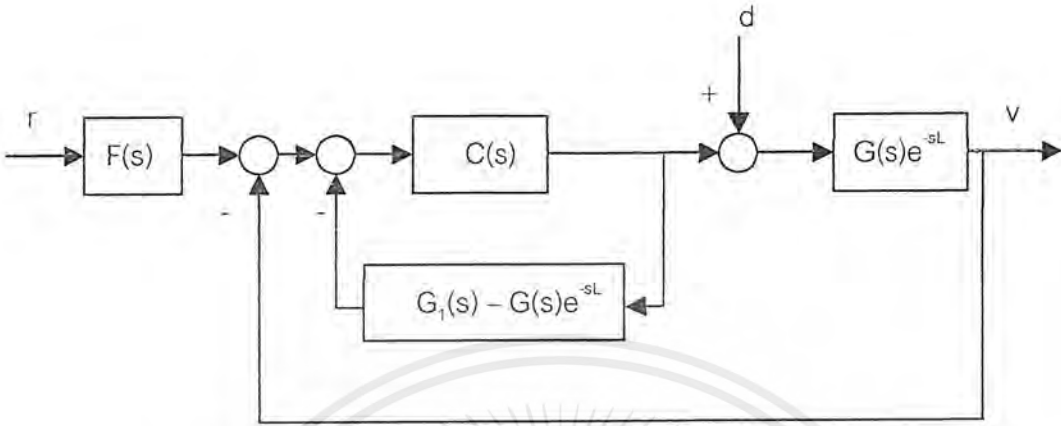
รูปที่ 4.12 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์แล้ว เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก

จากรูปที่ 4.9 ถึง 4.12 พบว่าระบบควบคุมแบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนองยาวนานขึ้น เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก ในช่วงสถานะอยู่ตัว ระบบควบคุมแบบ Watanabe จะให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สัจัญญาณอ้างอิงได้ช้า นั่นคือ ระบบจะมีสมรรถนะลดลงเมื่อเวลาไถ่การตอบสนองยาวนานขึ้น ไม่ว่าจะเป็ระบบควบคุมแบบ PI หรือ PID ดยมีค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate หรือ มีค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์แล้วก็ตาม

#### 4.1.6 การปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม

จากที่ได้นำเสนอระบบควบคุมแบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง พบว่ายังต้องมีการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ได้สมรรถนะของระบบตามต้องการ ซึ่งเป็นเรื่องที่ยู่ยากมาก จึงได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงตัวชดเชยเวลาไถ่การตอบสนอง (Dead Time Compensator- DTC) ของ Watanabe and Ito's SP ซึ่งมีหลักการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แผนภาพบล็อกของ Watanabe and Ito'SP with the proposed filter

โดยที่

$$G_1(s) = (1 - Ls)G(s)$$

$$G(s) = \frac{1}{s}$$

จากแผนภาพบล็อกสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน ได้ดังนี้

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{F(s)C(s)G(s)e^{-sL}}{1 + C(s)G_1(s)}$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G(s)e^{-sL}}{1 + C(s)G_1(s)} + \frac{C(s)G(s)e^{-sL}}{1 + C(s)G_1(s)} [G_1(s) - G(s)e^{-sL}]$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอน  $\frac{Y(s)}{D(s)}$  จะเห็นได้ว่าค่าเอาต์พุตเมื่อมีการรบกวนจากภายนอกจะไม่ได้รับผลกระทบจากพรีฟิลเตอร์ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงผลตอบสนองให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ ถ้าเราเลือก  $C(s)$  ให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดผลของตัวรบกวนออกไปได้ แล้วจะพบว่าผลตอบสนองของเรามีค่าพุ่งเกินที่สูงมากเนื่องจากตำแหน่งของซีโร (zero) ในตัวควบคุม แต่ถ้ามีการใช้พรีฟิลเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยแล้ว จะทำให้เกิดการ cancel กันระหว่างโพล (pole) ของพรีฟิลเตอร์ กับซีโรของตัวควบคุม ผลตอบสนองของระบบก็จะได้รับการปรับปรุง ดังสมการ

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

$$F(s) = \frac{1 + \alpha T_i s}{1 + T_i s} \quad , \quad \alpha < 1$$

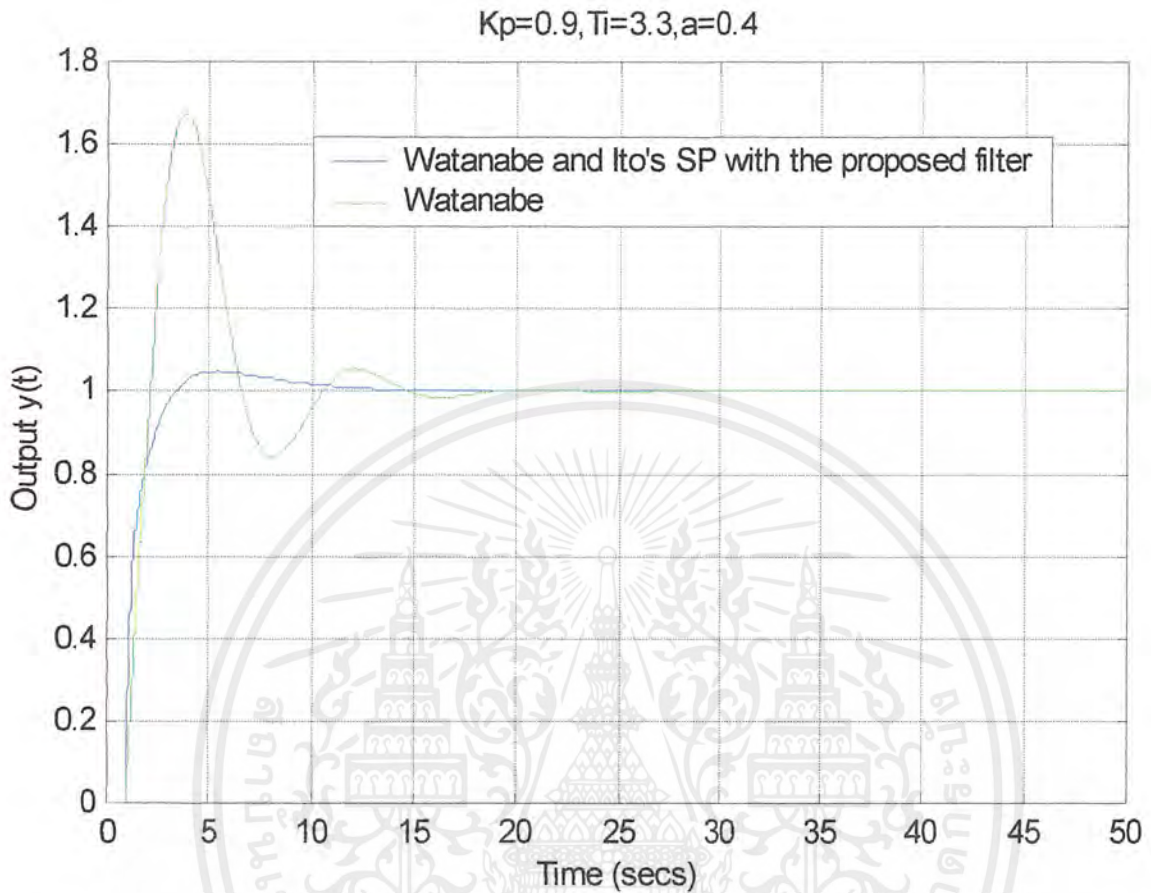
ถ้าค่า  $\alpha$  ได้รับการเลือกอย่างเหมาะสมแล้ว เราสามารถได้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะสูง จากจุดมุ่งหมายในการออกแบบระบบควบคุม โดยส่วนมากเราต้องการให้ระบบเป็นแบบหน่วงวิกฤต (critically damp) ให้มีผลตอบสนองที่เร็วที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อให้การออกแบบที่เกิดขึ้น สมบูรณ์แบบที่สุด ค่าของ  $\alpha$  ของ filter  $F(s)$  จะต้องถูกนิยามไว้ด้วยการจำลองอย่างกว้างขวาง พบว่า ค่าของ  $\alpha$  ที่ดีคือ 0.4

จากโครงสร้างของ Watanabe and Ito's SP with proposed filter นี้ ทำการวิเคราะห์ เมื่อระบบควบคุมแบบ PI แบบ Watanabe and Ito's SP with the proposed filter ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไร้การตอบสนอง เปรียบเทียบกับระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ที่ได้ นำเสนอในหัวข้อ 4.1.1 โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols with process reaction rate คือ

$$K_p = \frac{0.9}{RL}$$

$$T_i = 3.3L$$

โดยที่  $L$  เป็นเวลาไร้การตอบสนอง แสดงผลตอบสนองเปรียบเทียบระหว่าง 2 ระบบ ดังกล่าวที่เวลาไร้การตอบสนอง 1 วินาที ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบระบบควบคุมแบบ PI แบบ Watanabe and Ito'SP with the proposed filter กับระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ้การตอบสนอง

จากรูป 4.14 พบว่าระบบควบคุม PI แบบ Watanabe and Ito'SP with proposed filter จะมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยผลตอบสนองที่ได้จากโครงสร้างดังกล่าวนี้ไม่ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์อีกแล้ว เป็นการอำนวยความสะดวกให้อย่างมาก แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างของตัวควบคุมแบบ Watanabe and Ito'SP with proposed filter ที่สามารถปรับปรุงสมรรถนะของระบบที่มีกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไถ้การตอบสนองยาวนานได้เป็นอย่างดี

## 4.2 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไครการตอบสนอง

### 4.2.1 ผลตอบสนองของระบบ PI แบบ Watanabe

ศึกษาผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไครการตอบสนอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Refined Ziegler-Nichols คือ

$$K_p = \frac{5K_{cr}}{6} \left[ \frac{12 + K_{cr}}{15 + 14K_{cr}} \right]$$

$$T_i = \frac{P_{cr}}{5} \left[ \frac{4K_{cr}}{15} + 1 \right]$$

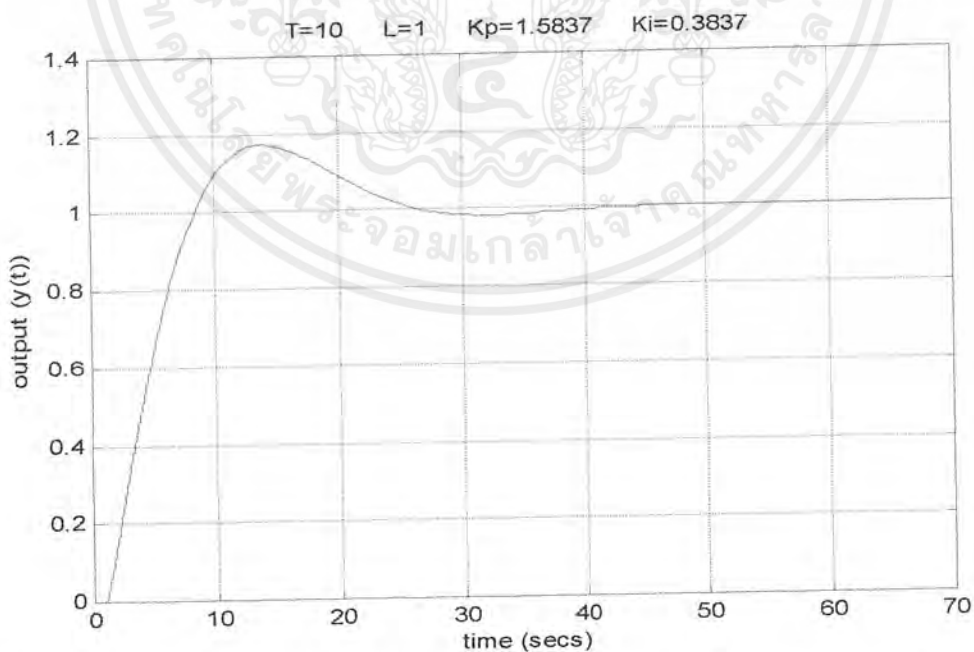
โดยที่

$K_{cr}$  เป็นค่าอัตราขยายที่ทำให้เกิดการแกว่ง (gain of oscillation)

$P_{cr}$  เป็นค่าคาบของการแกว่ง (period of oscillation)

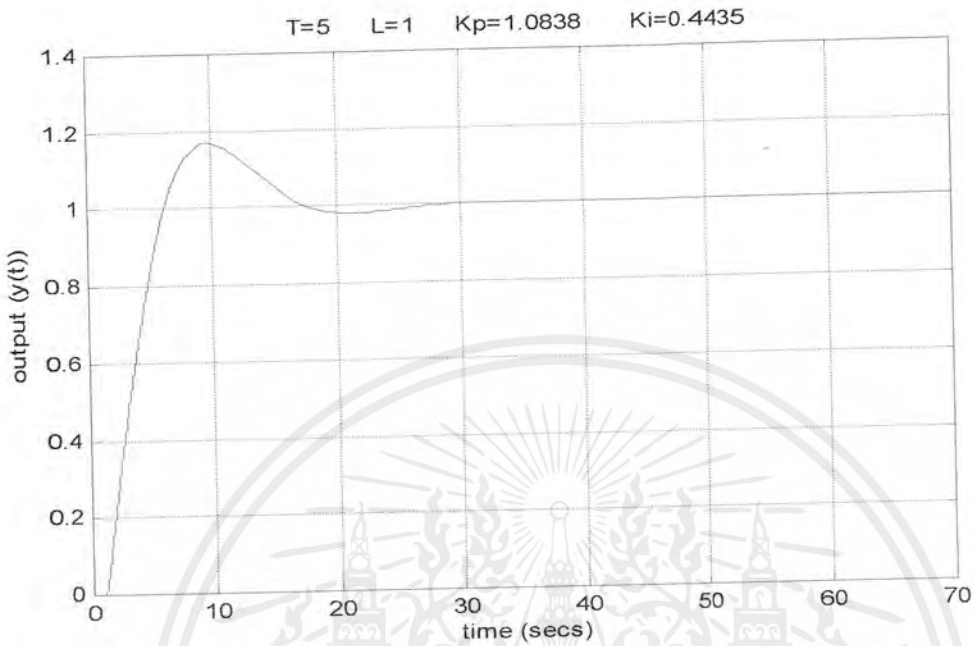
#### 4.2.1.1 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไครการตอบสนองคงที่

ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไครการตอบสนองคงที่ 1 วินาที โดยทำการทดลองที่ค่าคงตัวเวลา 10, 5, 2.5, 1.67, 1.25, 1 และ 0.1 วินาที ตามลำดับ แสดงผลตอบสนอง ดังรูป

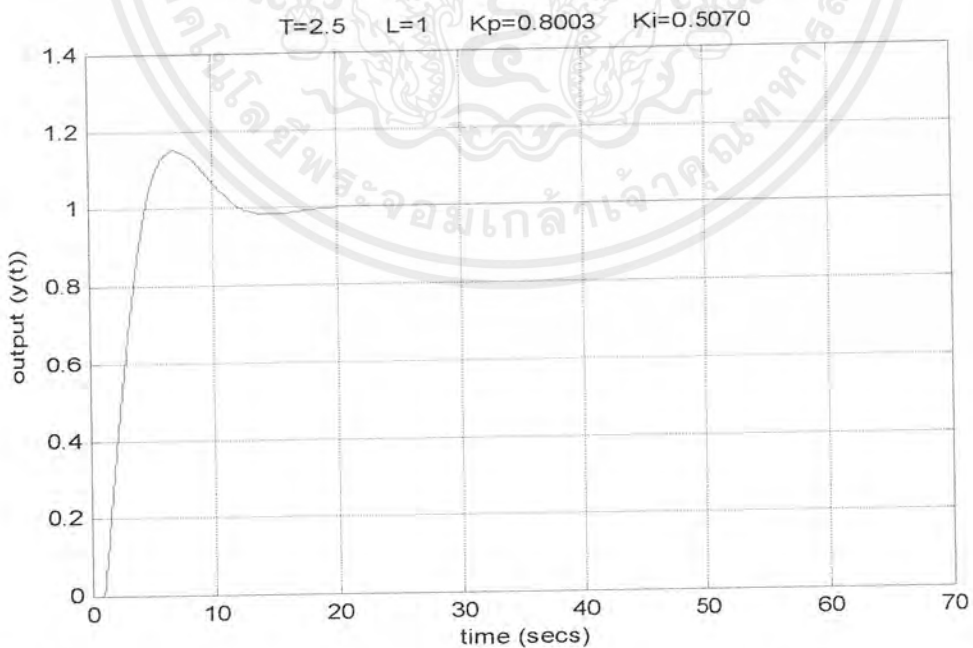


รูปที่ 4.15 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

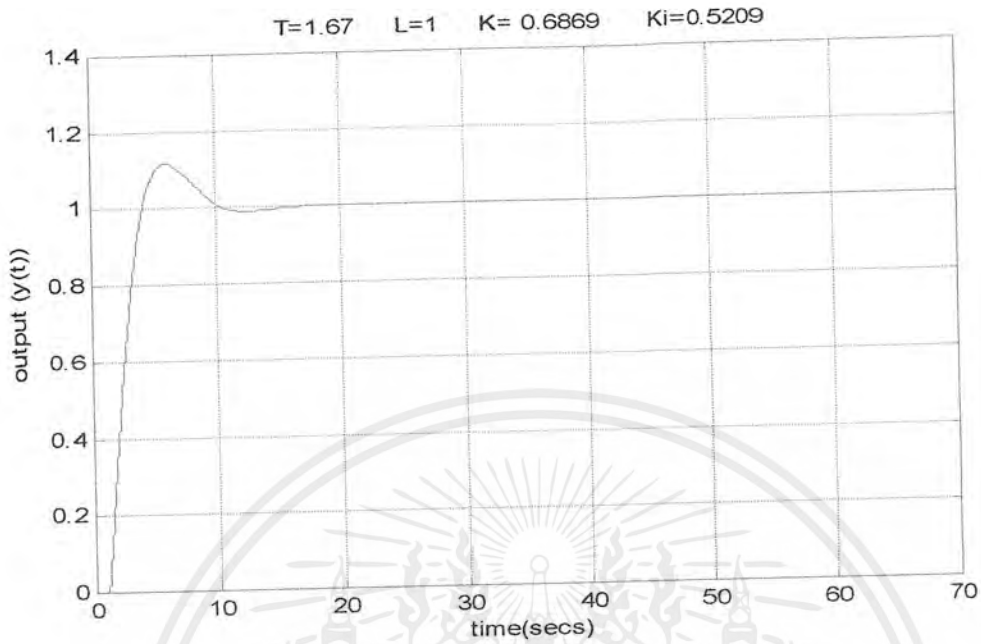


รูปที่ 4.16 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 5 วินาที

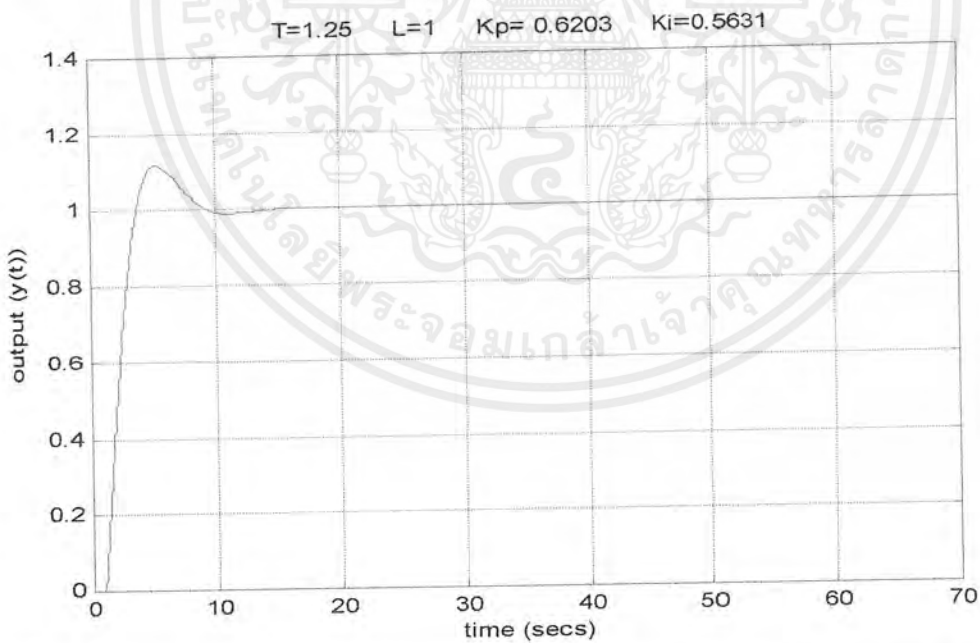


รูปที่ 4.17 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

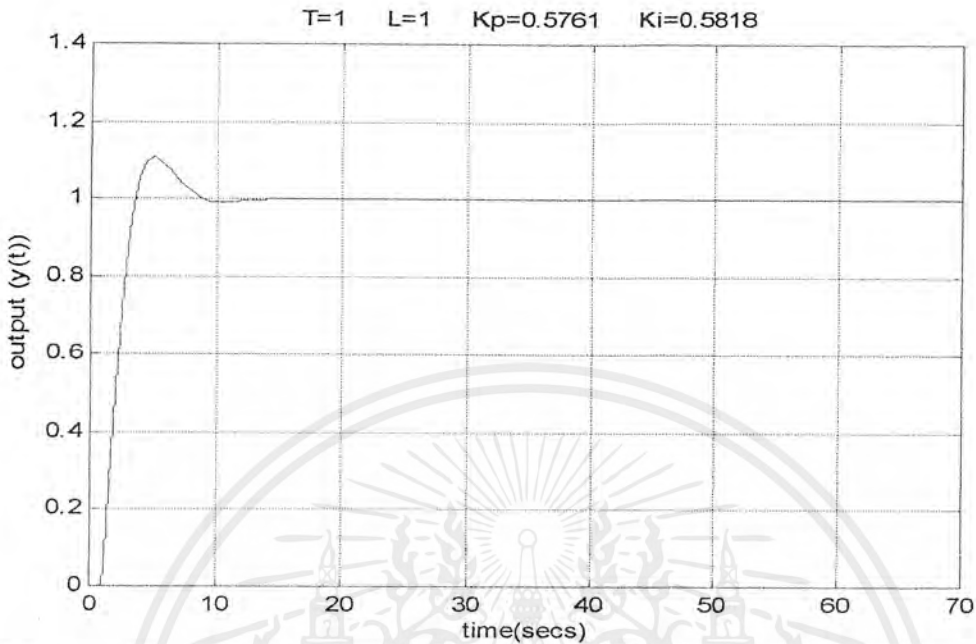


รูปที่ 4.18 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที

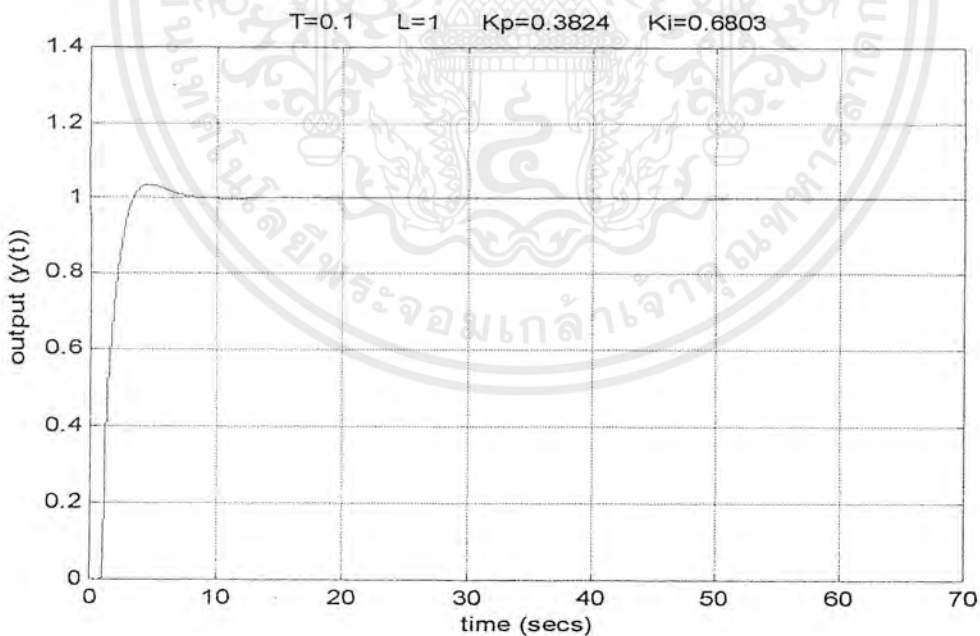


รูปที่ 4.19 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที



รูปที่ 4.21 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง 1 วินาที โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Refined Ziegler-Nichols สำหรับทุกค่าคงตัวเวลาที่ทำการศึกษาระบบจะมีสมรรถนะที่สามารถยอมรับได้ โดยไม่ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกิน  $M_o$  , ค่าช่วงเวลาขึ้น  $t_r$  , ค่าช่วงเวลาเข้าที่  $t_s$  และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว  $e_{ss}$  ในตารางที่ 4.5

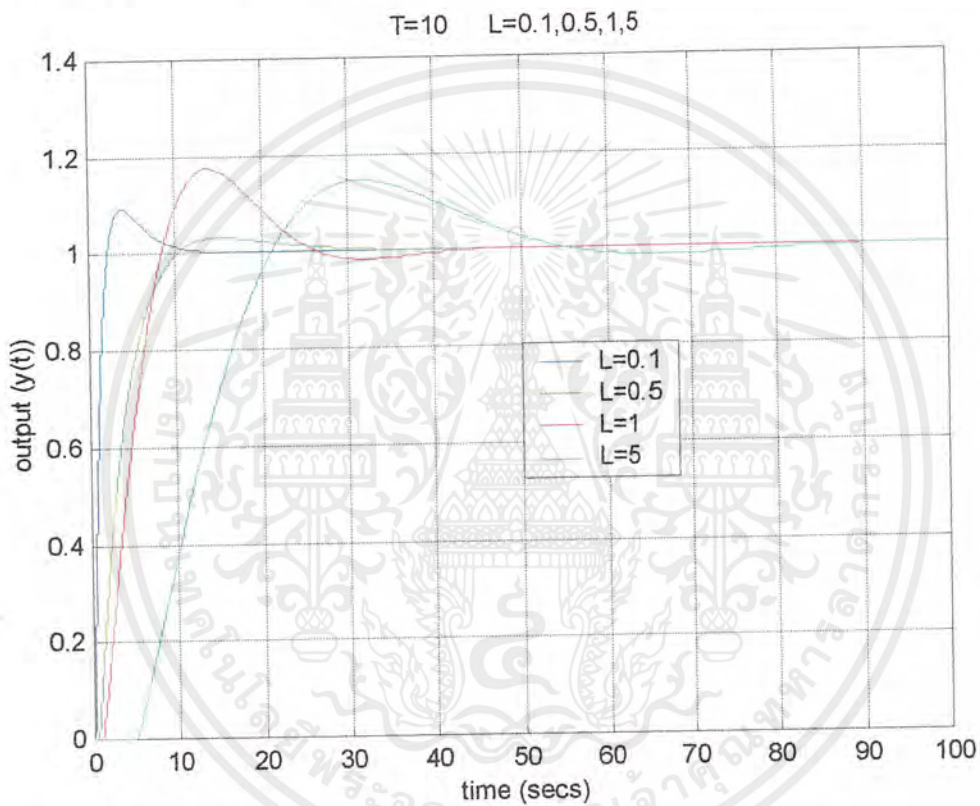
ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง 1 วินาที

$\tau$ (secs)	$K_p$	$K_i$	$M_o$ (%)	$t_r$ (secs)	$t_s$ (secs)	$e_{ss}$ %
0.1	0.3824	0.6803	3.6556	1.5000	6.2712	0
1	0.5761	0.5818	10.6561	1.8400	7.8527	0
1.25	0.6203	0.5631	11.8025	2.0040	8.4637	0
1.67	0.6869	0.5209	11.8141	2.3280	9.5827	0
2.5	0.8003	0.5070	15.2316	2.7120	11.4046	0
5	1.0838	0.4435	17.0424	3.8730	16.4928	0
10	1.5837	0.3837	17.3269	5.5950	24.5746	0

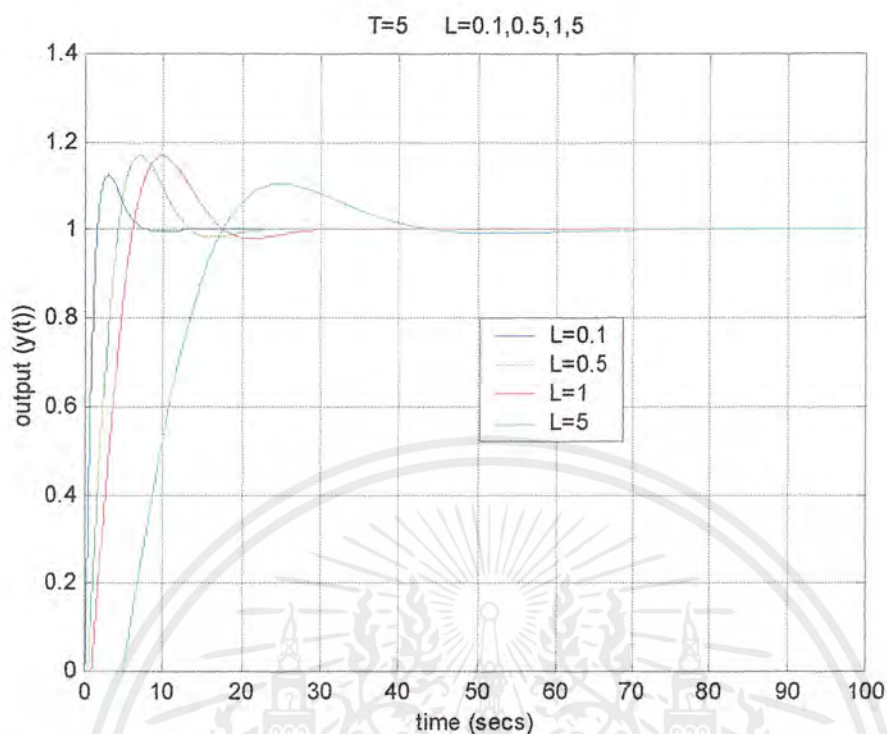
จากตาราง 4.5 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง 1 วินาที พบว่าเมื่อกระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีค่าคงตัวเวลาน้อยระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ด้วยค่าเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกิน  $M_o$  , ค่าช่วงเวลาขึ้น  $t_r$  , ค่าช่วงเวลาเข้าที่  $t_s$  ที่น้อยกว่าเมื่อกระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีค่าคงตัวเวลามาก แสดงว่าระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่จะให้สมรรถนะดีขึ้นเมื่อค่าคงตัวเวลากระบวนการแบบอันดับหนึ่งลดลง

#### 4.2.1.2 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่เวลาไ้การตอบสนองต่างกัน

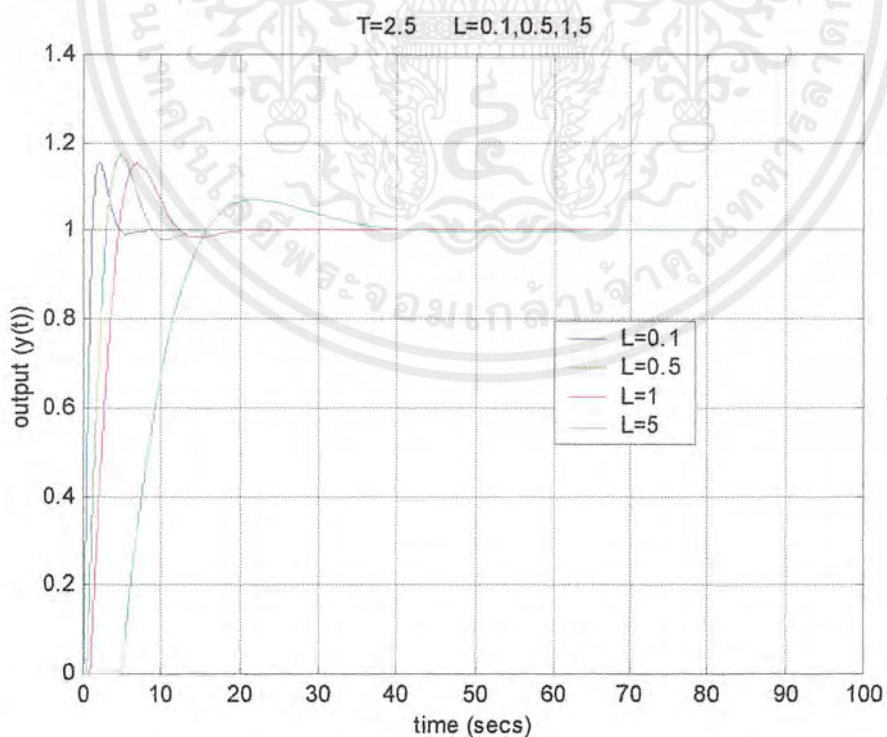
ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาที่ โดยทำการทดลองที่เวลาไ้การตอบสนองเป็น 0.1, 0.5, 1 และ 5 วินาที ตามลำดับ แสดงผลตอบสนอง ดังรูป



รูปที่ 4.22 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เวลาไ้การตอบสนองต่างกัน

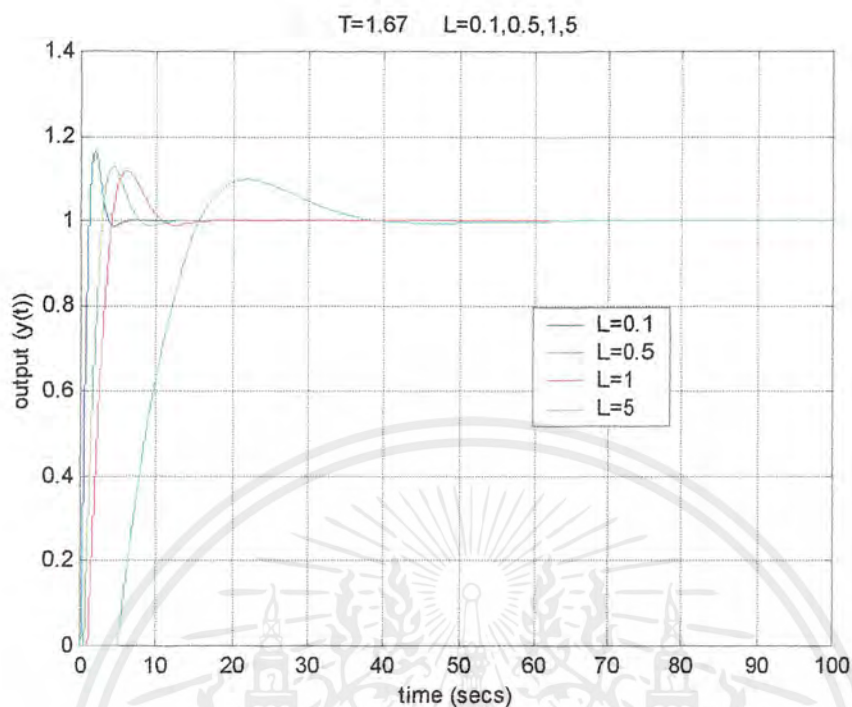


รูปที่ 4.23 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 5 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน

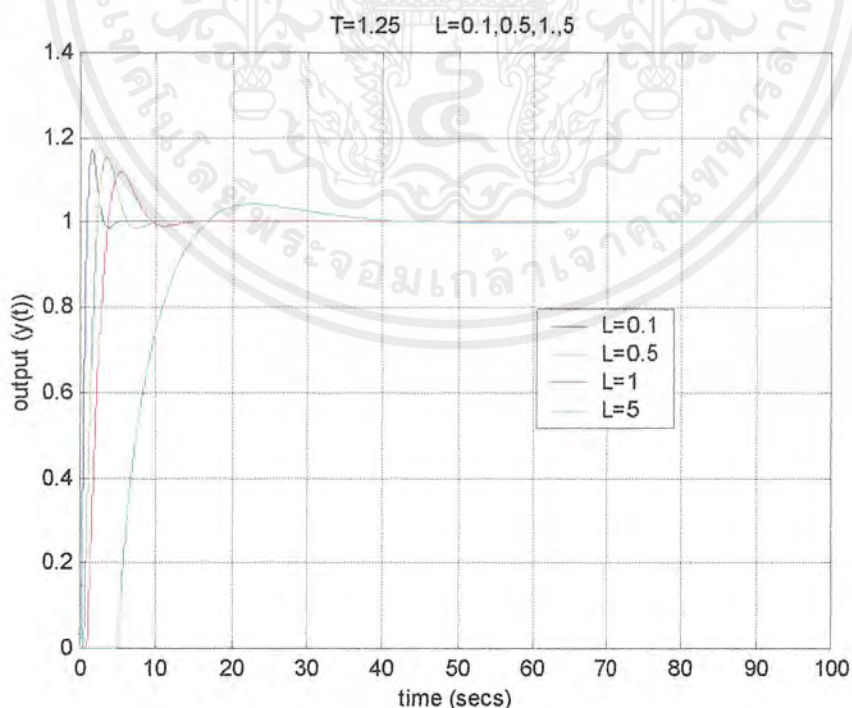


รูปที่ 4.24 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

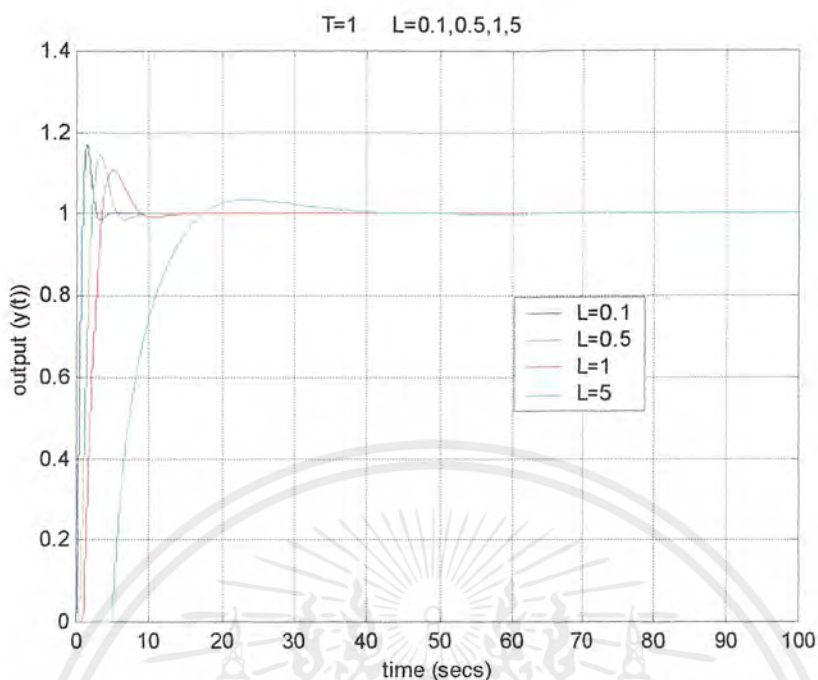


รูปที่ 4.25 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน

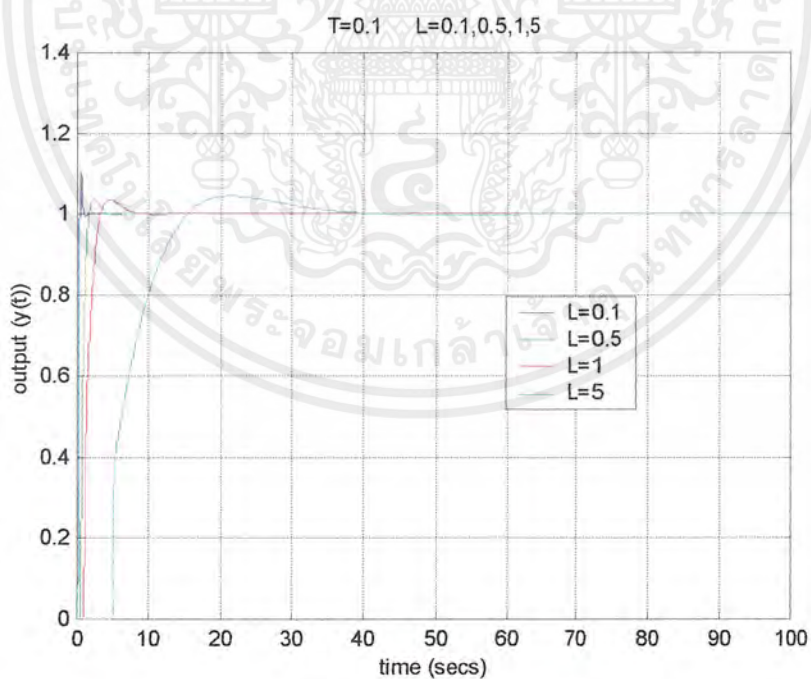


รูปที่ 4.26 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน



รูปที่ 4.28 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 - 4.28 ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาคงที่ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Refined Ziegler-Nichols สำหรับทุกค่าเวลาไร้การตอบสนองที่ทำการศึกษาคพบว่าระบบจะมีสมรรถนะที่สามารถยอมรับได้โดยไม่ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน  $M_o$  , ค่าช่วงเวลานขึ้น  $t_r$  , ค่าช่วงเวลาเข้าที่  $t_s$  และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว  $e_{ss}$  ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาคงที่ เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน

T Secs	L secs	Kp	Ki	Mo %	tp secs	tr secs	ts secs	ess %
10	0.1	10.0334	2.9313	9.3254	3.8089	1.4000	9.1019	0
	0.5	2.5375	0.3347	3.0449	15.2550	6.0280	21.3700	0
	1	1.5837	0.3837	17.3269	13.8656	5.5950	24.5746	0
	5	0.7342	0.1059	14.5600	31.5456	12.1430	51.1806	0
5	0.1	5.3547	3.0457	12.0051	2.9023	1.1180	6.1903	0
	0.5	1.5837	0.7576	16.9703	6.9766	2.8200	12.3756	0
	1	1.0838	0.4435	17.0424	9.6958	3.8730	16.4928	0
	5	0.5760	0.1159	10.4833	24.9677	9.2400	39.2897	0
2.5	0.1	3.0088	3.2876	15.5363	2.1711	0.8660	4.1631	0
	0.5	1.0837	0.8917	17.2255	4.8358	1.9290	8.2238	0
	1	0.8003	0.5070	15.2316	6.9566	2.7120	11.4046	0
	5	0.4720	0.1263	7.0586	22.0608	7.6120	33.9758	0
1.67	0.1	2.2251	3.4600	16.4165	1.8014	0.7260	3.3224	0
	0.5	0.9017	0.8759	12.7488	4.1656	1.6840	6.8946	0
	1	0.6869	0.5209	11.8141	6.0087	2.3280	9.5827	0
	5	0.4327	0.1267	4.5716	22.7721	7.6090	32.6011	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T Secs	L secs	Kp	Ki	Mo %	tp secs	tr secs	ts secs	ess %
1.25	0.1	1.8247	3.6407	16.8836	1.5602	0.6300	2.8112	0
	0.5	0.8003	1.0169	15.3474	3.4736	1.3520	5.6956	0
	1	0.6203	0.5631	11.8025	5.3317	2.0040	8.4637	0
	5	0.4129	0.1295	4.1373	22.9621	7.5330	32.1231	0
1	0.1	1.5837	3.7878	16.9696	1.3956	0.5640	2.4756	0
	0.5	0.7342	1.0591	14.5644	3.1546	1.2140	5.1186	0
	1	0.5761	0.5818	10.6561	4.9827	1.8400	7.8527	0
	5	0.4016	0.1287	3.4471	23.6611	7.7790	31.5531	0
0.1	0.1	0.5760	5.8064	10.5705	0.4987	0.1850	0.7857	0
	0.5	0.4016	1.3184	4.0301	2.2902	0.7470	3.1912	0
	1	0.3824	0.6803	3.6556	4.6122	1.500	6.2712	0
	5	0.3740	0.1476	4.5256	21.5662	6.8330	31.1382	0

จากตาราง 4.6 พบว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาคงที่ ระบบจะมีสมรรถนะที่สามารถยอมรับได้ที่ทุกค่าของเวลาไร้การตอบสนองที่เราทำการศึกษา แต่ ณ ค่าเวลาไร้การตอบสนองน้อยระบบจะเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ด้วยค่าช่วงเวลารั้ง  $t_r$  , ค่าช่วงเวลารั้งที่  $t_r$  ที่น้อยกว่า ณ.เวลาไร้การตอบสนองมาก

#### 4.2.2 ผลตอบสนองของระบบ PID แบบ Watanabe

ในทำนองเดียวกัน ศึกษาผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยกฎการปรับแต่งของ Ziegler-Nichols วิธีที่ 1 (the first method of Ziegler-Nichols rules) คือ

$$K_p = \frac{1.2\tau}{L}$$

$$T_i = 2L$$

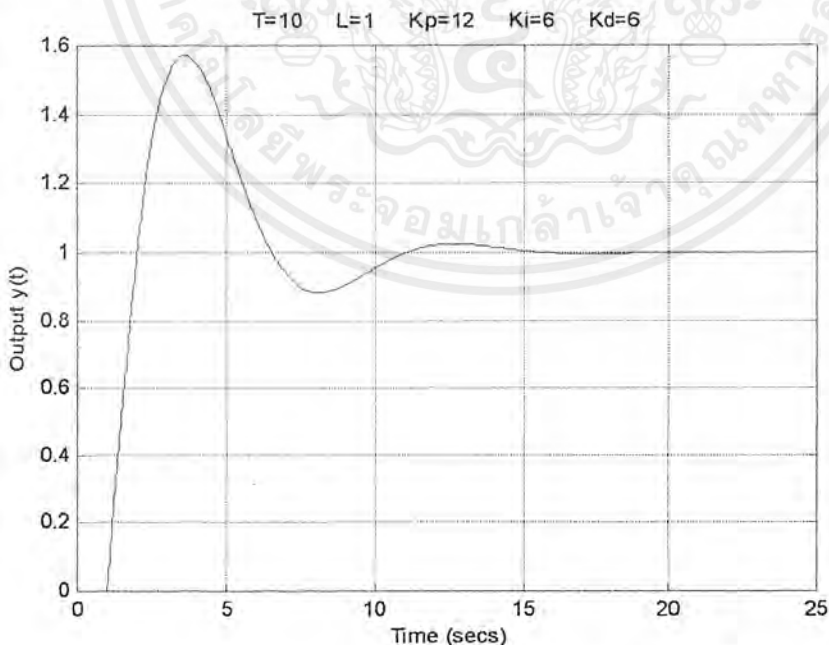
$$T_d = \frac{L}{2}$$

โดยที่

$L$  เป็นเวลาไ้การตอบสนอง

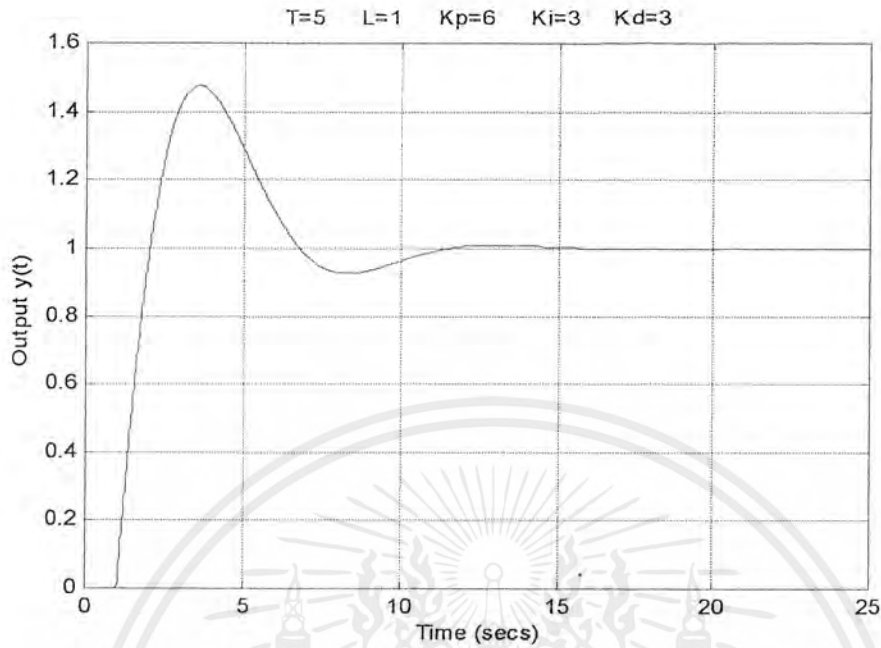
##### 4.2.2.1 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนองคงที่

ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนองคงที่ 1 วินาที โดยทำการทดลองที่ค่าคงตัวเวลา 10, 5, 2.5, 1.67, 1.25, 1 และ 0.1 วินาที ตามลำดับ แสดงผลตอบสนอง ดังรูป

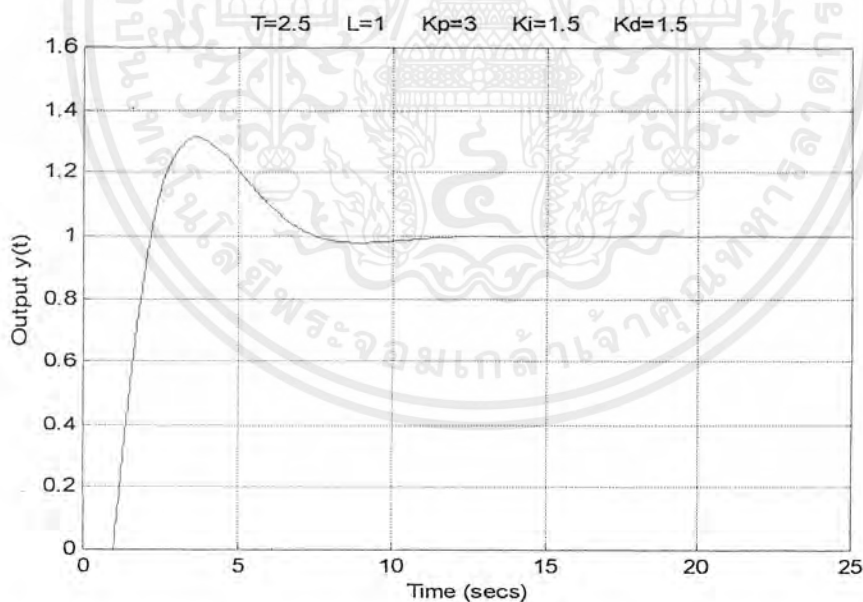


รูปที่ 4.29 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

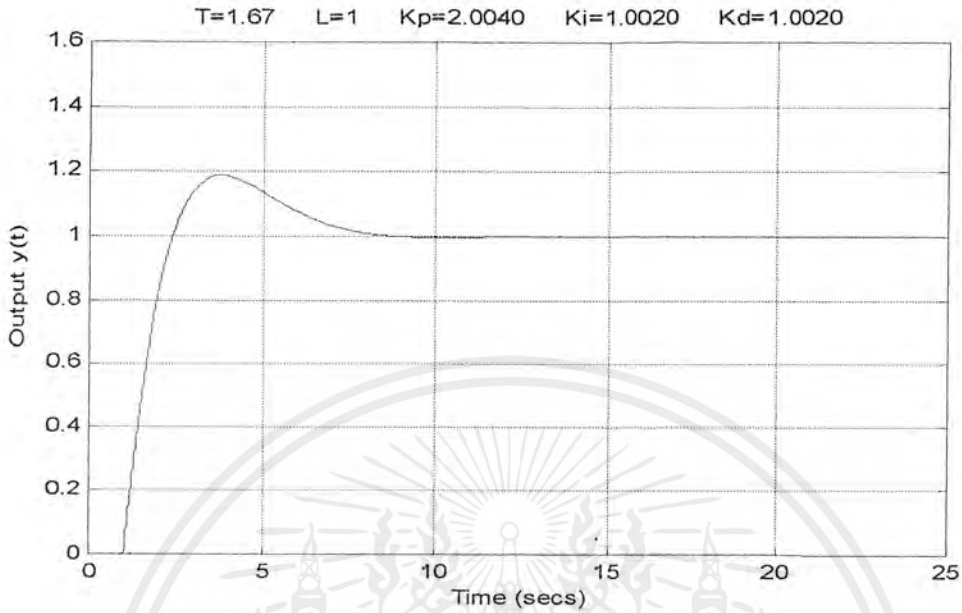


รูปที่ 4.30 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watana ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 5 วินาที

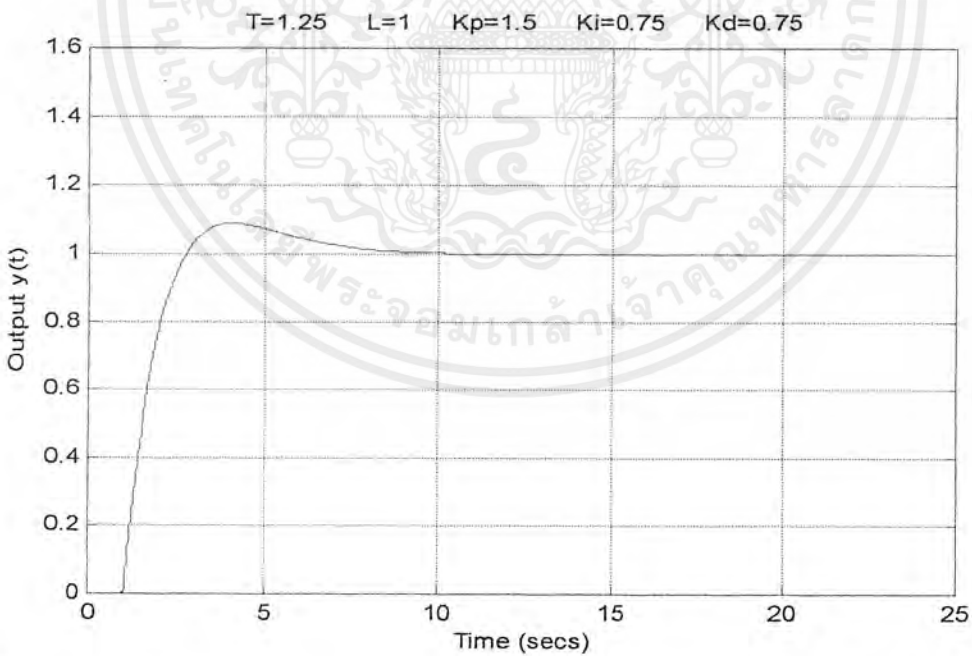


รูปที่ 4.31 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

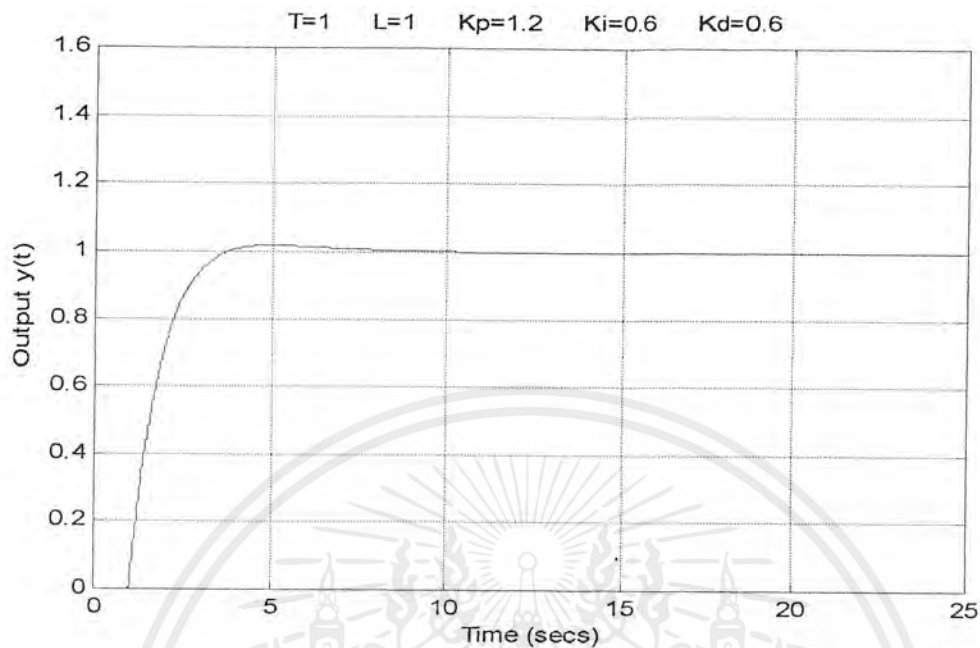


รูปที่ 4.32 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที

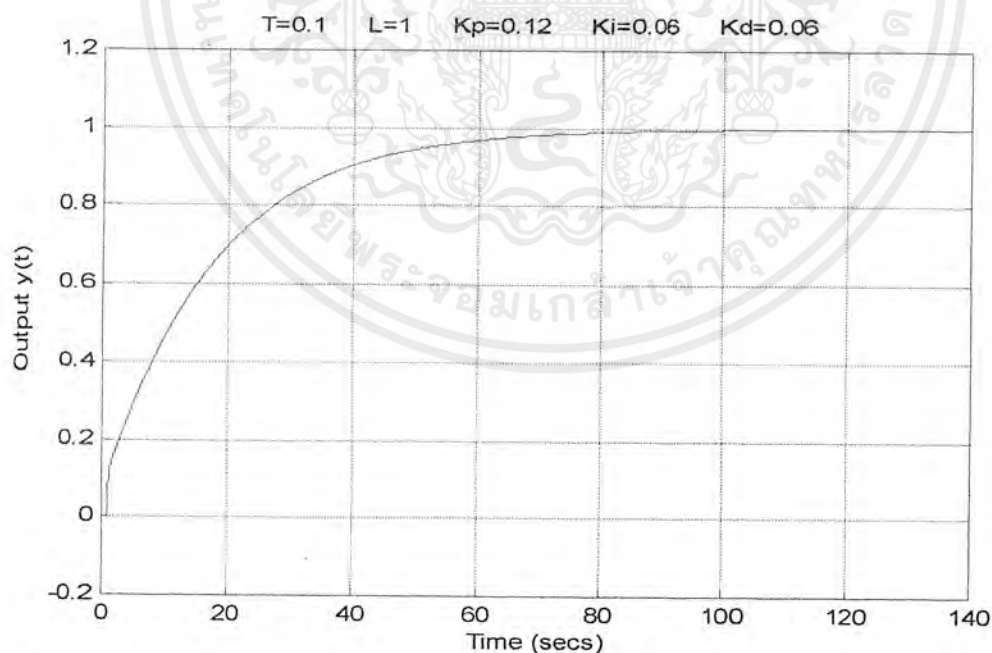


รูปที่ 4.33 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที



รูปที่ 4.35 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง 1 วินาที โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยกฎการปรับแต่งของ Ziegler-Nichols วิธีที่ 1 กระบวนการที่เป็นอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลามากและน้อยเกินไป สมรรถนะของระบบไม่สามารถยอมรับได้ ดังแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน  $M_o$ , ค่าช่วงเวลารั้ง  $t_r$ , ค่าช่วงเวลารั้ง  $t_s$  และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว  $e_{ss}$  ในตารางที่ 4.7

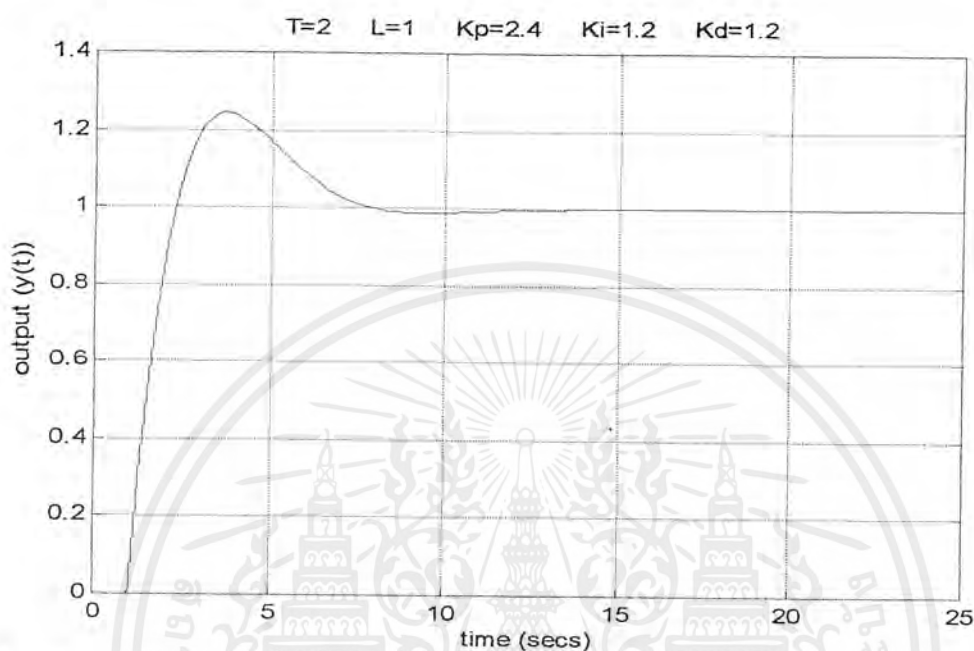
ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง 1 วินาที

$\tau$ (secs)	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$M_o$ (%)	$t_r$ (secs)	$t_s$ (secs)	$e_{ss}$ (%)
0.1	0.12	0.06	0.06	[ ]	38.26	67.7136	0
1	1.2	0.6	0.6	1.7881	1.5760	3.3641	0
1.25	1.5	0.75	0.75	8.8470	1.2530	7.4347	0
1.67	2.0040	1.0020	1.0020	18.7556	1.0540	7.4627	0
2.5	3	1.5	1.5	31.3706	0.9210	9.5871	0
5	6	3	3	47.5465	0.8210	10.5705	0
10	12	6	6	57.2814	0.78	13.4814	0

จากตาราง 4.7 พบว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง 1 วินาที ที่ค่าคงตัวเวลามาก สมรรถนะของระบบยังไม่สามารถยอมรับได้ แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าคงตัวเวลาน้อยลง พบว่าสมรรถนะของระบบสามารถยอมรับได้มากขึ้นตามลำดับ จนกระทั่งค่าคงตัวเวลาลดลงมาถึงค่าหนึ่ง สมรรถนะของระบบจะไม่สามารถยอมรับได้อีกครั้งหนึ่ง เป็นที่สังเกตได้ว่าจะมีค่าคงตัวเวลาเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้นที่สมรรถนะของระบบเป็นที่ยอมรับได้ เราจึงทำการศึกษาถึงช่วงของค่าคงตัวเวลาดังกล่าวนั้น

เมื่อทำการพิจารณาสมรรถนะของระบบที่สามารถยอมรับได้นั้นคือ ค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน  $M_o$  ไม่เกิน 25% และค่าช่วงเวลารั้ง  $t_s$  อยู่ภายใน 2% criterion พบว่าช่วงของค่าคงตัวเวลาที่ทำให้สมรรถนะของระบบเป็นที่สามารถยอมรับได้ดังกล่าวมีค่า อยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 วินาที

ในที่นี่จะแสดงผลตอบสนองและสมรรถนะของระบบที่ค่าคงตัวเวลาเป็น 2 วินาที ดังรูปที่ 4.36 และตารางที่ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.36 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2 วินาที

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้การตอบสนอง 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 2 วินาที

$\tau$ (secs)	Dead time (secs)	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$M_o$ (%)	$t_r$ (secs)	$t_s$ (secs)	$e_{ss}$ (%)
2	1	2.4	1.2	1.2	24.6473	0.9820	7.2737	0

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของระบบที่ค่าคงตัวเวลามากกว่า 2 วินาที พบว่า ระบบจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน  $M_o$  ที่สูงเกินไปจึงต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่ เพื่อให้ได้สมรรถนะเป็นที่ยอมรับได้ หรือทำการเพิ่มพรีฟิลเตอร์เข้าไปก็จะช่วยลดค่าพุ่งเกินได้เช่นเดียวกัน ดังจะได้นำเสนอในหัวข้อ 4.2.4

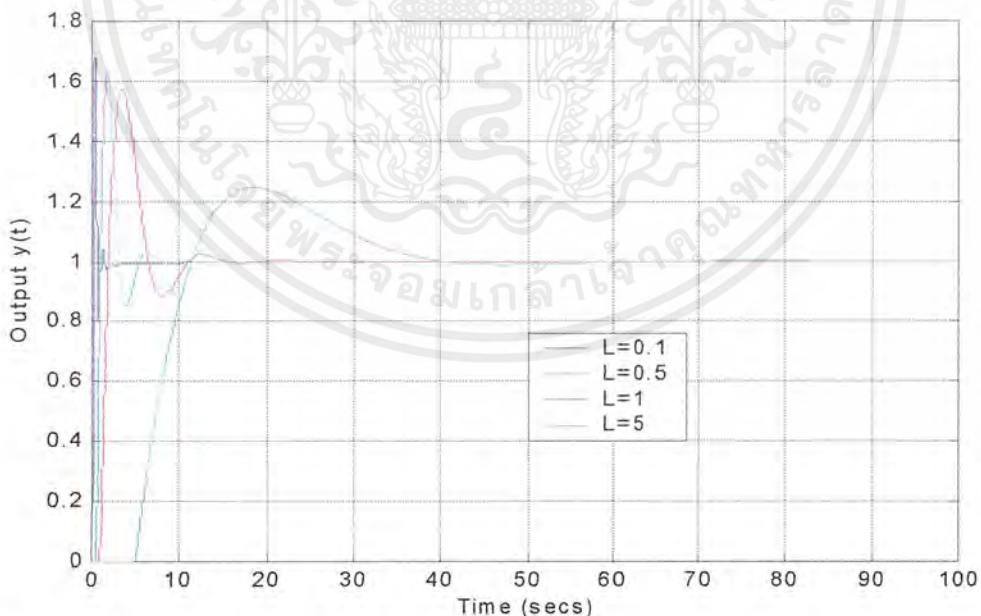
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผลตอบสนองของระบบที่ค่าคงตัวเวลาน้อยกว่า 1 วินาที พบว่า ระบบจะมี settling time ที่มากเกินไป ดังนั้น Ziegler-Nichols 1<sup>st</sup> นี้จะไม่เหมาะสมสำหรับค่าคงตัวเวลาที่น้อยเกินไปกล่าวคือ  $L/\tau > 1$

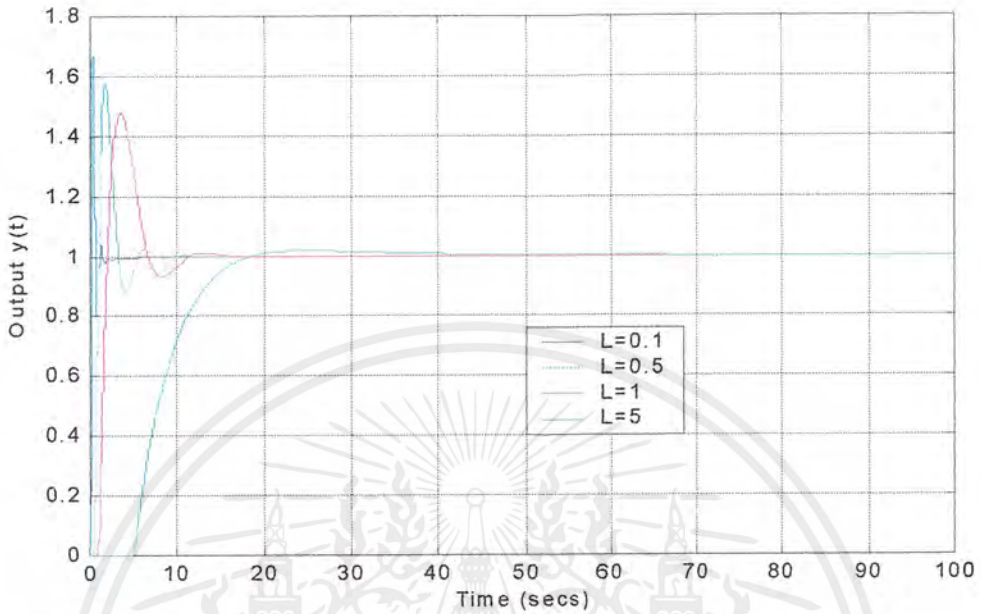
จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นนี้ จะพบว่าสอดคล้องกับหลักการของ Ziegler-Nichols Step Response Method ที่มีข้อกำหนดว่าจะสามารถใช้ Ziegler-Nichols rule ได้ก็ต่อเมื่อ  $0.1 < L/\tau < 1$  ถ้า  $L/\tau$  มากเกินไปกว่าช่วงนี้จะเป็นข้อเสียเปรียบที่จะใช้ control law นี้ในการชดเชยค่าเวลาไร้การตอบสนอง แต่ถ้า  $L/\tau$  น้อยกว่าช่วงนี้ จะต้องมีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบใหม่ด้วย higher-order compensator หรือสามารถใช้อุปกรณ์การปรับแต่งอื่นๆ ที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นก็ได้

#### 4.2.2.2 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน

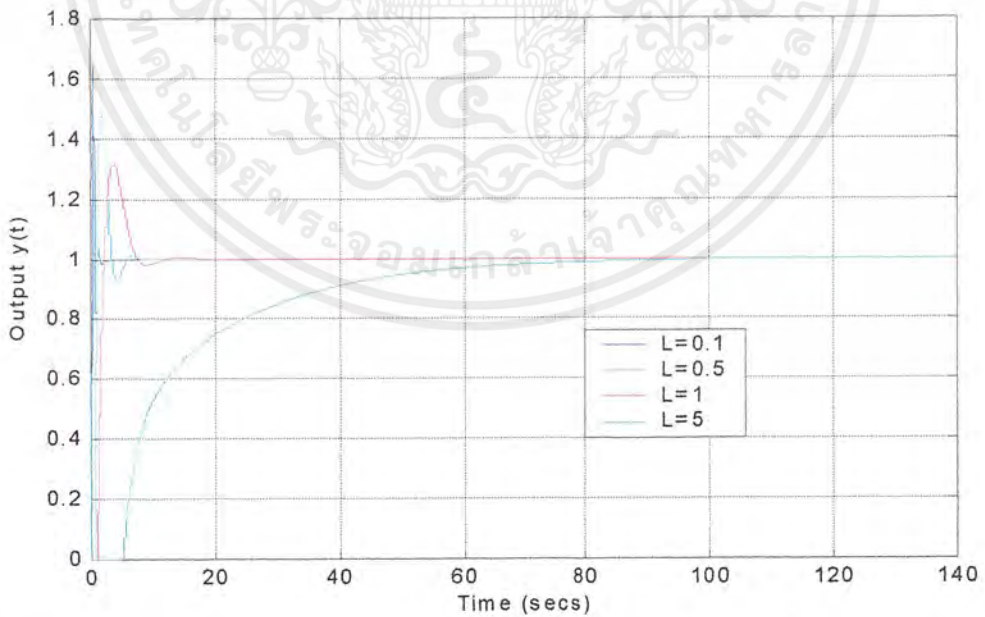
ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาคงที่ โดยทำการทดลองที่เวลาไร้การตอบสนองเป็น 0.1, 0.5, 1 และ 5 วินาที ตามลำดับ แสดงผลตอบสนอง ดังรูป



รูปที่ 4.37 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน

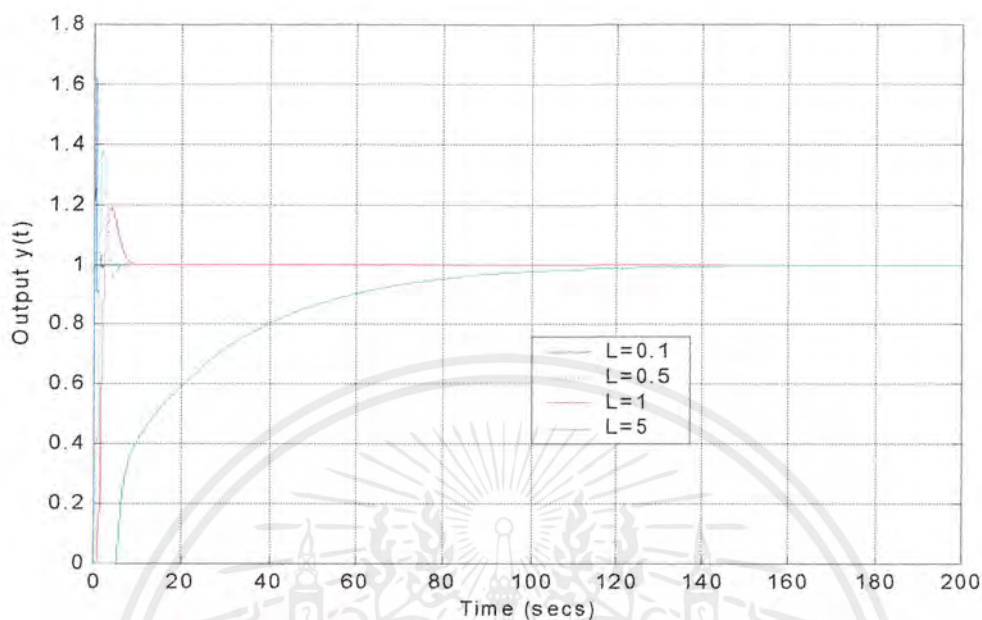


รูปที่ 4.38 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 5 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน

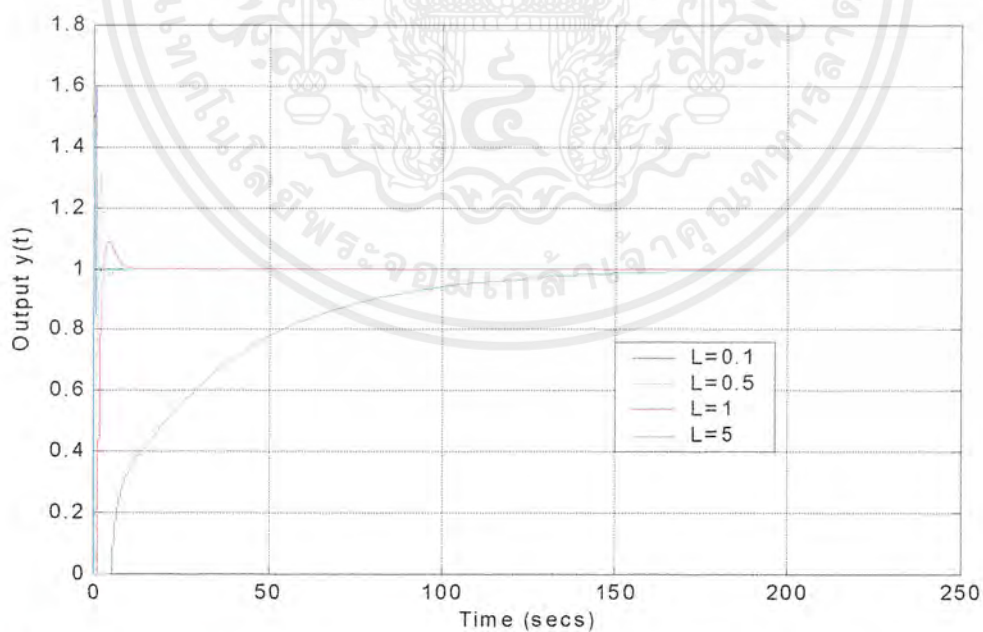


รูปที่ 4.39 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

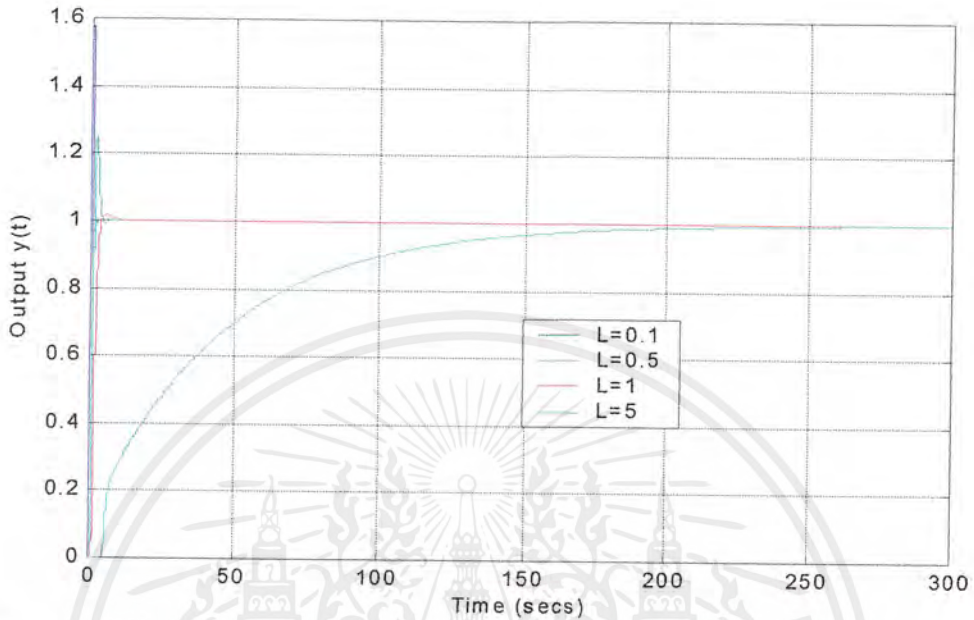


รูปที่ 4.40 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน

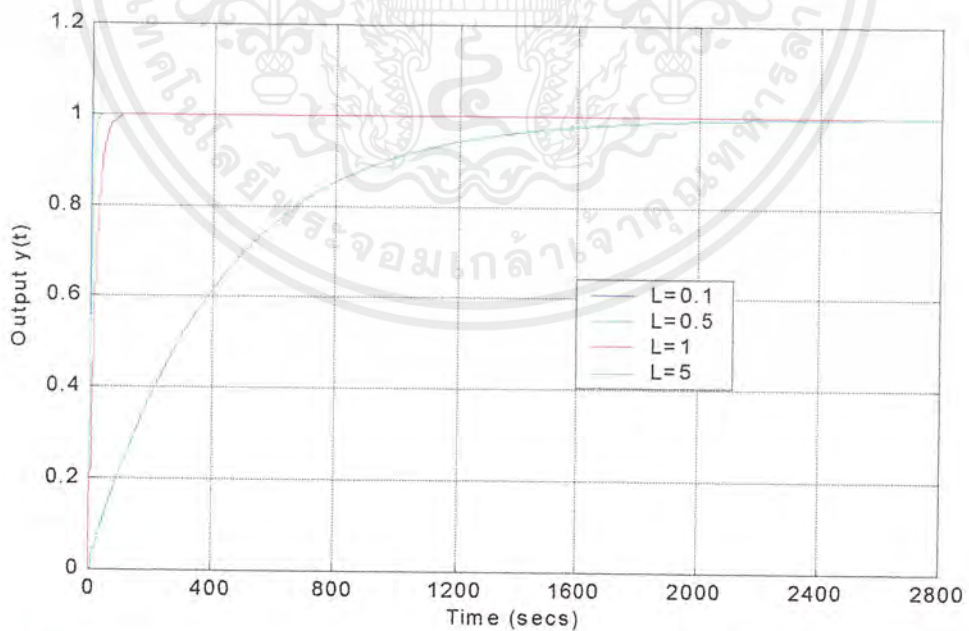


รูปที่ 4.41 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที เวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน



รูปที่ 4.43 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.37 – 4.43 ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยกฎการปรับแต่งของ Ziegler-Nichols วิธีที่ 1 กระบวนการที่เป็นอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้การตอบสนองมากเกินไป สมรรถนะของระบบจะลดลง ดังแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกิน  $M_o$ , ค่าช่วงเวลาขึ้น  $t_r$ , ค่าช่วงเวลาเข้าที่  $t_s$  และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว  $e_{ss}$  ในตารางที่ 4.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาคงที่ เวลาไร้การตอบสนองเป็น 0.1, 0.5, 1 และ 5 วินาที

$\tau$ (secs)	$L$ (secs)	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$M_o$ (%)	$t_r$ (secs)	$t_r$ (secs)	$e_{ss}$ (%)
0.1	0.1	1.2	6	0.06	1.7836	0.1580	0.3371	0
	0.5	0.24	0.24	0.06	[ ]	9.4450	17.3645	0
	1	0.12	0.06	0.06	[ ]	38.26	67.7136	0
	5	0.024	0.0024	0.06	[ ]	926.2	1650	0
1	0.1	12	60	0.6	57.3381	0.0770	1.3474	0
	0.5	2.4	2.4	0.6	24.6497	0.49	3.6367	0
	1	1.2	0.6	0.6	1.7781	5.0011	3.3641	0
	5	0.24	0.024	0.6	[ ]	94.4530	173.635	0
1.25	0.1	15	75	0.75	59.4411	0.0770	1.3713	0
	0.5	3	3	0.75	31.3715	0.46	4.7951	0
	1	1.5	0.75	0.75	8.8470	1.2530	7.4347	0
	5	0.3	0.03	0.75	[ ]	74.67	140.071	0
1.67	0.1	20.04	100.2	1.002	61.6133	0.077	1.3854	0
	0.5	4.008	4.008	1.002	39.0149	0.4340	5.1914	0
	1	2.0040	1.002	1.002	18.7556	1.0540	7.4627	0
	5	0.4008	0.0401	1.002	[ ]	54.2980	105.628	0
2.5	0.1	30	0150	1.5	63.8193	0.0760	1.3984	0
	0.5	6	6	1.5	47.5513	0.4110	5.2855	0
	1	3	1.5	1.5	31.3706	0.9210	9.5871	0
	5	0.6	0.06	1.5	[ ]	32.7670	69.6637	0
5	0.1	60	300	3	66.0994	0.075	1.4074	0
	0.5	12	12	3	57.2878	0.39	6.7404	0
	1	6	3	3	47.5465	0.8210	10.5705	0
	5	1.2	0.12	3	1.7887	7.8790	16.8211	0
10	0.1	120	600	6	67.2616	0.0750	1.4089	0
	0.5	24	24	6	62.6487	0.38	6.9707	0
	1	12	6	6	57.2814	0.78	13.4814	0
	5	2.4	0.24	6	24.6454	4.9100	36.3717	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.9 เห็นว่าระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยกฎการปรับแต่งของ Ziegler-Nichols วิธีที่ 1 เมื่อกระบวนการมีเวลาไถ่การตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงไป ระบบจะมีลตอบสนองที่สามารถยอมรับได้ เมื่อ  $0.1 < L/\tau < 1$  เช่นเดียวกับกับหัวข้อ 4.2.2.1



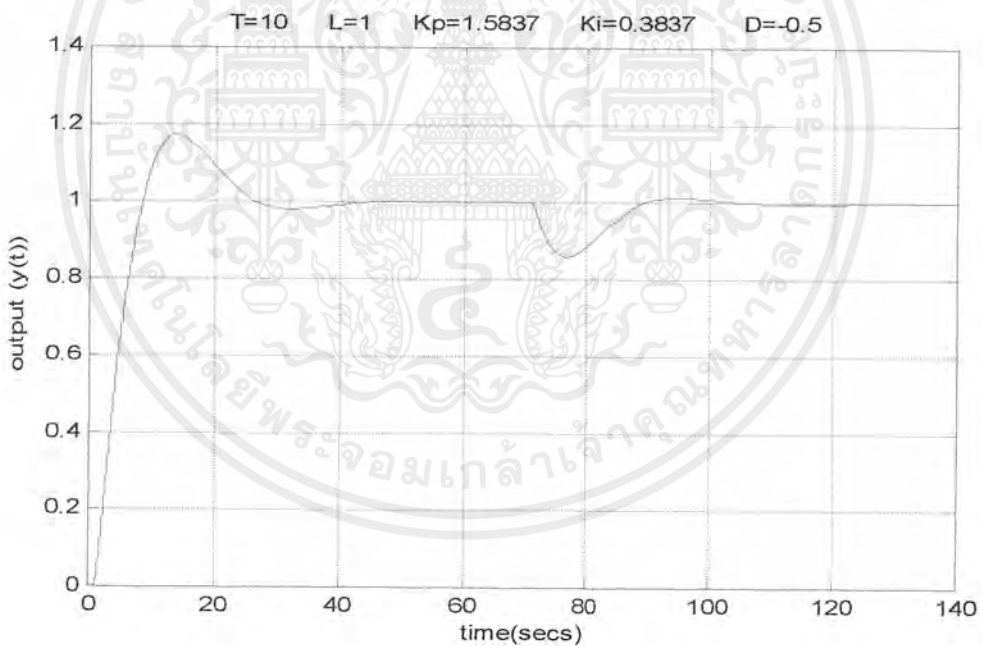
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ผลตอบสนองของระบบ PI แบบ Watanabe เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก

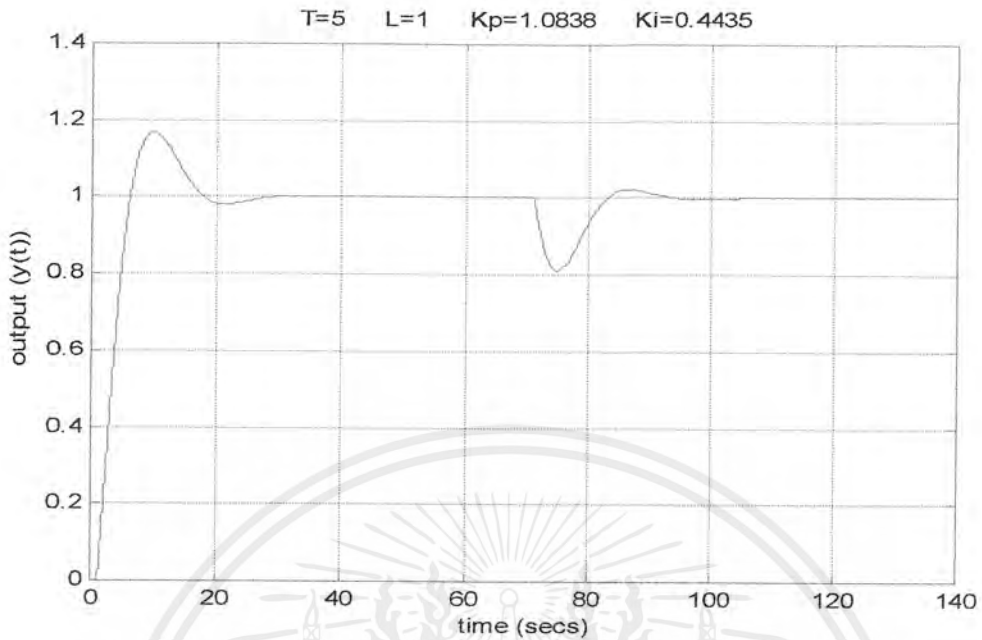
ในส่วนนี้ ทำการศึกษาผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Refined Ziegler-Nichols เหมือนหัวข้อ 4.2.1

##### 4.2.3.1 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่

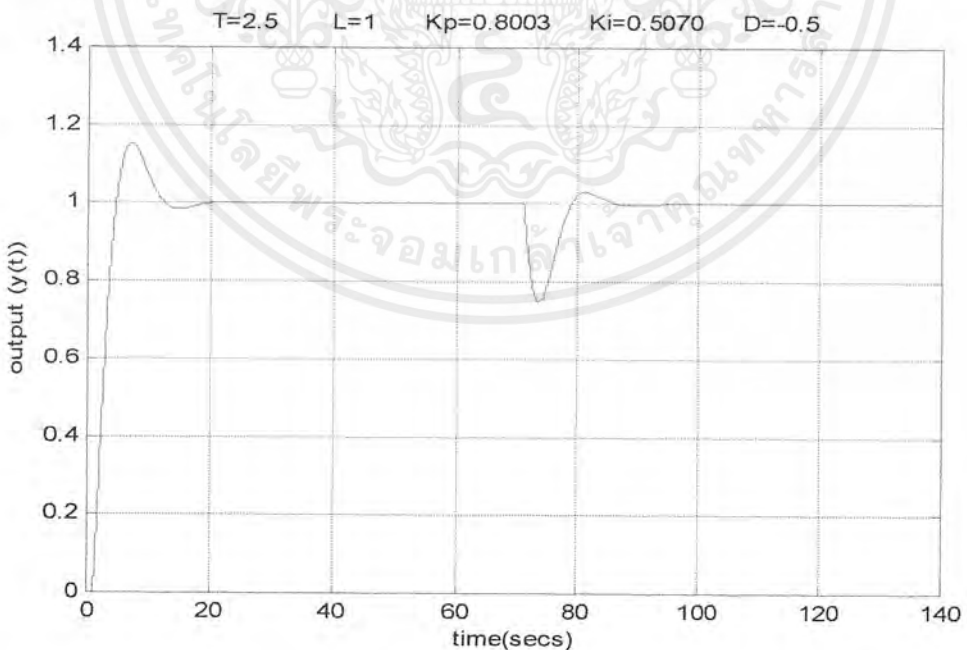
ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต โดยทำการทดลองที่ค่าคงตัวเวลา 10, 5, 2.5, 1.67, 1.25, 1 และ 0.1 วินาที ตามลำดับ แสดงผลตอบสนองดังรูป



รูปที่ 4.44 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต

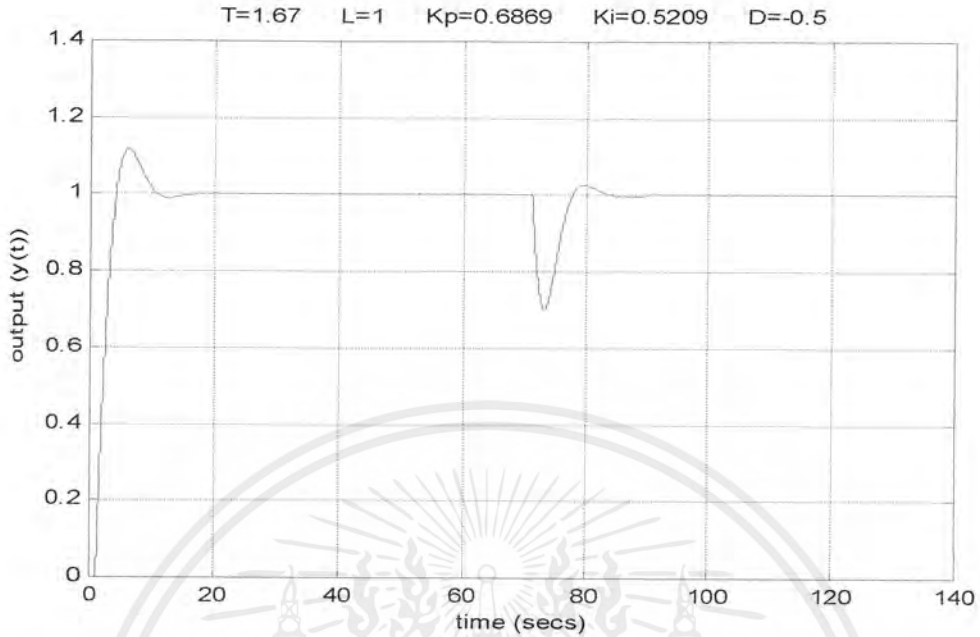


รูปที่ 4.45 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 5 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต

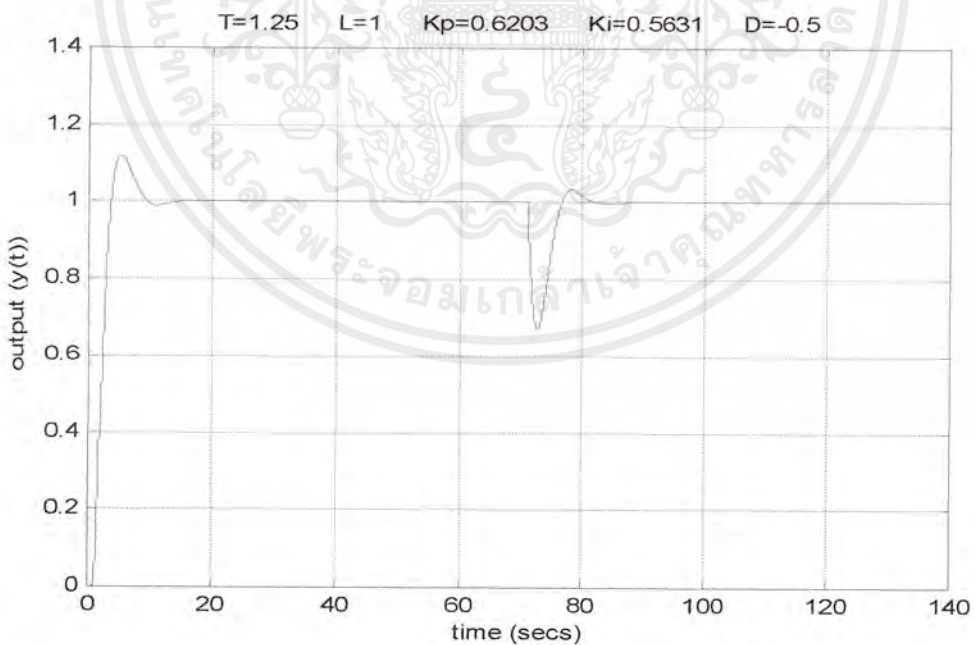


รูปที่ 4.46 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

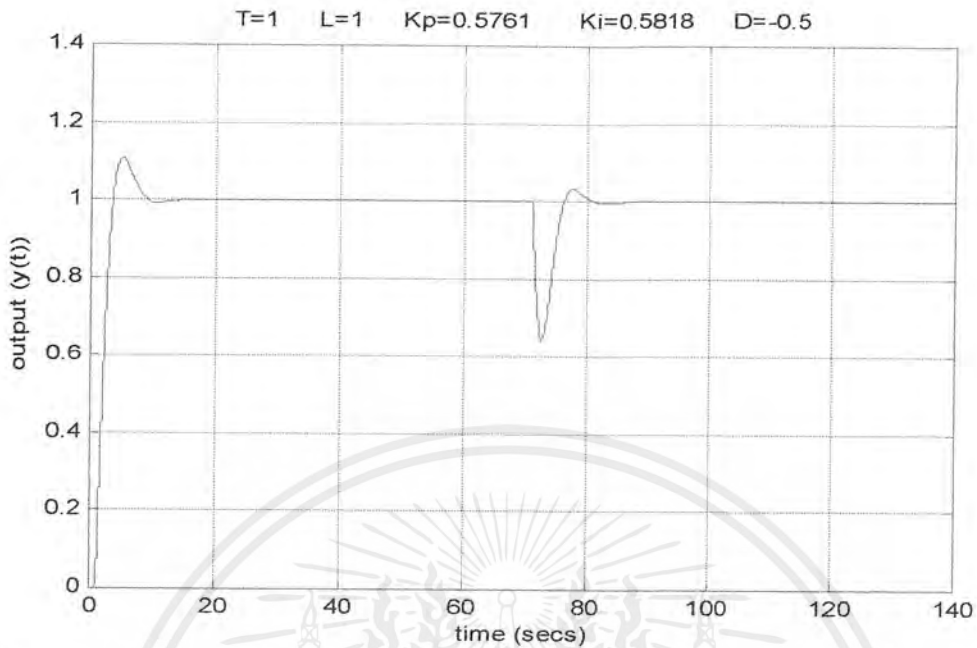


รูปที่ 4.47 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต

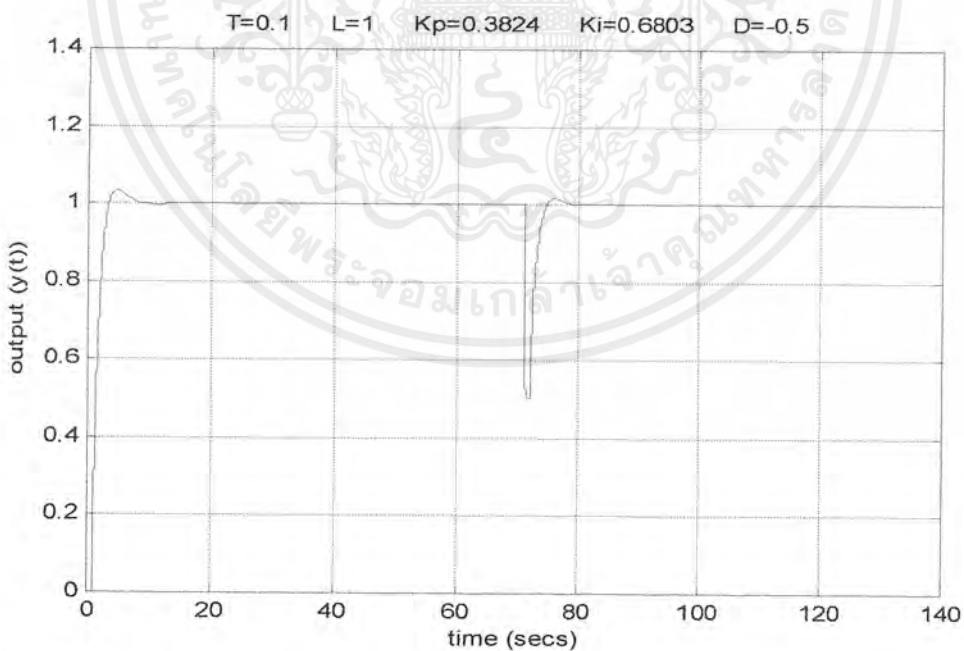


รูปที่ 4.48 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 1 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุท



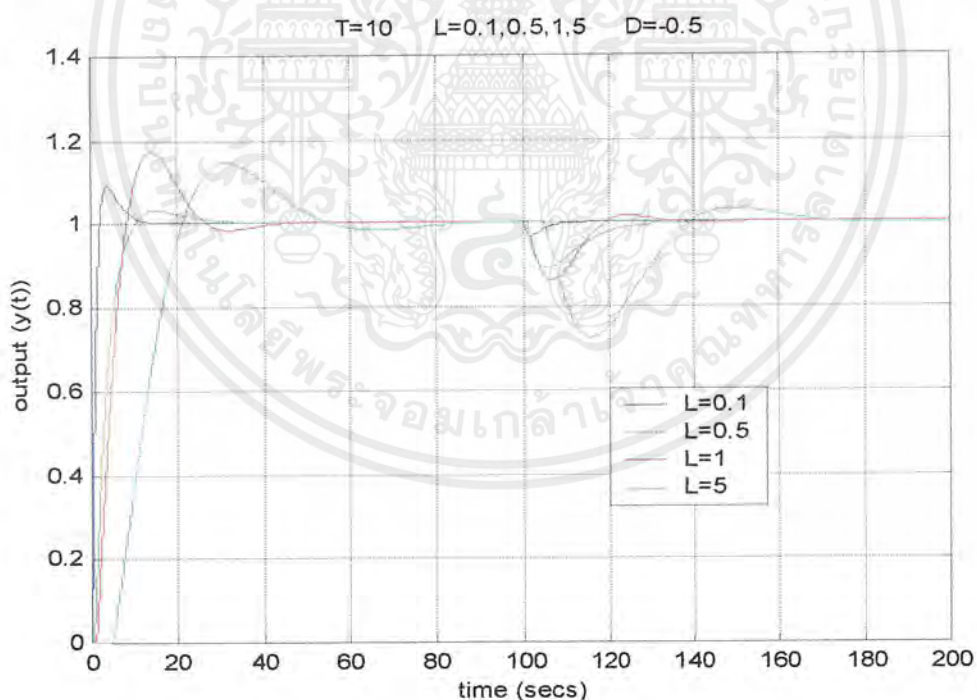
รูปที่ 4.50 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.44 ถึง 4.50 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไครการตอบสนองคงที่ 1 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต พบว่าเมื่อค่าคงตัวเวลาลดลง ตัวรบกวนจะมีผลต่อสมรรถนะระบบเป็นอย่างมาก โดยที่ในช่วงสถานะอยู่ตัว ระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาน้อยจะให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ช้ากว่า ระบบจะมีสมรรถนะลดลงเมื่อกระบวนการมีค่าคงตัวเวลาลดลง ณ เวลาไครการตอบสนองคงที่ค่าหนึ่ง แสดงว่า ค่าคงตัวเวลามีผลต่อการกลับเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงเช่นเดียวกับค่าเวลาไครการตอบสนอง

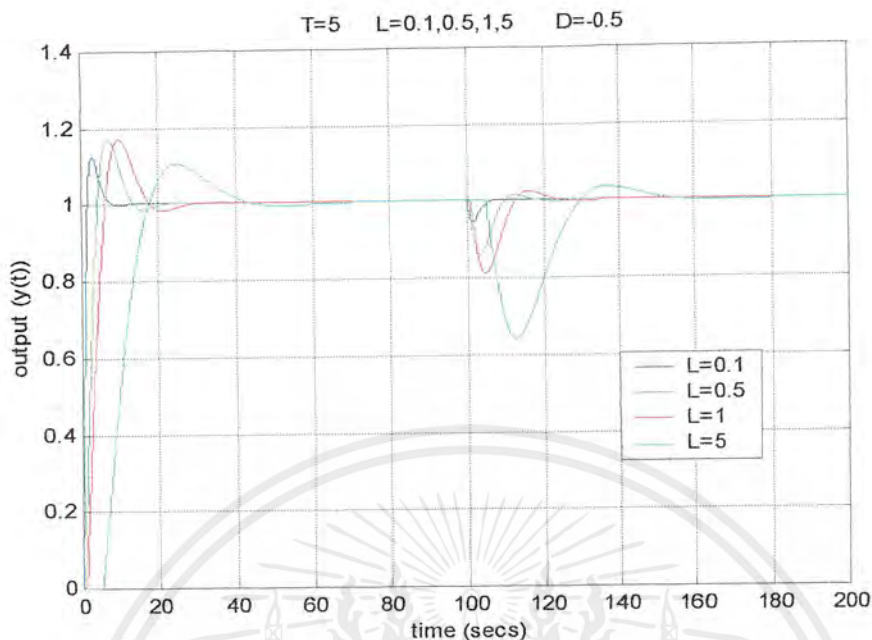
#### 4.2.3.2 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไครการตอบสนองต่างกัน

ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาคงที่ เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต โดยทำการทดลองที่เวลาไครการตอบสนองเป็น 0.1, 0.5, 1 และ 5 วินาที ตามลำดับ แสดงผลตอบสนอง ดังรูป

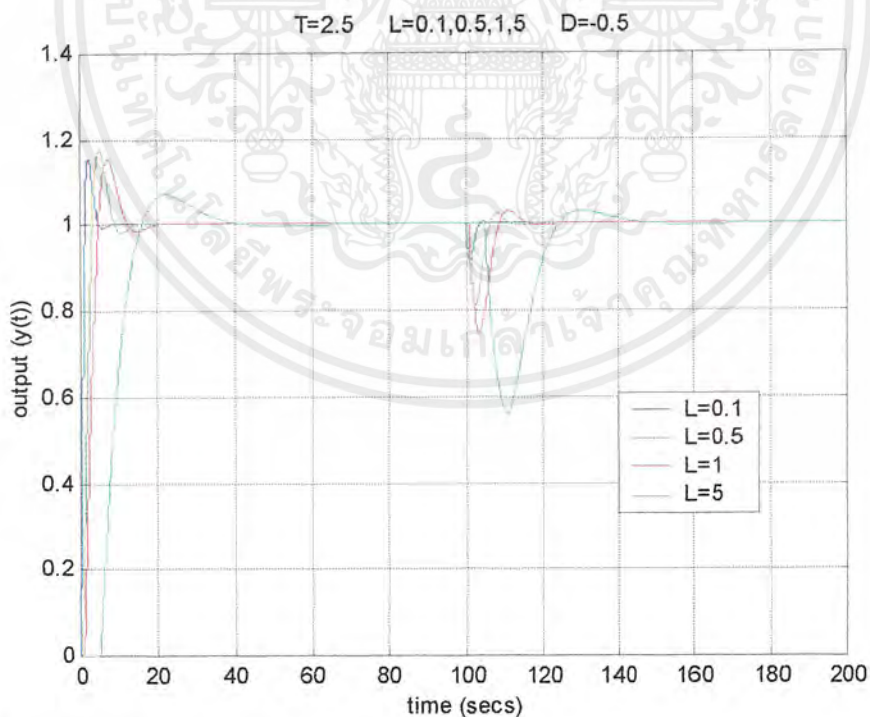


รูปที่ 4.51 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เวลาไครการตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

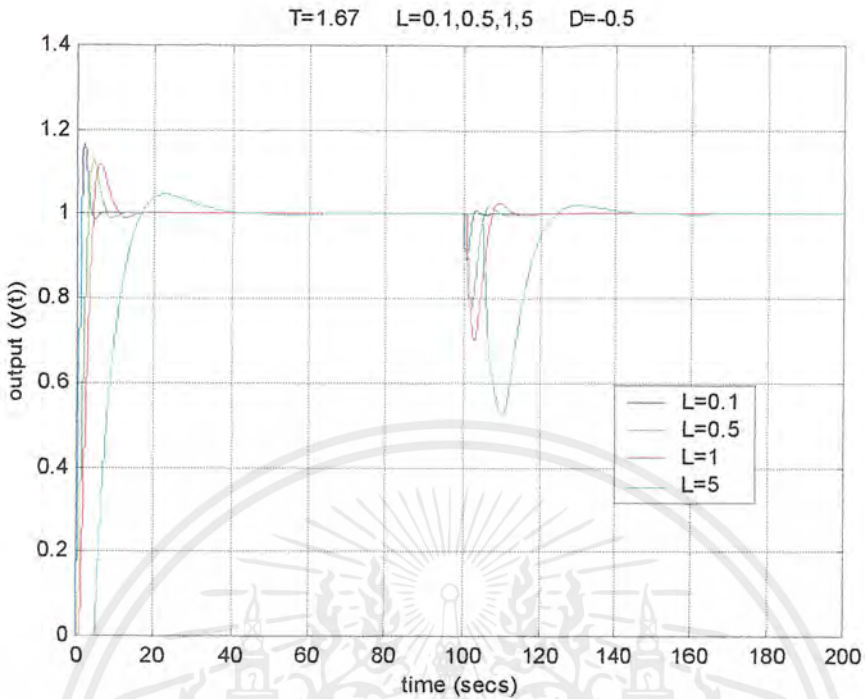


รูปที่ 4.52 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 5 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน

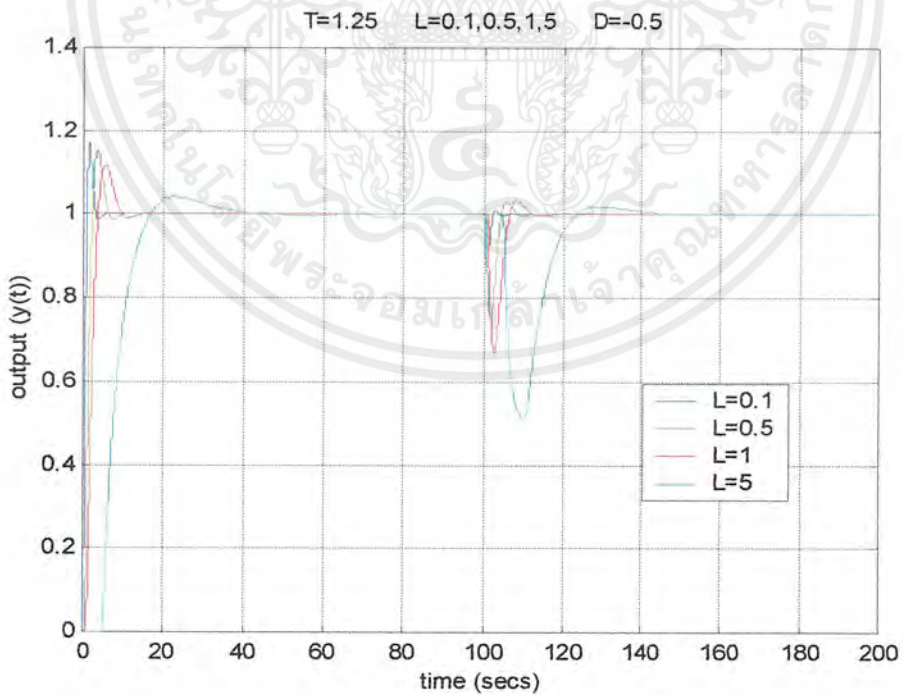


รูปที่ 4.53 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกัน เมื่อมีผลของตัวรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

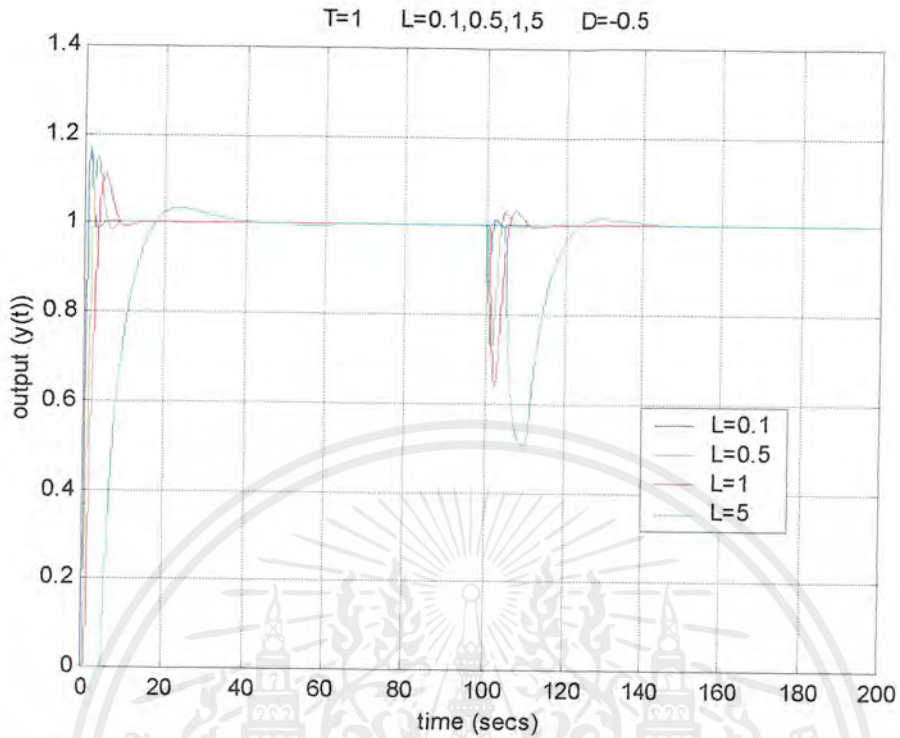


รูปที่ 4.54 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกันเมื่อมีผลของตัวรบกวน

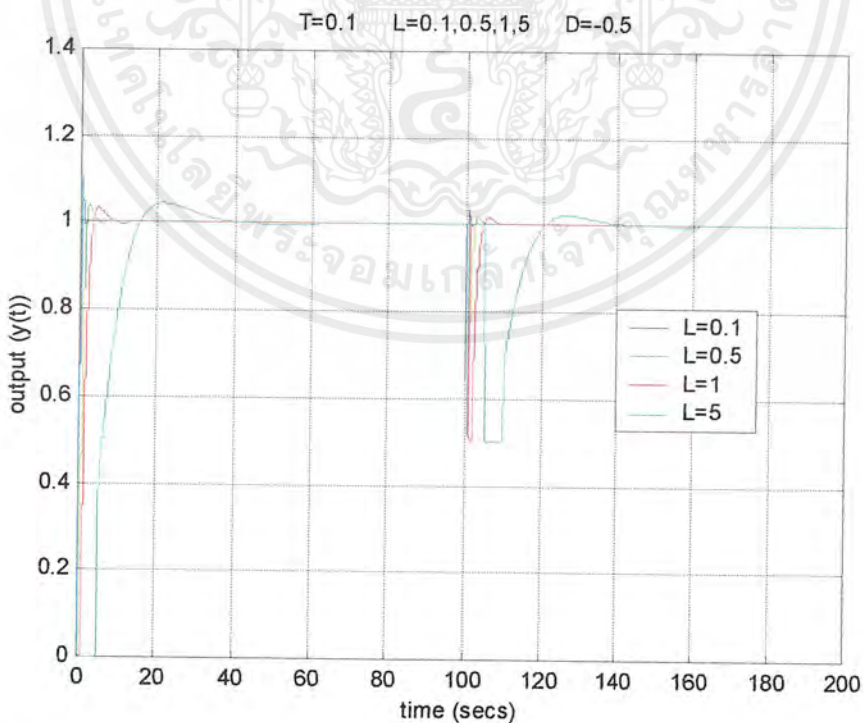


รูปที่ 4.55 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกันเมื่อมีผลของตัวรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.56 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกันเมื่อมีผลของตัวรบกวน



รูปที่ 4.57 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับ

หนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกันเมื่อมีผลของตัวรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.51 ถึง 4.57 พบว่าระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาที่ค่า เวลาไ้การตอบสนอง 0.1, 0.5, 1 และ 5 วินาที เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก เมื่อเวลาไ้การตอบสนองยาวนานขึ้น ในช่วงสถานะอยู่ตัว ระบบควบคุมแบบ Watanabe จะให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สัจญญานอ้างอิงได้ช้า นั่นคือ ระบบจะมีสมรรถนะลดลงเมื่อเวลาไ้การตอบสนองยาวนานขึ้น



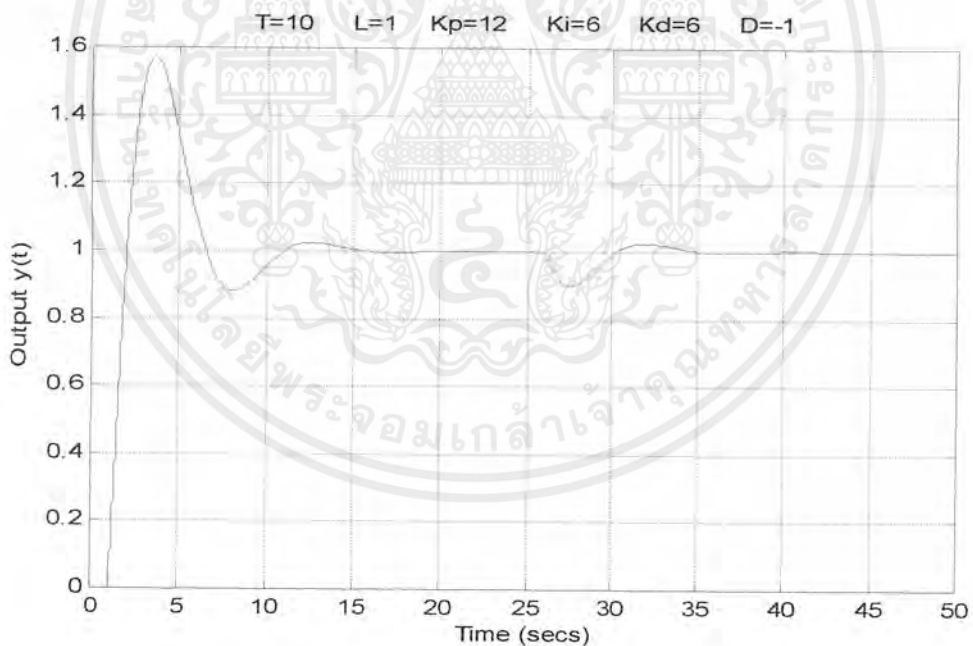
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 ผลตอบสนองของระบบ PID แบบ Watanabe เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก

ในส่วนนี้ ทำการศึกษาผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยกฎการปรับแต่งของ Ziegler-Nichols วิธีที่ 1 เหมือนหัวข้อ 4.2.2

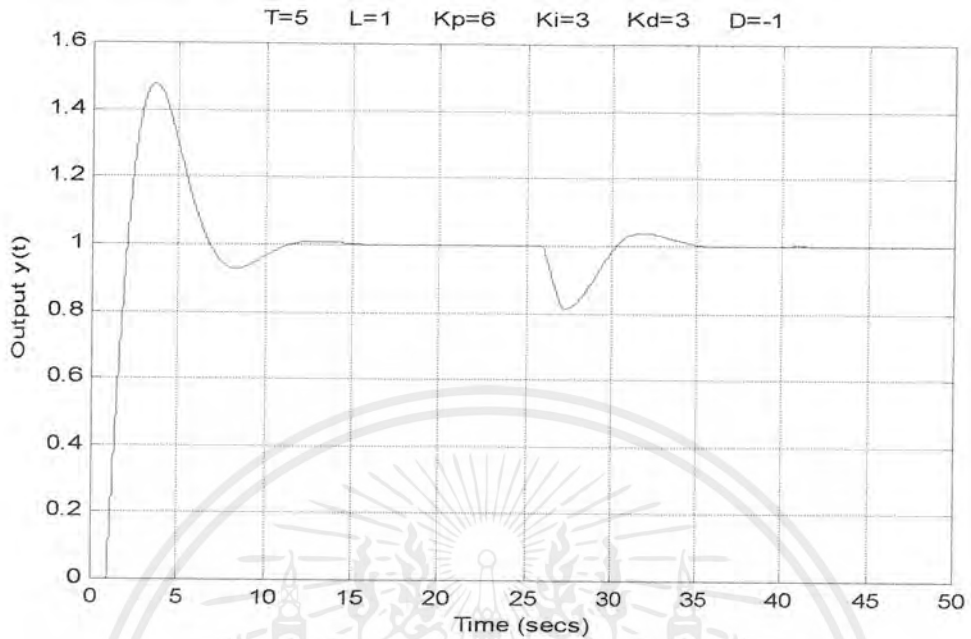
##### 4.2.4.1 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่

ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุท โดยทำการทดลองที่ค่าคงตัวเวลา 10, 5, 2.5, 1.67, 1.25, 1 และ 0.1 วินาที ตามลำดับ แสดงผลตอบสนองดังรูป

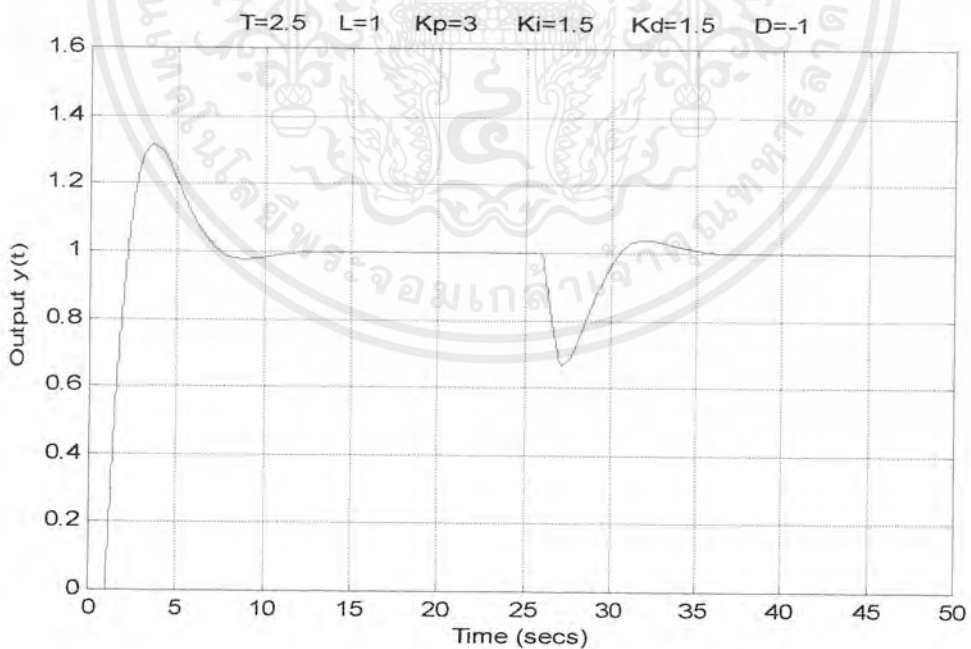


รูปที่ 4.58 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

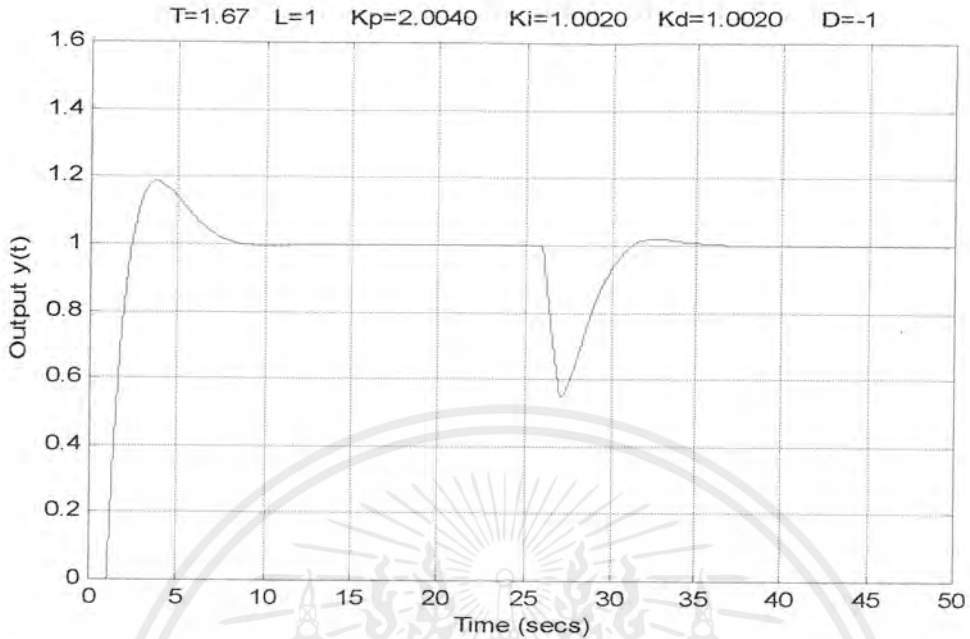


รูปที่ 4.59 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 5 วินาที และมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต

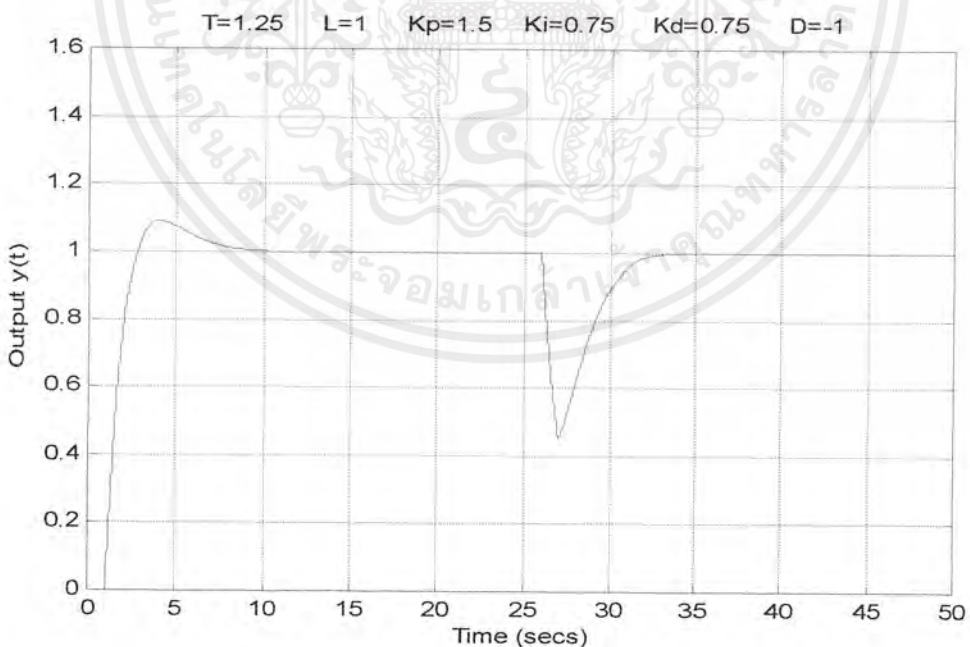


รูปที่ 4.60 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที และมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

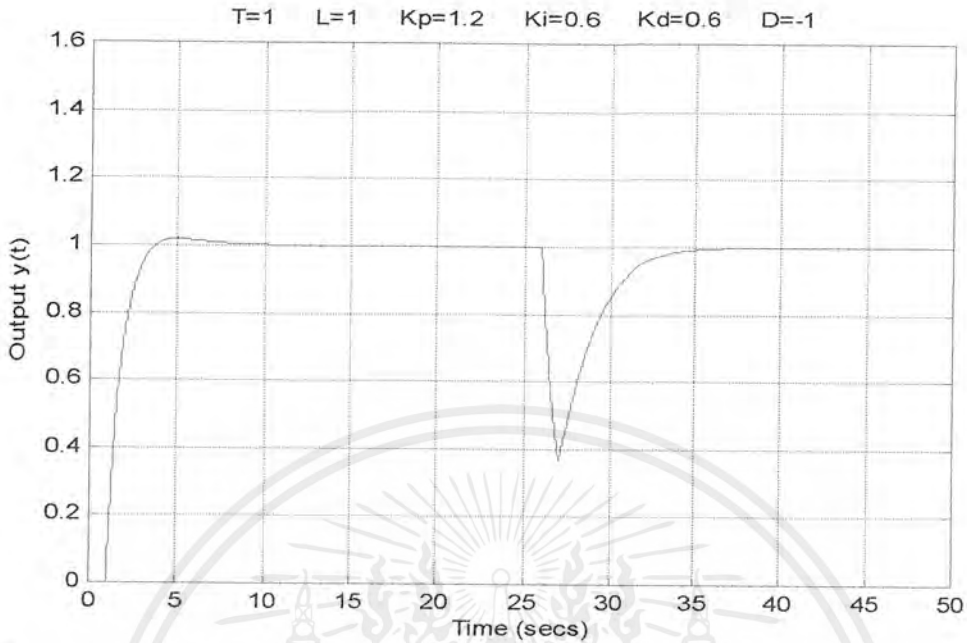


รูปที่ 4.61 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไครการตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาทีเมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต

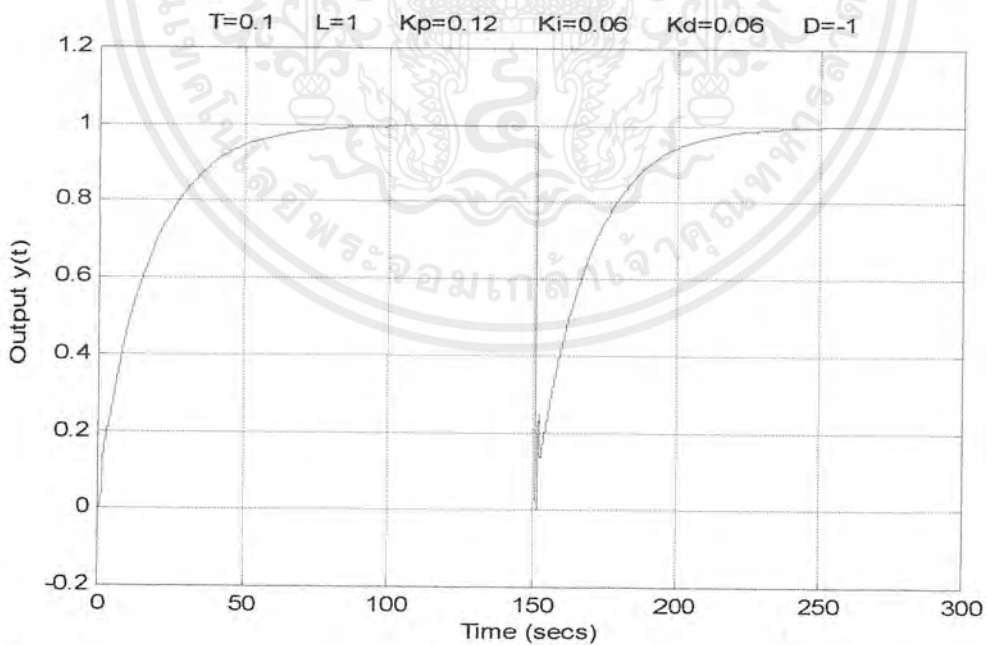


รูปที่ 4.62 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไครการตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาทีเมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.63 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 1 วินาทีเมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุท



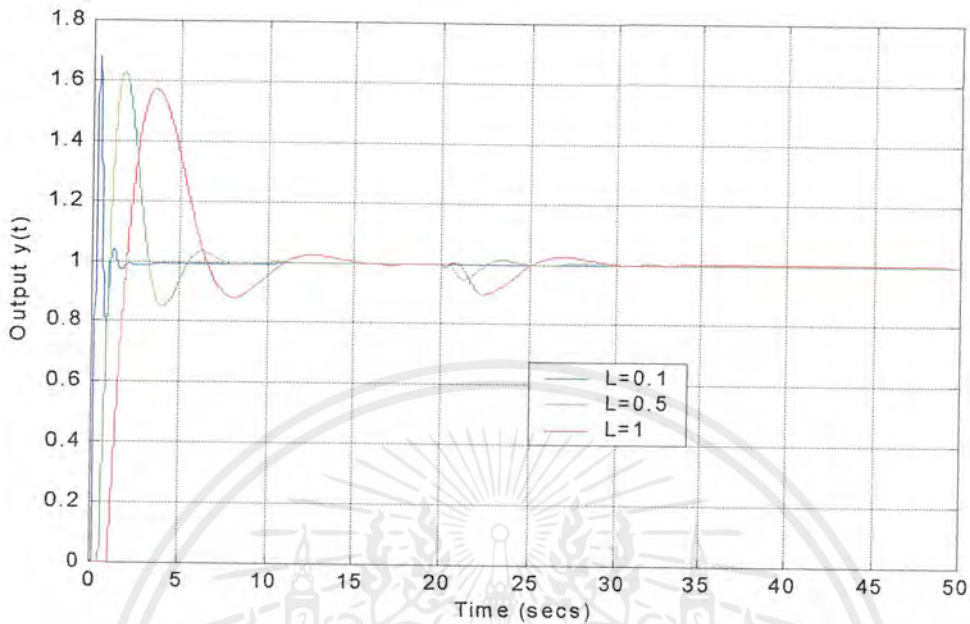
รูปที่ 4.64 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที ค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาทีเมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

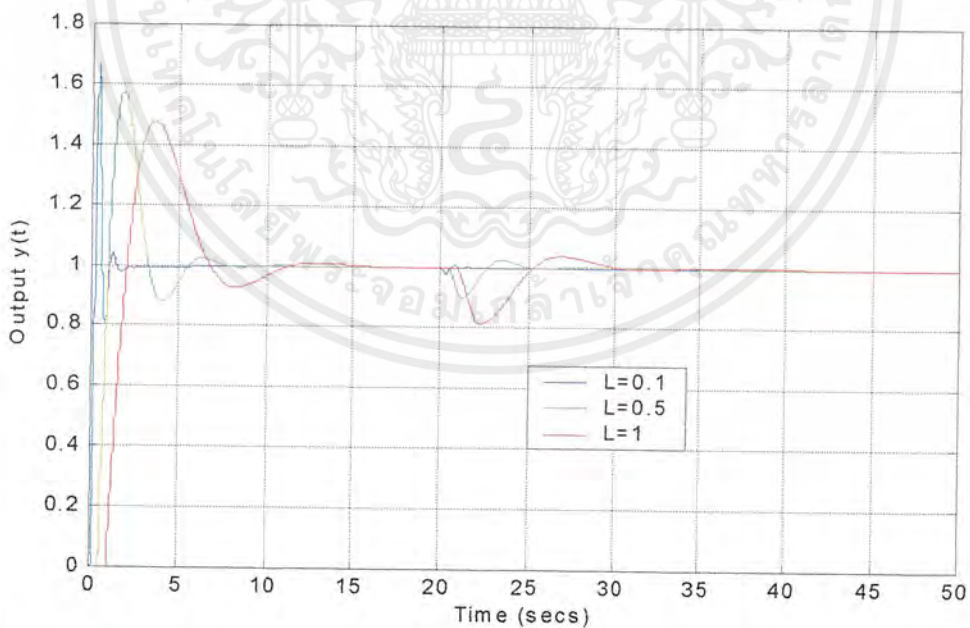
จากรูปที่ 4.58 ถึง 4.64 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองคงที่ 1 วินาที เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุต พบว่าเมื่อค่าคงตัวเวลาลดลง ตัวรบกวนจะมีผลต่อสมรรถนะระบบเป็นอย่างมาก โดยที่ในช่วงสถานะอยู่ตัว ระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาน้อยจะให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ช้ากว่า ระบบจะมีสมรรถนะลดลงเมื่อกระบวนการมีค่าคงตัวเวลาลดลง ณ. เวลาไถ่การตอบสนองคงที่ค่าหนึ่ง แสดงว่า ค่าคงตัวเวลามีผลต่อการกลับเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงเช่นเดียวกับค่าเวลาไถ่การตอบสนอง

#### 4.2.4.2 กระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนองต่างกัน

จากผลการทดลองหัวข้อ 4.2.2.2 จะเห็นว่าเมื่อระบบมีเวลาไถ่การตอบสนองยาวนานมากขึ้น ระบบจะกลับเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงอีกครั้งหนึ่งได้แต่จะใช้เวลามาก ซึ่งแสดงถึงผลกระทบของเวลาไถ่การตอบสนองที่มีต่อสมรรถนะของระบบ ตัวอย่างเช่น ที่ค่าเวลาไถ่การตอบสนองเป็น 5 วินาทีและค่าคงตัวเวลาเท่ากับ 0.1 ระบบควบคุม PID แบบ Watanabe จะกลับเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงอีกครั้งหนึ่งที่เวลาประมาณ 1650 วินาที ดังนั้นเราจึงทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาคงที่ เมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่ (-1) เข้ามาที่เอาต์พุต โดยทำการทดลองที่เวลาไถ่การตอบสนองเป็น 0.1, 0.5 และ 1 วินาที แสดงผลตอบสนอง ดังรูป

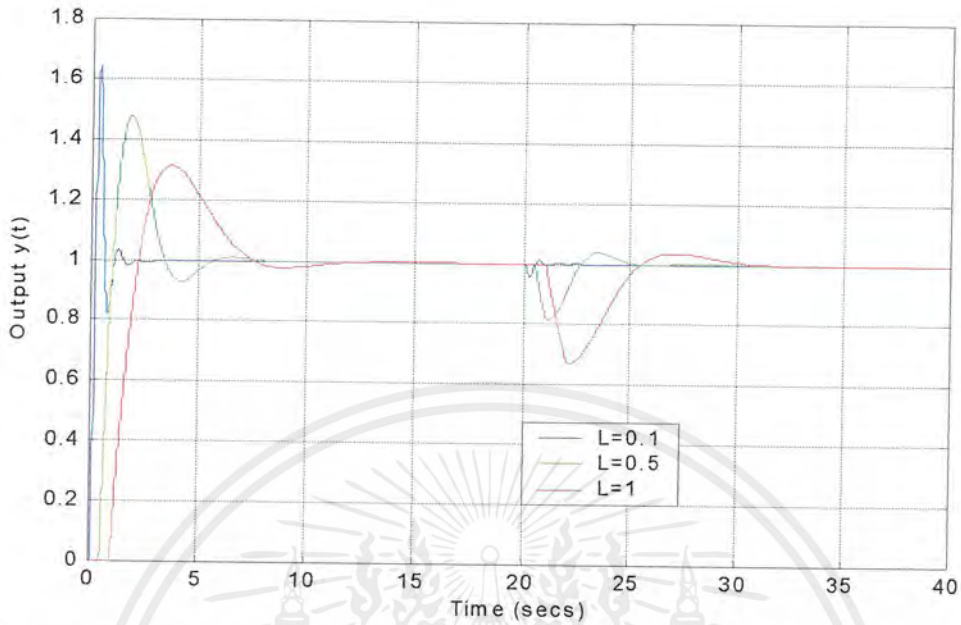


รูปที่ 4.65 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกันเมื่อมีผลของตัวรบกวน

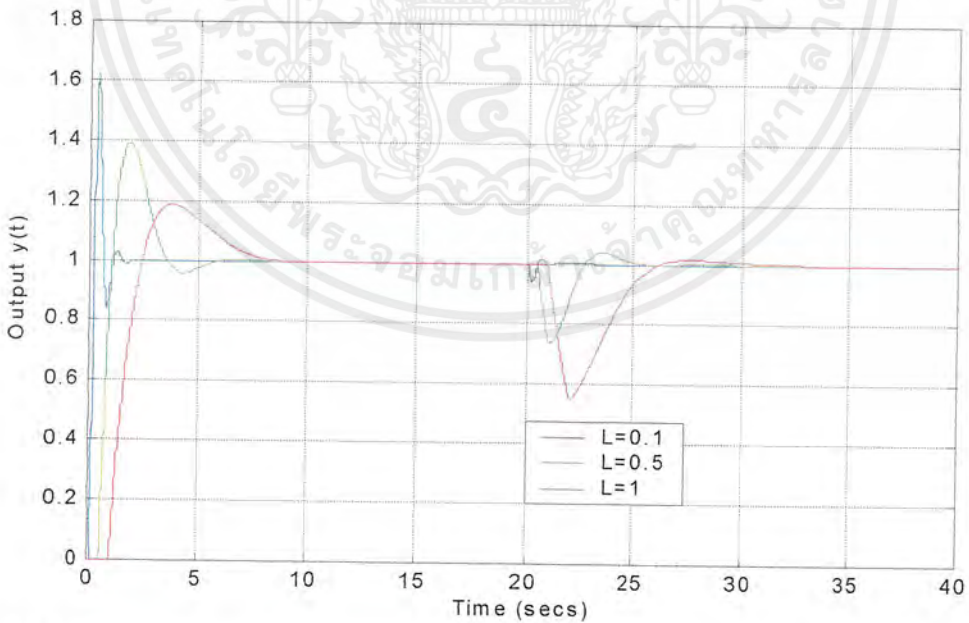


รูปที่ 4.66 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 5 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกันเมื่อมีผลของตัวรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

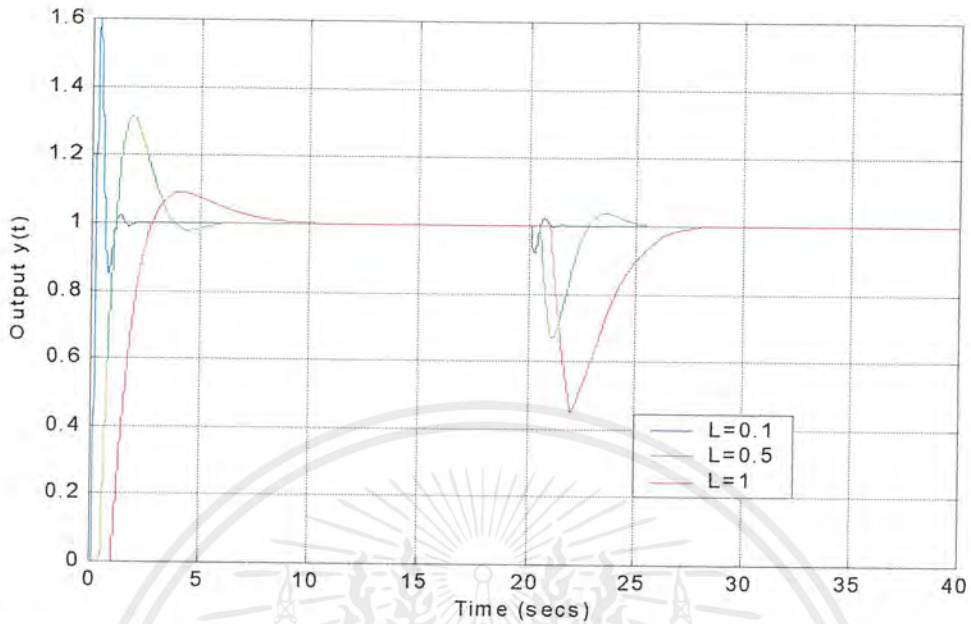


รูปที่ 4.67 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 2.5 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกันเมื่อมีผลของตัวรบกวน

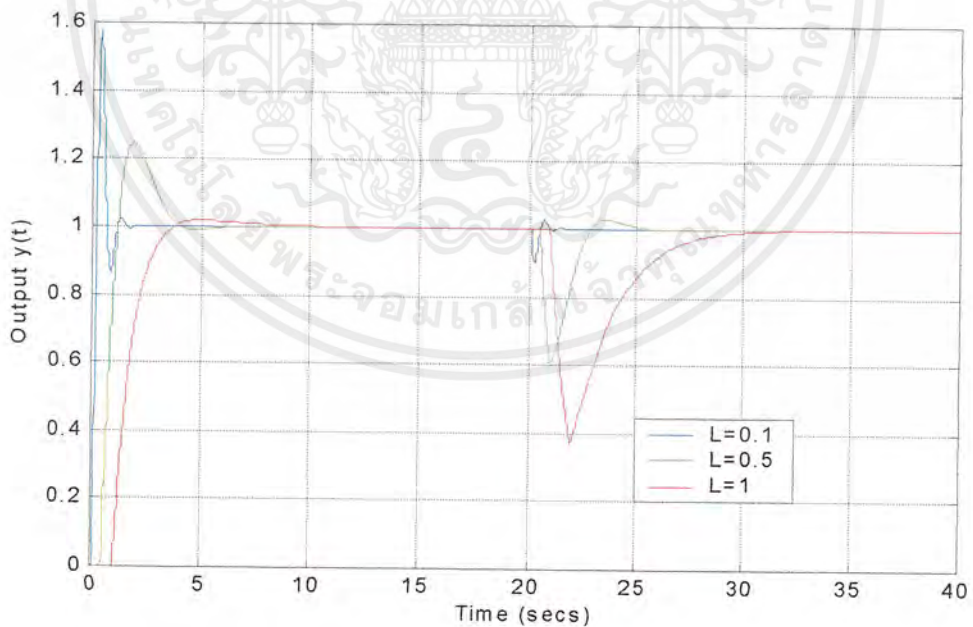


รูปที่ 4.68 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกันเมื่อมีผลของตัวรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

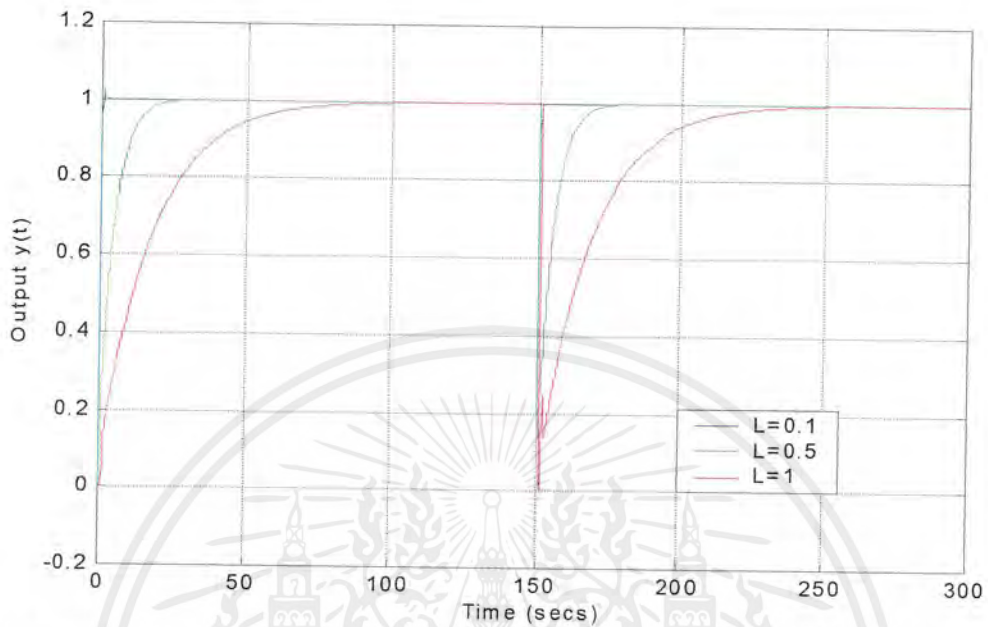


รูปที่ 4.69 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1.25 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกันเมื่อมีผลของตัวรบกวน



รูปที่ 4.70 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 1 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกันเมื่อมีผลของตัวรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

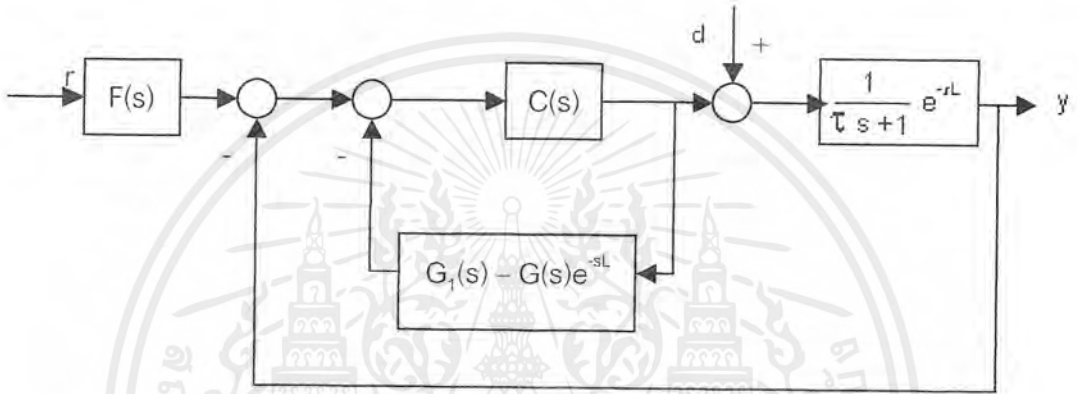


**รูปที่ 4.71** แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลา 0.1 วินาที เวลาไร้การตอบสนองต่างกันเมื่อมีผลของตัวรบกวน

จากรูปที่ 4.65 ถึง 4.71 พบว่าระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาคงที่ เวลาไร้การตอบสนอง 0.1, 0.5, 1 วินาที เมื่อมีการรบกวนจากภายนอก เมื่อเวลาไร้การตอบสนองยาวนานขึ้น ในช่วงสถานะอยู่ตัว ระบบควบคุมแบบ Watanabe จะให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ช้า นั่นคือ ระบบจะมีสมรรถนะลดลงเมื่อเวลาไร้การตอบสนองยาวนานขึ้น

#### 4.2.5 การปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม

ในส่วนนี้จะทำการปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งโดยการเพิ่มพรีฟิลเตอร์เข้าไปเพื่อศึกษาว่าพรีฟิลเตอร์ช่วยปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุมได้ดีหรือไม่อย่างไร



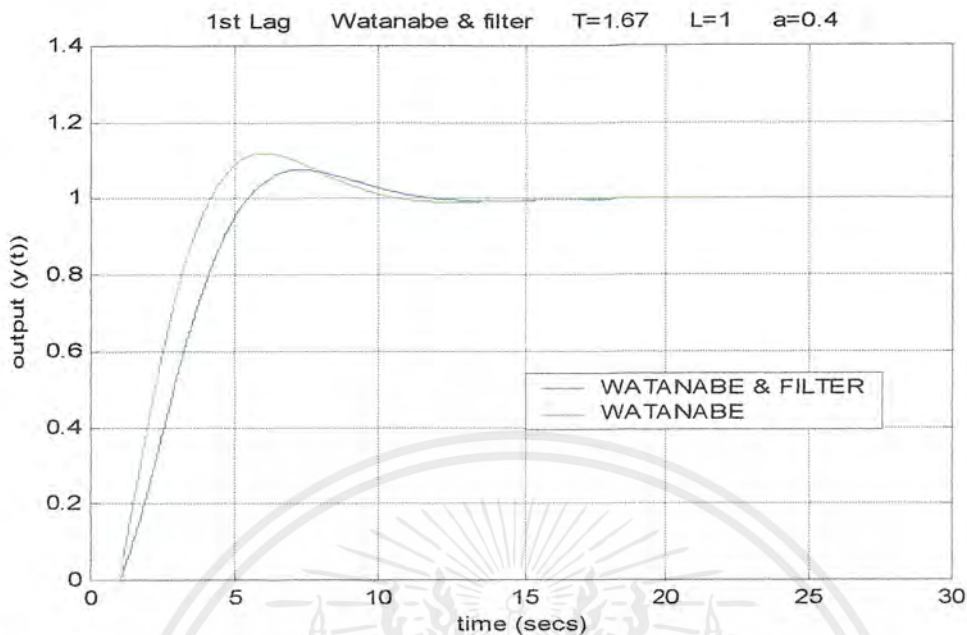
รูปที่ 4.72 แผนภาพบล็อกของ Watanabe เมื่อเพิ่มพรีฟิลเตอร์ในกระบวนการอันดับหนึ่ง

$$G_1(s) = \frac{G(s)}{1 + Ls}, \quad G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

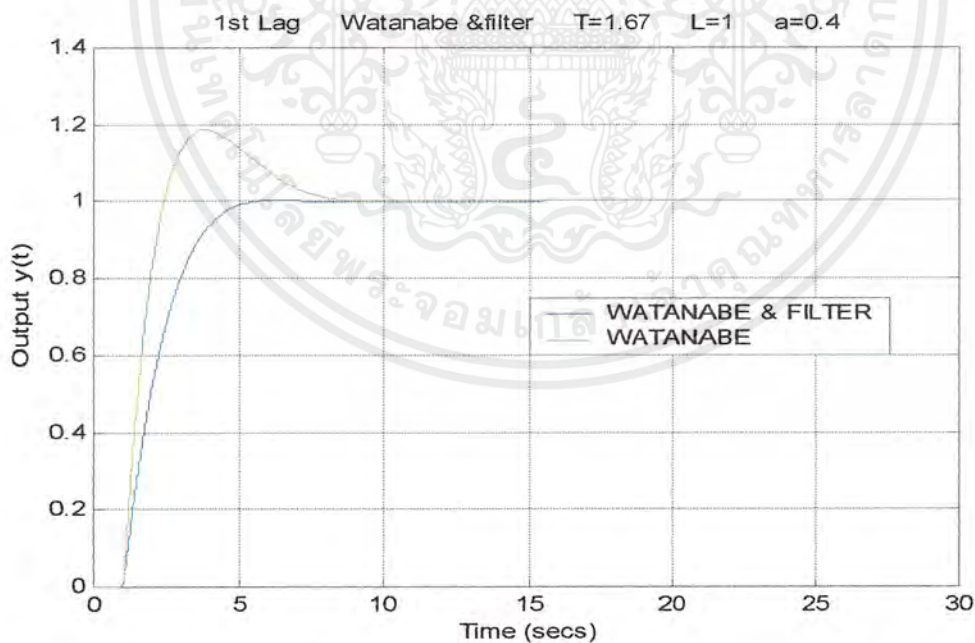
$$F(s) = \frac{1 + \alpha T_i s}{1 + T_i s}, \quad \alpha < 1$$

ทำการวิเคราะห์ห้ระบบควบคุม PI หรือ PID แบบ Watanabe ที่มีพรีฟิลเตอร์ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีเวลาไร้การตอบสนอง ที่ค่าคงตัวเวลา 1.67 วินาที ณ เวลาไร้การตอบสนอง 1 วินาที เปรียบเทียบกับระบบควบคุม PI หรือ PID แบบ Watanabe แสดงผลตอบสนองดังรูป 4.73 และ 4.74 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.73 แสดงการเปรียบเทียบระบบควบคุมแบบ PI แบบ Watanabe ที่มีฟริลเตอร์ กับระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง

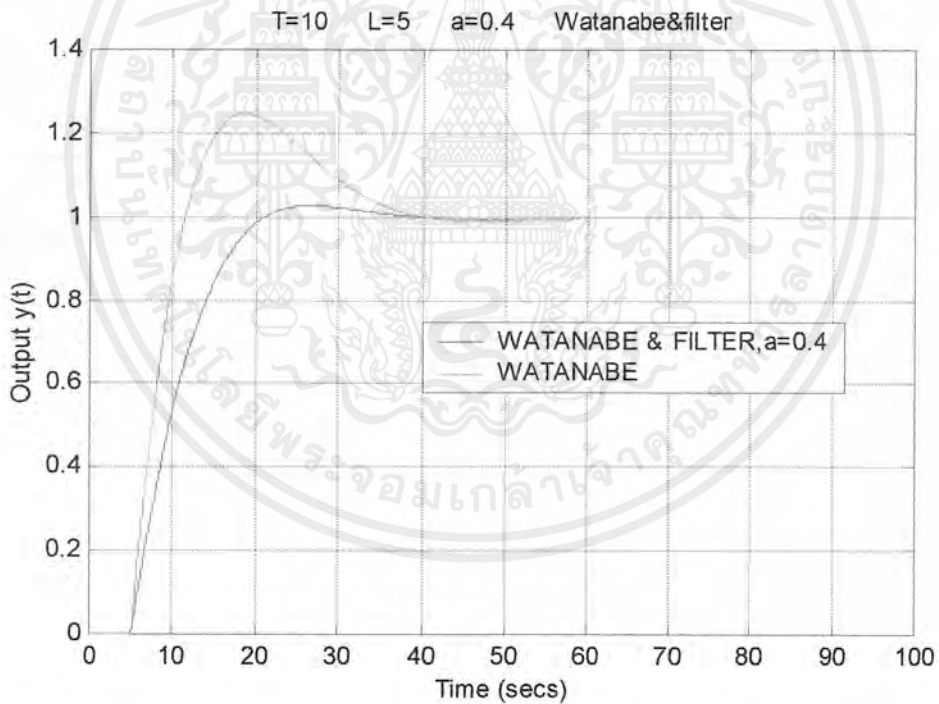


รูปที่ 4.74 แสดงการเปรียบเทียบระบบควบคุมแบบ PID แบบ Watanabe ที่มีฟริลเตอร์ กับระบบควบคุม PI แบบ Watanabe ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไถ่การตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.73 และ 4.74 พบว่า ระบบควบคุม PI หรือ PID แบบ Watanabe ที่มีพีรีฟิลเตอร์ ระบบจะให้สมรรถนะที่ดีขึ้นโดยไม่ต้องทำการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์ เราจึงนำระบบควบคุมแบบ Watanabe ที่มีพีรีฟิลเตอร์ไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนอง

ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.2.1 ปัญหาที่เกิดจากระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ในกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนอง คือ ผลตอบสนองของกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนองที่มี  $L/\tau < 0.5$  จะมีค่าพุ่งเกินสูงเกินกว่าที่จะยอมรับได้ เราจึงทำการศึกษาว่าพีรีฟิลเตอร์ช่วยปรับปรุงสมรรถนะของกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนองยาวนานได้หรือไม่โดยทำการเปรียบเทียบระบบควบคุม PID แบบ Watanabe กับระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ที่มีพีรีฟิลเตอร์ ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เวลาไ้การตอบสนอง 5 วินาที แสดงผลตอบสนอง ดังรูปที่ 4.75



รูปที่ 4.75 แสดงการเปรียบเทียบระบบควบคุม PID แบบ Watanabe กับระบบควบคุม PID แบบ Watanabe ที่มีพีรีฟิลเตอร์ ในกระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีค่าคงตัวเวลา 10 วินาที เวลาไ้การตอบสนอง 5 วินาที  $\alpha=0.4$

จากรูปที่ 4.75 แสดงให้เห็นว่าพีรีฟิลเตอร์ช่วยปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้สามารถเป็นที่ยอมรับได้โดยไม่ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุป

จากการศึกษาระบบควบคุม PI และ PID แบบ Watanabe พบว่าวิธีดังกล่าวสามารถกำจัดผลกระทบของตัวรบกวนได้ โดยพิจารณาจากเมื่อมีตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาต์พุท ระบบแบบ Watanabe จะสามารถควบคุมให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็ว ซึ่งเป็นข้อพิสูจน์ว่าสามารถแก้ปัญหาของวิธีการชดเชยเวลาไร้การตอบสนองของ Smith Predictor ได้ แต่เวลาไร้การตอบสนองก็ยังมีผลต่อระบบอยู่ แม้จะได้รับการปรับปรุงโครงสร้างของตัวควบคุมโดย Watanabe แล้วก็ตาม กล่าวคือ การมีเวลาไร้การตอบสนองยาวนานขึ้นในกระบวนการ ระบบจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการแกว่ง และทำให้ระบบมีเสถียรภาพน้อยลงจนถึงขาดเสถียรภาพไปเลย ดังนั้นในการออกแบบระบบควบคุมจึงต้องหลีกเลี่ยงหรือลดผลของเวลาไร้การตอบสนองให้น้อยที่สุด

จากผลการทดลองควบคุมกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่เวลาไร้การตอบสนองค่าหนึ่ง ด้วยระบบควบคุมแบบ Watanabe และระบบควบคุมแบบดั้งเดิมเมื่อระบบยังไม่ถูกรบกวน พบว่าระบบควบคุมแบบ Watanabe สามารถควบคุมระบบที่กระบวนการมีเวลาไร้การตอบสนองได้ดี โดยจะเห็นได้จากผลการตอบสนอง ในช่วงเวลาสถานะชั่วคราว ระบบควบคุม PI แบบ Watanabe สามารถควบคุมระบบให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินน้อยกว่าระบบควบคุมแบบดั้งเดิมและช่วงเวลานั้นของระบบควบคุมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วงสถานะอยู่ตัว ระบบควบคุม PI แบบ Watanabe มีช่วงเวลาเข้าที่เร็วกว่าระบบควบคุมแบบดั้งเดิม ระบบควบคุม PID แบบ Watanabe สามารถควบคุมระบบให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินน้อยกว่าระบบควบคุมแบบดั้งเดิมและช่วงเวลานั้นของระบบควบคุมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วงสถานะอยู่ตัว ระบบควบคุม PID แบบ Watanabe มีช่วงเวลาเข้าที่ช้ากว่าระบบควบคุมแบบดั้งเดิม โดยที่ความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวของระบบควบคุมทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ และผลการทดลองเมื่อกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์มีเวลาไร้การตอบสนองยาวนาน ทั้งระบบควบคุมแบบ Watanabe และระบบควบคุมแบบดั้งเดิมจะให้ผลการตอบสนองที่เหมือนกัน คือ ในช่วงเวลาสถานะชั่วคราว ระบบควบคุมมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินมากกว่า ช่วงเวลานั้นช้ากว่าและช่วงเวลาเข้าที่ช้ากว่ากระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์มีเวลาไร้การตอบสนองน้อย นั่นคือ สมรรถนะของระบบลดลงเมื่อกระบวนการมีเวลาไร้การตอบสนองยาวนานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองควบคุมกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไ้การตอบสนอง เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาท์พุท ระบบควบคุมแบบ Watanabe สามารถควบคุมให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ โดยที่เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไ้การตอบสนองยาวนาน ระบบควบคุมแบบ Watanabe สามารถควบคุมให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ช้ากว่ากระบวนการที่มีเวลาไ้การตอบสนองน้อย จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เวลาไ้การตอบสนองจะมีผลต่อสมรรถนะของระบบ ไม่ว่าจะเป็นระบบจะได้รับการปรับปรุงโครงสร้างของตัวควบคุมหรือไม่ก็ตาม

สำหรับระบบที่เราทำการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์จนได้สมรรถนะของระบบเป็นที่ยอมรับได้แล้ว ณ เวลาไ้การตอบสนองนั้นๆ ถ้ากระบวนการมีเวลาไ้การตอบสนองเปลี่ยนแปลงไป เราต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่เพื่อจะได้สมรรถนะของระบบตามต้องการอีกครั้ง เนื่องจากเวลาไ้การตอบสนองมีผลต่อเสถียรภาพของระบบดังได้แสดงในบททดลอง

เราสามารถทำการปรับปรุงสมรรถนะของระบบที่มีกระบวนการแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไ้การตอบสนองได้โดยทำการปรับปรุงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบ Watanabe อีกครั้งพร้อมทั้งใส่ฟรี้ฟิลเตอร์เพิ่มเข้าไปจะช่วยลดค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบได้ อีกทั้งค่า ค่าช่วงเวลาขึ้นและ ค่าช่วงเวลาเข้าที่ ก็เร็วขึ้น ส่งผลให้สมรรถนะรวมของระบบดีขึ้นจนสามารถเป็นที่ยอมรับได้ โดยที่ไม่ต้องทำการปรับค่าอัตราขยายใหม่ซึ่งเป็นการยุ่งยากอีกต่อไป เป็นการสะดวกต่อผู้ออกแบบระบบควบคุมที่กระบวนการเป็นแบบอินทิเกรเตอร์ที่มีเวลาไ้การตอบสนองได้เป็นอย่างมาก

สำหรับการศึกษาระบบที่กระบวนการเป็นแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนอง อันเป็นกระบวนการส่วนใหญ่ที่พบในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป จากผลการทดลองของระบบควบคุม PI และ PID แบบ Watanabe ในกระบวนการอันดับหนึ่งที่ค่าเวลาคงตัวค่าหนึ่ง เมื่อเวลาไ้การตอบสนองต่างกัน คือ 0.1, 0.5, 1 และ 5 วินาทีตามลำดับ สรุปได้ว่า เมื่อเวลาไ้การตอบสนองยาวนานขึ้นจะส่งผลให้ระบบมีผลตอบสนองที่ช้าลง หมายถึง สมรรถนะของระบบลดลงนั่นเอง

ทดลองควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งที่ค่าเวลาไ้การตอบสนองค่าหนึ่ง (1 วินาที) เมื่อค่าคงตัวเวลาต่างกัน คือ 0.1, 1, 1.25, 1.67, 2.5, 5 และ 10 วินาทีตามลำดับ เราจะสามารถทำการวิเคราะห์ความยากง่ายในการควบคุมกระบวนการแบบ อันดับหนึ่งที่มีเวลาไ้การตอบสนองได้โดยการพิจารณาจากอัตราส่วนของ  $L/\tau$  ดังได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 2.1 ในบททฤษฎีและหลักการ

เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยตัวรบกวนขนาดคงที่เข้ามาที่เอาท์พุท พบว่า ณ ค่าคงตัวเวลาค่าหนึ่ง เมื่อเวลาไ้การตอบสนองยาวระบบจะถูกรบกวนมากขึ้น และจะกำจัดผลของตัวรบกวนออกไปได้ช้ากว่าเมื่อกระบวนการมีค่าเวลาไ้การตอบสนองน้อย ดังจะเห็นได้จากบททดลองที่ได้แสดง

รูปผลตอบสนองและค่าผลตอบสนองซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อกระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีเวลาใช้การตอบสนองยาวนาน ผลของตัวรบกวนให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะอ้างอิงได้ช้าลง

ผลการทดลองควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งมีเวลาใช้การตอบสนองค่าหนึ่ง เมื่อค่าคงตัวเวลามาก พบว่าระบบจะถูกรบกวนน้อยลงจึงสามารถกำจัดผลของตัวรบกวนออกไปได้เร็วกว่า เมื่อกระบวนการมีค่าคงตัวเวลาน้อย ระบบกลับเข้าสู่สภาวะอ้างอิงอีกครั้งหนึ่งได้เร็วกว่า ดังได้แสดงรูปผลตอบสนองและค่าผลตอบสนองไว้ในบททดลอง

เราสามารถทำการปรับปรุงสมรรถนะของระบบที่มีกระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีเวลาใช้การตอบสนองได้โดยทำการเพิ่มพรีฟิเตอร์ โดยไม่ต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างตัวควบคุมของ Watanabe แต่อย่างใด ก็จะช่วยให้ระบบมีสมรรถนะที่สูงขึ้น คือ ค่าพุงเกินลดลง, ค่าช่วงเวลาขึ้น และ ค่าช่วงเวลาเข้าเร็วขึ้น ทำให้เราสามารถควบคุมระบบที่มีกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาใช้การตอบสนองยาวนานได้อย่างง่ายดาย สะดวก และรวดเร็ว อีกทั้งยังให้สมรรถนะที่ดีอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

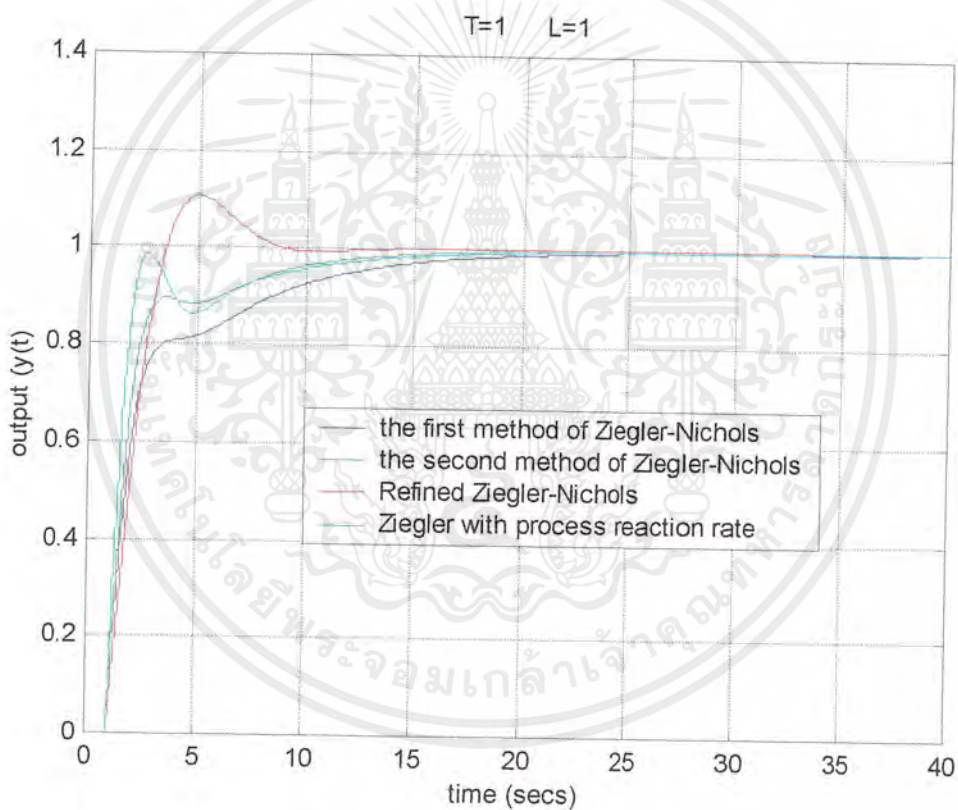


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมมีโครงสร้างแบบ Watanabe ในกระบวนการอันดับหนึ่งมีเวลาไร้การตอบสนองของขณะที่วิธีการกำหนดพารามิเตอร์ต่างกัน

### 1. การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบตัวควบคุมหลักแบบ PI



รูปที่ ผ.1 แสดงผลตอบสนองเปรียบเทียบของระบบที่มีตัวควบคุมหลักแบบ PI มีโครงสร้างแบบ Watanabe และกระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีเวลาไร้การตอบสนองเมื่อใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่างกัน

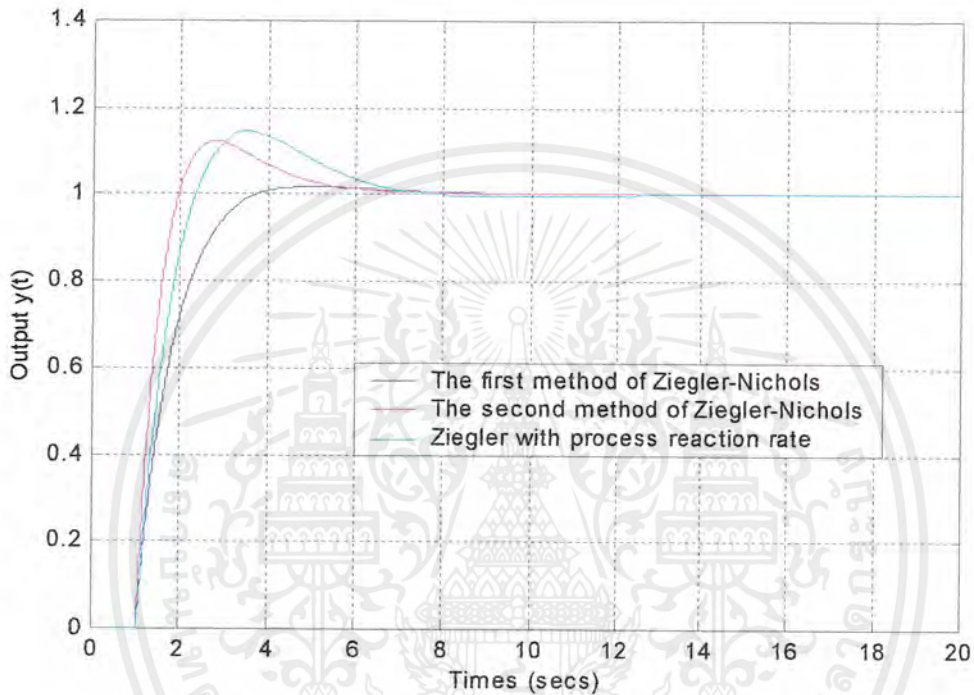
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผ. 1 แสดงค่าผลตอบสนองของเปรียบเทียบของระบบที่มีตัวควบคุมหลักแบบ PI มีโครงสร้างแบบ Watanabe และกระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีเวลาไรการตอบ  
 สมอง 1 วินาที เมื่อใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่างกัน

วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์	สูตรที่ใช้ในการคำนวณ	$K_p$	$K_i$	$M_o$ (%)	$t_r$ (secs)	$t_s$ (secs)	$e_{ss}$ (%)
Ziegler with Process reaction rate	$K_p = \frac{0.9}{RL}$ $T_i = 3.3L$	1.4286	0.4329	[ ]	0.983	13.5992	0
The first method of Ziegler-Nichols	$K_p = \frac{0.9\tau}{L}$ $T_i = 3L$	0.9000	0.3000	[ ]	7.3760	16.7796	0
The second method of Ziegler-Nichols	$K_p = 0.6K_{cr}$ $T_i = \frac{P_{cr}}{1.2}$	1.0183	0.3958	[ ]	5.0580	12.4205	0
Refined Ziegler-Nichols	$K_p = \frac{5K_{cr}}{6} \left[ \frac{12 + K_{cr}}{15 + 14K_{cr}} \right]$ $T_i = \frac{P_{cr}}{5} \left[ \frac{4K_{cr}}{15} + 1 \right]$	0.5761	0.5818	10.6561	1.8400	7.8527	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบตัวควบคุมหลักแบบ PID



รูปที่ ๘.2 แสดงผลตอบสนองเปรียบเทียบของระบบที่มีตัวควบคุมหลักแบบ PID มีโครงสร้างแบบ Watanabe และกระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีเวลาไว้การตอบสนองเมื่อใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่างกัน

ตาราง ผ.2 แสดงค่าผลตอบสนองเปรียบเทียบของระบบที่มีตัวควบคุมหลักแบบ PID มีโครงสร้างแบบ Watanabe และกระบวนการแบบอันดับหนึ่งมีเวลา  
 ไร้การตอบสนองของ 1 วินาที เมื่อใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่างกัน

วิธีการกำหนด ค่าพารามิเตอร์	สูตรที่ใช้ในการคำนวณ	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$M_o$ (%)	$t_p$ (secs)	$t_r$ (secs)	$e_{ss}$ (%)
Ziegler with process reaction rate	$K_p = \frac{1.3}{RL}$ $T_i = 2.2L$ $T_d = 0.45L$	2.0635	0.9380	0.9286	12.2078	0.6940	5.5316	0
The first method of Ziegler-Nichols	$K_p = \frac{1.2r}{L}$ $T_i = 2L$ $T_d = 0.5L$	1.2	0.6	0.6	1.7881	1.5760	3.3641	0
The second method of Ziegler-Nichols	$K_p = 0.6K_{cr}$ $T_i = 0.5P_{cr}$ $T_d = 0.125P_{cr}$	1.3578	0.8795	0.5240	14.4562	0.9880	6.5487	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

ตาราง ผ.2 แสดงกระบวนการที่มีเวลาไร้การตอบสนอง

Process	Dead time	First-order time lags						Noninteracting PID controller (Eq. (10) adjusted according to		Interacting PID controller (Eq. (9) adjusted according to	
		$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	Eq. (4) Case A	Eq. (18) Case B	Eq. (4) Case C	Eq. (20) Case D	
	$\theta$	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	IAE Value				
1	0	1	1	1			100%	74%	88%	85%	
2	0	1	1	0.1			100	71	71	70	
3	0	1	0.1	0.1			100	76	86	80	
4	0	1	1	1	1		100	82	102	91	
5	0	1	1	1	0.1		100	76	96	86	
6	0	1	1	0.1	0.1		100	76	84	81	
7	0	1	0.1	0.1	0.1		100	80	91	85	
8	0	1	1	1	1	1	100	81	104	89	
9	1	10					100	84	72	77	
10	1	5					100	80	82	81	
11	1	2.5					100	83	94	83	
12	1	1.67					100	92	101	93	
13	1	1.25					100	91	107	93	
14	1	1					100	105	120	104	
15	1	0.1					Unstable	Unstable	Unstable	Unstable	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

- [1.] F.G.Shinsky, "Process Control System Application, Design, and Tuning", Third edition, pp.9-11, McGraw-Hill Inc., 1988
- [2.] Karl Johan Astrom, "Adaptive Control", First edition, pp.330-331, Addison-Wesley, 1989
- [3.] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering", Second edition, Prentice-Hall Inc. , 1990
- [4.] Yoshikazu Kiwaragi, and Takashi Soeda, "ทำความเข้าใจกับการควบคุมอัตโนมัติ", Nissin Shuppan Co.,Ltd.
- [5.] K. J. Astrom, C. C. Hang, and B. C. Lim, "A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 39, pp. 343-345, Feb. 1994
- [6.] David W. Pessen, "A New Look at PID-Controller Tuning," *Trans. ASME*, Vol. 116, pp. 553-557., Sep. 1994
- [7.] Julio E. Normey-Rico and Eduardo F. Camacho, "Robust Tuning of Dead-Time Compensator for Process with an integrator and Long Dead-Time," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. 44, pp.1597-1603., Aug. 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้