

การควบคุมแบบอะแดปทีฟ  
Adaptive control



โดย  
นายจตุวัฒน์ ราชเรืองระบิน  
นายพลาว์สทธิ์ ทองคำวงศ์

รฟ.  
ค ๒๙๖ ก  
๒๕๔๔

เลขหน.  
เลขทะเบียน 45700  
วัน, เดือน, ปี 3 ก.พ. 2546

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

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

175

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมแบบอะแดพทีฟ

ผู้จัดทำ

1. นายจาตุวัฒน์ ราชเรืองระบิน รหัสประจำตัว 41014069
2. นายพลาว์สิทธิ์ ทองคำวงศ์ รหัสประจำตัว 41014301



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การควบคุมแบบอะแดปทีฟ (Adaptive control)

นายจตุวัฒน์ ราชเรืองระบิน

นายพลาว์สิทธิ์ ทองคำวงศ์

ผศ. พรสุข รติโรจน์อนันต์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2544

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำทฤษฎีการควบคุมแบบอะแดปทีฟมาใช้กับระบบจริง โดยการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงและอุณหภูมิของน้ำด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้การควบคุมแบบอะแดปทีฟโพลเพลซเมนต์ผ่านทางการ์ด ET-PCDIO ผลการทดลองสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์และอุณหภูมิของน้ำที่ค่าอ้างอิง(set point) ต่างๆได้ และยังสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์และอุณหภูมิของน้ำได้ในกรณีที่โหลดเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง

### Abstract

This thesis presents the application of adaptive pole placement control to direct current motor speed control and water temperature control system by using ET-PCDIO card to interface with the computer. The control results from the experimentation show the good control performance even the load is greatly changed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า	
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท	2
	1.3 ขอบเขตของปริญญาโท	2
บทที่ 2	ทฤษฎีและหลักการ	3
	2 การออกแบบตัวควบคุมดิจิทัล	3
	2.1 การวางโพล	3
	2.1.1 อันดับของตัวควบคุม R-S-T	5
	2.2 การลดผลกระทบและการติดตาม	6
	2.3 การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีทำซ้ำ	9
	2.3.1 โครงสร้างลีทสสแควร์	9
	2.3.2 โครงสร้างของรีเคอร์ซีฟลีทสสแควร์	11
	2.3.3 พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	14
	2.4 การออกแบบตัวควบคุมอะแดปทีฟโดยวิธีโพลเพลซเมนต์	14
	2.4.1 การออกแบบตัวควบคุมภายใต้เงื่อนไขอุดมคติ	14
บทที่ 3	การคำนวณและการสร้าง	18
	3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีRLS	18
	3.2 การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีโพลเพลซเมนต์	19
	3.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบ	20
	3.4 วงจรแปลงสัญญาณเพื่อติดต่อกับคอมพิวเตอร์	23
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง	26
	4.1 การทดลองควบคุมความเร็วมอเตอร์	26
	4.2 การทดลองควบคุมอุณหภูมิของน้ำ	49
บทที่ 5	บทวิจารณ์และสรุป	54
	5.1 สรุปผลการปฏิบัติงาน	54
	5.2 ปัญหาในการทำงานและการแก้ไข	54
	5.3 ผลที่ได้รับจากการทำโครงการ	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.4 แนวทางในการพัฒนา

54

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

หนังสืออ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวควบคุมดิจิทัล R-S-T	3
รูปที่ 2.2 พฤติกรรมการลดผลกระทบและการติดตาม	7
รูปที่ 2.3 แบบจำลองของระบบดิสครีต	9
รูปที่ 2.4 การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี RLS	12
รูปที่ 2.5 แสดงตัวควบคุมที่ใช้ในระบบอะแดปทีฟ	15
รูปที่ 3.1 ตัวควบคุม R-S-T ด้วยวิธีโพลเพลซเมนท์	19
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบ	20
รูปที่ 3.3 ฮาร์ดแวร์ของมอเตอร์กระแสตรง	21
รูปที่ 3.4 ฮาร์ดแวร์ของถังต้มน้ำ	22
รูปที่ 3.5 การ์ด ET-PCDIO	24
รูปที่ 3.6 ไฟล์ชาร์ตของโปรแกรม	25
รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองของมอเตอร์	27
รูปที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ด้วยวิธี RLS	28
รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\alpha$ เท่ากับ 0.1	29
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\alpha$ เท่ากับ 0.2	30
รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\alpha$ เท่ากับ 0.3	31
รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\alpha$ เท่ากับ 0.4	32
รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\alpha$ เท่ากับ 0.5	33
รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\alpha$ เท่ากับ 0.6	34
รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\alpha$ เท่ากับ 0.7	35
รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\xi$ เท่ากับ 0.1	36
รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\xi$ เท่ากับ 0.2	37
รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\xi$ เท่ากับ 0.3	38
รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\xi$ เท่ากับ 0.4	39
รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\xi$ เท่ากับ 0.5	40
รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\xi$ เท่ากับ 0.6	41
รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\xi$ เท่ากับ 0.7	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\xi$ เท่ากับ 0.8	43
รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อ $\xi$ เท่ากับ 0.9	44
รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อมีโหลด 1 ตัว	45
รูปที่ 4.20 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อมีโหลด 2 ตัว	46
รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อมีโหลด 3 ตัว	47
รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองของมอเตอร์เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง	48
รูปที่ 4.23 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำเมื่อไหลเท่ากับ 0.1	49
รูปที่ 4.24 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำเมื่อไหลเท่ากับ 0.5	50
รูปที่ 4.25 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำเมื่อไหลเท่ากับ 0.7	51
รูปที่ 4.26 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำเมื่อมีการเติมน้ำแข็ง	52
รูปที่ 4.27 ค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ด้วยวิธีRLS	53

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาถึงทฤษฎีการควบคุมแบบอะแดปทีฟกันอย่างแพร่หลายทั้งการวิจัย, การทดลองใช้กับแบบจำลองในลักษณะต่างๆ แต่การนำทฤษฎีการควบคุมแบบอะแดปทีฟมาใช้กับระบบจริงนั้นยังไม่พบเห็นกันมากนัก ดังนั้นในปริญาานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นการนำทฤษฎีการควบคุมแบบอะแดปทีฟมาทดลองใช้กับระบบจริงโดยเป็นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงและอุณหภูมิของน้ำด้วยคอมพิวเตอร์โดยออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีอะแดปทีฟโพลเพลซเมนต์ผ่านทางการ์ด ET-PCDIO ซึ่งใช้เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยการ์ด ET-PCDIO ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลและ เปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อก ซึ่งการ์ด ET-PCDIO จะรับสัญญาณอนาล็อกจากตัวรับรู้(sensor)มาเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิตอลแล้วส่งค่าให้กับคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปคำนวณตามที่ได้โปรแกรมไว้ จากนั้นคอมพิวเตอร์จะส่งค่าที่คำนวณได้ผ่านทางการ์ด ET-PCDIO เพื่อแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อกให้กับไดรเวอร์(driver)เพื่อได้ออกพุทตามที่ได้โปรแกรมไว้ หลักสำคัญของการควบคุมแบบอะแดปทีฟโพลเพลซเมนต์คือการติดตามหาค่าเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่เวลาจริง เพื่อนำไปออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโพลเพลซเมนต์ที่เวลาจริง ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี ในที่นี้ใช้วิธี Recursive Least Squares (RLS) การทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์และอุณหภูมิของน้ำคือกำหนด ค่าอ้างอิง(Set point) ให้กับมอเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนได้ตรงตามค่าอ้างอิงแล้ว จากนั้นเปลี่ยนโหลดเพื่อดูว่ามอเตอร์ยังคงหมุนได้ตรงตามค่าอ้างอิงหรือไม่ ผลการทดลองสามารถควบคุมได้ตามค่าอ้างอิง การทดลองควบคุมอุณหภูมิของน้ำก็ทำเช่นเดียวกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปฏิญญานิพนธ์

1. ศึกษาหลักการควบคุมแบบอะแดพทีฟ
2. ศึกษาหลักการหาค่าเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ด้วยวิธี RLS
3. ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีอะแดพทีฟโพลเพลซเมนท์
4. ออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ควบคุมกระบวนการโดยใช้หลักการอะแดพทีฟ

## 1.3 ขอบเขตของปฏิญญานิพนธ์

1. ศึกษาหลักการควบคุมแบบอะแดพทีฟ
2. เขียนโปรแกรมด้วยภาษาซี เพื่อ
  - หาเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบที่เวลาจริง
  - ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีอะแดพทีฟโพลเพลซเมนท์
3. ทดลองควบคุมความเร็วของดีซีมอเตอร์โดยการอินเทอร์เฟซกับคอมพิวเตอร์ผ่านการ์ด ET-PCDIO
4. ทดลองควบคุมอุณหภูมิของน้ำโดยการอินเทอร์เฟซกับคอมพิวเตอร์ผ่านการ์ด ET-PCDIO
5. เก็บผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### 2. การออกแบบตัวควบคุมดิจิทัล

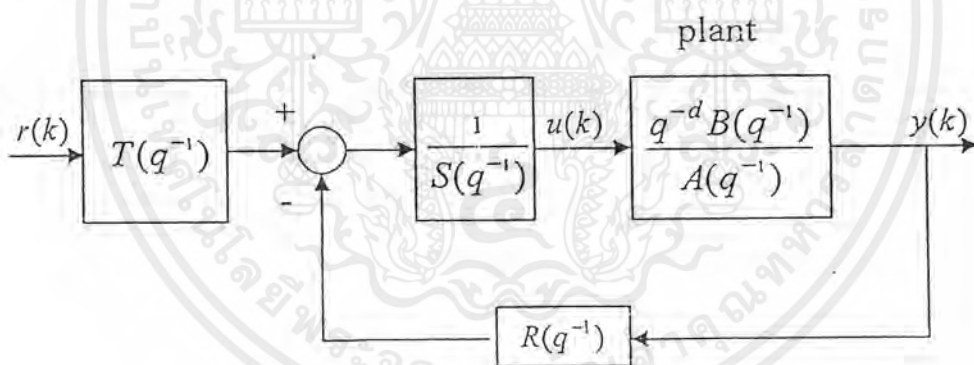
การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดิจิทัลใช้วิธีการวางโพลที่เหมาะสม (Poles Placement ) ในรูปแบบตัวควบคุมดิจิทัล R-S-T ซึ่งสามารถใช้กับระบบที่เสถียรและไม่เสถียรได้.

#### 2.1 การวางโพล ( Poles Placement )

ตัวควบคุมดิจิทัล R-S-T มีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.1 , $r(k)$  คือ อินพุตอ้างอิง , $u(k)$  คือ อินพุตควบคุม และ $y(k)$  คือ เอาท์พุทของกระบวนการ(plant) ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการคือ

$$G_p(q^{-1}) = \frac{q^{-d} B(q^{-1})}{A(q^{-1})}$$

$d$  คือ ดีเลย์ (delay time)



รูปที่ 2.1 ตัวควบคุมดิจิทัลR-S-T

$S(q^{-1})$  และ  $R(q^{-1})$  คือ ตัวขดเซย ,  $T(q^{-1})$  คือตัวกรอง ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบปิดคือ

$$H_{CL}(q^{-1}) = \frac{q^{-d} B(q^{-1}) T(q^{-1})}{A(q^{-1}) S(q^{-1}) + q^{-d} B(q^{-1}) R(q^{-1})} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= \text{ตัวส่วนของ plant (plant denominator)} \\ &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} B(q^{-1}) &= \text{ตัวเศษของ plant (plant numerator)} \\ &= b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_m q^{-m} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$n$  และ  $m$  คืออันดับของ  $A(q^{-1})$  และ  $B(q^{-1})$

$$\begin{aligned} \text{โพลีโนเมียลวงปิดคือ } D(q^{-1}) &= A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})R(q^{-1}) \\ &= 1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{nd} q^{-nd} \end{aligned} \quad (2.4)$$

สมการที่ 2.4 มีชื่อว่า สมการ Diophantine หรือ Bezout identity สัมประสิทธิ์ของ  $D(q^{-1})$  เกิดจากการรวมกันระหว่างสัมประสิทธิ์  $B(q^{-1})$  และ  $A(q^{-1})$  และสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า  $S(q^{-1})$  และ  $R(q^{-1})$

$$S(q^{-1}) = 1 + s_1 q^{-1} + \dots + s_{ns} q^{-ns} \quad (2.5)$$

$$R(q^{-1}) = r_0 + r_1 q^{-1} + \dots + r_{nr} q^{-nr} \quad (2.6)$$

ค่า  $nd, ns$  และ  $nr$  เป็นอันดับของ  $D(q^{-1})$ ,  $S(q^{-1})$  และ  $R(q^{-1})$  ตามลำดับ

นำสมการที่ (2.4), (2.5), (2.6) มาเขียนเป็นเมตริกมีรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & \dots & 0 & b_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 a_1 & 1 & \dots & \dots & b_1 & b_0 & \dots & \dots & \dots \\
 a_2 & a_1 & \dots & \dots & b_2 & b_1 & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & b_0 \\
 a_n & \dots & \dots & a_1 & b_m & \dots & \dots & \dots & b_1 \\
 0 & a_n & \dots & \dots & 0 & b_m & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & \dots & \dots & 0 & a_n & \dots & \dots & \dots & 0 & b_m
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 1 \\
 s_1 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 s_{nr} \\
 r_0 \\
 r_1 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 r_{nr}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 1 \\
 a_1 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 d_{nd}
 \end{bmatrix}
 \quad (2.6a)$$

$$MX = D \quad (2.7)$$

เมตริก  $M$  คือ ซิสเวสเตอร์เมตริก ,  $D$  คือ เวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ในสมการที่ 2.4 ,  $X$  คือ เวกเตอร์ของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของตัวควบคุม ,  $D(q^{-1})$  ผู้ออกแบบสามารถกำหนดได้เองหารากของสมการที่ (2.7) มีค่า

$$X = M^{-1} D \quad (2.8)$$

### 2.1.1 อันดับของตัวควบคุม R-S-T

ขนาดของซิสเวสเตอร์เมตริกขึ้นอยู่กับอันดับตัวควบคุม ถ้าเลือกอันดับของตัวควบคุมให้เหมาะสม ซิสเวสเตอร์เมตริกจะเป็นเมตริกจัตุรัส. ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพียงชุดเดียว(unique solution). กล่าวคือ จำนวนของสมการและจำนวนของตัวแปรที่ไม่ทราบในสมการที่ (2.7) ต้องมีจำนวนเท่ากัน จำนวนพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าคือจำนวนของสัมประสิทธิ์  $S(q^{-1})$  และ  $R(q^{-1})$  ส่วนจำนวนสมการคือจำนวนสัมประสิทธิ์ของ  $D(q^{-1})$  หรืออันดับ  $A(q^{-1})$  รวมกับอันดับ  $S(q^{-1})$  ดังนั้น

$$\text{จำนวนของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า} = ns + nr + 1 \quad (2.9)$$

$$\text{จำนวนของสมการ} = n + ns \quad (2.10a)$$

$$= nd \quad (2.10b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากจำนวนของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบเท่ากับจำนวนของสมการทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$ns + nr + 1 = n + ns \quad (2.11)$$

$$nr = n - 1 \quad (2.12)$$

$$ns \geq nr \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.12) เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์เพียงชุดเดียว (unique solution) อันดับของ  $R(q^{-1})$  ต้องน้อยกว่าอันดับของ  $A(q^{-1})$ . เพื่อความเหมาะสมในการออกแบบตัวควบคุม อันดับ  $ns$  ในสมการที่ (2.11) ซึ่งถูกหักล้างนั้นชี้ให้เห็นว่า  $S(q^{-1})$  สามารถเลือกอย่างไรก็ได้. จากสมการที่ (2.4) อันดับ  $ns$  ขึ้นอยู่กับค่า  $d$  ตามนี้

$$ns \leq m + d - 1 \quad (2.14a)$$

ค่า  $nd - n = ns$

$$nd \leq n + m + d - 1 \quad (2.14b)$$

## 2.2 การลดผลรบกวนและการติดตาม (Regulation and Tracking)

โพลวงปิดที่เป็นรากของสมการโพลโนเมียล  $D(q^{-1})$  เป็นตัวอธิบายถึงพฤติกรรมในการลดผลรบกวนของระบบควบคุม.  $D(q^{-1})$  ถูกออกแบบให้มีพฤติกรรมตามที่ต้องการคือสามารถลดผลรบกวนได้อย่างรวดเร็ว. เขียนในรูปแบบไบโนเมียลได้

$$D(q^{-1}) = (1 - \alpha q^{-1})^{nd} \quad (2.15)$$

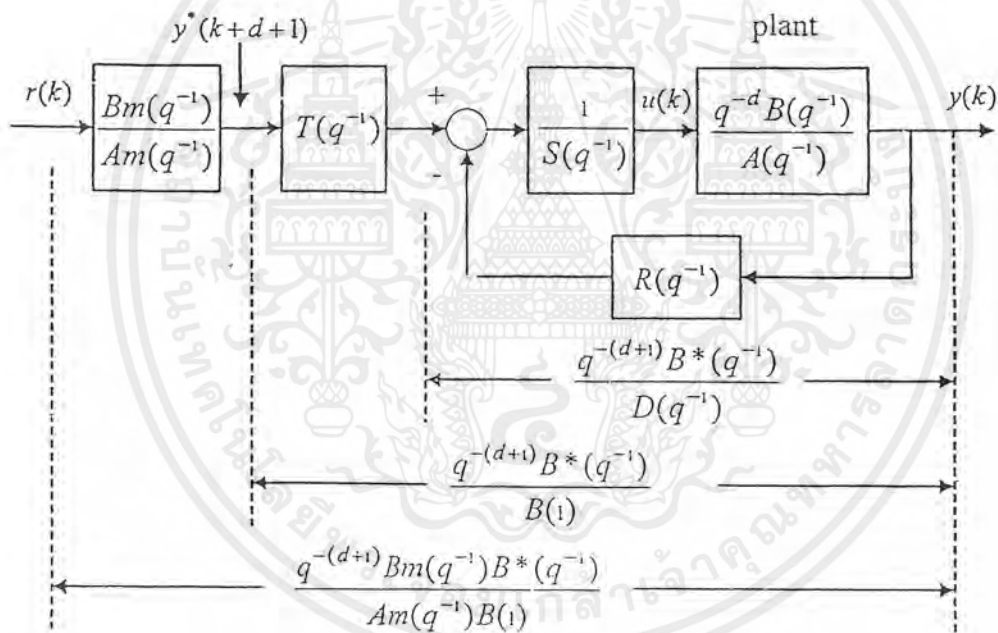
$\alpha$  คือ โพลที่เสถียรของระบบวงปิดดีสครีตมีค่าอยู่ระหว่าง

$$0 < \alpha < 1 \quad (2.16)$$

แล้วตัวควบคุม  $S(q^{-1})$  และ  $R(q^{-1})$  ถูกออกแบบภายใต้พฤติกรรมการลดผลรบกวนที่ต้องการ

เมื่ออินพุตอ้างอิงเกิดการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเส้นทางของ  $y^*(k)$  เส้นทาง  $y^*(k)$  จะถูกเก็บหรือถูกสร้างทุกครั้งที่มีอินพุตอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้รูปแบบจำลองไดนามิกวิธีนี้เรียกว่า "การติดตาม (Tracking)" ดังแสดงในรูป 2.2 รูปแบบจำลองไดนามิก  $B_m(q^{-1}) / A_m(q^{-1})$  ถูกกำหนดจากพฤติกรรมที่ต้องการ (rise time, overshoot, setting time) โดยใช้ฟังก์ชันขั้นบันไดเป็นอินพุต เส้นทาง  $y^*(k)$  มีค่า

$$y^*(k) = \frac{q^{-(d+1)} B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})} r(k) \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.2 พฤติกรรมการลดผลรบกวนและการติดตาม

$$B_m(q^{-1}) = b_{m0} + b_{m1}q^{-1} + \dots$$

$$A_m(q^{-1}) = 1 + a_{m1}q^{-1} + a_{m2}q^{-2} + \dots$$

และ  $q^{-d}B(q)$  สามารถเขียนใหม่ได้  $q^{-(d+1)}B^*(q^{-1})$ ;  $B(q^{-1}) = q^{-1}B^*(q^{-1})$

ค่า แรกของ  $y^*(k+d+1)$  ที่เกิดจาก  $r(k)$  มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y^*(k+d+1) = \frac{Bm(q^{-1})}{Am(q^{-1})} r(k) \quad (2.18)$$

การตามรอย(Tracking) นั้นตัวกรอง  $T(q^{-1})$  ควรเลือกให้เหมาะสม

$$T(q^{-1}) = GD(q^{-1}) \quad (2.19)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} G &= 1/B(1) && \text{ถ้า } B(1) \neq 0 \\ &= 1 && \text{ถ้า } B(1) = 0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

จากรูปที่ 2.2 ได้สมการตามกฎการควบคุมคือ

$$S(q^{-1})u(k) + R(q^{-1})y(k) = T(q^{-1})y^*(k+d+1) \quad (2.21)$$

และ

$$u(k) = \frac{T(q^{-1})y^*(k+d+1) - R(q^{-1})y(k)}{S(q^{-1})} \quad (2.22)$$

โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างอินพุตอ้างอิงกับเอาต์พุตคือ

$$H_{CL}(q^{-1}) = \frac{q^{-(d+1)}Bm(q^{-1})}{Am(q^{-1})} \times \frac{B^*(q^{-1})}{B(1)} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีทำซ้ำ ( Recursive System Identification )

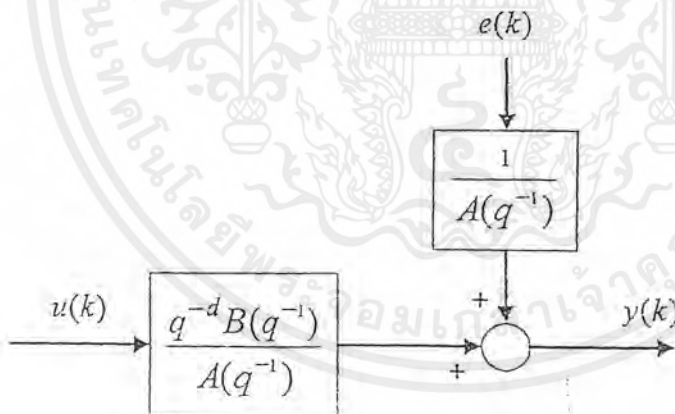
เมื่อระบบที่จะควบคุมไม่ทราบค่าพารามิเตอร์หรือค่าพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การควบคุมระบบดังกล่าวควรใช้ตัวควบคุมที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตามที่พารามิเตอร์เปลี่ยน. วิธีหาค่าพารามิเตอร์ที่นิยมคือวิธีรีเคอร์ซีฟทีทสแควร์ (Recursive Least Square ) เป็นวิธีหาค่าพารามิเตอร์แบบเรียลไทม์ (real-time) โดยใช้หลักการพื้นฐานจากลีทสแควร์ (Least Square )

### 2.3.1 โครงสร้างลีทสแควร์ (Least Square Algorithm)

หลักการของลีทสแควร์ มีพื้นฐานจากการทำซ้ำเชิงเส้น ( linear regressive ) โดยมีแบบจำลอง อย่างง่ายดังสมการ

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta \quad (2.24)$$

ค่า  $y(k)$  คือค่าเอาต์พุต,  $\varphi(k)$  คือ เวกเตอร์,  $\theta$  คือ เวกเตอร์ที่ไม่ทราบค่าของพารามิเตอร์ . แบบจำลองของระบบดิสครีตโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของระบบดิสครีต

ค่า  $e(k)$  คือ ตัวรบกวนแบบลำดับสีขาวซึ่งมีค่าความแปรผัน  $\sigma$

ได้ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต  $y(k)$  และอินพุตควบคุม  $u(k)$  คือ

$$\frac{y(k)}{u(k)} = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_m q^{-m}}{1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}} \quad (2.25)$$

เอาที่พุดของกระบวนการ เขียนให้อยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียลเท่ากับ

$$y(k) = -\sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^m b_i u(k-i) \quad (2.26a)$$

หรือ

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - \dots - a_n y(k-n) + b_0 u(k) + \dots + b_m u(k-m) \quad (2.26b)$$

จากสมการที่ 2.24 เวกเตอร์  $\phi^T(k)$  และพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า  $\theta$  คือ

$$\phi^T(k) = [-y(k-1) \dots -y(k-n) \quad u(k) \quad u(k-1) \dots u(k-m)] \quad (2.27a)$$

$$\theta = [a_1 \ a_2 \dots \ a_n \ b_0 \ b_1 \dots \ b_m] \quad (2.27b)$$

สมการที่ 2.24 สามารถเขียนใหม่ได้

$$y(k) = \phi^T(k)\theta + e(k) \quad (2.28)$$

สำหรับแบบจำลองที่สมมุติขึ้นมาเขียนเป็นสมการได้

$$y(k) = \phi^T(k)\hat{\theta} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\hat{y}(k)$  คือ เอาท์พุทที่เกิดจากการทำนาย , เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่เกิดจากการทำนายมีค่า

$$\hat{\theta} = [\hat{a}_1 \hat{a}_2 \dots \hat{a}_n \hat{b}_0 \hat{b}_1 \dots \hat{b}_m] \quad (2.30)$$

ผลต่างระหว่าง  $y(k)$  และ  $\hat{y}(k)$  คือความผิดพลาดของเอาท์พุทจริงกับเอาท์พุทที่เกิดจากการทำนายสามารถเขียนเป็นสมการได้

$$\varepsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta} \quad (2.31)$$

เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า . หาได้จากการทำให้  $\varepsilon(k)$  มีค่าน้อยที่สุดดังสมการ

$$\begin{aligned} V(\theta) &= \varepsilon^T(k)\varepsilon(k) \\ &= [y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}]^T [y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}] \end{aligned} \quad (2.32)$$

ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเท่ากับ

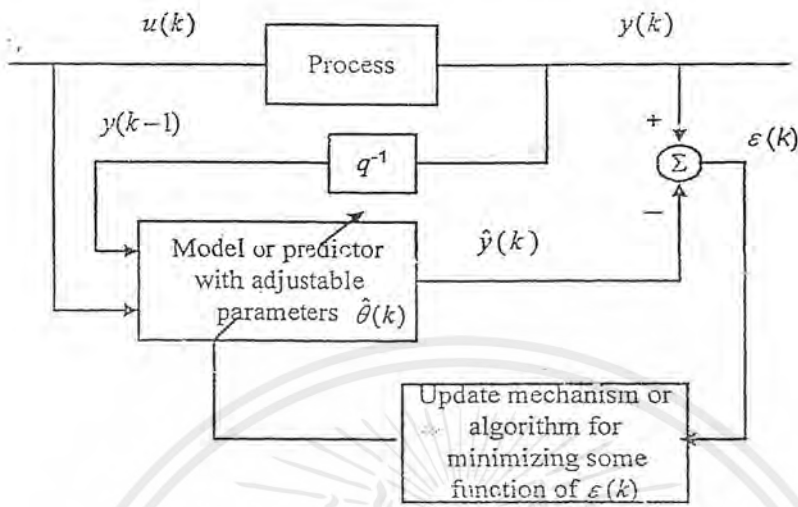
$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= \left[ \sum_{k=1}^N \varphi(k)\varphi^T(k) \right]^{-1} \sum_{k=1}^N \varphi(k)y(k) \\ &= [Z^T Z]^{-1} Z^T y \end{aligned} \quad (2.33)$$

โดยที่ค่า  $Z = \varphi^T(k)$

### 2.3.2 โครงสร้างของรีเคอร์ซีฟลีทสแควร์ (Recursive Least Square(RLS) Algorithm )

เนื่องจากระบบควบคุมแบบอแด็ปทีฟเป็นการควบคุมแบบเวลาจริง(real time)ดังนั้นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต้องทำตลอดเวลา. วิธีที่ใช้กันส่วนมากคือ RLS ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี RLS

จากสมการที่ 2.33 กำหนดตัวแปรขึ้นอีกหนึ่งตัวคือ  $P(k)$  โดยมีค่าเท่ากับ

$$P(k) = \left[ \sum_{s=1}^k \varphi(s)\varphi^T(s) \right]^{-1} \quad (2.34)$$

จากสมการที่ 2.34 สามารถเขียน  $P(k)$  ในอีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$P^{-1}(k) = P^{-1}(k-1) + \varphi(k)\varphi^T(k) \quad (2.35)$$

ให้  $\theta^1(k-1)$  เป็นค่าที่เกิดขึ้น ณ เวลา  $k-1$  เขียนเป็นสมการได้

$$\theta^{-1}(k-1) = P(k-1) \sum_{s=1}^{k-1} \varphi(s)y(s) \quad (2.36)$$

จากสมการที่ (2.34), (2.35), และ (2.36) ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เกิดจากการประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + P(k)\varphi(k)\varepsilon(k) \quad (2.37)$$

เพื่อหลีกเลี่ยงการอินเวอร์สของค่า  $P(k)$  จึงได้นำทฤษฎีการอินเวอร์สของเมตริก (Matrix inversion lemma) มาใช้กับสมการที่ (2.34) ทฤษฎี lemma มีวิธีการใช้ดังสมการที่ (2.38)

$$[A+BCD]^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B[DA^{-1}B+C^{-1}]^{-1}DA^{-1} \quad (2.38)$$

ผลที่เกิดจากการใช้วิธี RLS ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์, ค่าอแดพเตชันเกน (adaptation gain) ผลต่างระหว่างเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจริงกับเอาต์พุตที่เกิดจากการทำนาย (error)

ค่าพารามิเตอร์

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)\varphi(k)}{1 + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \varepsilon(k) \quad (2.39a)$$

ค่าอแดพเตชันเกน (adaptation gain)

$$P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1)\varphi(k)\varphi^T(k)P(k-1)}{1 + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \quad (2.39b)$$

ค่า ความผิดพลาด(error)

$$\varepsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (2.39c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ในปัญหา LS ค่าพารามิเตอร์  $\theta$  ในสมการที่ (2.24) เป็นค่าคงที่. แต่ในระบบบอดี้พืพค่าพารามิเตอร์ มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทำให้ต้องเพิ่มตัวแปรอีกคือ  $\lambda$  (forgetting factor). ซึ่งมีค่า  $0 < \lambda < 1$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (2.39a),(2.39b) และ (2.39c) ได้ใหม่

ค่าพารามิเตอร์

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \varepsilon(k) \quad (2.40a)$$

ค่าอแดปเตชันเกน (adaptation gain)

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \left[ P(k-1) - \frac{P(k-1)\varphi(k)\varphi^T(k)P(k-1)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \right] \quad (2.40b)$$

ค่าความผิดพลาด (error)

$$\varepsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (2.40c)$$

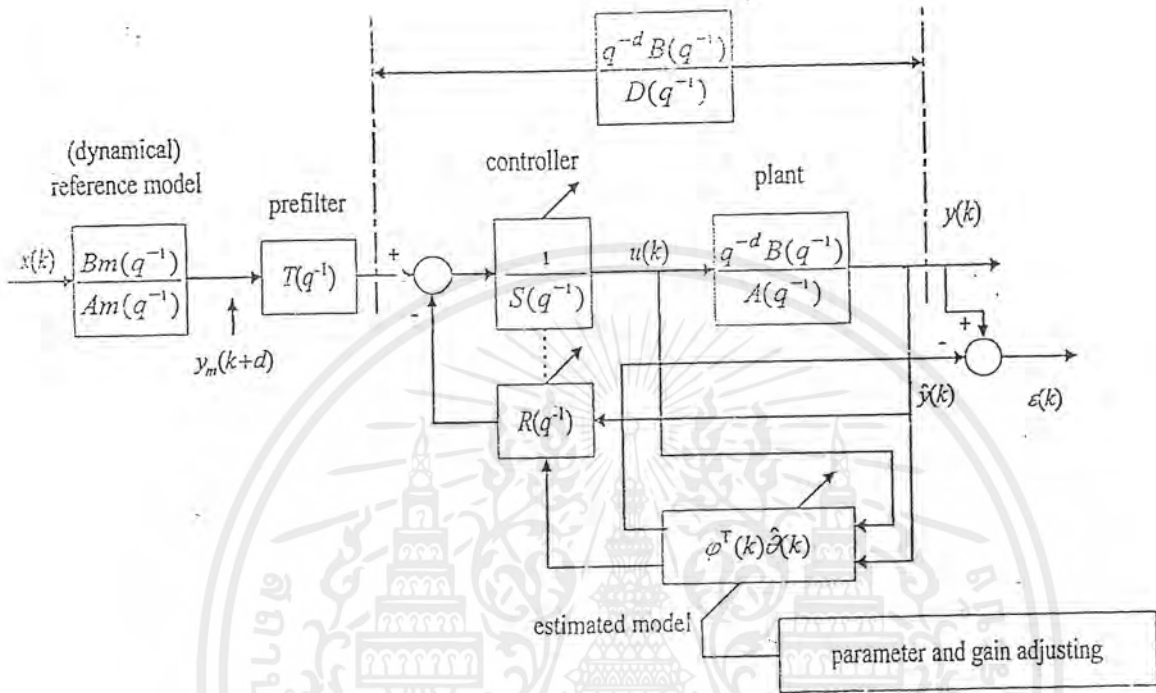
## 2.4 การออกแบบตัวควบคุมอะแดปทีฟโดยวิธีโพลเพลซเมนต์ (Adaptive Pole Placement Control)

การควบคุมระบบบอดี้พืพตัวควบคุมที่ใช้ในระบบดังกล่าวถูกออกแบบด้วยวิธีการวางโพล (Pole Placement) การออกแบบตัวควบคุมแบบโพลเพลซเมนต์ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1

### 2.4.1 การออกแบบตัวควบคุมภายใต้เงื่อนไขอุดมคติ (Design under ideal Condition)

เมื่อนำบล็อกไดอะแกรมของ RLS ในรูปที่ 4.2 มาใช้ร่วมกับตัวควบคุมที่ถูกออกแบบโดยการวางโพล (Pole Placement) ทำให้เกิดบล็อกไดอะแกรมขึ้นมาใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงตัวควบคุมที่ใช้ในระบบอแดปทีฟ

อ้างอิงรูปที่ 2.5 ในกรณีที่ระบบไม่มีตัวรบกวนสามารถเขียนสมการของกระบวนการ (Plant) ได้คือ

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d} B(q^{-1})u(k) \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_m q^{-m}$$

นำแบบจำลองไดนามิกมาเขียนเป็นสมการ

$$Am(q^{-1})y_m(k+d) = q^d Bm(q^{-1})x(k) \quad (2.42)$$

$y_m(k+d)$  คือ สัญญาณอ้างอิงและ

$$Am(q^{-1}) = 1 + a_{m1} q^{-1} + \dots + a_{mn} q^{-n}$$

$$Bm(q^{-1}) = b_{m0} + b_{m1} q^{-1} + \dots + b_{mn} q^{-m}$$

โพลวงปิดกำหนดจากโพลในเมียด

$$D(q^{-1}) = 1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{nd} q^{-nd} \quad (2.43)$$

เอาต์พุตของกระบวนการ มีค่า

$$D(q^{-1})y(k) = q^d B(q^{-1})T(q^{-1})y_m(k+d) \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $u(k)$  ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการหาได้จาก

$$u(k) = \frac{1}{S(q^{-1})} [T(q^{-1})y_m(k+d) - R(q^{-1})y(k)] \quad (2.45)$$

โดยที่

$$S(q^{-1}) = 1 + s_1 q^{-1} + \dots + s_{ns} q^{-ns}$$

$$R(q^{-1}) = r_0 + r_1 q^{-1} + \dots + r_{nr} q^{-nr}$$

นำสมการที่ (2.45) แทนเข้าไปในสมการที่ (2.41) และเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.44) ทำให้ได้สมการไดโอแฟนทีน

$$D(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})R(q^{-1}) \quad (2.46)$$

## บทที่ 3

### การคำนวณและการสร้าง

ในการควบคุมระบบจริงด้วยวิธีอะแดปทีฟโพลเพลซเมนที่มีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

3.1 หาค่าพารามิเตอร์ของโมเดลโดยวิธีรีเคอร์ซีฟลีสทสแควร์ (Recursive Least square) โดยมีขั้นตอนการคำนวณตามสมการดังนี้

3.1.1 หาค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการทำนายจากสมการ

$$e(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (3.1)$$

3.1.2 การปรับอัตราขยาย

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \left[ P(k-1) - \frac{P(k-1)\varphi(k)\varphi^T(k)P(k-1)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \right] \quad (3.2)$$

$\lambda$  คือ ค่าฟอร์เกตติงแฟคเตอร์ (forgetting factor) มีค่าอยู่ระหว่าง  $0 < \lambda < 1$  ในที่นี้กำหนดให้มีค่า 0.9 และกำหนดค่า  $P(k-1)$  ในขั้นแรกให้มีค่าเท่ากับ  $10,000I$  เมื่อ  $I$  คือเมตริกเอกลักษณ์ (identity matrix)

3.1.3 หาค่าพารามิเตอร์จากสมการ

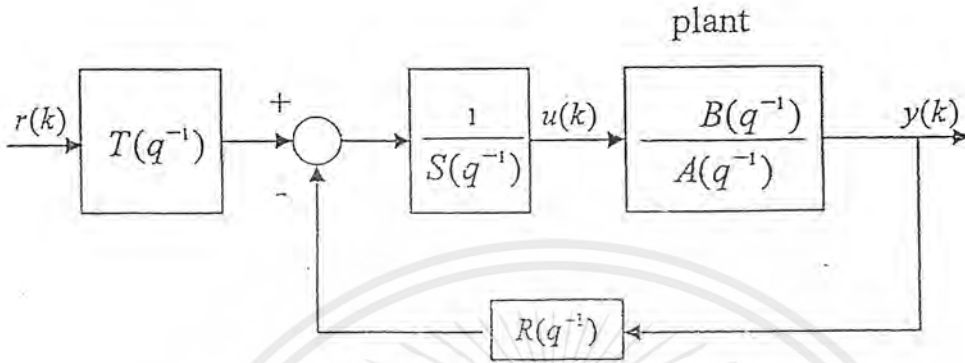
$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} e(k) \quad (3.3)$$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องออกมานำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีอะแดปทีฟโพลเพลซเมนที่ดังขั้นตอนต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโพลเพลซเมนต์

ตัวควบคุมที่ใช้ในระบบอะแดพทีฟมีลักษณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวควบคุม R.S.T ด้วยวิธีโพลเพลซเมนต์

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องออกมา นำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไปคำนวณหาค่า  $S(q^{-1})$ ,  $R(q^{-1})$  และ  $T(q^{-1})$  โดยค่า  $S(q^{-1})$ ,  $R(q^{-1})$  หาได้จากสมการ

$$MX = D \tag{3.4}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & b_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ a_1 & 1 & \dots & \dots & b_1 & b_0 & \dots & \dots & \dots \\ a_2 & a_1 & \dots & \dots & b_2 & b_1 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & b_0 \\ a_n & \dots & \dots & a_1 & b_m & \dots & \dots & \dots & b_1 \\ 0 & a_n & \dots & \dots & 0 & b_m & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & a_n & \dots & \dots & \dots & 0 & b_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ s_1 \\ \dots \\ \dots \\ s_{ns} \\ r_0 \\ r_1 \\ \dots \\ \dots \\ r_{nr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ d_1 \\ \dots \\ \dots \\ d_{nd} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่เมตริก  $M$  คือ ซิสเวสเตอร์เมตริก เป็นเมตริกที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ที่หามาจากขั้นตอนที่ (3.1.1), (3.1.2) และ (3.1.3)

เวกเตอร์  $D$  คือ สัมประสิทธิ์ของสมการ  $D(q^{-1}) = (1 - \alpha q^{-1})^{nd}$  ค่า  $\alpha$  เป็นค่าที่กำหนดขึ้นเอง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง  $0 < \alpha < 1$  ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 0.1, ค่า  $nd$  มีค่าเท่ากับ 2 เนื่องจากมอเตอร์เป็นระบบอันดับสอง

เมื่อแก้สมการที่ (3.4) ทำให้ได้ค่า  $S(q^{-1})$ ,  $R(q^{-1})$   
ส่วนค่า  $T(q^{-1})$  หาจาก

$$T(q^{-1}) = G D(q^{-1}) \quad (3.15)$$

โดยที่

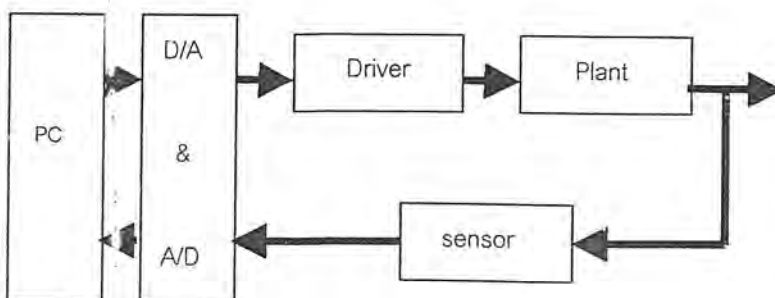
$$G = \frac{1}{B(1)} \quad \text{ถ้า } B(1) \neq 0 \\ = 1 \quad ; B(1) = 0$$

นำค่า  $S(q^{-1})$ ,  $R(q^{-1})$  และ  $T(q^{-1})$  ที่คำนวณได้แทนในสมการกฎการควบคุม

$$u(k) = \frac{T(q^{-1})y^*(k+d+1) - R(q^{-1})y(k)}{S(q^{-1})}$$

เพื่อนำค่าสัญญาณควบคุมที่ได้ส่งให้กระบวนการ

### 3.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบ(Block diagram)

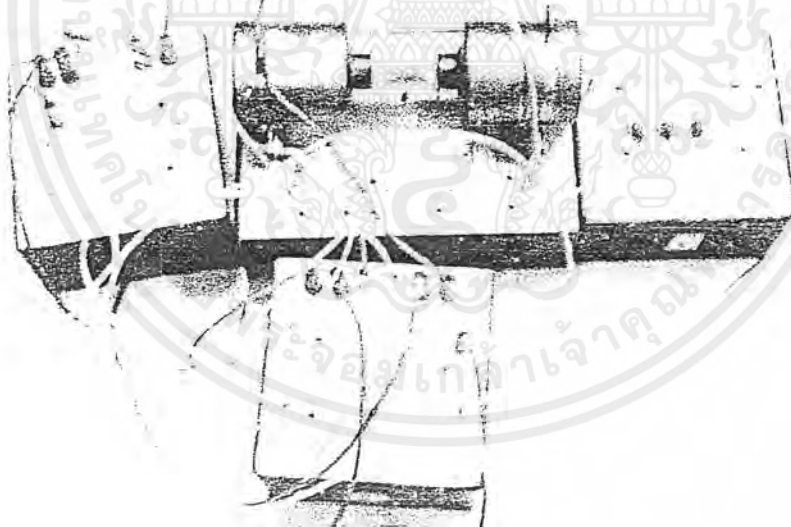


รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

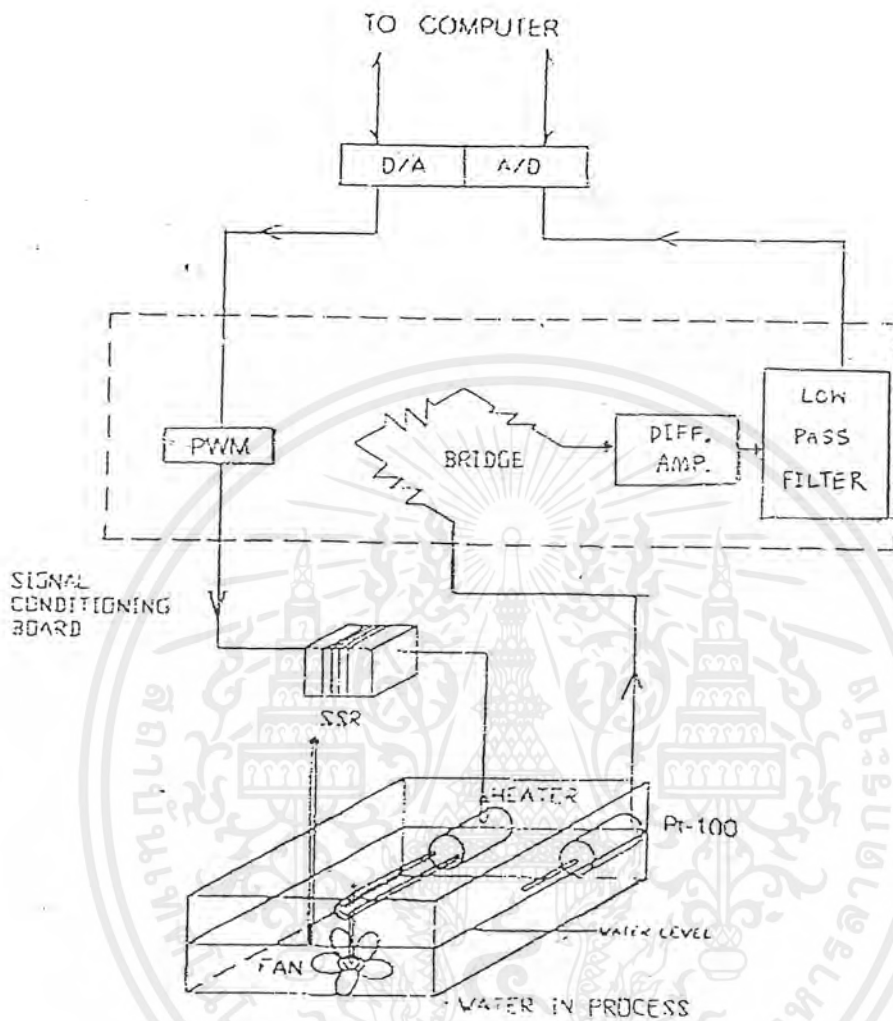
จากรูปที่ 3.2 พิสูจน์การทำงานจากระบบทั้งหมดในแต่ละรอบได้ดังนี้

- 1) ตัวรับรู้ (sensor) จะรับรู้ค่าเอาต์พุทของกระบวนการแล้วแปลงค่าเป็นศักดาไฟฟ้า
  - 2) สัญญาณศักดาไฟฟ้าจาก 1) จะผ่านเข้าไปในคอมพิวเตอรืโดยผ่านทางวงจรแปลงสัญญาณ ต่อเนื่องเป็นสัญญาณดิจิทัล
  - 3) คอมพิวเตอรืจะรับสัญญาณดิจิทัลจาก 2) มาเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการ ( Set point ) และคำนวณตามสมการที่ได้โปรแกรมไว้
  - 4) สัญญาณดิจิทัลที่คอมพิวเตอรืคำนวณแล้วจะผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณ ต่อเนื่องซึ่งจะกลับเป็นศักดาไฟฟ้าอีกครั้งเรียกว่า "สัญญาณควบคุม"
  - 5) สัญญาณควบคุมจาก 4) จะผ่านไดรเวอร์ (Driver) แล้วไดรเวอร์จะส่งสัญญาณศักดาไฟฟ้า ให้กับกระบวนการ
- ระบบทั้งหมดนี้จะทำงานตามขั้นตอน 1) ถึง 5) หลายรอบจนกระทั่งได้เอาต์พุทของ กระบวนการตามที่ต้องการซึ่งโปรแกรมไว้ในคอมพิวเตอรื



รูปที่ 3.3 ฮาร์ดแวร์ของมอเตอร์กระแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ฮาร์ดแวร์ของถังต้มน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วงจรแปลงสัญญาณเพื่อติดต่อกับคอมพิวเตอร์

ในที่นี้ใช้การ์ด PC-DIO เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อขยายระบบอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

#### 3.4.1 ส่วนแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล; ADC

ในส่วนนี้ใช้ไอซีเบอร์ ADC0804 ทำหน้าที่รับสัญญาณอินพุตในรูปอนาลอกแล้วเปลี่ยนเป็นดิจิตอล เพื่อส่งให้ซีพียูประมวลผล โดยสามารถรับสัญญาณอนาลอกได้ถึง 5 vdc

#### 3.4.2 ส่วนแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก; DAC

ในส่วนนี้ใช้ไอซี DAC ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณอนาลอก ซึ่งการควบคุมขนาดของเอาต์พุตนั้นทำได้โดยการส่งข้อมูลออกไปยังพอร์ตควบคุมของไอซี DAC (Port Control DAC) ซึ่งอัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้นั้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้น นั่นคือ

ถ้าส่งค่า FFH จะได้ขนาดเอาต์พุตสูงสุด

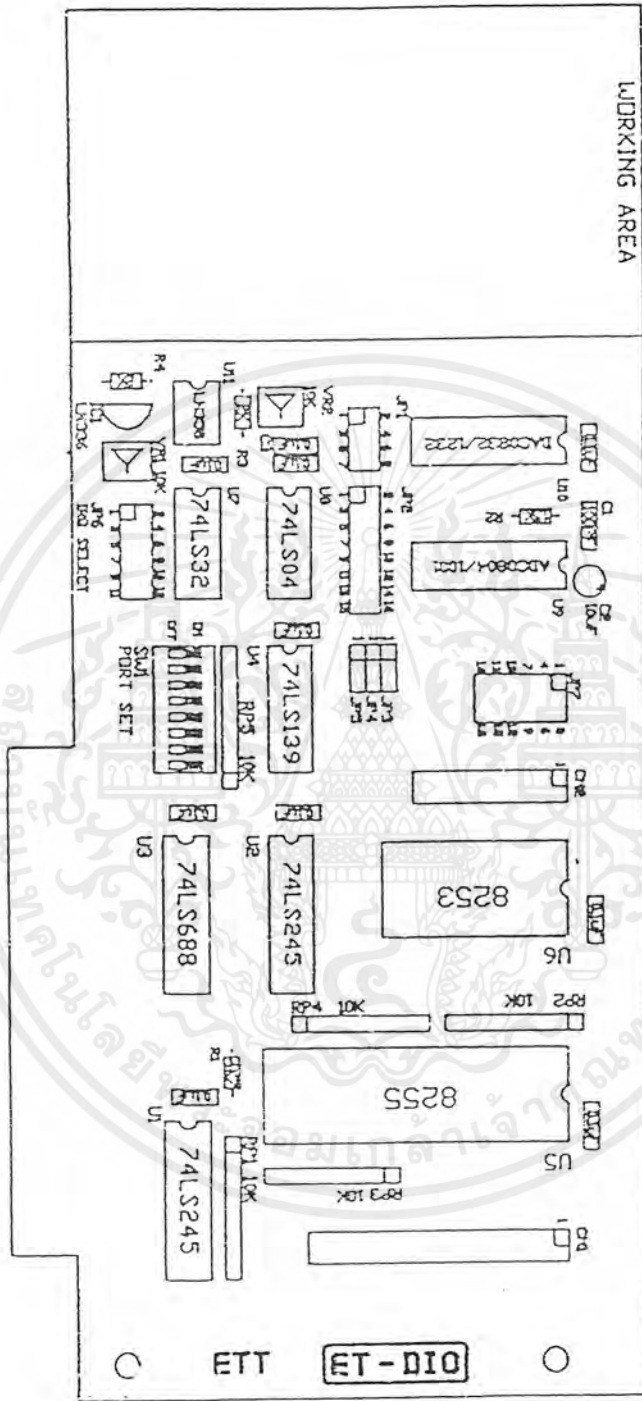
ถ้าส่งค่า 7FH จะได้ขนาดเอาต์พุตครึ่งหนึ่ง

ถ้าส่งค่า 00H จะได้ขนาดเอาต์พุตต่ำสุด

ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตมีความละเอียดถึง 256 ค่าจากย่านความกว้างของสัญญาณทั้งหมดหรือคำนวณจาก

$$\text{ความละเอียดของช่วงสัญญาณ} = (V_{\max} - V_{\min}) / 256$$

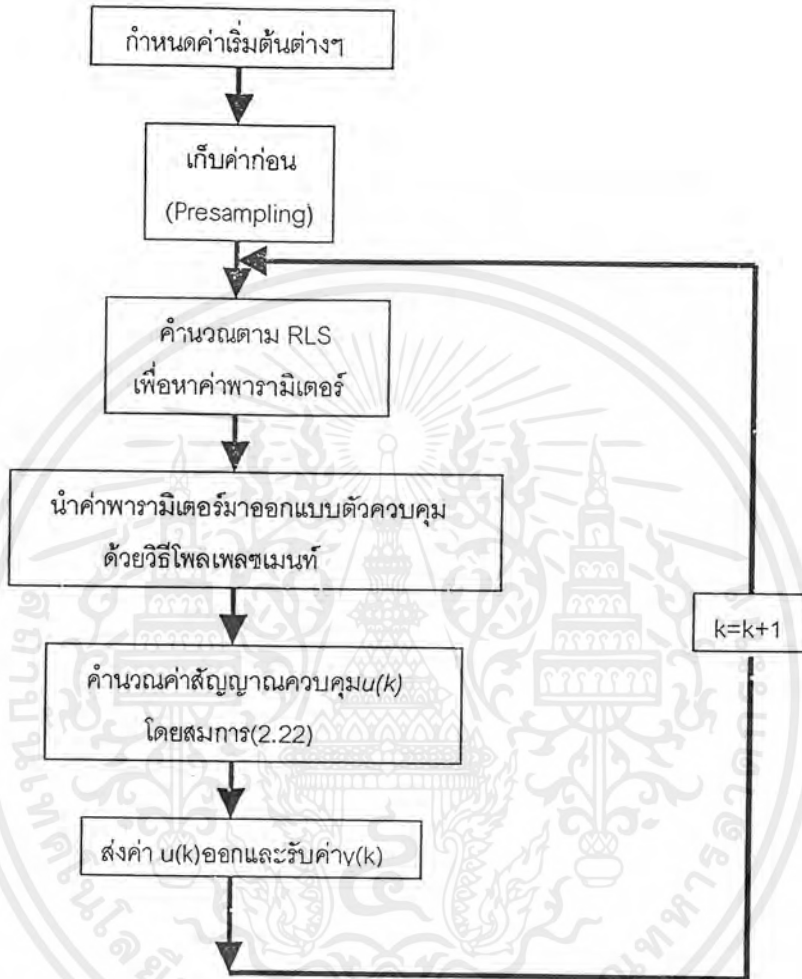
สัญญาณเอาต์พุตมีค่าระหว่าง 0 – 10 V เพราะฉะนั้นได้ความละเอียดของสัญญาณเป็น 0.039 V



รูปที่ 3.5 การ์ด ET-PCDIO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนโฟลว์ชาร์ตของโปรแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 3.6 โฟลว์ชาร์ตของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

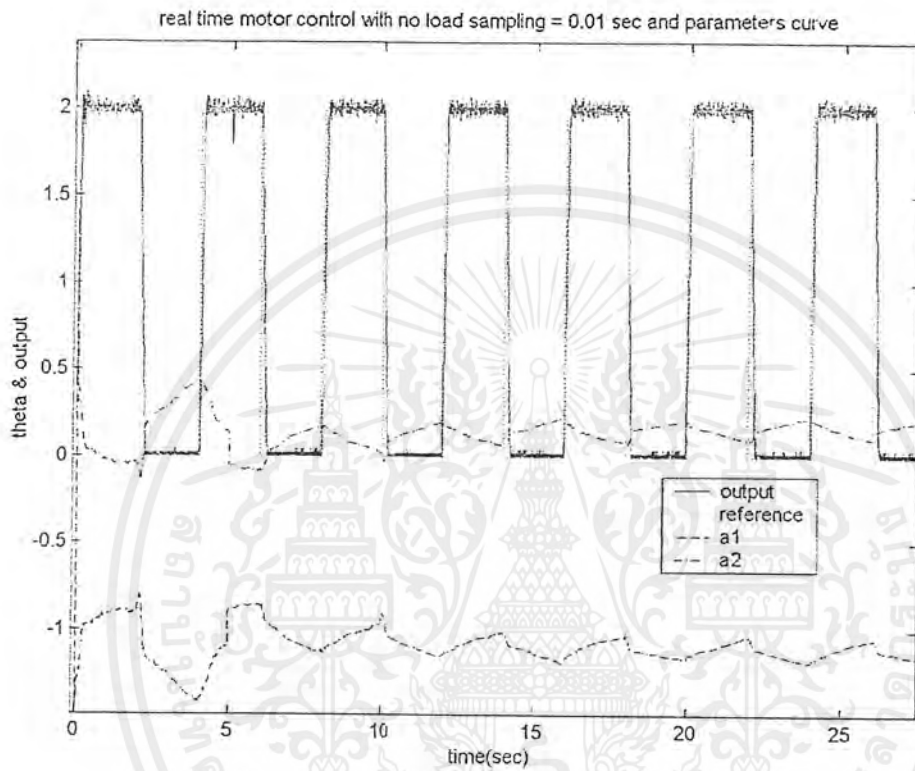
ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำหลักการในบทที่ 3 มาเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษาซีเพื่อทำการควบคุมกระบวนการโดยวิธีอะแดปทีฟโพลเพลซเมนต์และได้ทดลองควบคุมกระบวนการจริงสองกระบวนการคือ

1. กระบวนการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง
2. กระบวนการควบคุมอุณหภูมิของถังต้มน้ำ

#### 4.1 การควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงโดยวิธีอะแดปทีฟโพลเพลซเมนต์

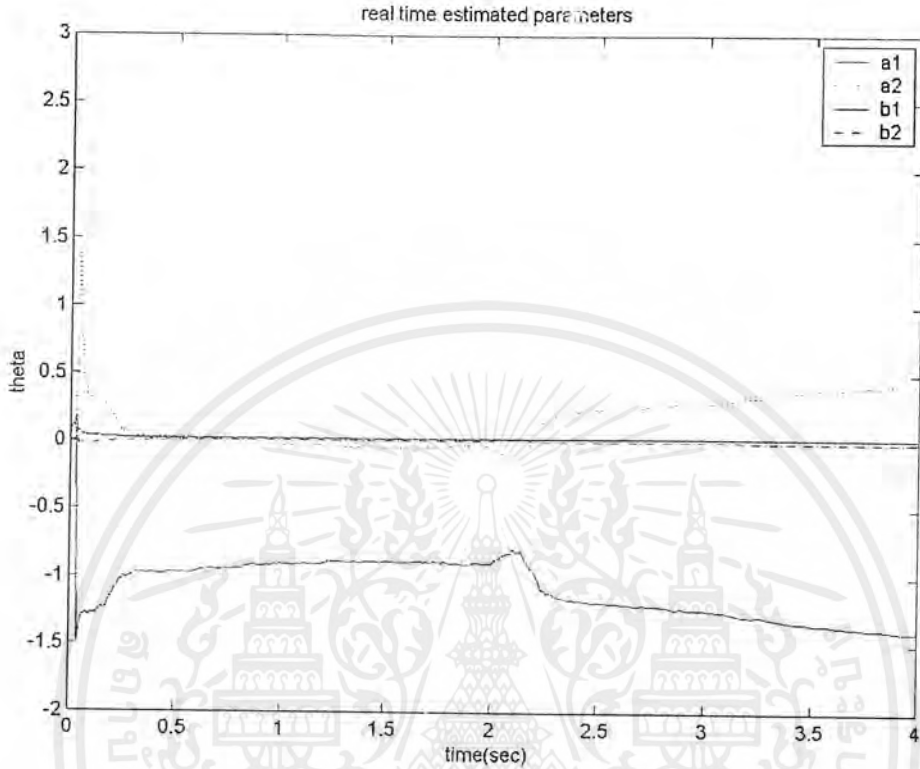
4.1.1 ทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงโดยไม่กำหนดแบบจำลองอ้างอิงเพื่อดูผลตอบสนองของระบบและการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์

โดยการทดลองนี้กำหนดให้อินพุทอ้างอิง (reference input) เป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (square wave) มีขนาด 0 - 2 โวลท์, เวลาที่ใช้ในการแซมปลิง (sampling period) คือ 0.01 วินาที, ค่าความถี่ของคลื่นรูปสี่เหลี่ยมคือ 0.25 Hz, ค่าโพล  $\alpha$  เท่ากับ 0.1, ค่าอะแดปเตชันเกนเท่ากับ 100,000, ค่า  $\lambda$  (forgetting factor) เท่ากับ 0.99 มอเตอร์ไม่มีโหลด



รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้จากวิธี RLS

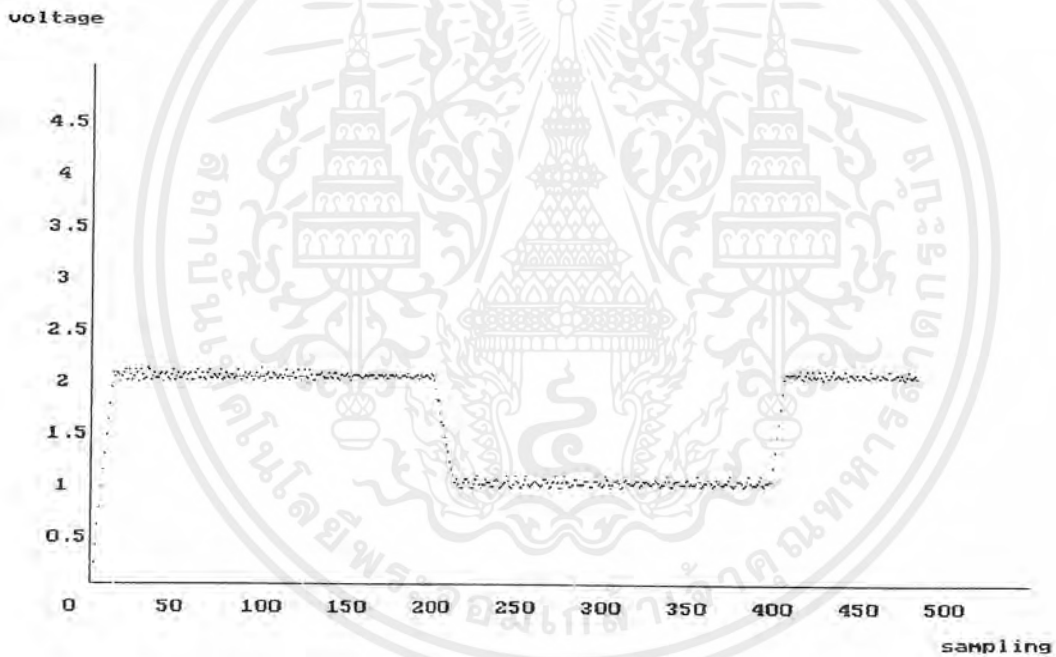
จากการทดลองจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้จากวิธี RLS จะไม่คงที่แต่ยังคงแสดงถึงลักษณะของระบบได้อย่างใกล้เคียงและผลตอบสนองของมอเตอร์ค่อนข้างดี โดยเวลาเข้าสู่สถานะคงตัวมีค่าน้อย

#### 4.1.2 การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบเรียลไทม์ในขณะที่ไม่มีโหลดและไม่ได้ใช้แบบจำลองอ้างอิง

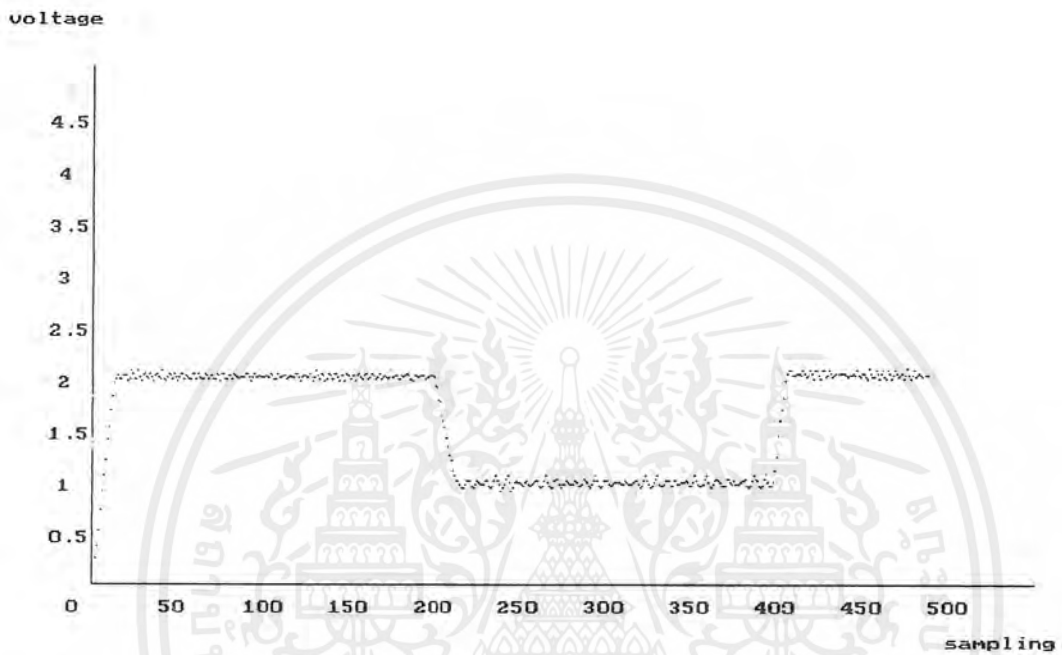
อินพุตที่ใช้คือ คลื่นรูปสี่เหลี่ยม(square wave) มีขนาด 2 โวลต์, ความถี่ที่ใช้มีค่า 0.5 Hz, เวลาที่ใช้ในการแซมปีง(sampling period) คือ 0.01วินาที

เอาท์พุทที่ออกมาจะเป็นศักดาไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับความเร็ว

โดยกำหนดโพล  $\alpha$  จากสมการ  $D(q^{-1}) = (1 - \alpha q^{-1})^{nd}$  ให้มีค่าตั้งแต่ 0.1 - 0.7 แล้วดูผลตอบสนองเมื่อโพลเปลี่ยนแปลงเพื่อหาค่าโพลที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดลองแสดงดังรูปข้างล่าง

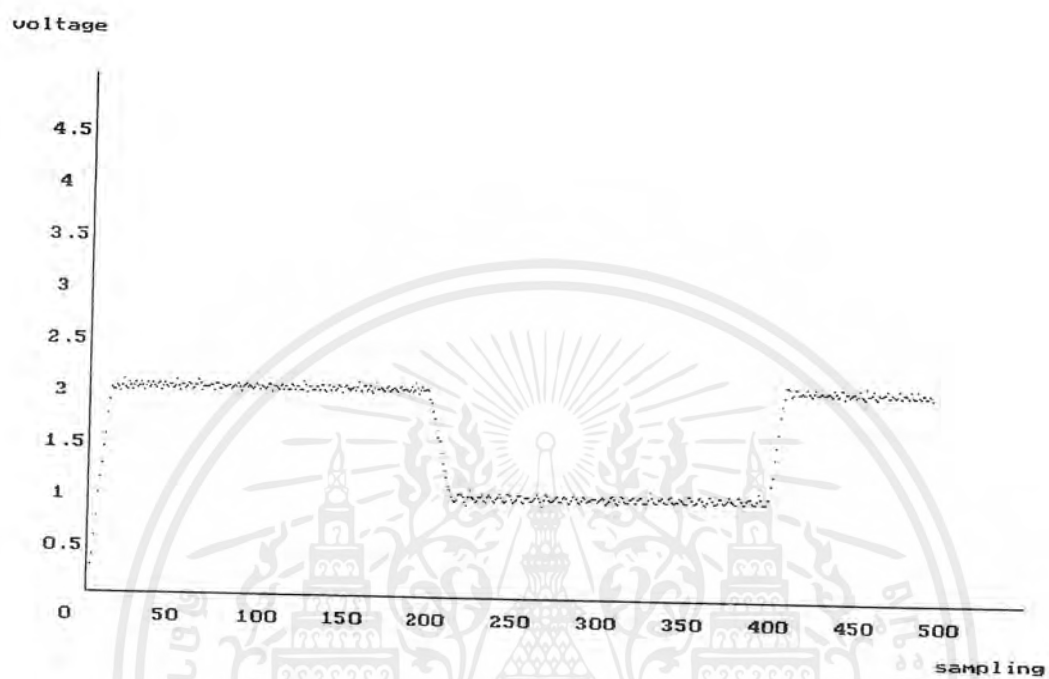


รูปที่ 4.3 เมื่อ  $\alpha$  มีค่า 0.1



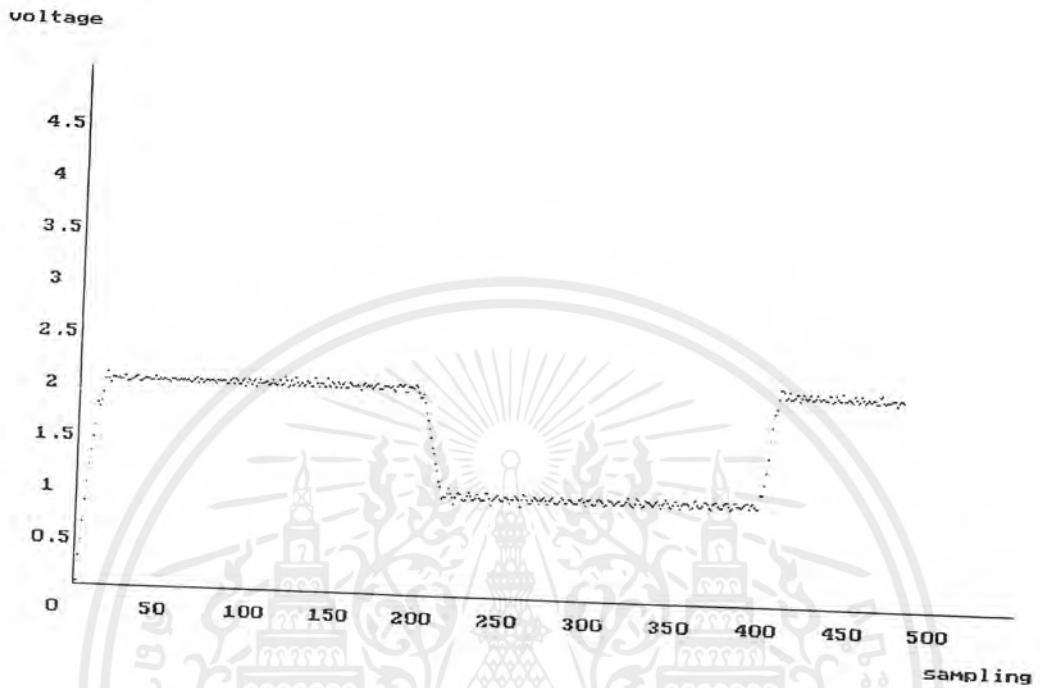
รูปที่ 4.4 เมื่อ  $\alpha$  มีค่า 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



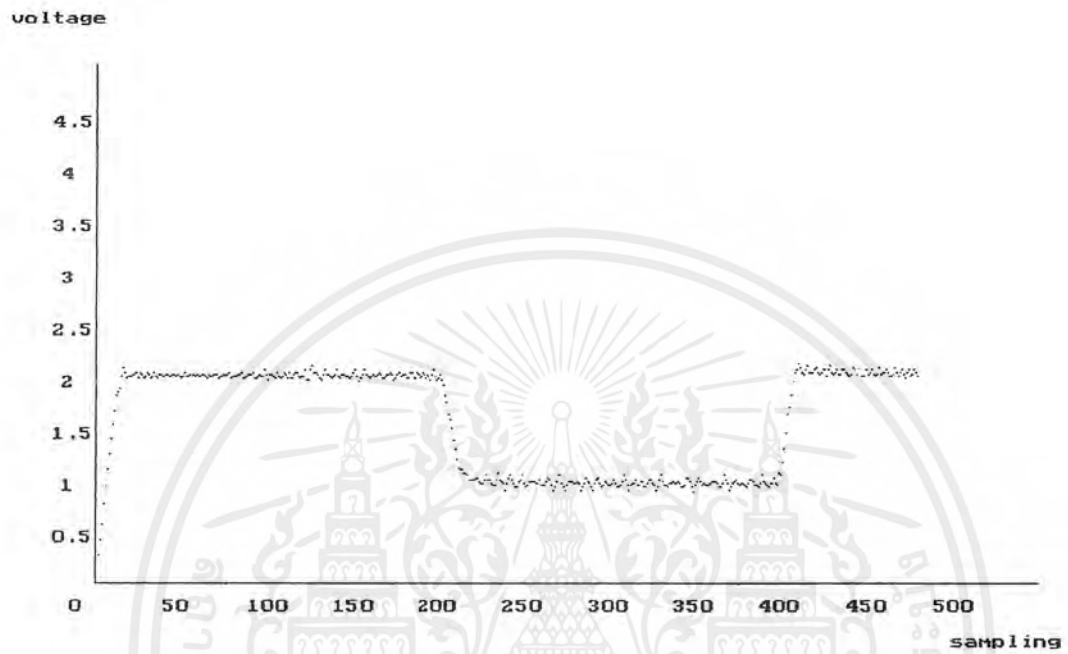
รูปที่ 4.5 เมื่อ  $\alpha$  มีค่า 0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



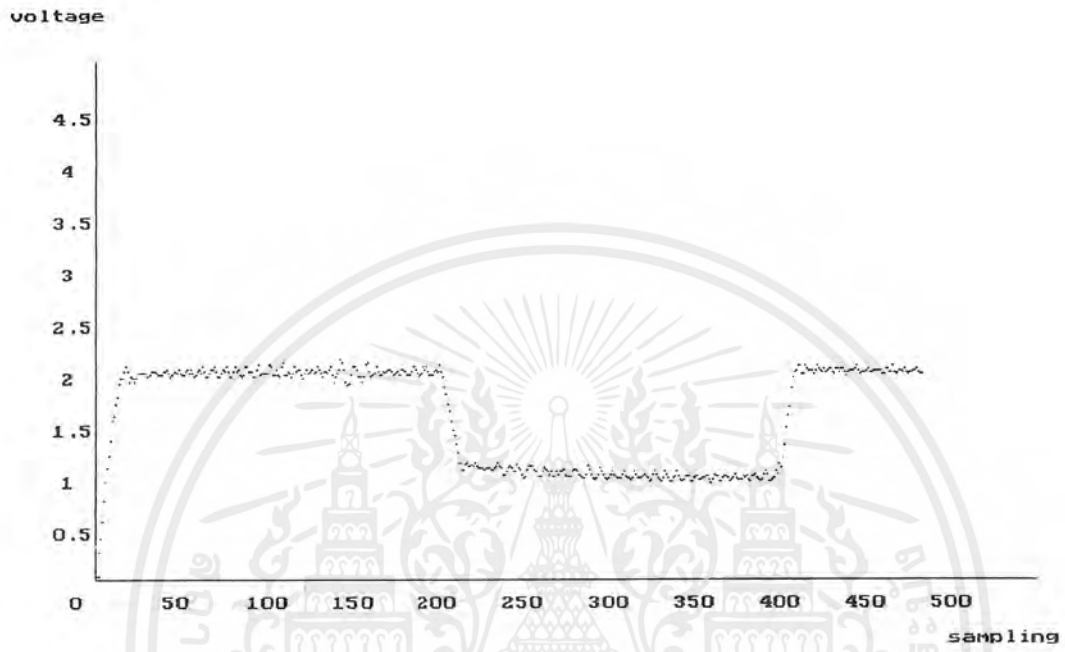
รูปที่ 4.6 เมื่อ  $\alpha$  มีค่า 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



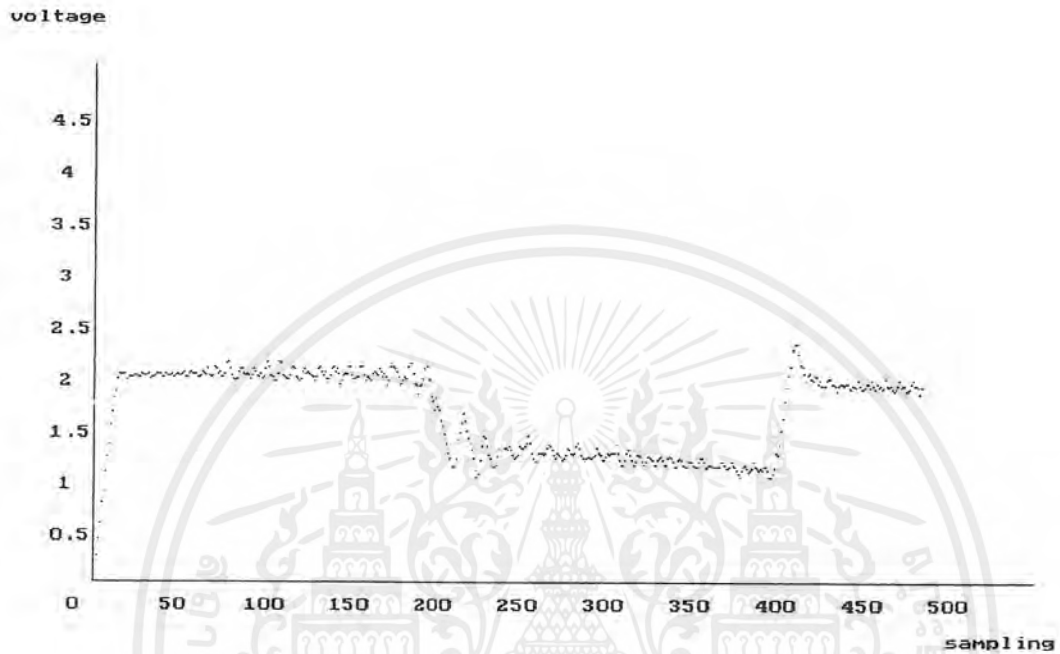
รูปที่ 4.7 เมื่อ  $\alpha$  มีค่า 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 เมื่อ  $\alpha$  มีค่า 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 เมื่อ  $\alpha$  มีค่า 0.7

จากการทดลองเห็นได้ว่าค่าโพลที่เหมาะสมควรมีค่าน้อยๆ เนื่องจากถ้าค่าโพลสูงจะทำให้ระบบไม่เสถียร

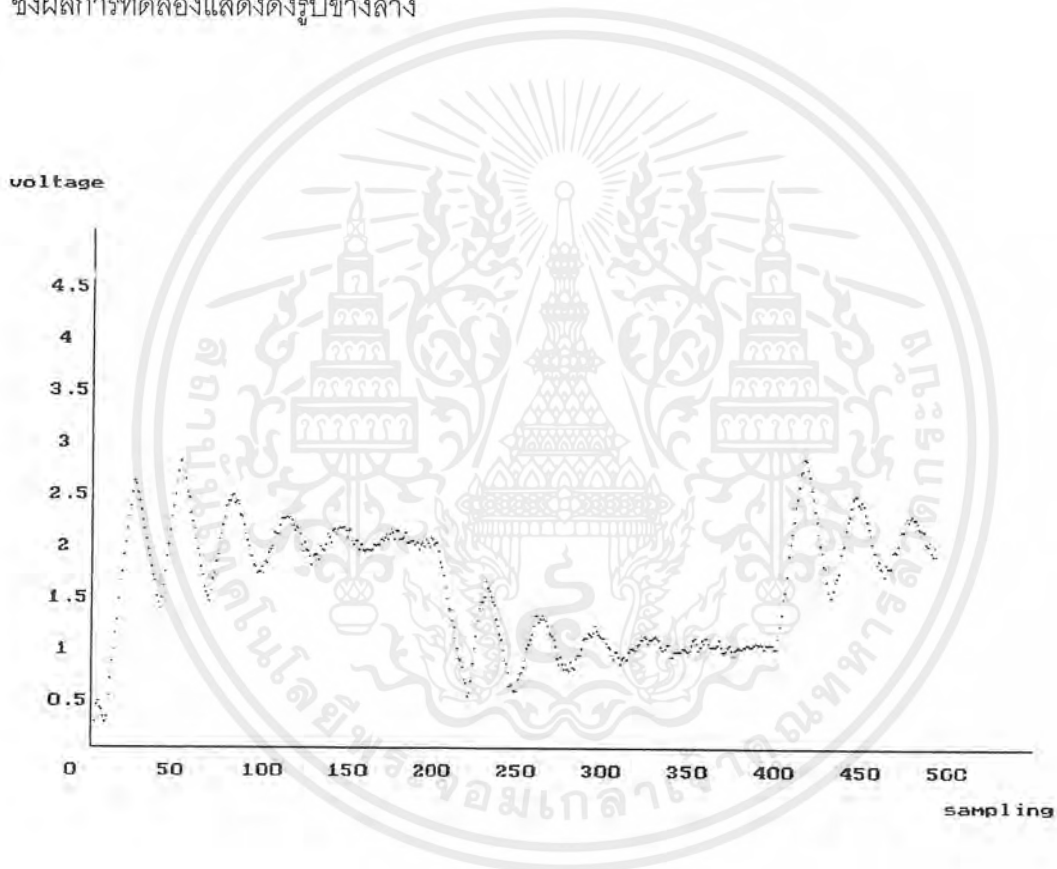
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบเรียลไทม์ในกรณีที่ไม่มีโหลดและได้มีการใช้แบบจำลองอ้างอิง

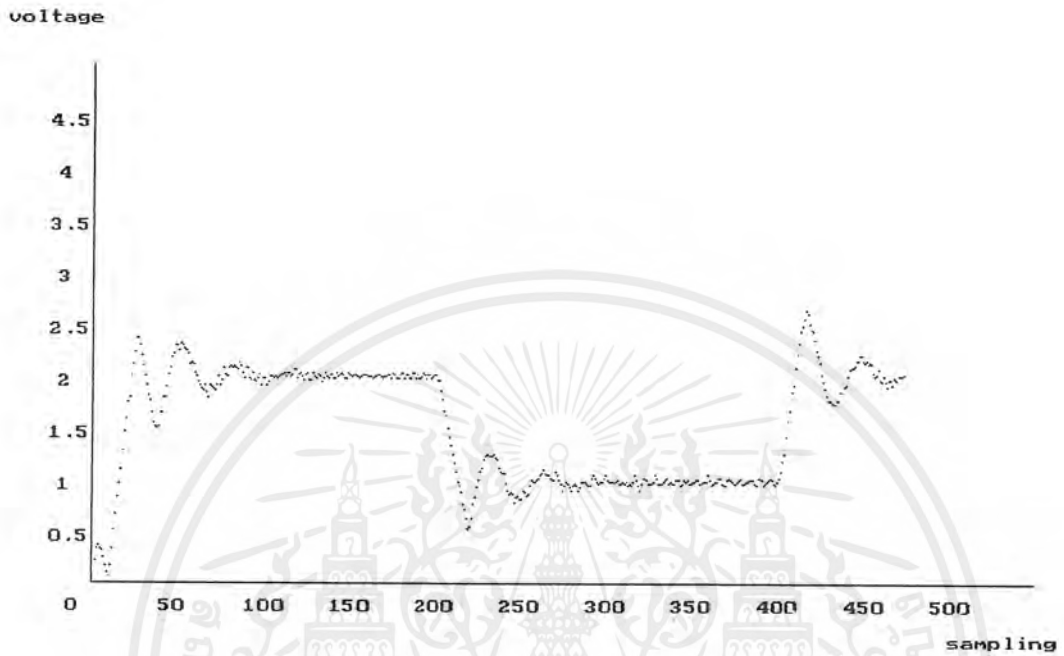
อินพุทที่ใช้คือ คลื่นรูปสี่เหลี่ยม(square wave) มีขนาด 2 โวลต์, ความถี่ที่ใช้มีค่า 0.5 Hz, เวลาที่ใช้ในการแซมปิ้ง(sampling period) คือ 0.01, ค่าโพลเท่ากับ 0.1

โดยแบบจำลองอ้างอิงกำหนดจาก  $\omega_n$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20 และกำหนดให้  $\zeta$  (damping ratio) มีค่าตั้งแต่ 0.1-0.9

ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปข้างล่าง

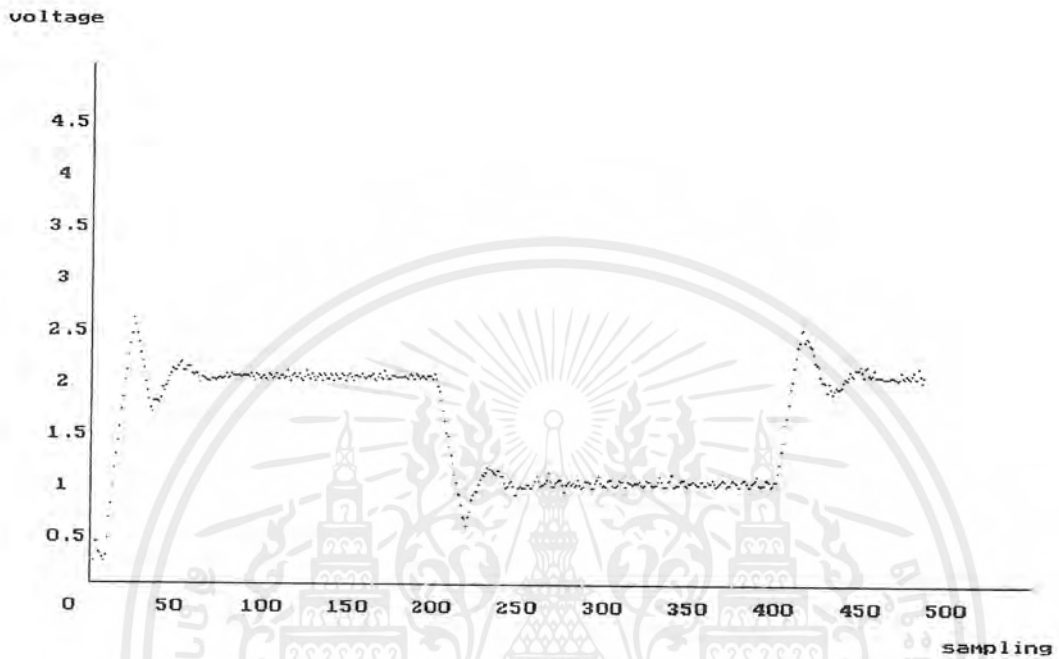


รูปที่ 4.10 เมื่อ  $\zeta$  มีค่า 0.1



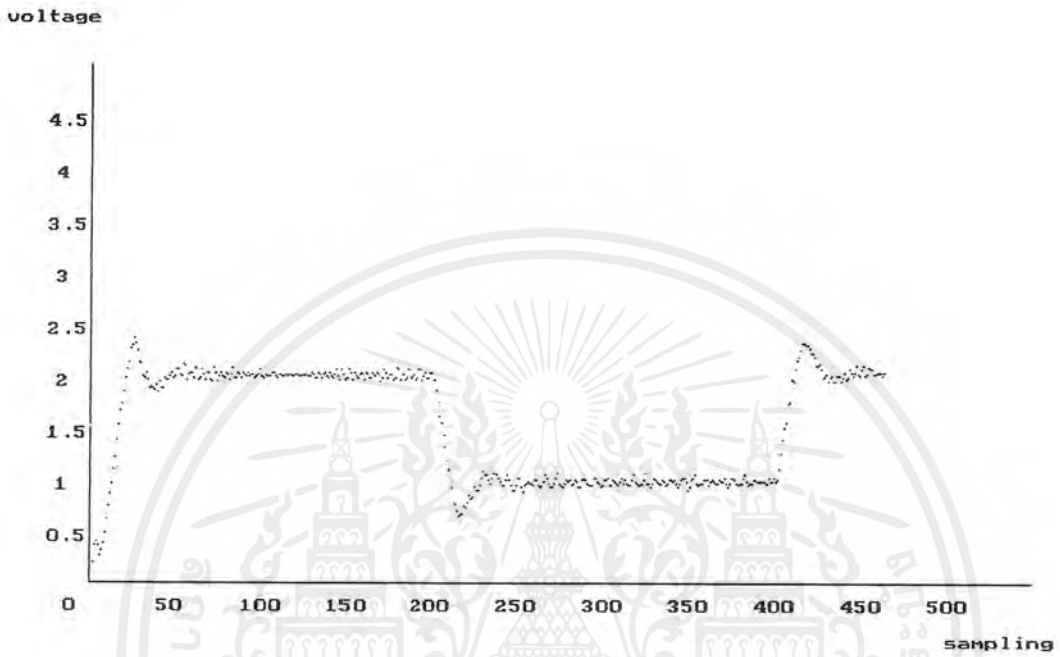
รูปที่ 4.11 เมื่อ  $\xi$  มีค่า 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



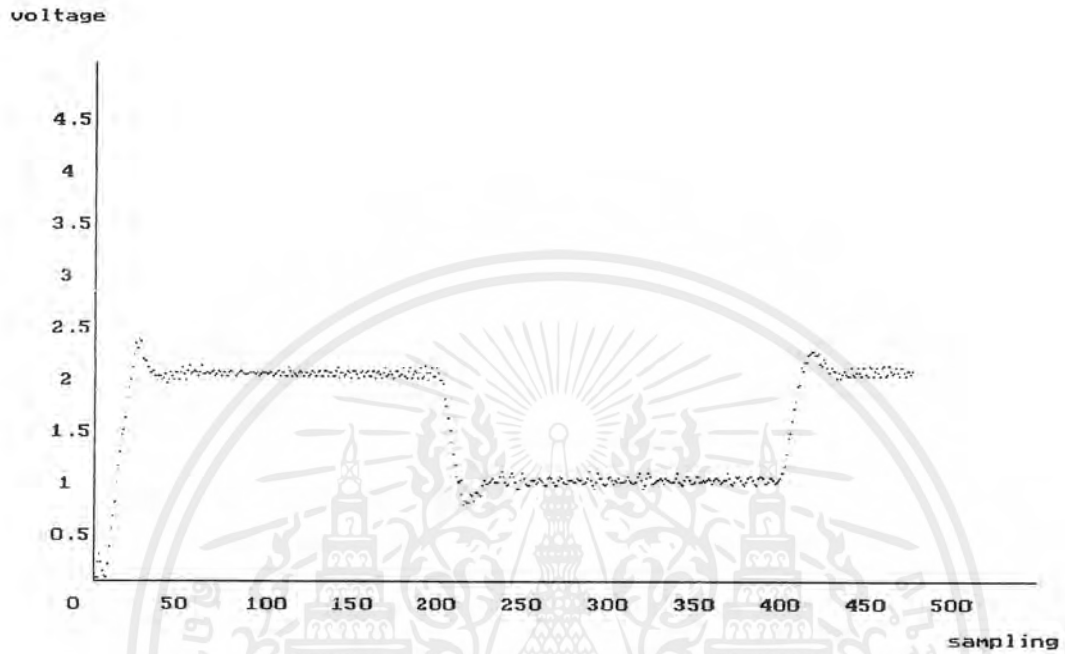
รูปที่ 4.12 เมื่อ  $\xi$  มีค่า 0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



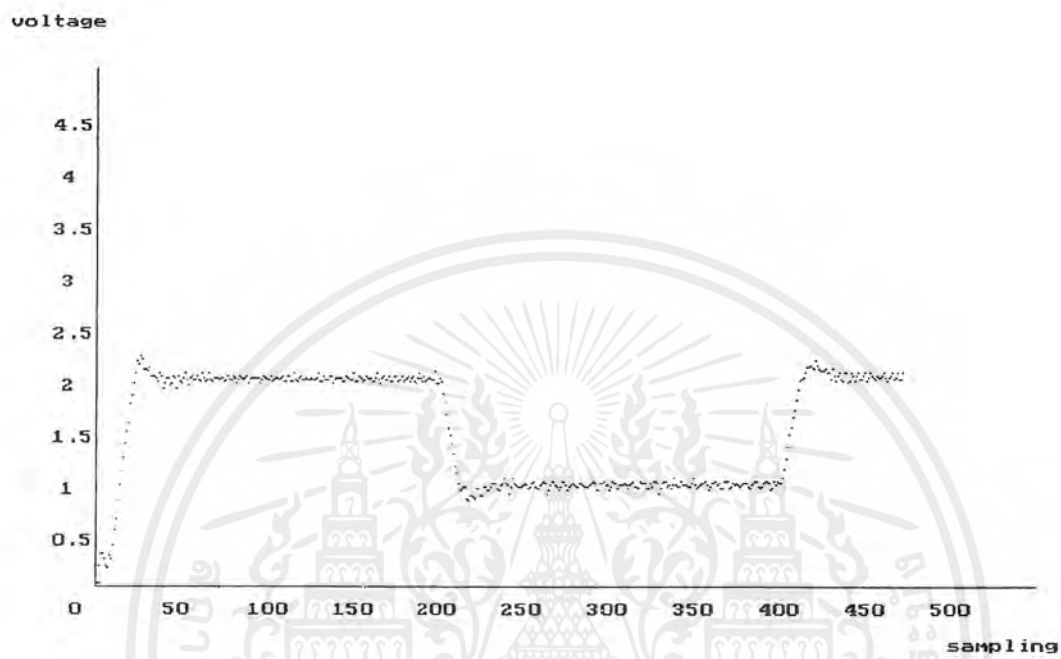
รูปที่ 4.13 เมื่อ  $\zeta$  มีค่า 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



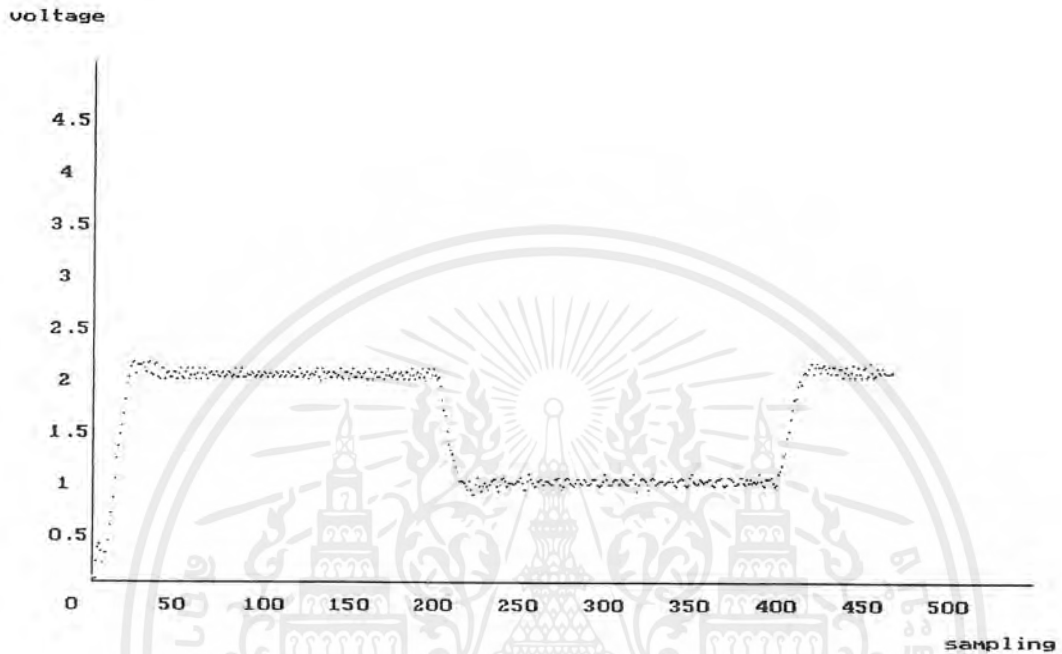
รูปที่ 4.14 เมื่อ  $\zeta$  มีค่า 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



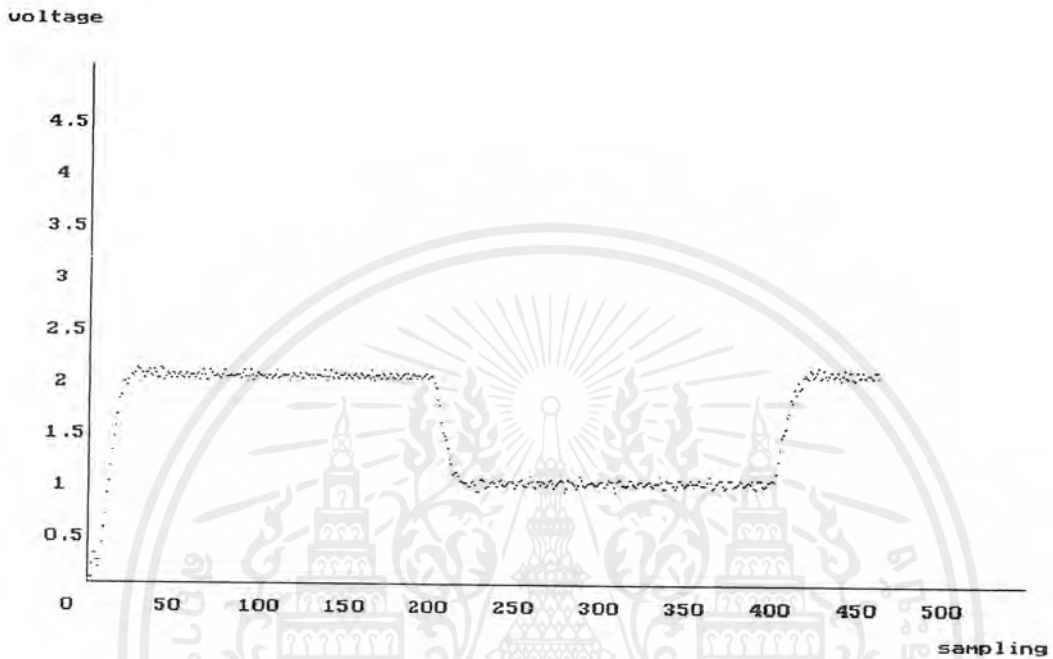
รูปที่ 4.15 เมื่อ  $\xi$  มีค่า 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



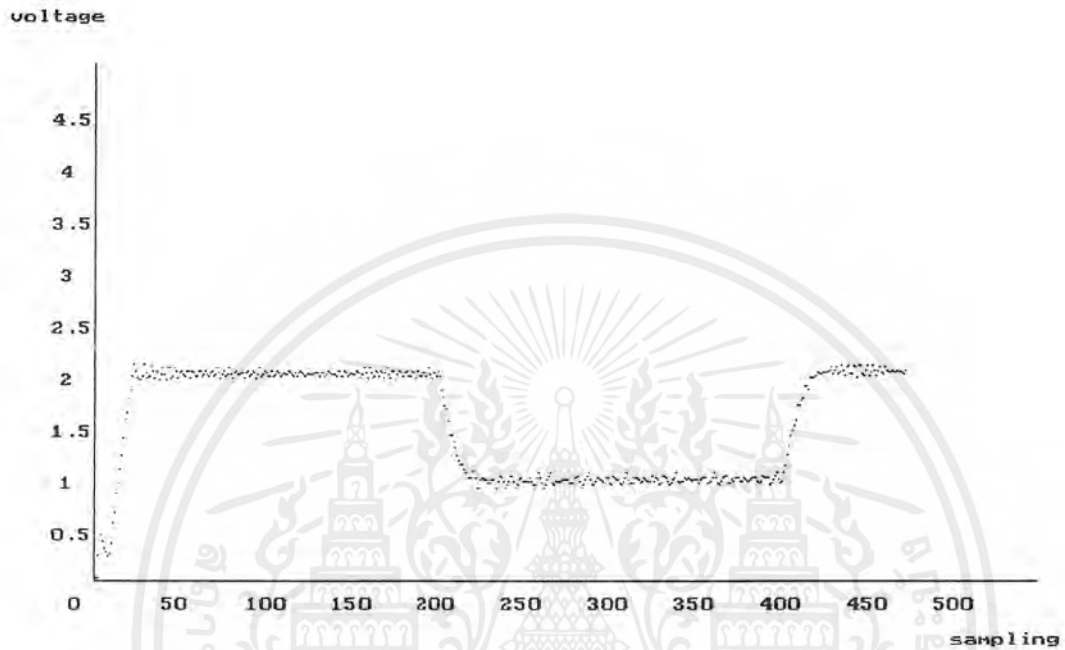
รูปที่ 4.16 เมื่อ  $\zeta$  มีค่า 0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 เมื่อ  $\zeta$  มีค่า 0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 เมื่อ  $\zeta$  มีค่า 0.9

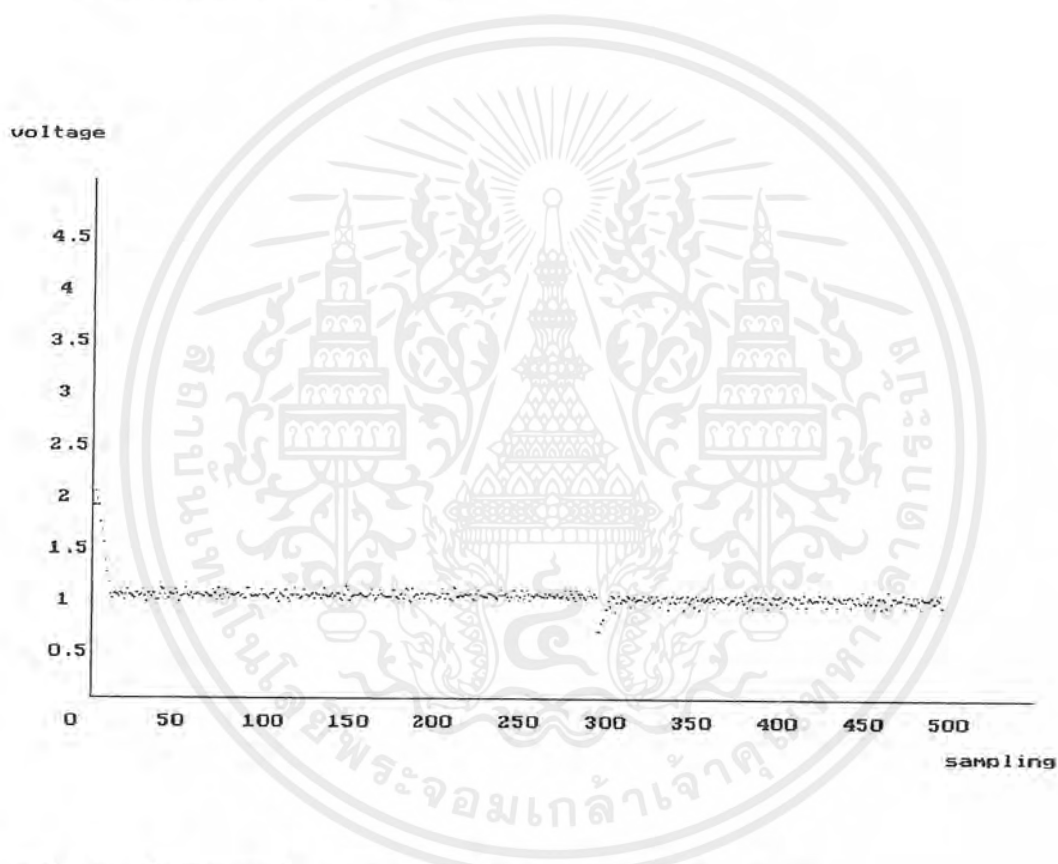
จากการทดลองสรุปได้ว่าสามารถที่จะกำหนดผลตอบสนองให้กับระบบอย่างไรก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

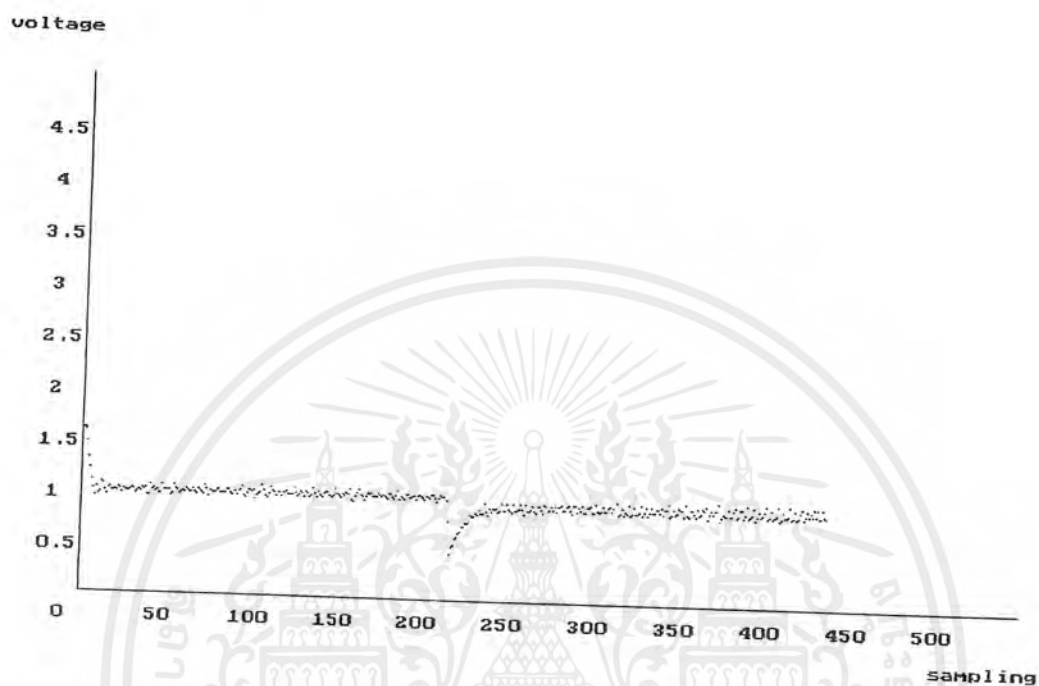
#### 4.1.4 การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบเรียลไทม์เมื่อมีโหลดและไม่ได้มีการใช้แบบจำลองอ้างอิง

อินพุทที่ใช้คือ ฟังก์ชันขั้นบันไดมีขนาด 1 โวลต์, เวลาที่ใช้ในการแซมปิ้ง (sampling period) คือ 0.01 วินาที ค่าโพลเท่ากับ 0.1 โดยโหลดที่ใช้คือความต้านทานโดยแต่ละตัวมีค่าความต้านทาน 10 โอห์ม

ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 4.19 เมื่อมีโหลดหนึ่งตัว (10  $\Omega$ ) จุดที่กราฟตกคือช่วงที่เปลี่ยนโหลด



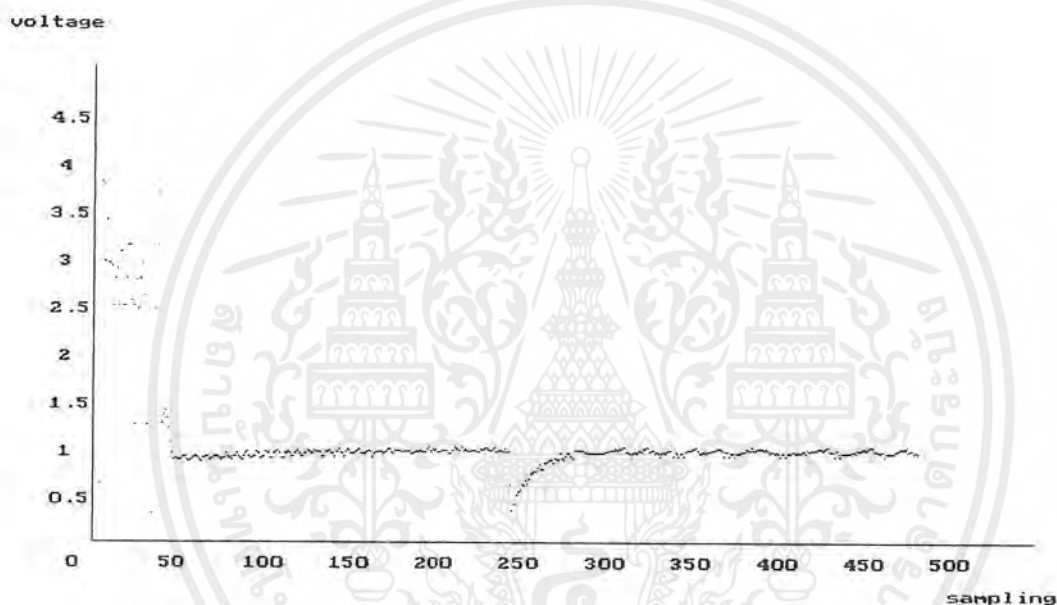
รูปที่ 4.20 เมื่อมีโหลดสองตัว ( $5\Omega$ ) จุดที่กราฟตกคือช่วงที่เปลี่ยนโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5 การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบเรียลไทม์เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง (1 $\Omega$ ) และไม่ได้มีการใช้แบบจำลองอ้างอิง

อินพุตที่ใช้คือ ฟังก์ชันขั้นบันไดมีขนาด 1 โวลต์, เวลาที่ใช้ในการแซมปิ้ง (sampling period) คือ 0.01 วินาที ค่าโพลเท่ากับ 0.1

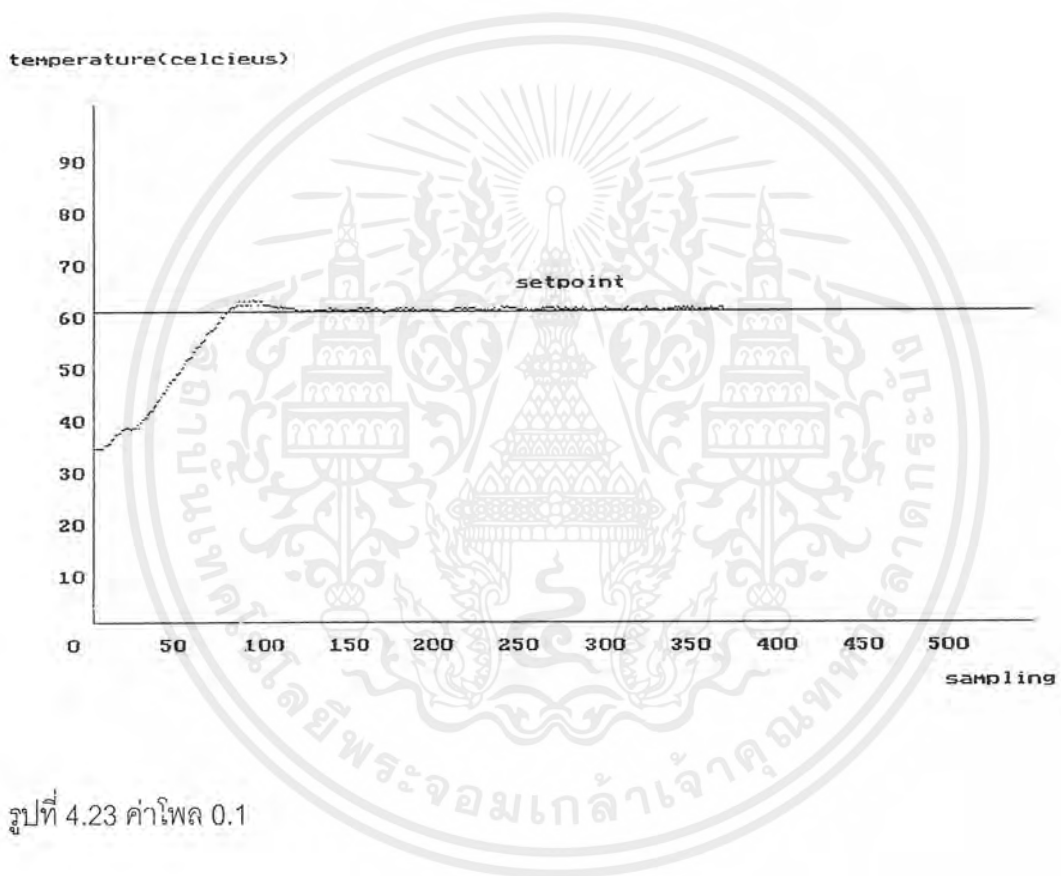
ผลการทดลองแสดงดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 4.22 เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง(1 $\Omega$ )

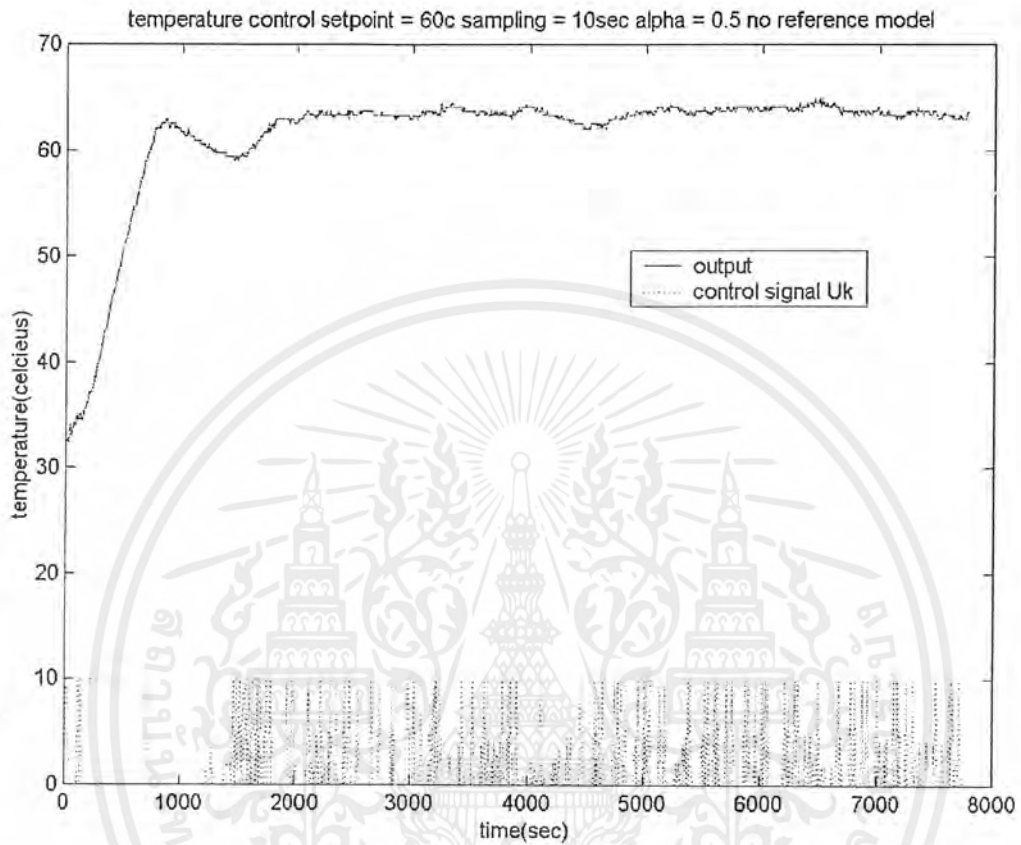
## 4.2 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำโดยวิธีอะแดพทีฟโพลเพลซเมนต์

4.2.1 ทดลองควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ ที่อุณหภูมิ 60 องศา โดย sampling period เท่ากับ 10 วินาที และไม่ใช้แบบจำลองอ้างอิง โดยกำหนดค่าโพลเท่ากับ 0.1,0.5,0.7 ผลการทดลองแสดงดังรูปข้างล่าง



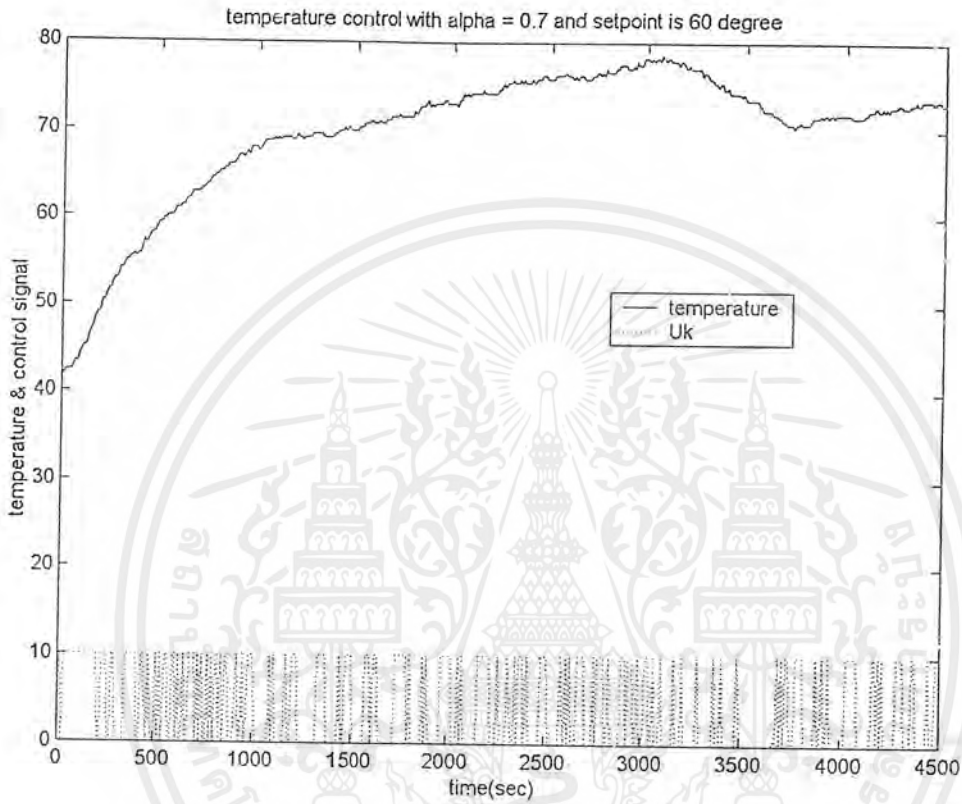
รูปที่ 4.23 ค่าโพล 0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ค่าโพล 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

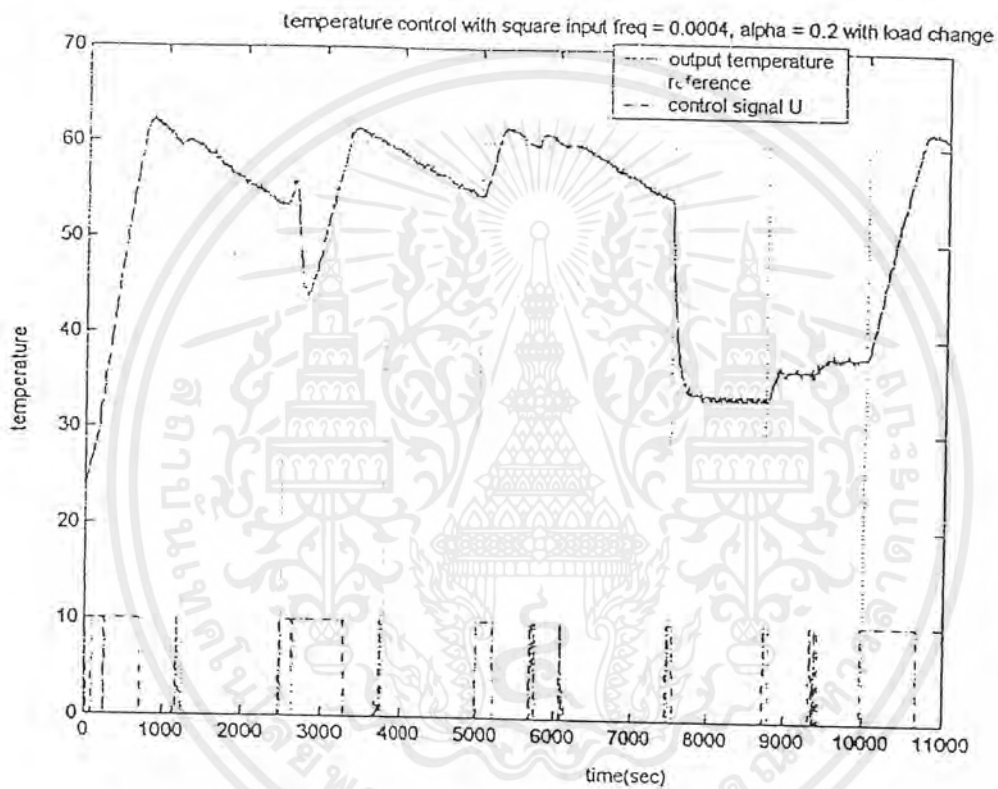


รูปที่ 4.25 ค่าโพล 0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

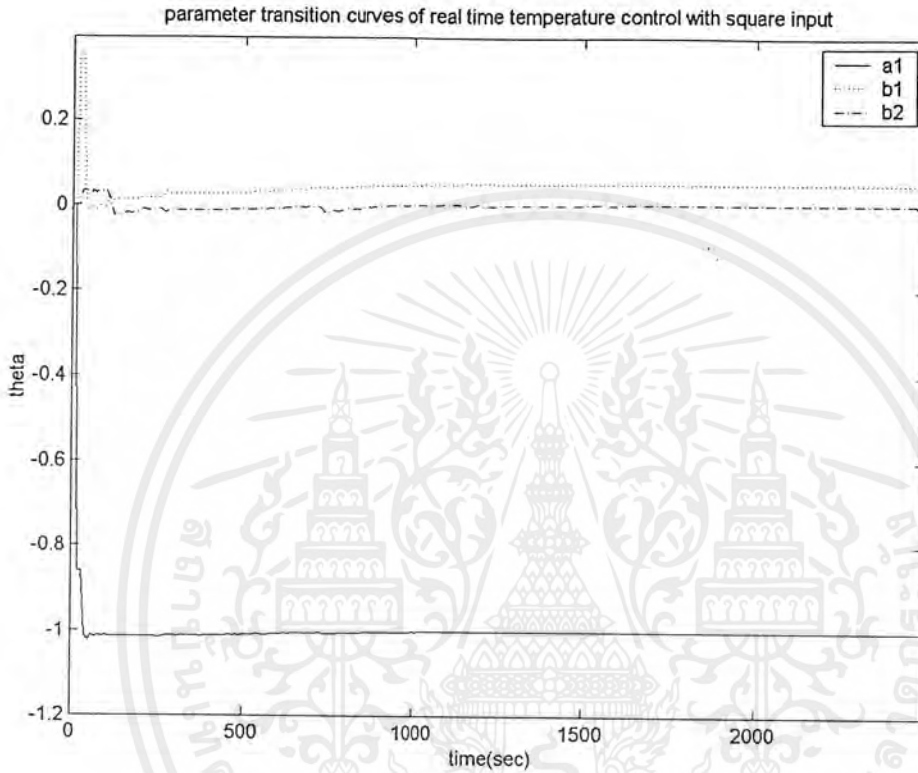
#### 4.2.2 ทดลองควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ 60 องศาและมีการเติมน้ำแข็งเพื่อให้พารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยน

ผลการทดลองแสดงดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 4.26 ควบคุมอุณหภูมิของน้ำและมีการเติมน้ำแข็งที่เวลา 2500 และ 7500วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้จากวิธี RLS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป

### 5.1 สรุปผลการปฏิบัติงาน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบอะแดปทีฟสามารถควบคุมกระบวนการที่โหลดเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างได้ดีทั้งกระบวนการช้า (slow process) และกระบวนการเร็ว (fast process)

### 5.2 ปัญหาในการทำงานและการแก้ไข

5.2.1 โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาได้นำไปลองใช้กับกระบวนการเร็ว (fast process) เพื่อที่จะได้เห็นข้อบกพร่องอย่างชัดเจนกว่ากระบวนการช้า (slow process)

5.2.2 โปรแกรมที่ใช้ในโครงการนี้ได้พัฒนาให้ใช้กับระบบที่มีอันดับไม่จำกัด แต่จำนวนอันดับขึ้นอยู่กับเวลาในการแซมปีง (sampling period)

### 5.3 ผลที่ได้รับจากโครงการ

5.3.1 ทำให้ทราบหลักการควบคุมแบบอะแดปทีฟ

5.3.2 สามารถหาค่าเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ด้วยวิธี RLS

5.3.3 สามารถออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีอะแดปทีฟโพลเพลซเมนท์

5.3.4 สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมกระบวนการโดยใช้หลักการอะแดปทีฟโพลเพลซเมนท์

5.3.5 ได้ประสบการณ์ในการแก้ปัญหาจากการทำงานจริง

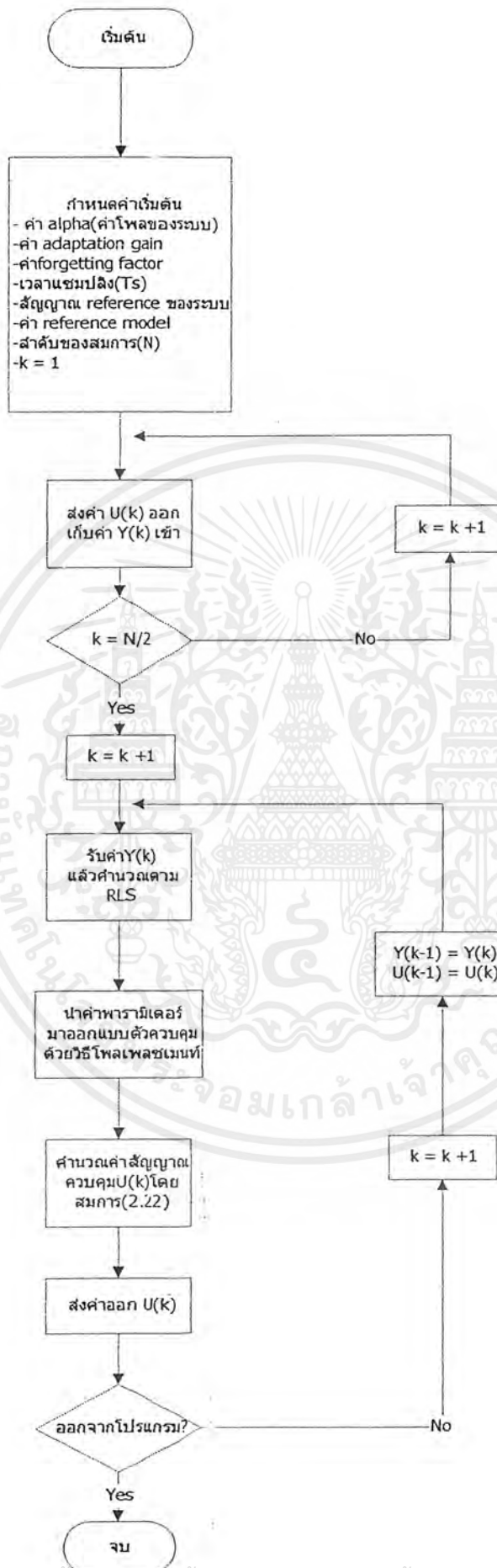
### 5.4 แนวทางในการพัฒนา

โครงการนี้ใช้การวางโพลโดยวิธีลองผิดลองถูก ดังนั้นควรมีการพัฒนาให้มีการวางโพลแบบอัตโนมัติตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด

## ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) ค่าเฉลี่ยของ Plant model ที่ได้จากการ identification

ถังน้ำ 
$$G(q^{-1}) = \frac{0.0274q^{-1} - 0.0006q^{-2}}{1 - 0.9993q^{-1}}$$

มอเตอร์ 
$$G(q^{-1}) = \frac{0.0232q^{-1} - 0.0005q^{-2}}{1 - 1.1136q^{-1} + 0.1629q^{-2}}$$

จากแบบจำลองของถังน้ำนำมาแปลงเป็น continuous form with time delay ได้ดังนี้

$$G_1(s) = \frac{39.411}{1 + 147015} e^{-8.7115s}$$

เป็นแบบจำลองก่อนเปลี่ยนโพล

$$G_2(s) = \frac{37.23}{1 + 183503} e^{-8.9765s}$$

เป็นแบบจำลองหลังเปลี่ยนโพล

โดยการแปลงจากระบบดิสครีตเป็นระบบต่อเนื่องโดยใช้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$G(s) = \frac{K}{1 + T_1 s} e^{-Ls}$$

$$G(m, q^{-1}) = \frac{b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2}}{1 - a_1 q^{-1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $T$  คือ เวลาแซมปิ้ง

$$a_1 = e^{-at}, \quad a = \frac{1}{T_1}$$

$$b_1 = K(1 - e^{-amT}), \quad b_2 = K(e^{-amT} - a_1)$$

$$m = \frac{T-L}{T}, \quad L \leq T$$

$$K(1 - a_1) = b_1 + b_2$$

- 2.) นำค่าเฉลี่ยของข้อ 1.) มาออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโพลเพลซเมนต์  
โดยใช้ค่าโพล 0.5 ได้ค่า  $R, S$  ดังนี้

ถึงน้ำ

$$R(q^{-1}) = -203.8281 + 208.333q^{-1}$$

$$S(q^{-1}) = 1 + 5.0842q^{-1}$$

มอเตอร์

$$R(q^{-1}) = 18.1477 - 13.0593q^{-1}$$

$$S(q^{-1}) = 1 - 0.8074q^{-1}$$

- 3.) การกำหนด Reference model ของระบบกำหนดโดยเทียบกับระบบอันดับสองมาตรฐาน

continuous  $G(s) = \frac{\omega_0^2}{\zeta^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_0^2}$  โดยกำหนดค่า  $\omega_0$  และ  $\zeta$  ที่ต้องการแล้วแปลง

ไปเป็น Discrete transfer function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น  $G(q^{-1}) = \frac{b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2}}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2}}$  โดยที่

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$b_1 = 1 - \alpha \left( \beta + \frac{\zeta \omega_0}{\omega} \xi \right)$$

$$b_2 = \alpha^2 + \alpha \left( \frac{\omega_0}{\omega} \xi - \beta \right)$$

$$a_1 = -2\alpha\beta$$

$$a_2 = \alpha^2$$

$$\alpha = e^{-\zeta \omega_0 T_s}$$

$$\beta = \cos \omega T_s$$

$$\xi = \sin \omega T_s$$

4.) ค่าตัวกรอง  $T$  หาได้จาก

$$T(q^{-1}) = GD(q^{-1})$$

โดยที่  $G = \frac{1}{B(1)}$  ถ้า  $B(1) \neq 0$

$= 1$  ถ้า  $B(1) = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากบุคคลสำคัญหลายท่านตั้งแต่  
อาจารย์พรสุข รัตโรจน์นันต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง  
ในการทำโครงการครั้งนี้ รวมถึงอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมทุกท่านที่ได้สอนวิชา  
ความรู้ต่าง ๆ ให้เป็นอย่างดี อีกทั้งธุรการภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมทั้งสองท่าน ที่ลืมไม่ได้คือ  
เพื่อนๆที่แสนดีทุกคน พ่อ แม่ พี่ น้อง ครอบครัวที่คอยช่วยเหลือในทุกๆอย่าง  
ขออวยพรให้บุคคลที่กล่าวถึงมีสุขภาพแข็งแรง มีจิตใจแจ่มใส.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. Landau I.D. System Identification and Control Design. Prentice Hall,1990.
2. Wellstead P.E.and Zarrop M.B. Self – Tuning Systems. John Wiley and Sons, 1991.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้