

การควบคุมระดับน้ำด้วยวิธีทำนายผลตอบสนองของระบบ
PREDICTIVE OPTIMAL CONTROL FOR A WATER
LEVEL CONTROL SYSTEM



นายฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน
MR. CHATCHAI AIJUMPORNSIN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 30974
วัน, เดือน, ปี..... ๕ ๔ ก.ย. 2541

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2541

ISBN 974-622-234-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREDICTIVE OPTIMAL CONTROL FOR A WATER
LEVEL CONTROL SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1998

ISBN 974-622-234-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมระดับน้ำด้วยวิธีทำนายผลตอบสนองของระบบ
นักศึกษา	ฉัตรชัย เขี่ยมพรสิน
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541

บทคัดย่อ

ระบบควบคุมไดนามิกเมทริกซ์ หรือ ดีเอ็มซี เป็นวิธีการควบคุมชนิดทำนายผลตอบสนองด้วยโมเดลแบบคอนโวลูชันดีสครีตได้ถูกออกแบบด้วยวิธีสถานะปริภูมิ โดยใช้สัมประสิทธิ์ผลตอบสนองต่อสัญญาณตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับหนึ่งหน่วย สร้างโมเดลกระบวนการในรูปสมการสถานะปริภูมิ อัลกอริทึมของตัวควบคุมดีเอ็มซีแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ตัวทำนาย (Predictor) และตัวควบคุมออปติมัล (Optimizer) ตัวทำนายใช้โมเดลทำนายผลตอบสนองของกระบวนการในอนาคต ตัวควบคุมออปติมัลใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) คำนวณตัวแปรปรับที่เหมาะสมเพื่อทำให้ค่าทำนายและค่าเป้าหมายต่างกันน้อยที่สุด

ตัวควบคุมดีเอ็มซีสร้างบนเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมกระบวนการควบคุมระดับน้ำ ชุดทดลองสามารถจัดได้เป็นกระบวนการควบคุมระดับน้ำแบบตัวแปรเดียวหรือแบบหลายตัวแปร ผลการทดลองและผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมดีเอ็มซีกับพีไอดี ในกรณีกระบวนการตัวแปรเดียว ระบบควบคุมดีเอ็มซีมีสมรรถนะดีกว่าระบบควบคุมพีไอดีในด้านผลตอบสนองต่อระดับสัญญาณอ้างอิงและด้านผลตอบสนองต่อการรบกวนจากภายนอก สำหรับกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุต ระบบควบคุมดีเอ็มซีแก้ปัญหาการรบกวนระหว่างลูปได้ดีกว่าวิธี decoupling control

Thesis Title	Predictive Optimal Control for a Water Level Control System
Student	Mr. Chatchai Aiumpornsin
Thesis Advisor	Associate professor Dr. Mongkol Mongkolwongrojn
Level of Study	Master of Engineering in Mechanical Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	1998

ABSTRACT

Dynamic Matrix Control or DMC, a model predictive control technique based on discrete convolution model, is interpreted in a state space framework. Unit step response coefficients are arranged into state space model. DMC algorithm is divided into two parts : a predictor and a optimizer. The predictor uses a model to predict the future output. The optimizer minimizes the difference between the predicted output and the set point by least square method.

DMC controller implemented on a digital computer by using C-language is applied to a water level control system. The plant can be set to be a single variable or multivariable level control process. Experimental and simulation results provide the comparison of DMC with PID control. In the case of SISO system, DMC is superior to the PID control in term of set point and load disturbance response. For system with two inputs and two outputs, DMC reduces the effects of interaction better than decoupling control.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความเมตตากรุณาจาก ท่านอาจารย์ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัย รู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่ให้โอกาสและสนับสนุนในทุกๆ ด้าน. งานงาน วิจัยสำเร็จตามเป้าหมาย จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุขสันต์ นุ่นงาม และ รศ.ดร.จงกล งามวิวิทย์ ที่กรุณา ให้คำแนะนำและชี้แนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์พงษ์ศักดิ์ คำมูล, คุณมณฑา เทียมเมือง, อาจารย์สรวิศ อยุธยา, อาจารย์วีระชัย ลิ้มพรชัยเจริญ ที่ช่วยเหลือหาอุปกรณ์ให้ ขอขอบพระคุณ คุณรัฐพันธ์ บริพันธ์ จากบริษัทสยามราชธานี ที่กรุณา calibrate อุปกรณ์ I/P converter ให้ ขอขอบพระคุณ คุณมาลี ชมจันทร์ ที่ช่วยเหลือในเรื่องการค้นข้อมูล ขอขอบพระคุณบริษัทบางกอก เอ็นยี เนียร์ริง เซอร์วิส แอนด์ เทคโนโลยี และบริษัท PADECO ที่สนับสนุนและให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณบุญชัย ศิลปกิจวงศ์กุล, คุณปริญญา ปริญาปัญญาจรงค์, คุณสมชาย ทองพร, คุณชาญชัย อมรสกุล, คุณกนกชาติ ทวีพันธ์สานต์, คุณสุวัฒน์ กิจไพศาลศักดิ์, คุณธิดาพร พิทักษ์พรพันธุ์, คุณสมศักดิ์ ธีระวัฒนสุข, คุณชูวิทย์ โภคบุตร, คุณวีระ ธรรมจรัส, คุณโชคชัย หาญธนาชาติ, คุณสุรพล ดิสกัมพล, คุณชนม์เจริญ ทิพสุวรรณ, คุณนรพล พันธุเลปะนะ, คุณวิรัช ศรีมงคล, คุณเสรี แซ่ตั้ง, คุณจุฑารัตน์ สุ่ม่วง, คุณพรพี ลิ้มเรืองรอง เพื่อนๆ และน้องๆ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ฉัตรชัย เขี่ยมพรสิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
สัญลักษณ์.....	XIV
สัญลักษณ์ด้วยอักษร.....	XVIII
คำย่อ.....	XIX
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 วิธีที่ใช้ในการวิจัย.....	2
2. ทฤษฎีควบคุมแบบ DMC.....	4
2.1 ประวัติความเป็นมาของ DMC.....	4
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบควบคุม DMC.....	5
2.2.1 สมการคณิตศาสตร์กระบวนการ (Plant model).....	5
2.2.2 ตัวทำนาย (The predictor).....	7
2.2.3 ตัวควบคุมออปติมัด (The optimizer).....	8

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ทฤษฎี DMC ในรูปแบบสถานะปริภูมิ (State space formulation).....	9
2.3.1 สมการคณิตศาสตร์กระบวนการในรูปแบบสถานะปริภูมิ.....	9
2.3.2 ตัวทำนายในรูปแบบสถานะปริภูมิ (The predictor).....	11
2.3.3 ตัวควบคุมออปติมัลในรูปแบบสถานะปริภูมิ (The optimizer).....	12
2.4 พารามิเตอร์ของระบบควบคุม DMC.....	13
2.5 เสถียรภาพของ DMC.....	14
2.6 DMC กับกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุต.....	14
3. กระบวนการและการจำลองกระบวนการ.....	16
3.1 อัตราการไหลของน้ำออกจากถัง.....	16
3.2 กระบวนการที่มีรูปแบบเป็นระบบอันดับหนึ่ง.....	17
3.3 กระบวนการที่มีรูปแบบเป็นระบบอันดับสอง.....	18
3.4 กระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุต.....	19
3.5 การจำลองกระบวนการ.....	20
4. ชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำ.....	21
4.1 อุปกรณ์ทดลอง.....	21
4.2 กระบวนการที่ทำการทดสอบ.....	25
4.3 ขั้นตอนการทดสอบตัวควบคุม DMC.....	26
4.4 ขั้นตอนการทดสอบตัวควบคุม PID.....	26
5. ผลการทดลอง.....	27
5.1 กระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถึง.....	27
5.1.1 ผลการหาโมเดลกระบวนการ.....	27
5.1.2 ผลการออกแบบตัวควบคุม DMC.....	29
5.1.3 ผลการออกแบบตัวควบคุม PID และตัวชดเชยเดดไทม์.....	31
5.1.4 ผลการทดสอบและการจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ.....	32
5.1.5 วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถึง.....	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 กระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังที่เชื่อมกับถังอีกใบหนึ่ง.....	43
5.2.1 ผลการหาโมเดลกระบวนการ.....	43
5.2.2 ผลการออกแบบตัวควบคุม DMC.....	44
5.2.3 ผลการออกแบบตัวควบคุม PID และตัวชดเชยเดดไทม์.....	46
5.2.4 ผลการทดสอบและการจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ.....	47
5.2.5 วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังที่เชื่อมต่อ ต่อกับถังอีกใบหนึ่ง.....	57
5.3 กระบวนการควบคุมระดับน้ำ 2 ถังที่เชื่อมต่อถึงกัน.....	60
5.3.1 การทดสอบกระบวนการครั้งที่หนึ่ง.....	60
5.3.1.1 ผลการหาโมเดลกระบวนการ.....	60
5.3.1.2 ผลการออกแบบตัวควบคุม DMC.....	61
5.3.1.3 ผลการออกแบบตัวควบคุม PID และตัว Decoupler.....	67
5.3.1.4 ผลการจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ.....	68
5.3.1.5 ผลการทดลอง.....	69
5.3.1.6 วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับน้ำ สองถังที่เชื่อมต่อถึงกัน.....	71
5.3.2 การทดสอบกระบวนการครั้งที่สอง.....	72
5.3.2.1 ผลการหาโมเดลกระบวนการ.....	72
5.3.2.2 ผลการออกแบบตัวควบคุม DMC.....	73
5.3.2.3 ผลการออกแบบตัวควบคุม PID และตัว Decoupler.....	78
5.3.2.4 ผลการจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ.....	78
5.3.2.5 ผลการทดลอง.....	80
5.3.2.6 วิเคราะห์ผลการทดลองกระบวนการครั้งที่สอง.....	83
6. บทสรุป.....	84

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม.....	87
ภาคผนวก ก การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID.....	89
ภาคผนวก ข Deadtime Compensator.....	91
ภาคผนวก ค Decoupling Control.....	92
ภาคผนวก ง โปรแกรมควบคุมระดับน้ำหนึ่งถัง.....	96
ภาคผนวก จ Pressure transmitter และวงจรมหาสัญญาณ.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	132



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงค่าของสมาชิกในเมทริกซ์ K_{DMC}	30
2 เปรียบเทียบสมรรถนะระบบควบคุมจากการทดลอง.....	40
3 เปรียบเทียบสมรรถนะระบบควบคุมจากการจำลองกระบวนการ.....	41
4 แสดงค่าของสมาชิกในเมทริกซ์ K_{DMC}	45
5 เปรียบเทียบสมรรถนะระบบควบคุมจากการทดลอง.....	58
6 เปรียบเทียบสมรรถนะระบบควบคุมจากการจำลองกระบวนการ.....	59
7 แสดงค่าของสมาชิกในเมทริกซ์ K_{DMC}	63
8 แสดงค่าของสมาชิกในเมทริกซ์ K_{DMC}	74



สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับหนึ่งหน่วย.....	6
2 แสดงผลตอบสนองของระบบเชิงเส้น.....	10
3 แสดงแผนผังสัญญาณของระบบควบคุม DMC.....	12
4 แสดงการหาอัตราการใช้ไหลออกของน้ำในถัง.....	16
5 แสดงกระบวนการถังบรรจุน้ำหนึ่งใบ.....	17
6 แสดงกระบวนการถังบรรจุน้ำที่เชื่อมต่อกับถังอีกใบหนึ่ง.....	18
7 แสดงกระบวนการถังบรรจุน้ำสองใบที่มีการ interaction ระหว่างกัน.....	19
8 ภาพถ่ายชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำ.....	23
9 แสดงแผนผังชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำ.....	24
10 เปรียบเทียบผลจากกระบวนการจริงกับผลตอบสนองของโมเดล สำหรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถัง.....	28
11 แสดงผลตอบสนองต่อแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับขนาด $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$	29
12 การหาพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID จากผลตอบสนองวงรอบเปิดของกระบวนการ.....	31
13 แผนผังสัญญาณระบบควบคุม PID มีตัวชดเชยเดดไทม์ สำหรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถัง.....	32
14 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.....	33
15 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.....	33
16 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 50 ซม.....	34
17 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 50 ซม.....	34
18 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที.....	35
19 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที.....	35
20 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 10 ซม.....	36
21 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 10 ซม.....	36
22 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.....	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
23 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.....	37
24 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที.....	38
25 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที.....	38
26 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม.....	39
27 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม.....	39
28 เปรียบเทียบผลจากกระบวนการจริงกับผลตอบสนองของโมเดล สำหรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังที่เชื่อมต่อกับถังอีกใบหนึ่ง.....	43
29 ผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับขนาด $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$	44
30 การหาพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID จากผลตอบสนองวงรอบเปิดของกระบวนการ.....	46
31 ผังสัญญาณระบบควบคุม PID มีตัวชดเชยเดดไทม์ สำหรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถัง.....	47
32 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.....	48
33 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.....	48
34 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 50 ซม.....	49
35 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 50 ซม.....	49
36 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที.....	50
37 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที.....	50
38 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 10 ซม.....	51
39 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 10 ซม.....	51
40 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.....	52
41 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.....	52
42 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที.....	53
43 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที.....	53
44 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 50 ซม.....	54
45 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 50 ซม.....	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

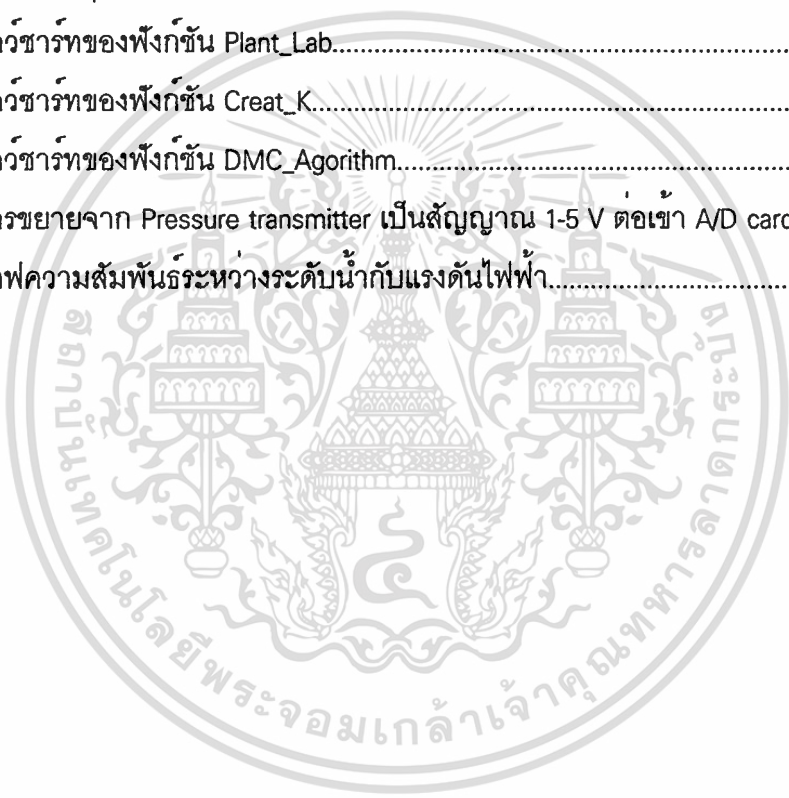
ภาพที่	หน้า
46 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 60 ซม.....	55
47 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 60 ซม.....	55
48 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที.....	56
49 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที.....	56
50 เปรียบเทียบผลของกระบวนการจริงกับผลตอบสนองของโมเดล ของกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุต ภาพบนเป็นระดับน้ำในถังใบที่หนึ่ง ภาพล่างเป็นระดับน้ำในถังใบที่สอง.....	61
51 แสดงผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับตัวที่ 1 ของกระบวนการ (u_1) โดยตัวแปรปรับมีรูปแบบเป็นฟังก์ชันระดับขนาด $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$	62
52 แสดงผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับตัวที่ 2 ของกระบวนการ (u_2) โดยตัวแปรปรับมีรูปแบบเป็นฟังก์ชันระดับขนาด $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$	62
53 ผังสัญญาณระบบควบคุม Decoupling control.....	67
54 ผลการจำลองกระบวนการ เมื่อใช้ระบบควบคุม DMC ควบคุมระดับน้ำในถังทั้งสองใบที่ 45 ซม. และเติมน้ำใส่ถังใบที่ 1 ที่เวลา 600 วินาที.....	68
55 ผลจำลองผลกระบวนการ เมื่อใช้ระบบควบคุม DMC ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ 60 ซม. และระดับน้ำในถังใบที่ 2 ที่ 45 ซม. มีการเติมน้ำใส่ถังใบที่ 1 ที่เวลา 600 วินาที.....	68
56 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID ควบคุมระดับน้ำในถังทั้งสองใบที่ 45 ซม. และเติมน้ำใส่ถังใบที่ 1 ที่เวลา 600 วินาที.....	69
57 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ 60 ซม. และระดับน้ำในถังใบที่ 2 ที่ 45 ซม. มีการเติมน้ำใส่ถังใบที่ 1 ที่เวลา 600 วินาที.....	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
58	เปรียบเทียบผลจากกระบวนการจริงกับผลตอบสนองของโมเดล ของกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุต ภาพบนเป็นระดับน้ำในถังใบที่หนึ่ง ภาพล่างเป็นระดับน้ำในถังใบที่สอง..... 72
59	การจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ เมื่อใช้ระบบควบคุม DMC ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ 55 ซม. และระดับน้ำในถังใบที่ 2 ที่ 45 ซม. มีการเติมน้ำใส่ถังใบที่ 1 ที่เวลา 450 วินาที และใส่ถังใบที่ 2 ที่เวลา 825 วินาที..... 78
60	การจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ เมื่อใช้ระบบควบคุม DMC ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ 50 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 45 ซม. ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ 40 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 35 ซม..... 79
61	การจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ เมื่อใช้ระบบควบคุม DMC ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ 50 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 55 ซม. ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ 40 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 45 ซม..... 79
62	เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID ควบคุม ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ 55 ซม. และระดับน้ำในถังใบที่ 2 ที่ 45 ซม. มีการเติมน้ำใส่ถังใบที่ 1 ที่เวลา 450 วินาที และใส่ถังใบที่ 2 ที่เวลา 825 วินาที..... 80
63	เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID ควบคุม ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ 50 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 45 ซม. ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ 40 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 35 ซม..... 81
64	เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID ควบคุม ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ 50 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 55 ซม. ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ที่ 40 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 45 ซม..... 82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก.1	แสดงการหาพารามิเตอร์ด้วยวิธี Process Reaction Curve.....	89
ข.1	ระบบควบคุม Deadtime compensator.....	91
ค.1	ระบบควบคุม Decoupling control.....	92
ค.2	ผังสัญญาณระบบสองอินพุตสองเอาต์พุตในรูปตัวแปรเมทริกซ์.....	93
ค.3	ระบบควบคุม Decoupling control แสดงส่วนตัว Decoupler.....	94
ง.1	โพล์ซาร์ทของฟังก์ชัน Plant_Lab.....	97
ง.2	โพล์ซาร์ทของฟังก์ชัน Creat_K.....	98
ง.3	โพล์ซาร์ทของฟังก์ชัน DMC_Agorithm.....	99
จ.1	วงจรรขยายจาก Pressure transmitter เป็นสัญญาณ 1-5 V ต่อเข้า A/D card.....	127
จ.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับแรงดันไฟฟ้า.....	128



สัญลักษณ์

$\bar{Y}(z)$	= ตัวแปรตอบสนองของโมเดลกระบวนการ (Model output variable) ในรูปตัวแปลง z (z-transform)
$U(z)$	= ตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulated variable) ในรูปตัวแปลง z
$HG(z)$	= พัลส์ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Pulse transfer function) ของกระบวนการ
h	= สัมประสิทธิ์ผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับแบบพัลส์ฟังก์ชันหนึ่งหน่วย (Unit pulse response coefficients)
s	= สัมประสิทธิ์ผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับขนาดหนึ่งหน่วย (Unit step response coefficients)
$y(k)$	= ตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ (Process output variable) ที่ช่วงการเก็บตัวอย่างที่ k ในงานวิจัยหมายถึงระดับความสูงของน้ำในถัง หน่วยเป็น cm
$\bar{y}(k)$	= ตัวแปรตอบสนองของโมเดลกระบวนการ (Model output variable) ที่ช่วงการเก็บตัวอย่างที่ k
$u(k)$	= ตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulated variable) ที่ช่วงการเก็บตัวอย่างที่ k ในงานวิจัยหมายถึงอัตราการไหลของน้ำผ่านวาล์วควบคุมเข้าสู่กระบวนการ หน่วยเป็น cm^3/sec
$\Delta u(k)$	= ค่าความแตกต่างของตัวแปรปรับที่ช่วงการเก็บตัวอย่างที่ k กับที่ช่วงการเก็บตัวอย่างที่ $k-1$
T	= คาบการเก็บตัวอย่าง (Sampling period)
N	= จำนวนสัมประสิทธิ์ของโมเดล (Model horizon)
P	= ระยะเวลาทำนาย (Prediction horizon)

สัญลักษณ์ (ต่อ)

- M = ระยะเวลาควบคุม (Control horizon)
- f = ตัวแปรถ่วงสัญญาณควบคุม (Control weighting factor)
- $y_d(k+j)$ = ค่าเป้าหมาย (Set point) ที่ช่วงการเก็บตัวอย่างที่ $k+j$
- $\bar{y}_p(k+j)$ = ค่าทำนายผลตอบสนองในอนาคตระยะ j ทำนายที่ช่วงการเก็บตัวอย่างที่ k
- $\bar{y}_{Future}(k+j)$ = ค่าทำนายผลตอบสนองในอนาคตระยะ j เนื่องจากตัวแปรปรับที่เข้าสู่กระบวนการในอนาคต พิจารณาที่ช่วงการเก็บตัวอย่างที่ k
- $\bar{y}_{Past}(k+j)$ = ค่าทำนายผลตอบสนองในอนาคตระยะ j เนื่องจากตัวแปรปรับที่เข้าสู่กระบวนการก่อนช่วงการเก็บตัวอย่างที่ k
- $w(k+j)$ = ความผิดพลาดของโมเดลกระบวนการที่ระยะทำนาย j พิจารณาที่ช่วงการเก็บตัวอย่างที่ k
- S_p = ไดนามิกเมทริกซ์ (Dynamic Matrix)
- Y_d = ในกรณีระบบควบคุม DMC หมายถึงเวกเตอร์ของ $y_d(k+j)$
ในกรณีระบบควบคุม PID หมายถึงระดับเป้าหมายที่กำหนดไว้
- \bar{Y}_p = เวกเตอร์ของ $\bar{y}_p(k+j)$
- \bar{Y}_{Future} = เวกเตอร์ของ $\bar{y}_{Future}(k+j)$
- \bar{Y}_{Past} = เวกเตอร์ของ $\bar{y}_{Past}(k+j)$
- W = เวกเตอร์ของ $w(k+j)$
- ΔU = เวกเตอร์ของ $\Delta u(k+j)$
- J = ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

สัญลักษณ์ (ต่อ)

I	= เมทริกซ์หนึ่งหน่วย (Identity matrix)
K_{DMC}	= ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม DMC
$\bar{y}(k/k-1)$	= ผลตอบสนอง $\bar{y}(k)$ เมื่อพิจารณาในช่วงการเก็บตัวอย่างที่ $k-1$
$\bar{Y}(k/k)$	= เวกเตอร์ตัวแปรสถานะ
S	= เวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ s
R	= สัมประสิทธิ์เมทริกซ์ มีขนาด $N * N$
Q	= สัมประสิทธิ์เมทริกซ์ มีขนาด $1 * N$
F	= Diagonal matrix ของตัวแปรถ่วงน้ำหนัก f
e	= ค่าแตกต่างระหว่างค่าเป้าหมายที่กำหนดกับค่าเอาต์พุตของระบบ
$E(z)$	= ค่าแตกต่างระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าเอาต์พุตของระบบ ในรูปตัวแปลง z
d	= จำนวนช่วงเวลาที่เป็นเดดไทม์
A	= พื้นที่หน้าตัด
v	= ความเร็วของการไหล
P_{atm}	= ความดันบรรยากาศ
ρ	= ความหนาแน่นของน้ำ
g	= ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก
C	= ค่าคงที่สำหรับการไหลแบบเทอร์บูแลนต์
R	= ค่าความต้านทานการไหล

สัญลักษณ์ (ต่อ)

- K_C = ค่าเกนของ Proportional controller
- τ_I = ค่าเวลาอินทิเกรต (Integral time)
- τ_D = ค่าเวลาอนุพันธ์ (Derivative time)
- D = ตัวควบคุม decoupler
- $\| \cdot \|$ = เครื่องหมายนอร์มของเมทริกซ์ (Matrix Norm)



สัญลักษณ์ด้วยกษัณ

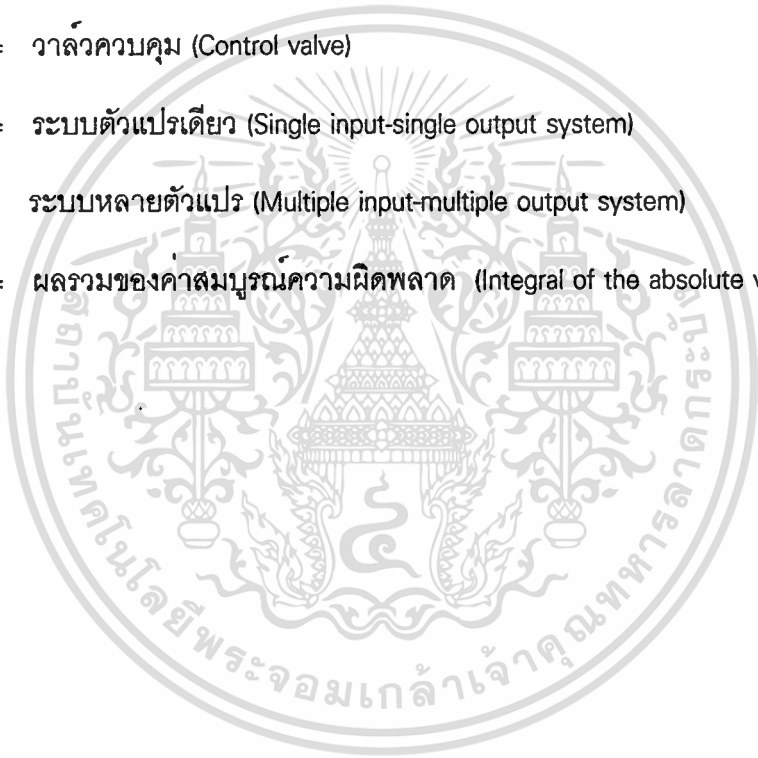
* = เครื่องหมายทรานสโพสของเมทริกซ์ (Transpose of matrix)

-1 = เครื่องหมายส่วนกลับของเมทริกซ์ (Inverse of matrix)



คำย่อ

PID	= ระบบควบคุมแบบ Proportional-Integral-Derivative
DMC	= ระบบควบคุมแบบ Dynamic Matrix Control
V	= วาล์ว (Valve)
CV	= วาล์วควบคุม (Control valve)
SISO	= ระบบตัวแปรเดียว (Single input-single output system)
MIMO	= ระบบหลายตัวแปร (Multiple input-multiple output system)
IAE	= ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ความผิดพลาด (Integral of the absolute value of error)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น มีเดดไทม์ (dead time) และเป็นระบบหลายตัวแปร (MIMO) ซึ่งมีลักษณะระบบที่ซับซ้อนและกัน (interaction) ตัวควบคุมแบบง่ายอย่างเช่น PID จึงไม่เหมาะสมในการใช้ควบคุมกระบวนการที่ซับซ้อนดังกล่าว อีกทั้งวิธีควบคุมขั้นสูงหลายวิธี เช่น การควบคุมแบบปรับตัวเอง เป็นต้น แม้จะมีสมรรถนะในการควบคุมที่ดี แต่ต้องใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนยากต่อการเข้าใจ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาระบบควบคุมแบบทำนายด้วยโมเดล (Model Predictive Control) ชนิดไดนามิกเมทริกซ์ (Dynamic Matrix Control) หรือดีเอ็มซี (DMC) ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมขั้นสูงและง่ายต่อการเข้าใจ เนื่องจากใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ไม่ซับซ้อน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1) ศึกษาเทคนิคการควบคุมแบบ DMC ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการควบคุมระดับน้ำ (Water level control process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างไม่เป็นเชิงเส้นและมีเดดไทม์ เปรียบเทียบสมรรถนะระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID โดยออกแบบตัวควบคุม PID ให้มีตัวชดเชยเดดไทม์ (deadtime compensate)

2) ศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบควบคุม DMC กับกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุตที่มีลักษณะ interaction ระหว่างกัน เปรียบเทียบสมรรถนะระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID โดยออกแบบตัวควบคุม PID ให้มีส่วนชดเชยการ interaction ด้วยวิธีควบคุมแบบ Decoupling Control

3) ศึกษาการจำลองกระบวนการด้วยคอมพิวเตอร์

1.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ใช้วิธี Least Square ในการสร้างตัวควบคุม DMC และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ
- 2) ใช้ทฤษฎีของ Sifu Li เขียนแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการ ให้อยู่ในรูปแบบสถานะปริภูมิ เรียกว่า State space model และประยุกต์โมเดลดังกล่าวเข้ากับเทคนิคการควบคุม DMC ทำให้สามารถเขียนโปรแกรมควบคุม DMC ได้ง่ายขึ้น
- 3) ใช้วิธีเชิงตัวเลข Runge-Kutta method ในการจำลองกระบวนการ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ทดสอบตัวควบคุมกับกระบวนการที่มีรูปแบบเป็นระบบอันดับหนึ่ง (First order system) มีเดดไทม์
- 2) ทดสอบตัวควบคุมกับกระบวนการที่มีรูปแบบเป็นระบบอันดับสอง (Second order system) มีเดดไทม์
- 3) ทดสอบตัวควบคุมกับกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุต ที่มีลักษณะ interaction ระหว่างกัน

1.5 วิธีที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีควบคุมแบบ DMC
- 2) หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการจากการทดลอง ด้วยวิธี Least Square
- 3) ใช้แบบจำลองที่ได้ออกแบบตัวควบคุม DMC ทดสอบสมรรถนะโดยรบกวนระบบด้วยการเติมน้ำและเปลี่ยนสัญญาณอ้างอิง
- 4) ทดสอบความคงทน (Robustness) ของตัวควบคุมโดยการเปลี่ยนระดับปฏิบัติการใหม่ ทำการทดสอบระบบที่ระดับปฏิบัติใหม่นี้ด้วยการเติมน้ำและเปลี่ยนระดับสัญญาณอ้างอิง
- 5) เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์

6) วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID ด้วยค่าเวลาขึ้น (rise time), ค่าเวลาสู่สมดุลย์ (settling time), ค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองสูงสุด (% overshoot) และค่าผลรวมค่าสมบูรณ์ของความผิดพลาด (IAE)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีควบคุมแบบ DMC

2.1 ประวัติความเป็นมาของ DMC

การควบคุมแบบไดนามิกเมทริกซ์ (Dynamic Matrix Control) หรือ ดีเอ็มซี (DMC) คิดค้นโดย C.R.Cutler และ B.L.Ramaker วิศวกรบริษัทน้ำมัน Shell ในปี ค.ศ.1979 เป็นวิธีการควบคุมโดยใช้หลักการของการควบคุมแบบทำนายด้วยโมเดล (Model Predictive Control) หรือ เอ็มพีซี (MPC) และได้มีการพัฒนาเรื่อยมา

ในปี ค.ศ.1985 A.M.Morshedi [1] เสนอการใช้ทฤษฎี Linear Programming กับตัวควบคุม DMC ทำให้ได้ตัวควบคุม LDMC เพื่อใช้กับระบบที่มีเงื่อนไขขอบเขตของตัวแปรอินพุทและตัวแปรเอาต์พุท ต่อมาในปี ค.ศ.1986 Carlos E.Garcia [3] เสนอทฤษฎีควบคุมแบบ Quadratic Dynamic Matrix Control (QDMC)

ในปี ค.ศ.1989 Sifu Li [10] เสนอตัวควบคุมแบบทำนายด้วยโมเดล (MPC) ในรูปแบบสถานะปริภูมิ (State space formulation) ต่อมาในปี ค.ศ.1995 P. Lundström [11] ได้แสดงระบบควบคุม DMC ในรูปแบบสถานะปริภูมิที่มีตัวสังเกตสถานะ (Observer) รวมอยู่ด้วย

ในประเทศไทยได้มีการศึกษาตัวควบคุมแบบทำนายด้วยโมเดลกันบ้างแล้ว เช่น ปี พ.ศ. 2537 ผศ.ดร.สุขสันต์ นุ่นงาม [18] เสนอบทความ "การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมชนิดใช้การคาดคะเนล่วงหน้ากับกระบวนการที่มีความหน่วงต่ำ" และในปี พ.ศ.2538 คุณสุรินทร์ทิพย์ ถาวรทวิวงษ์ [19] นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้เสนองานวิจัยในหัวข้อ "การประยุกต์การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟกับการผสมของเหลว"

สุรินทร์ทิพย์ กล่าวถึงการนำ DMC ไปใช้งานว่า "ปัจจุบันนี้การพัฒนารูปแบบการควบคุมแบบ DMC ได้รับการปรับปรุงเป็นซอฟต์แวร์ออกมาจำหน่ายในเชิงพาณิชย์แล้ว โดยมีบริษัทที่พัฒนาโปรแกรมออกมาหลายบริษัท เช่น เซ็ทพอยท์ (Setpoints), เบลีย์ (Bailey), โพรฟีเมติกส์ (Profimatics), ชิโยดะ (Chiyoda) เป็นต้น อุตสาหกรรมที่เลือกใช้ตัวควบคุม DMC ได้แก่ อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและปิโตรเลียม โดยนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานของหอกลิ้นและเตาปฏิกรณ์ เป็นต้น" ซึ่งรวมแล้วไม่น้อยกว่า 400 กระบวนการทั่วโลก" นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบควบคุม DMC

หลักการสำคัญของระบบควบคุม DMC ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1) หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของกระบวนการ (Plant) ใช้แบบจำลองที่ได้หาค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองต่อสัญญาณตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับ (Step function) ขนาดหนึ่งหน่วย หรือเรียกว่า Unit step response coefficients

2) ใช้ Unit step response coefficients สร้างเมทริกซ์ทำนายผลตอบสนองของกระบวนการ เมทริกซ์ทำนายประกอบด้วย 3 ส่วน คือ เมทริกซ์ทำนายผลตอบสนองเนื่องจากสัญญาณตัวแปรปรับที่จะเข้าสู่กระบวนการภายหลังเวลาปัจจุบัน เมทริกซ์ทำนายผลตอบสนองเนื่องจากสัญญาณตัวแปรปรับที่เข้าสู่กระบวนการก่อนหน้าเวลาปัจจุบัน และเมทริกซ์ประมาณค่าความผิดพลาดของโมเดล

3) หาขนาดของตัวแปรปรับที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างค่าทำนายและค่าเป้าหมาย (set point) ในทุกระยะทำนายมีค่าน้อยที่สุด ในที่นี้ใช้วิธี Least square ในการหาขนาดของตัวแปรปรับดังกล่าว

หลักการของระบบควบคุม DMC ดังกล่าวข้างต้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1) สมการคณิตศาสตร์กระบวนการ (Plant model)

สมการคณิตศาสตร์ของกระบวนการ (Plant) ที่เป็นตัวแปรเดียว (SISO) แบบเชิงเส้นไม่ต่อเนื่องและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เขียนอยู่ในรูป Pulse Transfer Function ได้เป็น

$$\frac{\bar{Y}(z)}{U(z)} = HG(z) = h_1z^{-1} + h_2z^{-2} + \dots + h_Nz^{-N} + \dots + h_\infty z^{-\infty} \quad (2.1)$$

เมื่อตัวแปรปรับเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันระดับ (step function) เขียนขนาดการเปลี่ยนแปลง $\Delta u(k)$ ได้เป็น

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (2.2)$$

$$\Delta U(z) = (1 - z^{-1})U(z) \quad (2.3)$$

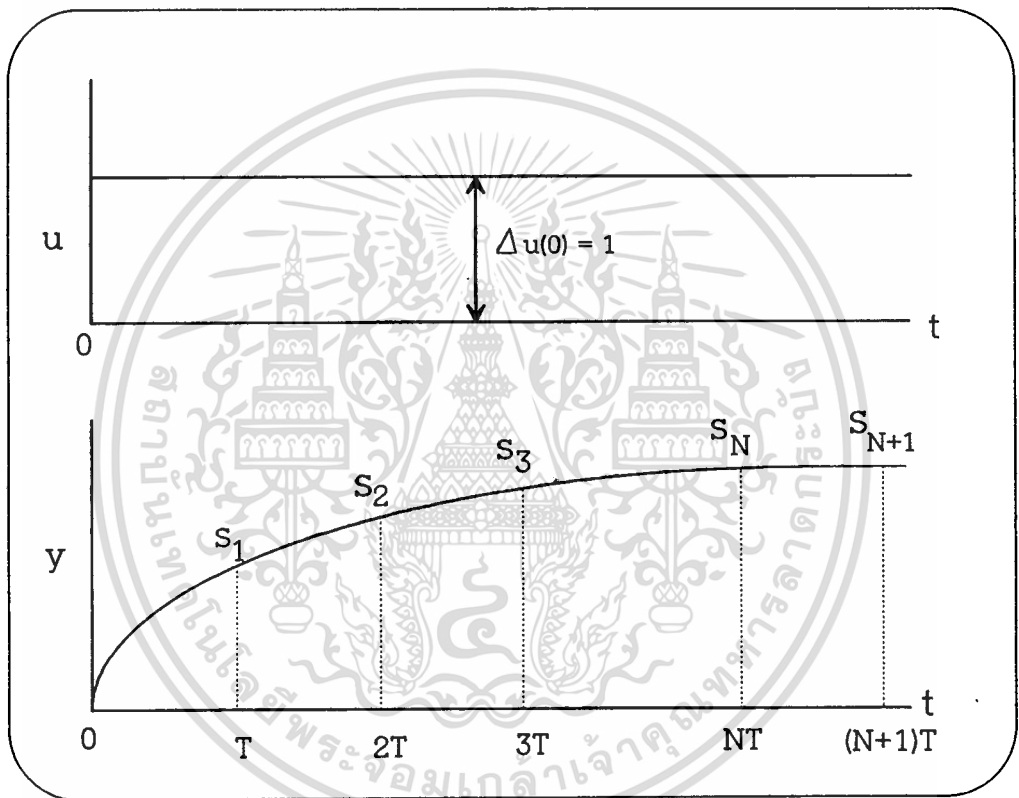
จากสมการ (2.1) และ (2.3) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{Y}(z) = HG(z) \frac{\Delta U(z)}{1-z^{-1}} = \left(s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} + \dots + s_N z^{-N} + \dots + s_\infty z^{-\infty} \right) \Delta U(z) \quad (2.4)$$

รูปแบบในสมการที่ (2.4) เมื่อสถานะเริ่มต้นเป็น 0 สามารถเขียน Convolution Model เป็น

$$\bar{y}(k) = \sum_{i=1}^{\infty} s_i \Delta u(k-i) \quad (2.5)$$



ภาพที่ 1 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับหนึ่งหน่วย

กระบวนการในสมการ (2.5) ให้เวลาเริ่มต้นมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับเป็นฟังก์ชันระดับขนาดหนึ่งหน่วย หรือ $\Delta u(0) = 1$ จะได้ผลตอบสนองดังภาพที่ (1) กระบวนการเข้าสู่สถานะสมดุล (steady state) ที่เวลา NT ค่าจำนวนเต็ม N เรียกว่า Model Horizon เนื่องจากในสถานะสมดุล $s_N \approx s_{N+1}$ สมการที่ (2.5) จึงเขียนได้เป็น

$$\bar{y}(k) = \sum_{i=1}^N s_i \Delta u(k-i) + s_N u(k-N-1) \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้กันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2) ตัวทำนาย (The predictor)

จากโมเดลในสมการที่ (2.6) สามารถสร้างสมการทำนายผลตอบสนองของกระบวนการ ซึ่งจะเกิดขึ้นในอนาคตเป็นระยะ P เมื่อกำหนดว่ามีสัญญาณตัวแปรปรับในอนาคตเป็นระยะ M เรียก P ว่าระยะการทำนาย หรือ Prediction Horizon เรียก M ว่าระยะการควบคุม หรือ Control Horizon จัดสมการทั้งหมดให้อยู่รูปเมทริกซ์ เรียก เมทริกซ์ทำนายผลตอบสนอง

$$\begin{bmatrix} \bar{y}_P(k+1) \\ \bar{y}_P(k+2) \\ \vdots \\ \bar{y}_P(k+M) \\ \vdots \\ \bar{y}_P(k+P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{Future}(k+1) \\ \bar{y}_{Future}(k+2) \\ \vdots \\ \bar{y}_{Future}(k+M) \\ \vdots \\ \bar{y}_{Future}(k+P) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{y}_{Past}(k+1) \\ \bar{y}_{Past}(k+2) \\ \vdots \\ \bar{y}_{Past}(k+M) \\ \vdots \\ \bar{y}_{Past}(k+P) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w(k) \\ w(k+1) \\ \vdots \\ w(k+M-1) \\ \vdots \\ w(k+P-1) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{y}_{Future}(k+1) \\ \bar{y}_{Future}(k+2) \\ \vdots \\ \bar{y}_{Future}(k+M) \\ \vdots \\ \bar{y}_{Future}(k+P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ s_2 & s_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_M & s_{M-1} & \vdots & \vdots & s_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_P & s_{P-1} & \cdots & \cdots & s_{P-M+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+M-1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+M-1) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$\bar{y}_{Past}(k+j)$ เป็นผลตอบสนองอันเนื่องมาจากสัญญาณตัวแปรปรับที่เข้าสู่กระบวนการก่อนหน้าช่วงการเก็บตัวอย่างที่ k สามารถหาได้จากสมการที่ (2.9)

$$\bar{y}_{Past}(k+j) = \sum_{i=j+1}^N s_i \Delta u(k+j-i) + s_N u(k+j-N-1) \quad (2.9)$$

$w(k+j)$ เป็นความผิดพลาดของโมเดล ซึ่งอาจมีสาเหตุจากการหาโมเดลผิดพลาดและรวมถึงความผิดพลาดเนื่องจากผลของสิ่งรบกวนจากภายนอกเข้าสู่กระบวนการ ทำให้ค่าทำนายของผลตอบสนองและค่าเอาท์พุทที่วัดได้จริงจากกระบวนการมีค่าไม่ตรงกัน เพื่อเป็นการชดเชยผลของความผิดพลาดดังกล่าว ตัวควบคุม DMC จึงรวมค่า $w(k+j)$ ไว้ในตัวควบคุมด้วย โดย

ประมาณว่าทุกระยะทำนาย $j = 1, 2, \dots, P$ มีค่า $w(k+j)$ คงที่เท่ากันหมด กำหนดเป็นฟังก์ชันระดับมีขนาดเท่ากับความแตกต่างระหว่างค่าวัดได้จริงของกระบวนการ ($y(k)$) กับค่าผลตอบสนองจากโมเดล ($\bar{y}(k)$) ดังสมการ (2.10)

$$w(k+j) = w(k) = y(k) - \bar{y}(k) \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, P-1 \quad (2.10)$$

สมการที่ (2.7) - (2.8) สามารถเขียนอยู่ในรูปตัวแปรเมทริกซ์ได้เป็น

$$\bar{Y}_P = \bar{Y}_{Future} + \bar{Y}_{Past} + W \quad (2.11)$$

$$\bar{Y}_{Future} = S_P \Delta U \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.11) - (2.12) สังเกตได้ว่าค่าทำนาย (\bar{Y}_P) ของ DMC ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

- 1) ผลของตัวแปรปรับที่เข้าสู่กระบวนการหลังเวลาปัจจุบัน ($S_P \Delta U$)
- 2) ผลของตัวแปรปรับที่เข้าสู่กระบวนการก่อนเวลาปัจจุบัน (\bar{Y}_{Past})
- 3) ค่าประมาณความผิดพลาดของโมเดลกระบวนการ (W)

2.2.3) ตัวควบคุมออปติมัล (The Optimizer)

หลักการออกแบบตัวควบคุม DMC คือการหาค่าการเปลี่ยนแปลงที่ดีที่สุดของสัญญาณตัวแปรปรับ เพื่อให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) J มีค่าน้อยสุด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J ประกอบด้วยผลรวมของ 2 องค์ประกอบ คือ

- 1) ค่าความแตกต่างกำลังสองของค่าเป้าหมายกับค่าทำนาย
- 2) ค่ากำลังสองของตัวแปรปรับโดยมีตัวถ่วงน้ำหนัก f เพื่อป้องกันการแกว่งตัวมากเกินไปของสัญญาณตัวแปรปรับและช่วยจำกัดให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้

$$J = \sum_{j=1}^P (y_d(k+j) - \bar{y}_p(k+j))^2 + f^2 \sum_{l=1}^M (\Delta u(k+l-1))^2 \quad (2.13)$$

เมื่อ $y_d(k+j)$ = ผลตอบสนองที่เป็นเป้าหมายที่ต้องการในแต่ละระยะทำนาย เขียนในรูปเวกเตอร์ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_d = \begin{bmatrix} y_d(k+1) \\ y_d(k+2) \\ \vdots \\ y_d(k+P) \end{bmatrix}$$

William L.Luyben [15] ได้แสดงวิธี Least Square สำหรับแก้มสมการที่ (2.13) ได้เป็น

$$\Delta U = \left[[(S_P)^* S_P + f^2 I]^{-1} (S_P)^* \right] \times \left[Y_d - (\bar{Y}_{Past} + W) \right] \quad (2.14)$$

ΔU เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรปรับในอนาคตที่จะทำให้ค่าทำนายและค่าเป้าหมายต่างกันน้อยที่สุด ในทางปฏิบัติตัวแปรปรับที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการมีขนาดเป็น $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ โดยที่ $\Delta u(k)$ เป็นสมาชิกแถวแรกของเวกเตอร์ ΔU ให้ K_{DMC} เป็นเกนตัวควบคุม DMC จะได้

$$\Delta u(k) = K_{DMC} \left[Y_d - (\bar{Y}_{Past} + W) \right] \quad (2.15)$$

$$K_{DMC} = \left[\begin{array}{cccc} 1 & 0 & \dots & 0 \end{array} \right]_{1 \times M} \times \left[[(S_P)^* S_P + f^2 I]^{-1} (S_P)^* \right] \quad (2.16)$$

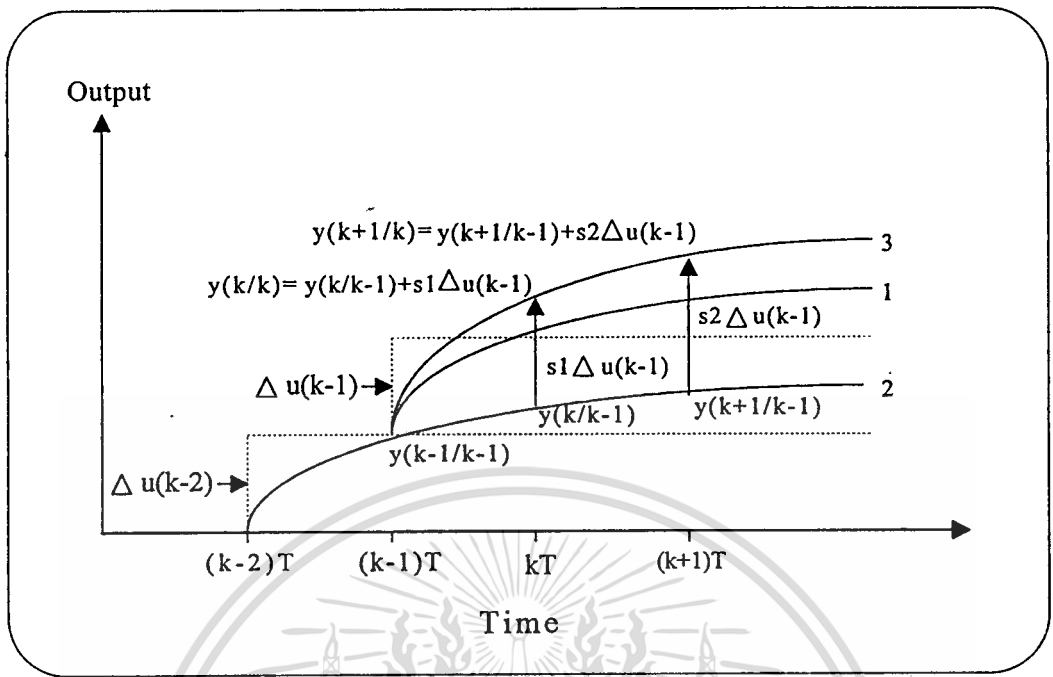
จากสมการ (2.15) จะเห็นว่าในแต่ละช่วงการเก็บตัวอย่างที่ k ต้องคำนวณค่า $\bar{y}_{Past}(k+j)$ ตั้งแต่ $j=1, 2, \dots, P$ ถ้า P และ N มีค่ามาก การคำนวณยิ่งยุ่งยากและช้าซ้อน ในที่นี้จึงเสนอตัวควบคุม DMC ในรูปแบบสถานะปริภูมิ (State space formulation) ซึ่งทำให้ลดการคำนวณที่ซ้ำซ้อนได้

2.3 ทฤษฎี DMC ในรูปแบบสถานะปริภูมิ (State space formulation)

2.3.1 สมการคณิตศาสตร์กระบวนการในรูปสมการสถานะปริภูมิ

พิจารณาภาพที่ (2) แสดงผลตอบสนองของกระบวนการเชิงเส้น ที่เวลา $(k-2)T$ มีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับเป็นฟังก์ชันระดับขนาด $\Delta u(k-2)$ เข้ากระบวนการ จะได้ผลตอบสนองเป็นกราฟเส้นที่ 2 และเมื่อเวลา $(k-1)T$ มีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับเป็นฟังก์ชันระดับขนาด $\Delta u(k-1)$ ได้ผลตอบสนองเป็นกราฟเส้นที่ 1 ดังนั้นผลตอบสนองรวมของกระบวนการเนื่องจากตัวแปรปรับ $\Delta u(k-2)$ และ $\Delta u(k-1)$ จะเป็นกราฟเส้นที่ 3 ซึ่งมีขนาดเท่ากับผลรวมของกราฟเส้น 1 และเส้น 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2 แสดงผลตอบสนองของระบบเชิงเส้น

Li Sifu [10] ได้ใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นดังกล่าวข้างต้น เขียนผลตอบสนองกระบวนการ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับ ได้เป็นโมเดลในรูปสมการสถานะปริภูมิ หรือ State space model ดังนี้

$$\bar{Y}(k/k) = R\bar{Y}(k-1/k-1) + S\Delta u(k-1) \quad (2.17)$$

$$\bar{y}(k) = Q\bar{Y}(k/k) \quad (2.18)$$

เมื่อ
$$\bar{Y}(k/k) = \begin{bmatrix} \bar{y}(k/k) \\ \bar{y}(k+1/k) \\ \vdots \\ \bar{y}(k+N-1/k) \end{bmatrix}$$

$$\bar{Y}(k-1/k-1) = \begin{bmatrix} \bar{y}(k-1/k-1) \\ \bar{y}(k/k-1) \\ \vdots \\ \bar{y}(k+N-2/k-1) \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{(N \times N)}$$

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{1 \times N}$$

2.3.2) ตัวทำนายในรูปแบบสถานะปริภูมิ (The predictor)

เมทริกซ์ทำนายเป็นไปตามสมการ (2.11)-(2.12) P.Lundström [11] ได้แสดงอัลกอริทึมของเวกเตอร์ \bar{Y}_{Past} ตามวิธีสถานะปริภูมิ ดังสมการ (2.19) ทำให้ลดความซับซ้อนในการคำนวณหาค่า $\bar{y}'_{Past}(k+j)$ สำหรับเวกเตอร์ W มีค่าตามสมการ (2.20)

$$\bar{Y}_{Past} = R_P \bar{Y}(k/k) \quad (2.19)$$

$$W = G[y(k) - \bar{y}(k)] \quad (2.20)$$

เมื่อ $R_P =$ เมทริกซ์ที่เป็น P แถวแรกของเมทริกซ์ R

$$G = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{P \times 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ปฏิบัติงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3) ตัวควบคุมออปติมัลในรูปแบบสถานะปริภูมิ (The Optimizer)

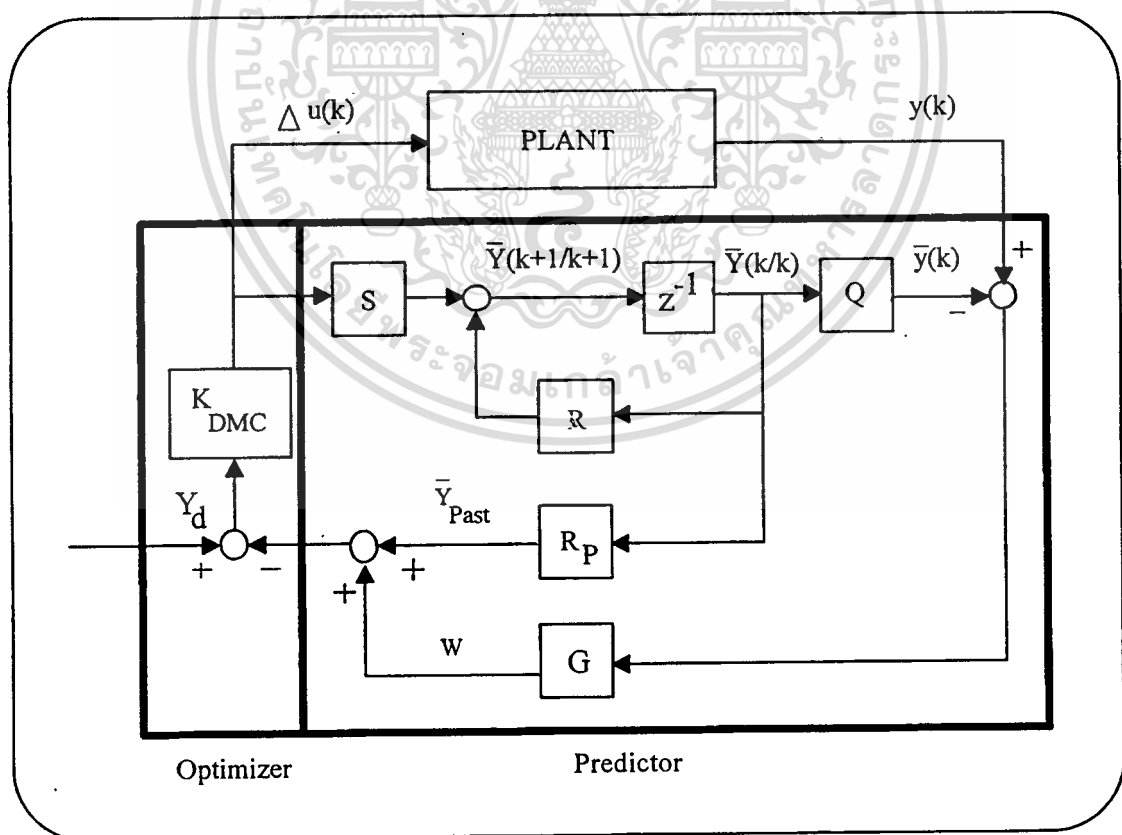
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สอดคล้องกับสมการที่ (2.13) สามารถเขียนได้เป็น

$$J = \min_{\Delta U} \{ \|Y_d - \bar{Y}_p\|^2 + \|F\Delta U\|^2 \} \quad (2.21)$$

เกนของตัวควบคุม DMC ในสมการที่ (2.16) เขียนได้เป็น

$$K_{DMC} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times M} \times [[(S_P)^* S_P + F^* F]^{-1} (S_P)^*] \quad (2.22)$$

เมื่อ $F = \begin{bmatrix} f & 0 & \dots & 0 \\ 0 & f & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & f \end{bmatrix}_{M \times M}$



ภาพที่ 3 แสดงแผนผังสัญญาณของระบบควบคุม DMC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 พารามิเตอร์ของระบบควบคุม DMC

Dale E. Seborg [4] ได้กล่าวถึงผลของพารามิเตอร์ของระบบควบคุมดังนี้

Model Horizon (N) ต้องเลือกจำนวน N ที่ทำให้ผลคูณของ NT มากกว่าเวลาที่กระบวนการเข้าสู่สภาวะสมดุลง (settling time) ในการทดสอบแบบวงรอบเปิด (open-loop) ถ้าใช้ค่า N น้อยไปจะทำให้สมรรถนะของระบบควบคุมไม่ดี เนื่องจากความไม่ถูกต้องของโมเดลหรือเรียกว่า Truncation error

Prediction Horizon (P) การเพิ่มค่า P จะทำให้ผลตอบสนองของระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น แต่มีผลทำให้การคำนวณยุ่งยากขึ้น

Control Horizon (M) การเพิ่มค่า M ทำให้การหา Invert Matrix ในสมการ (2.22) ยากขึ้น ค่า M ที่สูงๆจะทำให้ขนาดของสัญญาณตัวแปรปรับมากเกินไป ค่า M น้อยๆจะทำให้ระบบมีความคงทน (Robustness)

Control Weighting (f) ค่า f มากมีผลทำให้ขนาดของ Δu เปลี่ยนได้น้อยลง การเพิ่ม f จึงเป็นการป้องกันการแกว่งตัวของตัวแปรปรับ และช่วยจำกัดให้ขนาดตัวแปรปรับอยู่ในขอบเขตเงื่อนไขของอุปกรณ์ได้

Maurath [12] แนะนำว่าสำหรับระบบ SISO ที่ไม่มีเงื่อนไข ให้ใช้ค่า $M=1$, $f=0$ และ P เป็นตัวแปรสำหรับปรับค่าเพื่อให้ผลตอบสนองของระบบเหมาะสม โดยที่ PT ควรมีค่ามากกว่า 50% ของเวลาที่กระบวนการต้องใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุลงเมื่อทดสอบกระบวนการแบบวงรอบเปิด กล่าวคือในภาพที่ (1) กระบวนการเข้าสู่สภาวะสมดุลงที่เวลา NT ควรเลือกใช้ P ให้มีค่ามากกว่า $0.5N$

2.5 เสถียรภาพของ DMC

จากสมการที่ (2.14)-(2.16) ถ้า $k_{1,1}, k_{1,2}, \dots, k_{1,P}$ เป็นสมาชิกแถวแรกในเมทริกซ์ K_{DMC} และ $e_{oi}(k+j) = y_d(k+j) - [\bar{y}_{past}(k+j) + y(k) - \bar{y}(k)]$ เมื่อ $j = 1, 2, \dots, P$ จะได้

$$\Delta u(k) = k_{1,1}e_{oi}(k+1) + k_{1,2}e_{oi}(k+2) + \dots + k_{1,P}e_{oi}(k+P)$$

$$\begin{aligned} \Delta u(k) = & k_{1,1} \left[y_d(k+1) - \left(y(k) + (s_2 - s_1)\Delta u(k-1) + \dots + (s_N - s_{N-1})\Delta u(k+1-N) \right) \right] + \\ & + k_{1,2} \left[y_d(k+2) - \left(y(k) + (s_3 - s_1)\Delta u(k-1) + \dots + (s_N - s_{N-1})\Delta u(k+1-N) \right) \right] + \\ & + \dots + k_{1,P} \left[y_d(k+P) - \left(y(k) + (s_{P+1} - s_1)\Delta u(k-1) + \dots + (s_N - s_{N-1})\Delta u(k+1-N) \right) \right] \end{aligned}$$

$$\Delta u(k) = g_0(y_d(k) - y(k)) - g_1\Delta u(k-1) - g_2\Delta u(k-2) + \dots - g_{N-1}\Delta u(k+1-N)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{g_0}{(1+g_1z^{-1}+g_2z^{-2}+\dots+g_{N-1}z^{-N+1})(1-z^{-1})} \quad (2.23)$$

g_0, g_1, \dots, g_{N-1} เป็นฟังก์ชันของ $k_{1,1}, k_{1,2}, \dots, k_{1,P}$ จะเห็นว่าการพิจารณาเสถียรภาพของ DMC จากสมการคุณลักษณะเป็นไปด้วยความยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้น David M.Prett [5] แนะนำให้ใช้วิธีจำลองระบบวงปิดด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ อย่างไรก็ตามจากสมการ (2.23) จะเห็นว่า DMC มีคุณสมบัติ Integral action เนื่องจากมี pole ที่ $z = 1$

2.6 DMC กับกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุต

DMC สามารถประยุกต์เข้ากับกระบวนการหลายตัวแปร (MIMO) ได้เป็นอย่างดี ในที่นี้จะกล่าวถึงกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุต สามารถเขียนรูปแบบโมเดลได้เป็น

$$\bar{y}_1(k) = \sum_{i=1}^N s_{11,i} \Delta u_1(k-i) + s_{11,N} u_1(k-N-1) + \sum_{i=1}^N s_{12,i} \Delta u_2(k-i) + s_{12,N} u_2(k-N-1) \quad (2.24)$$

$$\bar{y}_2(k) = \sum_{i=1}^N s_{21,i} \Delta u_1(k-i) + s_{21,N} u_1(k-N-1) + \sum_{i=1}^N s_{22,i} \Delta u_2(k-i) + s_{22,N} u_2(k-N-1) \quad (2.25)$$

เขียนสมการ (2.24) และ (2.25) ในรูปสมการสถานะปริภูมิได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_1(k/k) \\ \bar{Y}_2(k/k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ 0 & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Y}_1(k-1/k-1) \\ \bar{Y}_2(k-1/k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1(k-1) \\ \Delta u_2(k-1) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{y}_1(k) \\ \bar{y}_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Y}_1(k/k) \\ \bar{Y}_2(k/k) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

รูปแบบทำนายสำหรับกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุตสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{P,1} \\ \bar{Y}_{P,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{P,11} & S_{P,12} \\ S_{P,21} & S_{P,22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{Past,1} \\ \bar{Y}_{Past,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{Past,1} \\ \bar{Y}_{Past,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{P,11} & 0 \\ 0 & R_{P,22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Y}_1(k/k) \\ \bar{Y}_2(k/k) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & 0 \\ 0 & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(k) - \bar{y}_1(k) \\ y_2(k) - \bar{y}_2(k) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

การหาขนาดของตัวแปรปรับเป็นไปทำนองเดียวกับกรณี SISO ได้ผลดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta u_1(k) \\ \Delta u_2(k) \end{bmatrix} = K_{DMC} \left(\begin{bmatrix} Y_{d,1} \\ Y_{d,2} \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} \bar{Y}_{Past,1} \\ \bar{Y}_{Past,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} \right) \right) \quad (2.31)$$

$$K_{DMC} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ & & & 0 \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \left[\left((S_P)^* S_P + F^* F \right)^{-1} (S_P)^* \right] \quad (2.32)$$

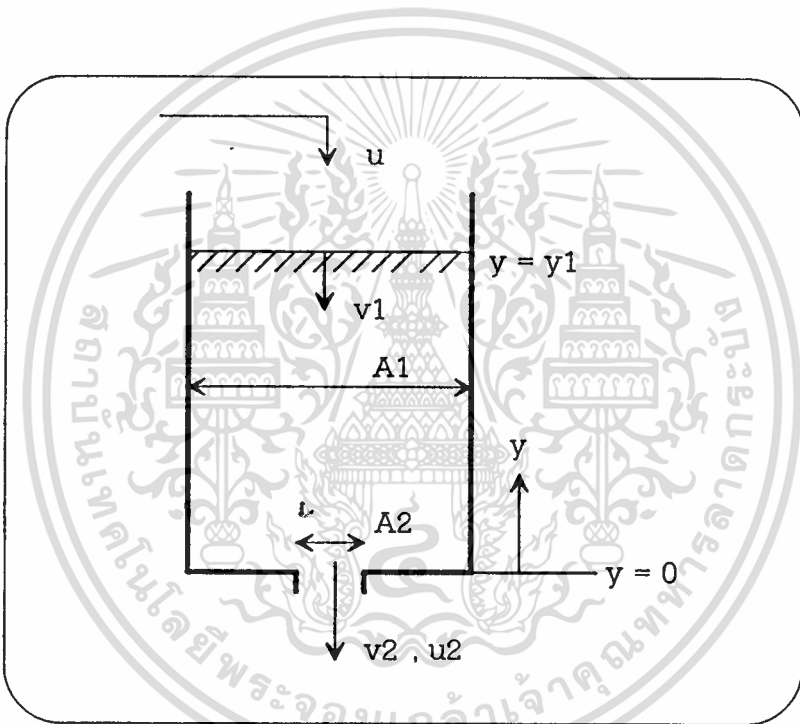
$$\text{เมื่อ } S_P = \begin{bmatrix} S_{P,11} & S_{P,12} \\ S_{P,21} & S_{P,22} \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} F_1 & 0 \\ 0 & F_2 \end{bmatrix}$$

บทที่ 3

กระบวนการและการจำลองกระบวนการ

3.1 อัตราการไหลของน้ำออกจากถัง



ภาพที่ 4 แสดงการหาอัตราการไหลออกของน้ำในถัง

ภาพที่ (4) ในสภาวะสมดุล (steady state) น้ำไหลเข้าด้วยอัตราการไหล u ถึงมีพื้นที่หน้าตัด A_1 ถ้าที่ระดับ y_1 น้ำไหลลงด้วยความเร็ว v_1 ที่กันถึงมีพื้นที่หน้าตัด A_2 น้ำไหลออกด้วยความเร็ว v_2 มีอัตราการไหล u_2 ใช้สมการของ Bernoulli's law แสดงกระบวนการดังกล่าวในสภาวะสมดุล ภายใต้เงื่อนไขการไหลแบบยุบตัวไม่ได้และไม่มีความเสียดทาน ได้สมการ (3.1)

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 + P_{atm} = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + P_{atm} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ P_{atm} เป็นความดันบรรยากาศ ρ เป็นความหนาแน่นของน้ำ และ g เป็นความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง เนื่องจากในสภาวะสมดุลย์ อัตราการไหลที่ระดับ 1 และ 2 เท่ากัน

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 \quad (3.2)$$

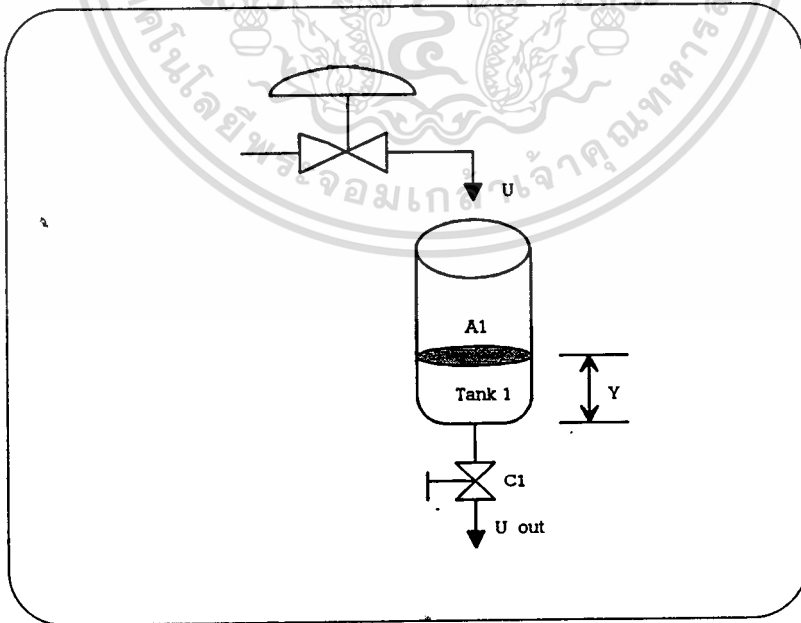
u_2 เป็นอัตราการไหลออกน้ำที่ก้นถัง หาได้จากสมการที่ (3.1)-(3.2) มีค่าเป็น

$$u_2 = A_1 \sqrt{\frac{2A_2^2}{A_1^2 - A_2^2} g y_1} = C \sqrt{y_1} \quad (3.3)$$

$$C = A_1 \sqrt{\frac{2A_2^2}{A_1^2 - A_2^2} g} \quad (3.4)$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่สำหรับการไหลแบบเทอร์นูแลนต์

3.2 กระบวนการที่มีรูปแบบเป็นระบบอันดับหนึ่ง (First order system)



ภาพที่ 5 แสดงกระบวนการถังบรรจุน้ำหนึ่งใบ

กระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งดังภาพที่ (5) ถ้าพื้นที่หน้าตัดถึงเป็น A_1 ค่าคงที่การไหลออกของน้ำเป็น C_1 ได้รูปแบบสมการอนุพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นอันดับหนึ่งดังนี้

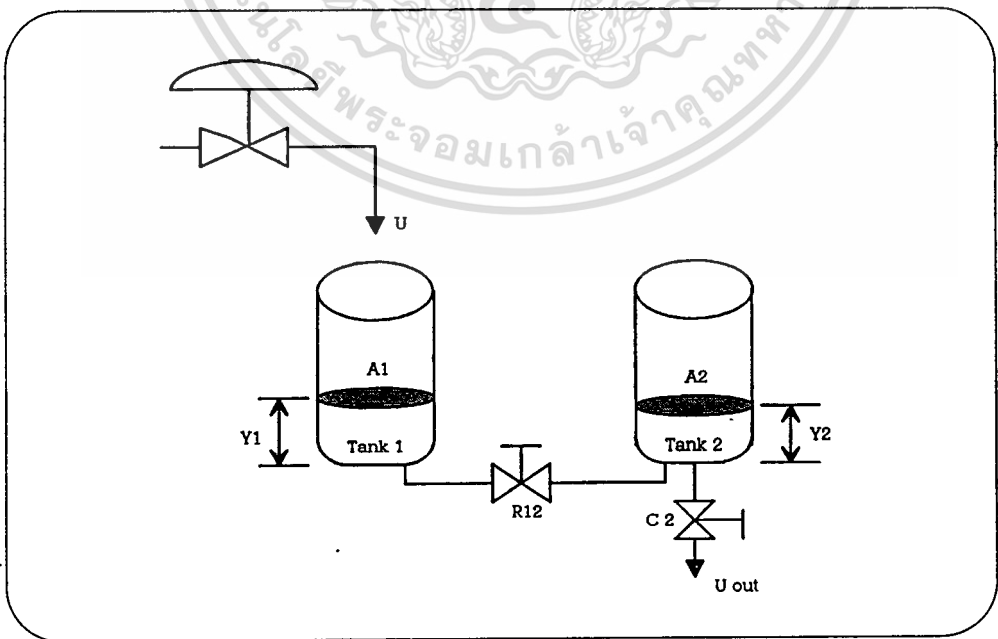
$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1}{A_1}u(t) - \frac{C_1}{A_1}\sqrt{y(t)} \quad (3.5)$$

3.3 กระบวนการที่มีรูปแบบเป็นระบบอันดับสอง (Second order system)

ภาพที่ (6) แสดงกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังใบที่สอง เมื่อน้ำไหลเข้าทางถังใบหนึ่ง ที่กันถังทั้งสองต่อท่อถึงกัน วาล์วที่กันถังใบที่สองมีค่าคงที่การไหลเป็น C_2 พิจารณาว่าการไหลผ่านวาล์วที่เชื่อมต่อระหว่างถังทั้งสองเป็นการไหลแบบเลมินาร์ มีความต้านทานการไหลเป็น R_{12} แสดงกระบวนการดังกล่าวในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งสองสมการได้เป็น

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = \frac{1}{A_1}u(t) - \frac{1}{A_1 R_{12}}(y_1(t) - y_2(t)) \quad (3.6)$$

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = \frac{1}{A_2 R_{12}}(y_1(t) - y_2(t)) - \frac{C_2}{A_2}\sqrt{y_2(t)} \quad (3.7)$$



ภาพที่ 6 แสดงกระบวนการถังบรรจุน้ำที่เชื่อมกับถังอีกใบหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

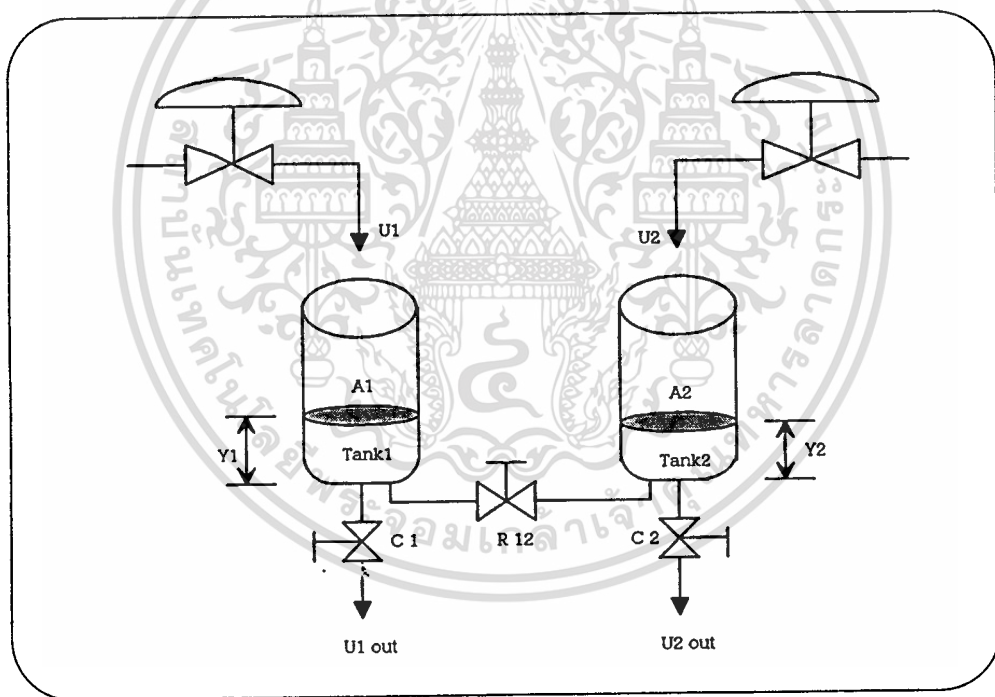
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุต

กระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุตที่มี interaction ระหว่างกันแสดงดังรูปที่ (7) โดยพิจารณาว่าการไหลผ่านวาล์วที่เชื่อมต่อระหว่างถังทั้งสองเป็นการไหลแบบเลมินาร์ ความต้านทานการไหลเป็น R_{12} เขียนสมการอนุพันธ์ได้เป็น

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = \frac{1}{A_1}u_1(t) - \frac{C_1}{A_1}\sqrt{y_1(t)} - \frac{1}{A_1R_{12}}(y_1(t) - y_2(t)) \quad (3.8)$$

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = \frac{1}{A_2}u_2(t) - \frac{C_2}{A_2}\sqrt{y_2(t)} + \frac{1}{A_2R_{12}}(y_1(t) - y_2(t)) \quad (3.9)$$



ภาพที่ 7 แสดงกระบวนการถังบรรจุน้ำสองใบที่มีการ interaction ระหว่างกัน

3.5 การจำลองกระบวนการ

กระบวนการที่มีเพียงสมการเดียว เช่น กระบวนดังสมการที่ (3.5) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์ฟังก์ชันได้เป็น

$$\frac{dy(t)}{dt} = f(t, y) \quad (3.10)$$

ในการจำลองกระบวนการในสมการที่ (3.10) ใช้ทฤษฎี Runge-Kutta method อันดับที่ 5 ซึ่งแสดงอัลกอริทึมไว้ใน Steven C.Chapra, Raymond P.Canale [14] ดังนี้

$$y_{k+1} = y_k + T \left[\frac{1}{90}(7z_1 + 32z_3 + 12z_4 + 32z_5 + 7z_6) \right] \quad (3.11)$$

เมื่อ

$$z_1 = f(t_k, y_k)$$

$$z_2 = f\left(t_k + \frac{1}{4}T, y_k + \frac{1}{4}Tz_1\right)$$

$$z_3 = f\left(t_k + \frac{1}{4}T, y_k + \frac{1}{8}Tz_1 + \frac{1}{8}Tz_2\right)$$

$$z_4 = f\left(t_k + \frac{1}{2}T, y_k - \frac{1}{2}Tz_2 + Tz_3\right)$$

$$z_5 = f\left(t_k + \frac{3}{4}T, y_k + \frac{3}{16}Tz_1 + \frac{9}{16}Tz_4\right)$$

$$z_6 = f\left(t_k + T, y_k - \frac{3}{7}Tz_1 + \frac{2}{7}Tz_2 + \frac{12}{7}Tz_3 - \frac{12}{7}Tz_4 + \frac{8}{7}Tz_5\right)$$

$$t_{k+1} = t_k + T$$

สำหรับกระบวนการที่ประกอบด้วยสมการอนุพันธ์สองสมการ เช่น สมการ (3.6)-(3.7) และ (3.8)-(3.9) เขียนในรูปความสัมพันธ์ของฟังก์ชันได้เป็นสมการ (3.12)-(3.13) และสามารถใช้ทฤษฎี Runge-Kutta method จำลองกระบวนการทั้งสองสมการพร้อมกันได้

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = f(t, y_1, y_2) \quad (3.12)$$

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = f(t, y_1, y_2) \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำ

4.1 อุปกรณ์ทดลอง

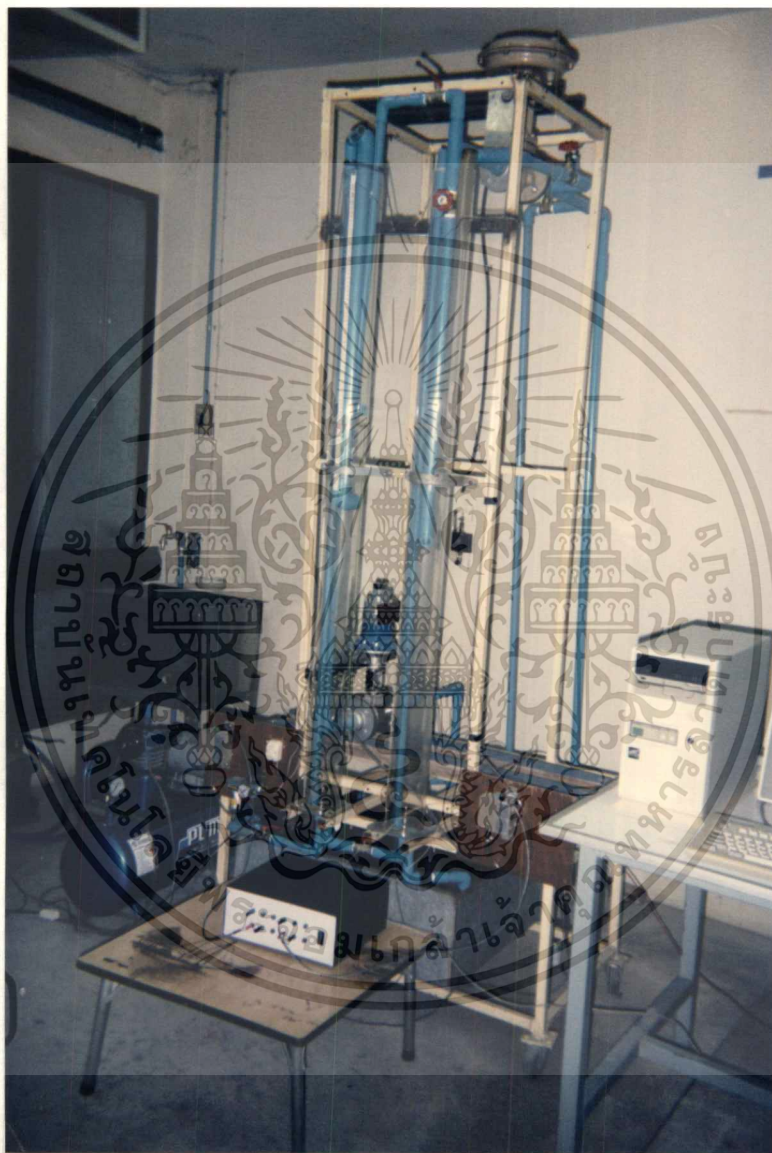
ภาพถ่ายชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำแสดงในภาพที่ (8) เขียนเป็นแผนผังดังภาพที่ (9) มีรายละเอียดของอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- 1) Pressure Transmitter 2 ชุด
เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันของน้ำ มีช่วงการวัดได้ 0-0.1 bar ทนแรงดันน้ำได้ไม่เกินหนึ่งเมตรน้ำ ในการใช้งานตั้งช่วงการวัดไว้ที่ 0-0.75 เมตร สัญญาณจาก Pressure Transmitter จะถูกขยายให้เป็นแรงดันขนาด 1-5 V.
- 2) PCL-812 Lab Card (A/D card) 1 ชุด
เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณ Analog ขนาด 1-5 V. จาก Pressure Transmitter แปลงเป็นสัญญาณ Digital ขนาด 12 บิต ส่งเข้าคอมพิวเตอร์
- 3) คอมพิวเตอร์ รุ่น 486 DX2-66 ขนาดแรม 4 MB. 1 ชุด
- 4) PCL-728 Lab Card (D/A card) 1 ชุด
เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณ Digital 12 บิต จากคอมพิวเตอร์แปลงเป็นกระแส 4-20 mA.
- 5) I to P Converter (I/P) 2 ชุด
เป็นอุปกรณ์รับกระแส 4-20 mA. จาก PCL-728 Lab Card แปลงเป็นแรงดันลมในช่วง 0.2-1 bar ต้องมี Supply เป็นลมแรงดัน 1.4 bar
- 6) Control Valve ของ FUJIKIN 1 ชุด
ขนาด 0.5 นิ้ว ชนิดปกติเปิด ต้องใช้ Supply เป็นลมแรงดัน 1.4 bar รับแรงดันลม 0.2-1 bar จาก I/P Converter เพื่อดันแผ่น diaphragm ทำให้วาล์วเปิดหรือปิดได้
- 7) Control Valve ของ Samson 1 ชุด
ขนาด 1 นิ้ว ชนิดปกติปิด รับแรงดันลม 0.2-1 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

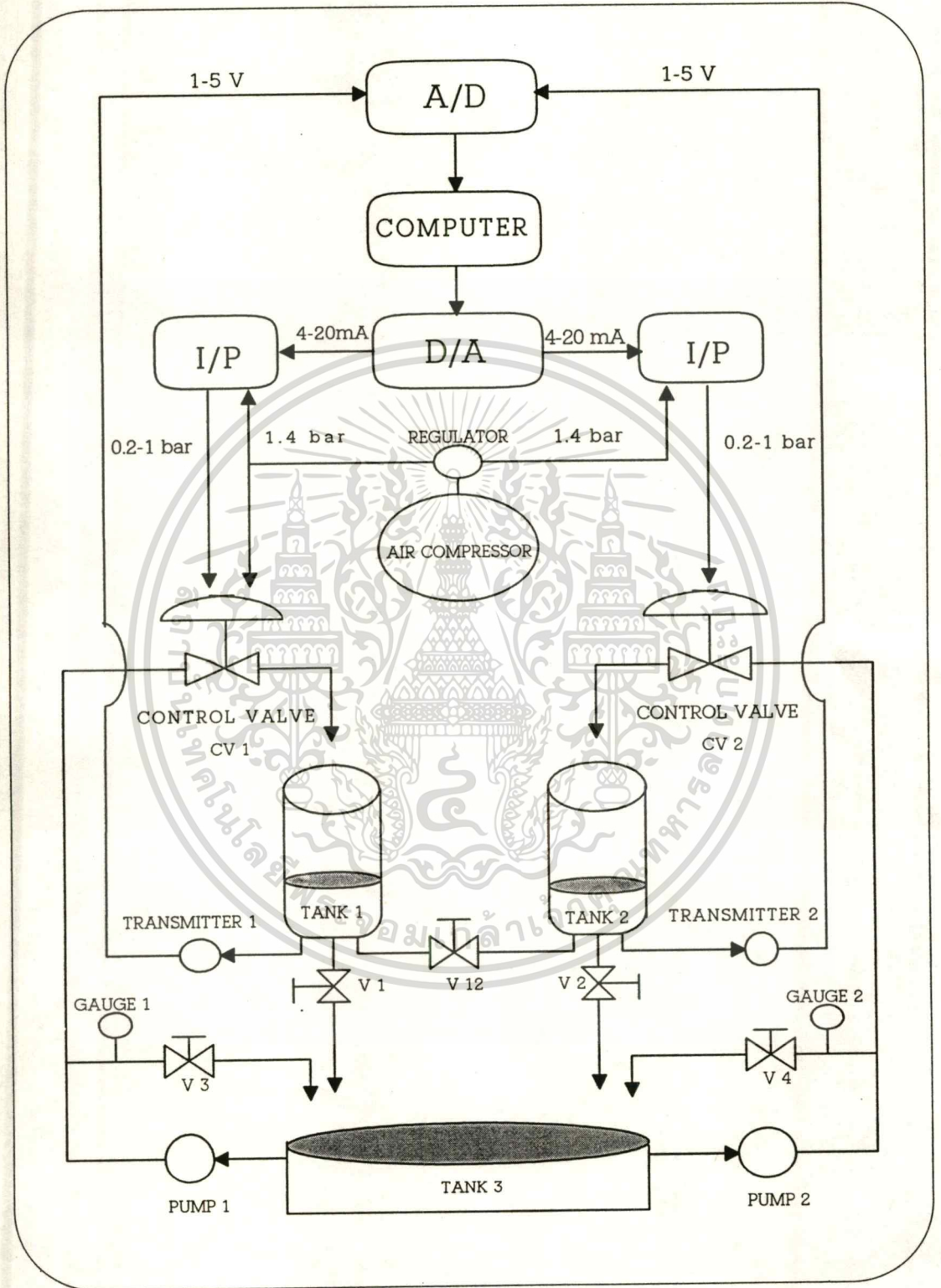
- | | | |
|---|---|------|
| 8) ปั้มน้ำชนิดหอยโข่ง ไซ้มอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า | 2 | ตัว |
| 9) ท่อพลาสติกใส
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 150 เซนติเมตร | 2 | เส้น |
| 10) Water Tank
เป็นถังพักน้ำสำหรับระบบ | 1 | ใบ |
| 11) ปั้ลม ไซ้มอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า | 1 | ตัว |
| 12) Pressure regulator
เป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันลมให้อยู่ระดับ 1.4 bar | 1 | ตัว |
| 13) Pressure gauge
เป็นอุปกรณ์วัดความดันของน้ำที่ตำแหน่งก่อนเข้าวาล์ว | 2 | ตัว |





ภาพที่ 8 ภาพถ่ายชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 9 แสดงแผนผังชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 กระบวนการที่ทำการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 3 กระบวนการ ได้แก่

1) กระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถัง ดังแสดงในภาพที่ (5) จัดอุปกรณ์โดยการเปิดวาล์ว V1 ปิดวาล์ว V12 ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 โดยใช้วาล์วควบคุม CV1

2) กระบวนการควบคุมระดับในถังที่เชื่อมต่อกับถังอีกใบหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ (6) จัดอุปกรณ์โดยการเปิดวาล์ว V1 เปิดวาล์ว V2 และ V12 ควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 2 โดยใช้วาล์วควบคุม CV1

3) กระบวนการควบคุมระดับน้ำ 2 ถังที่เชื่อมต่อกันที่กั้นถัง ดังแสดงในภาพที่ (7) จัดอุปกรณ์โดยเปิดวาล์ว V1, V2 และ V12 ควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 และ 2 พร้อมกัน โดยใช้วาล์วควบคุม CV1 และ CV2

เนื่องจากต้องการให้กระบวนการที่ทดสอบมีเดดไทม์อันเนื่องมาจากท่อที่ต่อจากวาล์วควบคุมเข้าสู่ถังน้ำมีความยาวมากๆ เช่น กระบวนการควบคุมน้ำหนึ่งถัง ต้องการให้มีเดดไทม์ 36 วินาที ในทางปฏิบัติใช้วิธีหน่วงด้วยซอฟต์แวร์ กล่าวคือสัญญาณตัวแปรปรับที่คำนวณได้ ณ ช่วงการเก็บตัวอย่างปัจจุบันที่ k จะถูกเก็บค่าไว้ในหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ และเมื่อเวลาผ่านไป 36 วินาที หรืออีก 18 คาบการเก็บตัวอย่าง ($k+18$) เมื่อใช้คาบการเก็บตัวอย่างละ 2 วินาที คอมพิวเตอร์จึงสั่งให้วาล์วควบคุมทำงานตามขนาดของตัวแปรปรับที่เก็บไว้ในหน่วยความจำ ทำให้น้ำไหลผ่านวาล์วควบคุมได้ช้าลง 36 วินาที สัญญาณตัวแปรปรับทุกค่าที่คำนวณได้จะถูกหน่วงด้วยซอฟต์แวร์ให้ช้าไป 36 วินาที ลักษณะการหน่วงด้วยซอฟต์แวร์ดังกล่าวจึงเปรียบคล้ายกับท่อน้ำมีความยาวมากๆ ทำให้กระบวนการมีเดดไทม์

4.3 ขั้นตอนการทดสอบตัวควบคุม DMC

1) หาโมเดลกระบวนการโดยการป้อนสัญญาณตัวแปรปรับเป็นตัวแปรสุ่ม (random variable) วัดระดับความสูงของน้ำในถัง ใช้ข้อมูลตัวแปรปรับและตัวแปรเอาต์พุตที่ได้หาค่าพารามิเตอร์ของโมเดลกระบวนการด้วยวิธี Least Square จากนั้นใช้โมเดลที่ได้หาค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับ 1 หน่วย (unit step response coefficients)

2) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันระดับหนึ่งหน่วยที่ได้ออกแบบตัวควบคุม DMC ทดสอบตัวควบคุมกับชุดทดลอง ปรับหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ทำให้ผลตอบสนองดีที่สุด

3) ทดสอบสมรรถนะของ ตัวควบคุมโดยการเติมน้ำรบกวนระบบและเปลี่ยนระดับสัญญาณอ้างอิง ทำการทดสอบระบบควบคุมที่ระดับปฏิบัติการต่างๆ เช่นที่ระดับ 20, 40 และ 55 เซนติเมตร เพื่อทดสอบความคงทน (Robustness) ของระบบควบคุม

4) เก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลต่อไป

4.4 ขั้นตอนการทดสอบตัวควบคุม PID

1) หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธีผลตอบสนองวงรอบเปิดตามวิธีของ Ziegler - Nichols ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก

2) ออกแบบตัวควบคุมชดเชยเดดไทม์ (deadtime compensator) ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

3) สำหรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำ 2 ถึงเป็นกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุตซึ่งมี Interaction ระหว่างกัน ต้องออกแบบชดเชยด้วยวิธีควบคุมแบบ Decoupling Control ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค

4) ใช้ตัวควบคุมที่ได้ทดสอบกับชุดทดลอง ทดสอบสมรรถนะตัวควบคุมด้วยวิธีการเติมน้ำรบกวนระบบและการเปลี่ยนระดับสัญญาณอ้างอิง โดยทำการทดสอบที่ระดับปฏิบัติการต่างๆ คือ 20, 40, 55 เซนติเมตร เพื่อทดสอบความคงทน (Robustness) ของระบบควบคุม

5) เก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป

บทที่ 5

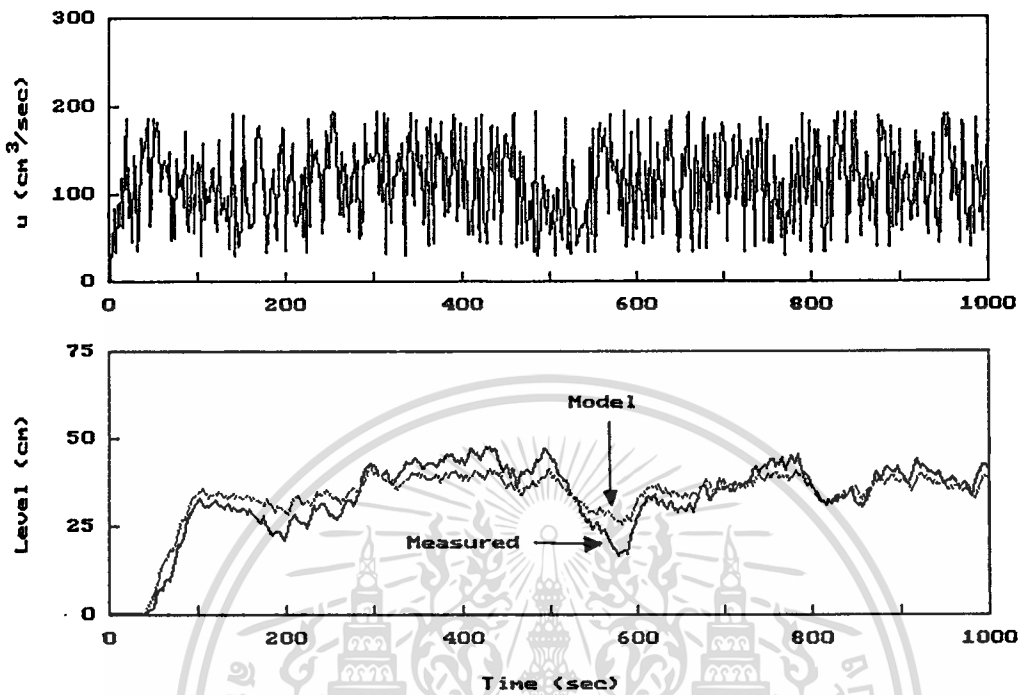
ผลการทดลอง

5.1 กระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถัง

5.1.1) ผลการหาโมเดลกระบวนการ

กระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถังดังแสดงในภาพที่ (5) เป็นกระบวนการที่มีรูปแบบเป็นระบบอันดับหนึ่ง จากการทดลองใส่สัญญาณตัวแปรปรับเป็นแบบตัวแปรสุ่ม (random variable) และวัดระดับน้ำได้ดังกราฟภาพที่ (10) คาบการเก็บตัวอย่าง 2 วินาที ใช้ข้อมูลของสัญญาณตัวแปรปรับและระดับความสูงของน้ำที่ได้หาพารามิเตอร์ด้วยวิธี Least Square ได้โมเดลกระบวนการในรูปแบบดีสครีตตามสมการที่ (5.1)

$$\frac{\bar{Y}(z)}{U(z)} = \frac{0.01912z^{-19}}{1-0.9400z^{-1}} \quad (5.1)$$

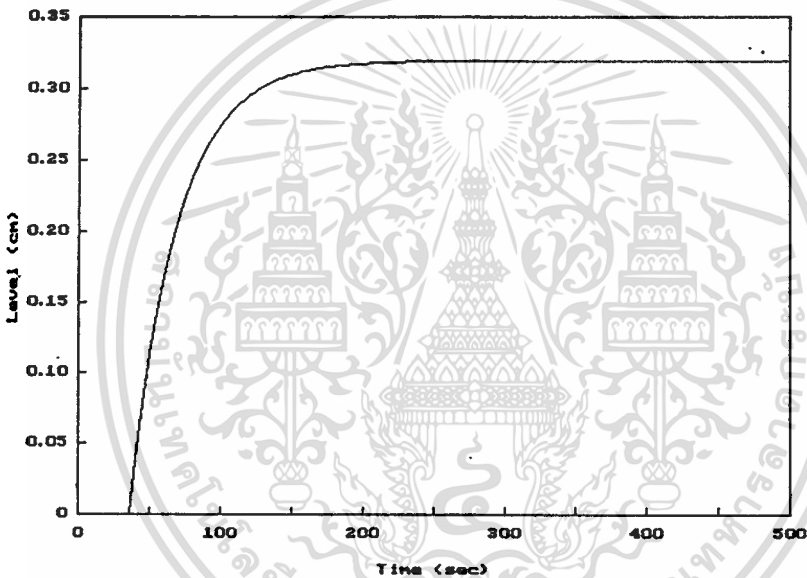


ภาพที่ 10 เปรียบเทียบผลจากกระบวนการจริงกับผลตอบสนองของโมเดล
สำหรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถัง

ภาพที่ (10) กราฟรูปบนเป็นขนาดของตัวแปรปรับแบบตัวแปรสุ่ม (random variable) ที่เข้าสู่กระบวนการ กราฟรูปล่างแสดงระดับความสูงของน้ำในถัง กราฟเส้นเข้มเป็นระดับความสูงของน้ำที่วัดได้โดยตรงจากกระบวนการ (Plant) โดยใช้ Pressure transmitter สำหรับกราฟเส้นบางได้จากการจำลองโมเดลในสมการที่ (5.1) โดยใช้ข้อมูลสัญญาณตัวแปรปรับในกราฟรูปบนทำการจำลองผลตอบสนองของโมเดล เพื่อเปรียบเทียบว่าโมเดลที่หาได้ให้ผลตอบสนองใกล้เคียงกับกระบวนการหรือไม่

5.1.2) ผลการออกแบบตัวควบคุม DMC

สัมประสิทธิ์ผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับขนาดหนึ่งหน่วย หรือเรียกว่า Unit step response coefficients หาได้จากสมการ (5.1) ได้ผลแสดงเป็นกราฟดังภาพที่ (11) ในที่นี้ ขนาดตัวแปรปรับ 1 หน่วย กำหนดเป็น $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$



ภาพที่ 11 แสดงผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับขนาด $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$

การปรับพารามิเตอร์ระบบควบคุม DMC ใช้วิธีของ Maurath ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย เนื่องจากมีค่า P เพียงค่าเดียวที่ต้องปรับ จากการทดสอบกับกระบวนการพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ $N=200$, $P=55$, $M=1$ และ $f=0$ ได้ค่าเกนของตัวควบคุม DMC เป็นเมทริกซ์ขนาด 1×55 มีค่าเป็น

$$K_{DMC} = [k_{1,1} \ k_{1,2} \ k_{1,3} \ \dots \ \dots \ k_{1,55}]_{1 \times 55} \quad (5.2)$$

เมื่อค่า $k_{1,1} \dots k_{1,55}$ แสดงค่าในตารางที่ (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงค่าของสมาชิกในเมทริกซ์ K_{DMC}

อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก	อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก
k _{1,1}	0.000000	k _{1,28}	0.088498
k _{1,2}	0.000000	k _{1,29}	0.094698
k _{1,3}	0.000000	k _{1,30}	0.100526
k _{1,4}	0.000000	k _{1,31}	0.106004
k _{1,5}	0.000000	k _{1,32}	0.111154
k _{1,6}	0.000000	k _{1,33}	0.115995
k _{1,7}	0.000000	k _{1,34}	0.120546
k _{1,8}	0.000000	k _{1,35}	0.124824
k _{1,9}	0.000000	k _{1,36}	0.128845
k _{1,10}	0.000000	k _{1,37}	0.132625
k _{1,11}	0.000000	k _{1,38}	0.136178
k _{1,12}	0.000000	k _{1,39}	0.139519
k _{1,13}	0.000000	k _{1,40}	0.142659
k _{1,14}	0.000000	k _{1,41}	0.145610
k _{1,15}	0.000000	k _{1,42}	0.148385
k _{1,16}	0.000000	k _{1,43}	0.150993
k _{1,17}	0.000000	k _{1,44}	0.153445
k _{1,18}	0.000000	k _{1,45}	0.155750
k _{1,19}	0.011507	k _{1,46}	0.157916
k _{1,20}	0.022324	k _{1,47}	0.159953
k _{1,21}	0.032493	k _{1,48}	0.161867
k _{1,22}	0.042051	k _{1,49}	0.163667
k _{1,23}	0.051036	k _{1,50}	0.165359
k _{1,24}	0.059483	k _{1,51}	0.166949
k _{1,25}	0.067423	k _{1,52}	0.168444
k _{1,26}	0.074886	k _{1,53}	0.169849
k _{1,27}	0.081903	k _{1,54}	0.171170
		k _{1,55}	0.172412

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3) ผลการออกแบบตัวควบคุม PID และตัวชดเชยเดดไทม์

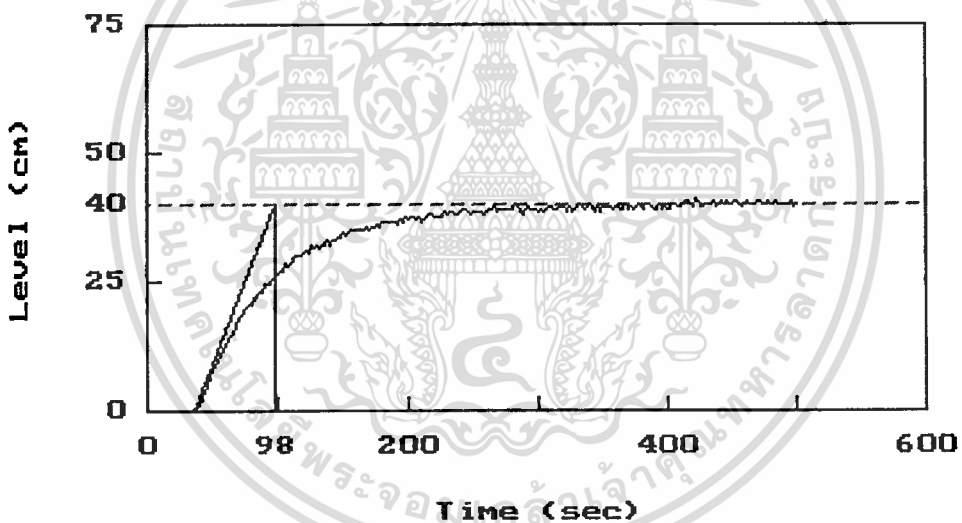
การหาพารามิเตอร์ของระบบควบคุม PID ใช้วิธีผลตอบสนองวงรอบเปิดตามวิธีของ Ziegler-Nichols (รายละเอียดดูภาคผนวก ก) ดังแสดงในภาพที่ (12) ได้ผลการคำนวณดังนี้

$$Slope = \frac{40}{(98-36)} = 0.646$$

$$K_C = \frac{1.2 \cdot 40}{36 \cdot 0.646} = 2.064$$

$$\tau_I = 2 \cdot 36 = 72 \text{ วินาที}$$

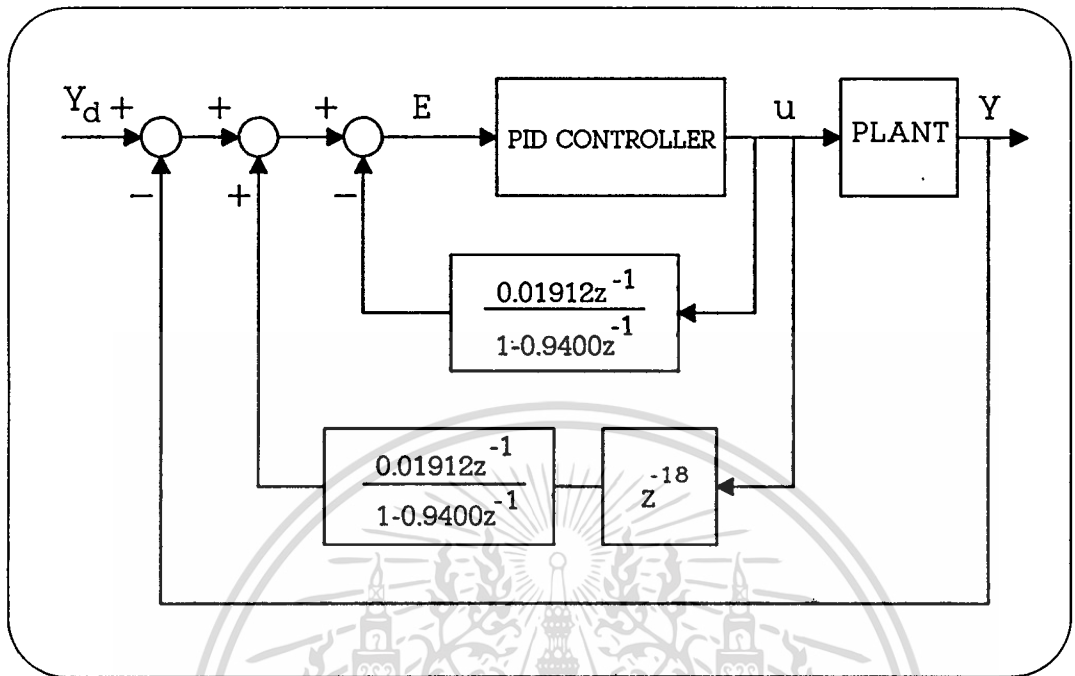
$$\tau_D = 0.5 \cdot 36 = 18 \text{ วินาที}$$



ภาพที่ 12 การหาพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID จากผลตอบสนองวงรอบเปิดของกระบวนการ

เนื่องจากกระบวนการมีเดดไทม์ จึงเพิ่มตัวชดเชยเดดไทม์ หรือ Deadtime compensator เข้าไว้ในตัวควบคุมด้วย และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID อีกครั้งเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด ได้ผลดังนี้ $K_C = 2.5$, $\tau_I = 60$ วินาที และ $\tau_D = 15$ วินาที ผลการออกแบบตัวควบคุม PID ที่มีตัวชดเชยเดดไทม์แสดงเป็นแผนผังได้ตามภาพที่ (13)

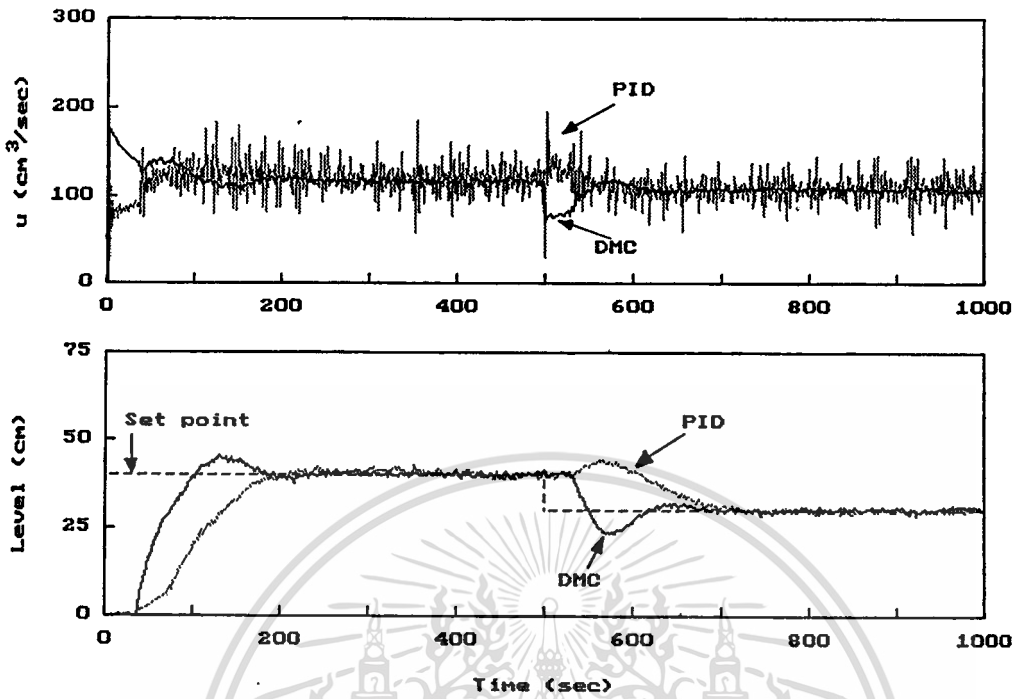
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



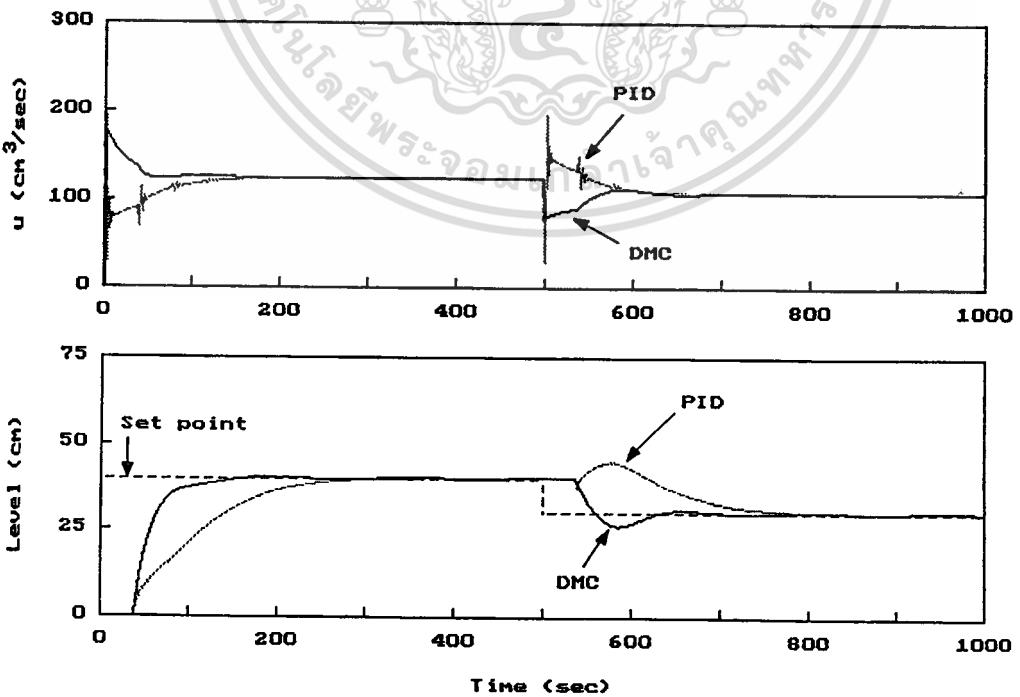
ภาพที่ 13 ผังสัญญาณระบบควบคุม PID มีตัวชดเชยเดดไทม์
สำหรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถัง

5.1.4) ผลการทดสอบและการจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ

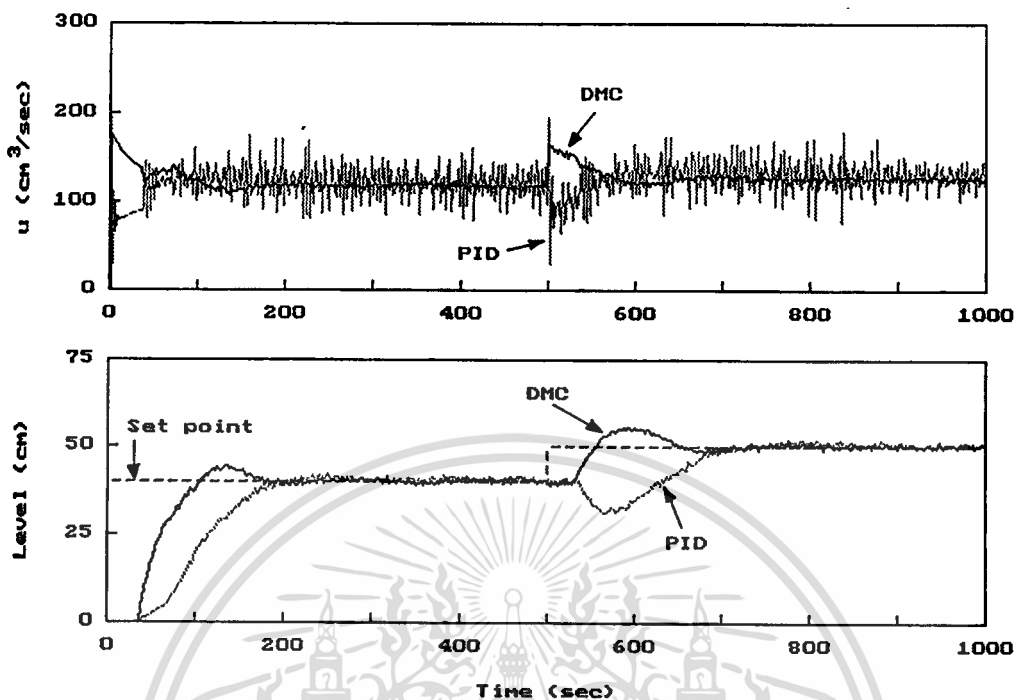
เนื่องจากการออกแบบระบบควบคุมทั้งสำหรับ DMC และ PID ที่ได้นี้ ใช้โมเดลที่ประมาณเป็นเชิงเส้นที่ระดับปฏิบัติการประมาณ 40 เซนติเมตร ค่าพารามิเตอร์ได้จากการทดสอบผลตอบสนองที่ระดับปฏิบัติการ 40 เซนติเมตร ในที่นี้จึงยึดถือระดับปฏิบัติการ 40 เซนติเมตรเป็นหลักในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม จากนั้นจะทดสอบความคงทน (Robustness) ของระบบควบคุมโดยการเปลี่ยนระดับปฏิบัติการเป็น 20 และ 55 เซนติเมตร ในแต่ละระดับปฏิบัติการจะทำการรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนระดับสัญญาณอ้างอิงเพิ่มขึ้น ลดระดับสัญญาณอ้างอิงลงทันที และรบกวนโดยการเติมน้ำเข้าสู่ระบบ ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองได้ผลดังต่อไปนี้



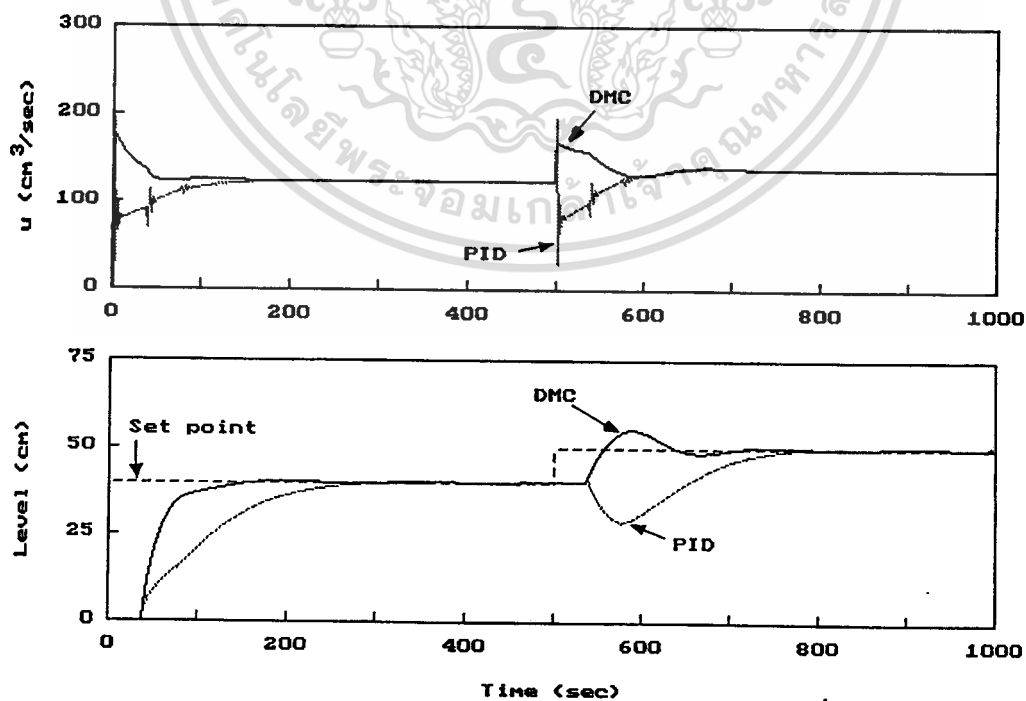
ภาพที่ 14 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.



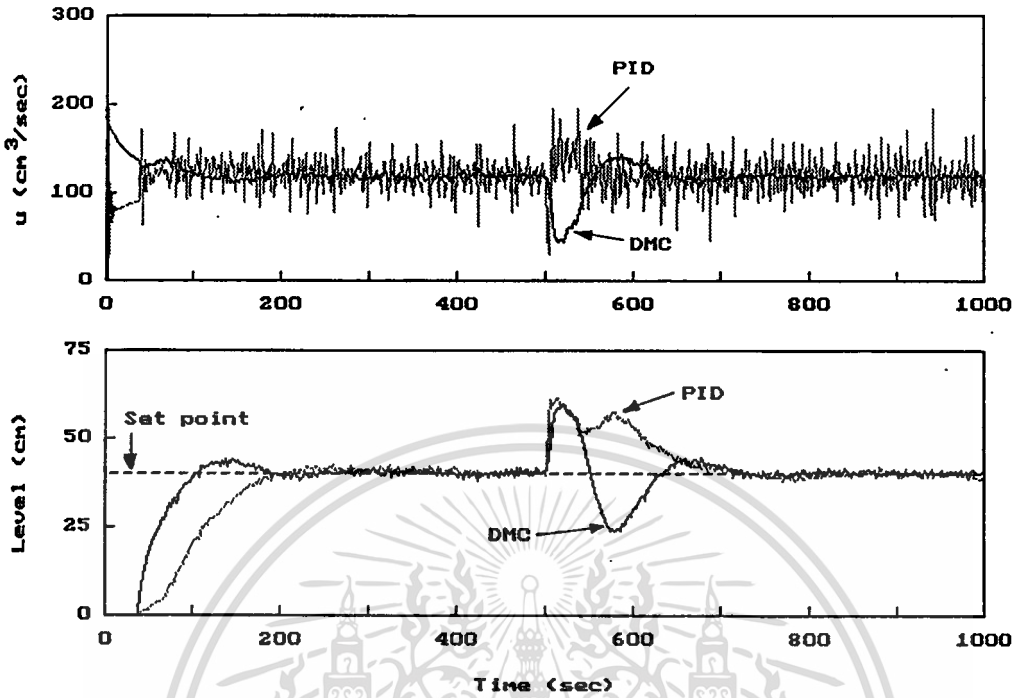
ภาพที่ 15 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.



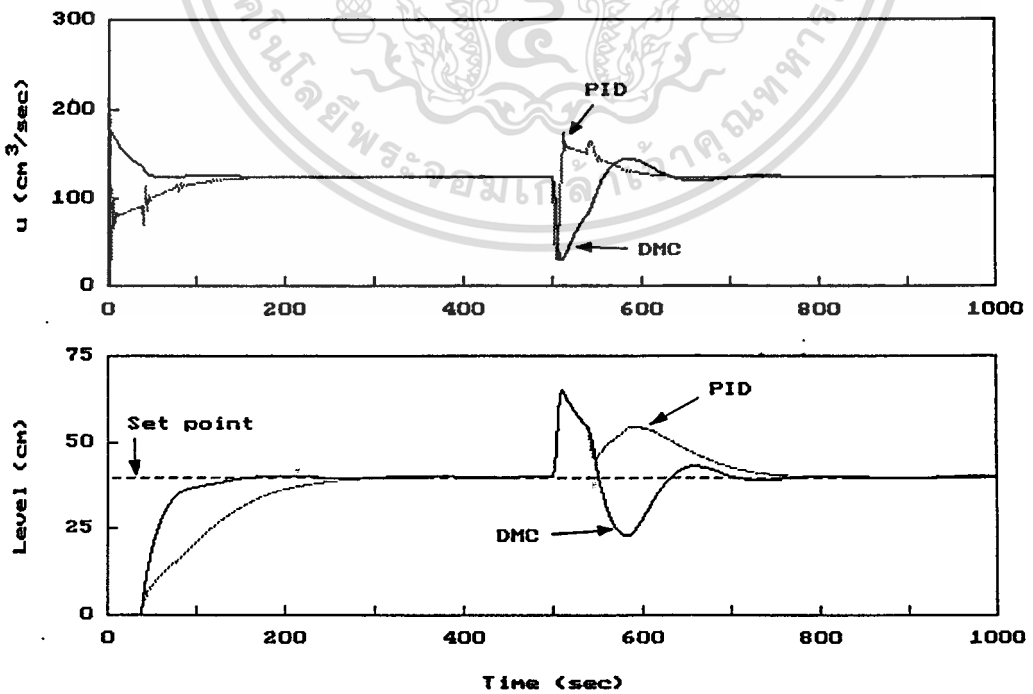
ภาพที่ 16 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 50 ซม.



ภาพที่ 17 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 50 ซม.
 เอกสารนี้เผยแพร่โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบอัตโนมัติทางวิศวกรรมศาสตร์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

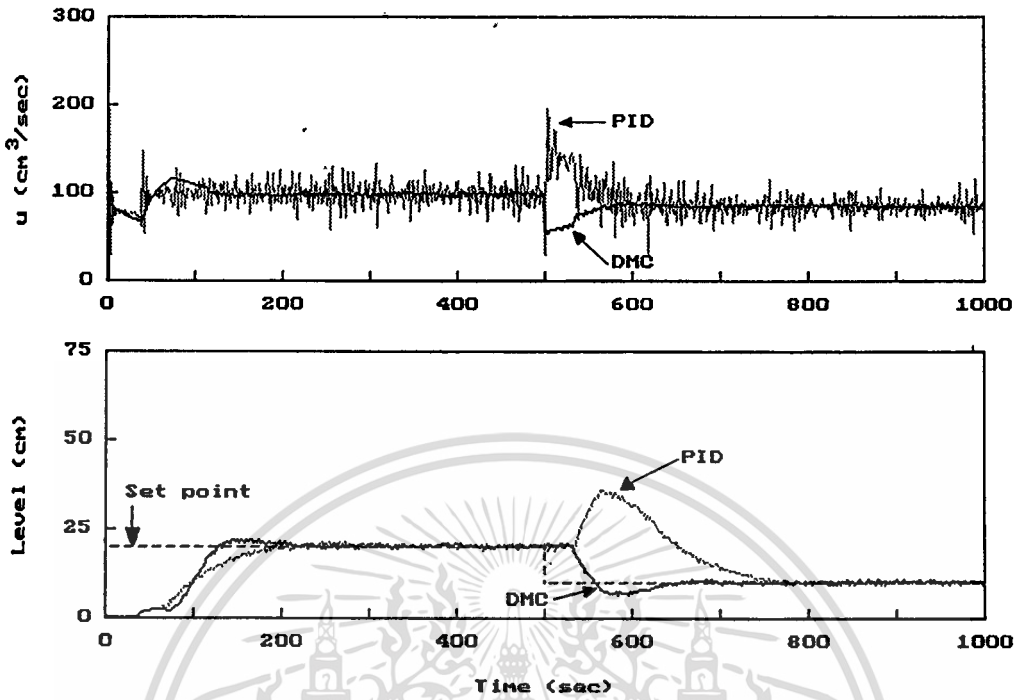


ภาพที่ 18 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที

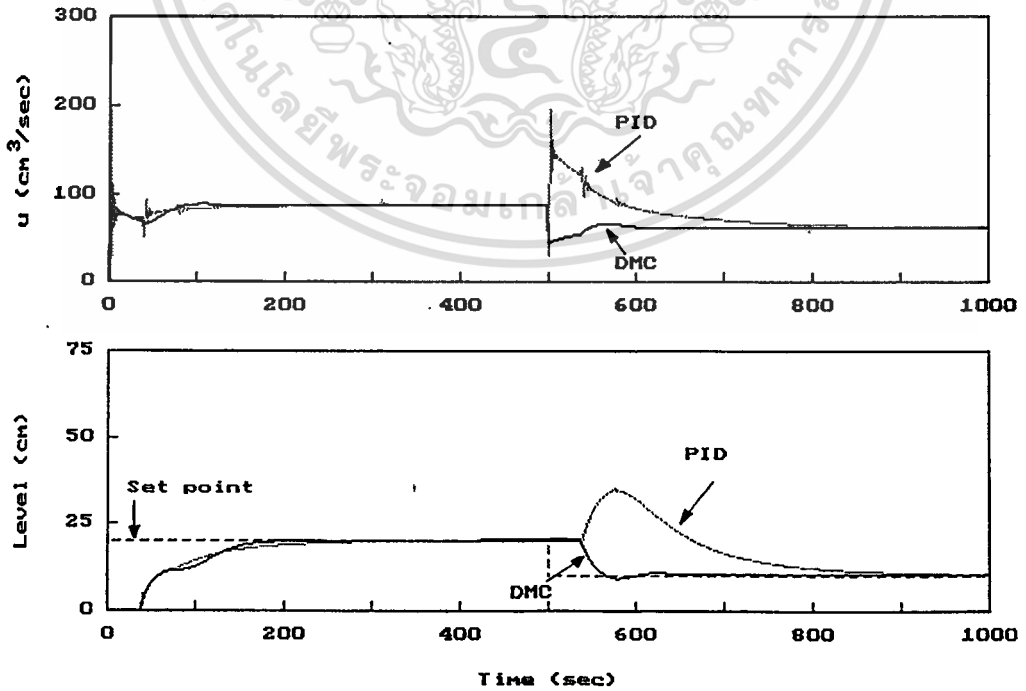


ภาพที่ 19 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที

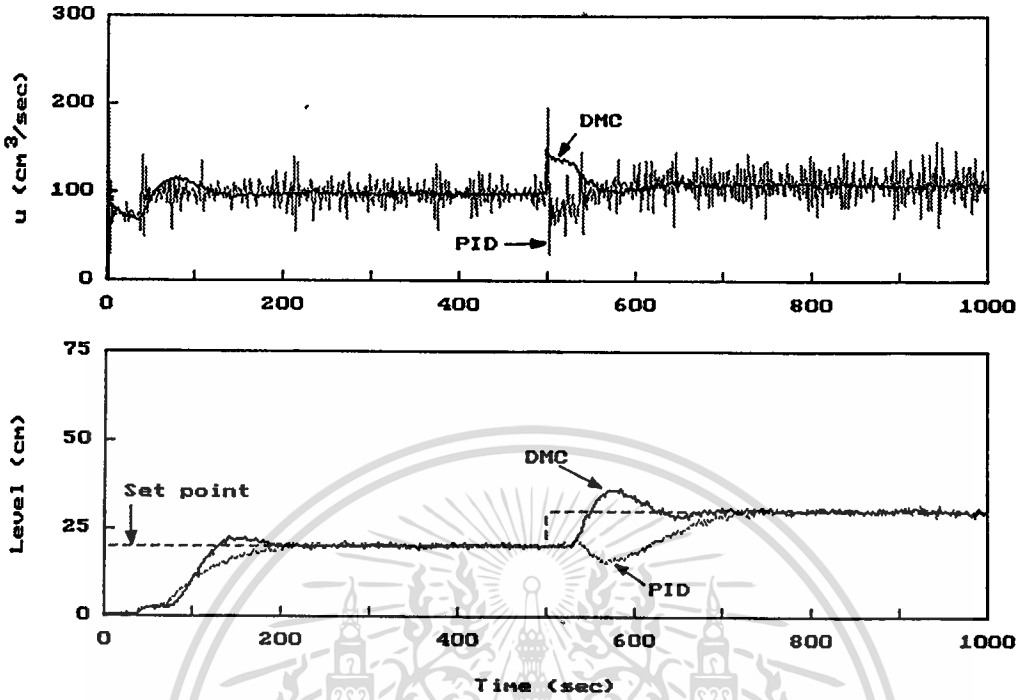
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



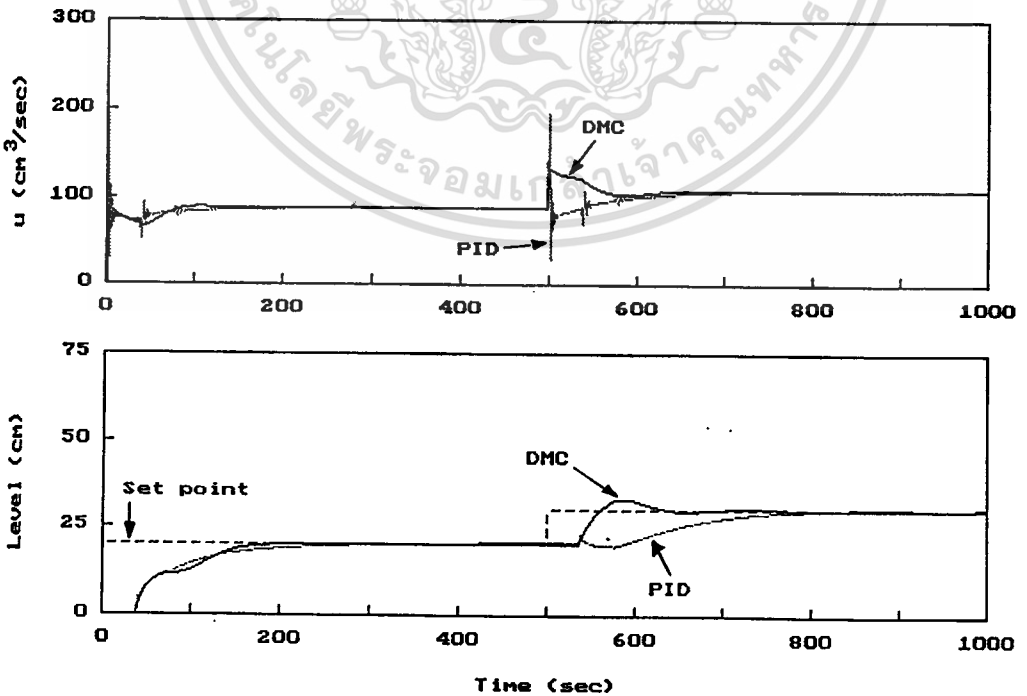
ภาพที่ 20 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 10 ซม.



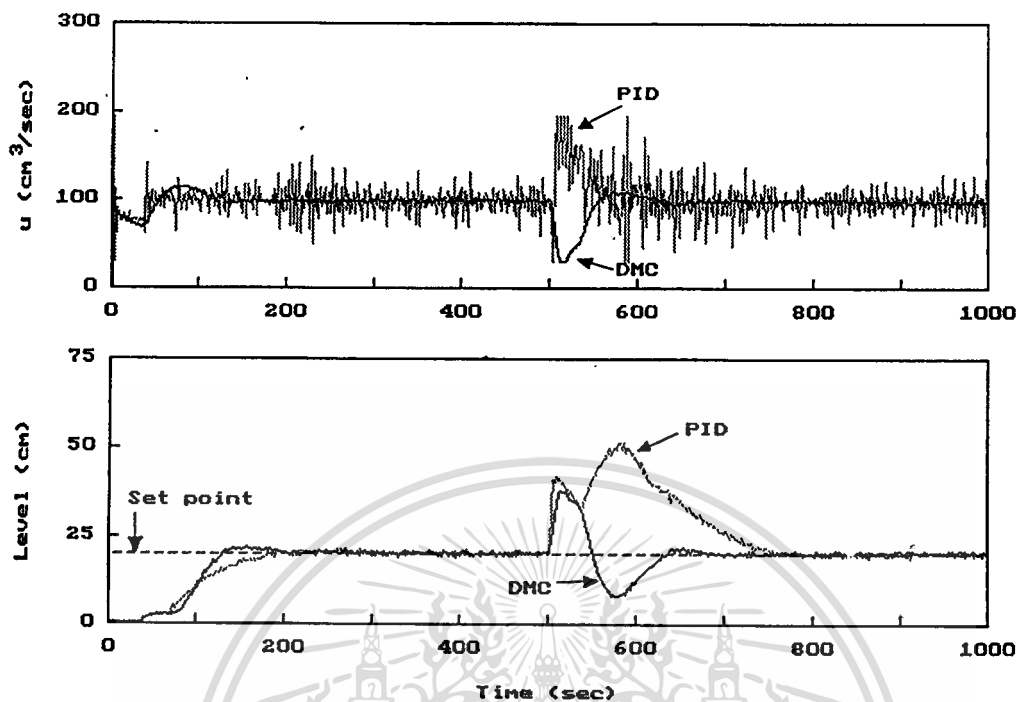
เอกสารภาพที่ 21 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 10 ซม. ด้านการคำนวณ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



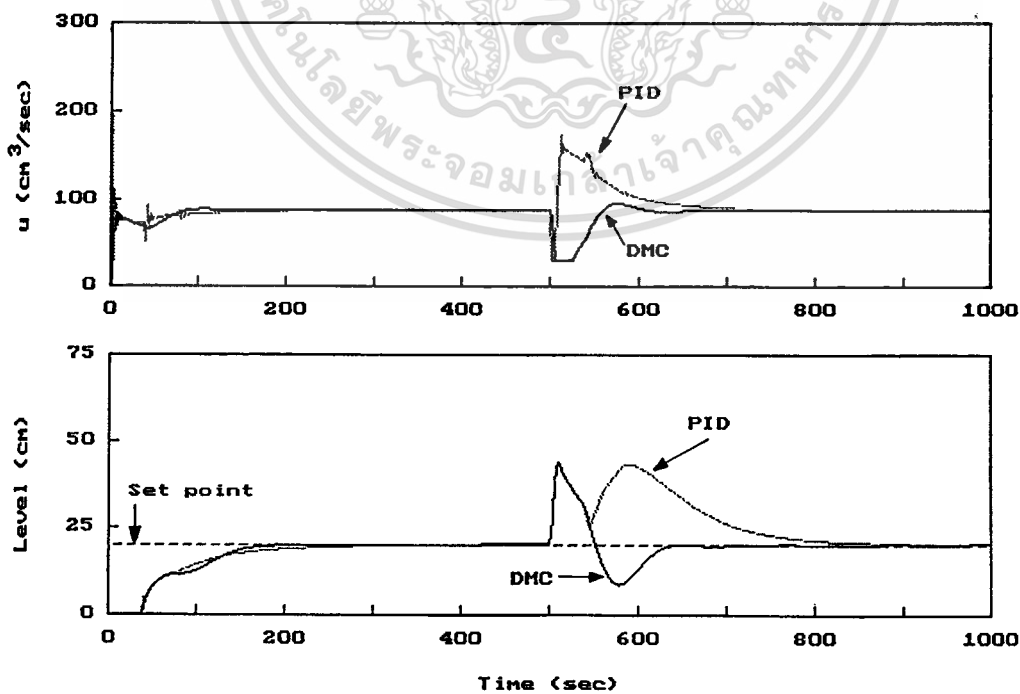
ภาพที่ 22 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.



ภาพที่ 23 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม. ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 24 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เดิมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที



ภาพที่ 25 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เดิมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที

5.1.5 วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถัง

จากผลการทดลองและผลการจำลองที่ได้ สรุปได้เป็นตารางที่ (2) และ (3) ตามลำดับ ค่า J หาจากสมการ (2.21) โดยหาในช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่ระดับเป้าหมาย คือช่วงเวลา 0-300 วินาที ค่า IAE เป็นผลรวมของค่าสมบูรณ์ความผิดพลาด โดยหาดังแต่เวลา 400 ถึง 800 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการรบกวนระบบ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบสมรรถนะระบบควบคุมจากการทดลอง

ระดับปฏิบัติการ	ตัวควบคุม	J	Rise time (วินาที)	Settling time (วินาที)	Overshoot (%)	IAE		
						ลดระดับ	เพิ่มระดับ	เติมน้ำ
40	DMC	$4.822 \cdot 10^5$	100	180	12.3	803	-	-
40	PID	-	180	180	0	1,754	-	-
40	DMC	$4.720 \cdot 10^5$	102	173	12.3	-	872	-
40	PID	-	175	175	0	-	2,249	-
40	DMC	$4.757 \cdot 10^5$	100	182	11.5	-	-	1,644
40	PID	-	182	182	0	-	-	2,096
20	DMC	$1.862 \cdot 10^5$	124	180	7.7	671	-	-
20	PID	-	176	180	0	3,050	-	-
20	DMC	$1.842 \cdot 10^5$	126	182	11.5	-	768	-
20	PID	-	182	182	0	-	1,813	-
20	DMC	$1.845 \cdot 10^5$	130	180	7.7	-	-	1,224
20	PID	-	180	180	0	-	-	3,838
55	DMC	$9.278 \cdot 10^5$	73	176	12.6	-	-	-
55	PID	-	194	300	2.8	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมรรถนะระบบควบคุมจากการจำลองกระบวนการ

ระดับปฏิบัติการ	ตัวควบคุม	J	Rise time (วินาที)	Settling time (วินาที)	Overshoot (%)	IAE		
						ลดระดับ	เพิ่มระดับ	เติมน้ำ
40	DMC	$4.637 \cdot 10^5$	150	150	0	664	794	1,773
40	PID	-	282	282	0	2,006	2,682	2,229
20	DMC	$1.360 \cdot 10^5$	188	188	0	515	617	1,235
20	PID	-	276	276	0	3,335	1,612	3,273
55	DMC	$9.473 \cdot 10^5$	85	214	8.4	-	-	-
55	PID	-	252	252	0	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถึงเป็นกระบวนการที่มีรูปแบบเป็นระบบอันดับหนึ่ง (First order system) จากการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 เซนติเมตร พบว่าการเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุม DMC เร็วกว่าระบบควบคุม PID มาก เนื่องจากมี rise time น้อยกว่ามาก ถึงแม้ระบบควบคุม DMC จะมี overshoot แต่ settling time ใกล้เคียงระบบควบคุม PID

เมื่อรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนระดับสัญญาณอ้างอิงทันทีจาก 40 เซนติเมตร เป็น 30 และ 50 เซนติเมตร สังเกตได้ชัดเจนว่าระบบควบคุม DMC มีผลตอบสนองเร็วกว่าดังภาพที่ (14)-(17) เมื่อรบกวนระบบโดยการเติมน้ำ พบว่าผลตอบสนองต่อการรบกวนของระบบควบคุม DMC จะแกว่งตัวเพื่อเข้าสู่ระดับสัญญาณอ้างอิงมากกว่าระบบควบคุม PID จากการทดลองพิจารณาผลรวมของค่าสมบูรณความผิดพลาด (IAE) พบว่าระบบควบคุม DMC สามารถลดผลรวมของความผิดพลาดเมื่อเทียบกับระบบควบคุม PID ได้ 54.2% 61.2% และ 21.6% ในช่วงที่มีการรบกวนด้วยวิธีลดระดับสัญญาณอ้างอิง เพิ่มระดับสัญญาณอ้างอิงและวิธีเติมน้ำตามลำดับ

ทดสอบที่ระดับปฏิบัติการเป็น 20 เซนติเมตร ระบบควบคุม DMC มีสมรรถนะดีกว่าระบบควบคุม PID กล่าวคือมีค่า settling time เท่ากันประมาณ 180 วินาที แต่ระบบควบคุม DMC มีค่า rise time น้อยกว่ามาก จากการหาค่า IAE พบว่าระบบควบคุม DMC สามารถลดผลรวมของความผิดพลาดเมื่อเทียบกับระบบควบคุม PID ได้ 78%, 57.6% และ 68.1% ในช่วงที่มีการรบกวนด้วยวิธีลดระดับสัญญาณอ้างอิง เพิ่มระดับสัญญาณอ้างอิงและวิธีเติมน้ำตามลำดับ

ที่ระดับปฏิบัติการเป็น 55 เซนติเมตร พบว่าระบบควบคุม DMC มีความคงทน (Robustness) สามารถควบคุมผลตอบสนองที่สภาวะคงที่ได้เป็นอย่างดี ในขณะที่ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID มีการแกว่งตัวที่สภาวะคงที่ มีแนวโน้มว่าจะไม่สามารถรักษาระดับปฏิบัติการไว้ได้

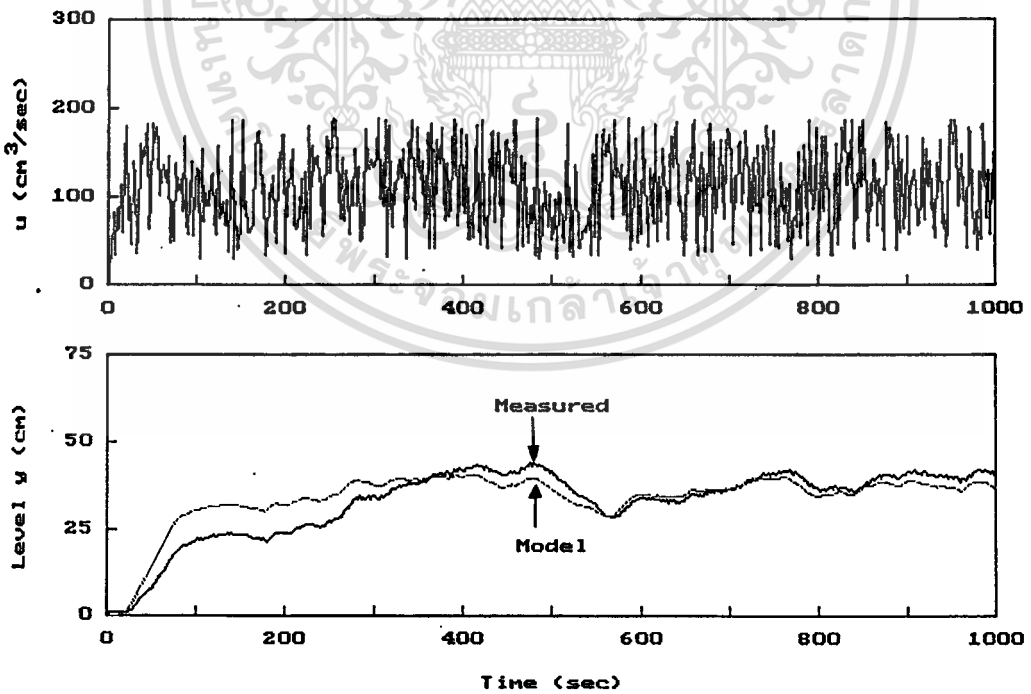
จากผลการจำลองกระบวนการ ได้ผลสอดคล้องกับการทดลอง กล่าวคือที่ระดับปฏิบัติการ 40, 20 และ 55 เซนติเมตร ระบบควบคุม DMC มี rise time, settling time และ IAE น้อยกว่าระบบควบคุม PID อย่างชัดเจน

5.2 กระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังที่เชื่อมต่อกับถังอีกใบหนึ่ง

5.2.1) ผลการหาโมเดลกระบวนการ

กระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังที่เชื่อมต่อกับอีกถังหนึ่งแสดงดังภาพที่ (6) เป็นกระบวนการที่มีรูปแบบเป็นระบบอันดับสอง จากการทดลองใส่สัญญาณตัวแปรปรับแบบตัวแปรสุ่มและวัดระดับน้ำได้ดังกราฟภาพที่ (28) คาบการเก็บตัวอย่าง 2 วินาที ใช้ข้อมูลของสัญญาณตัวแปรปรับและระดับความสูงของน้ำที่ได้หาพารามิเตอร์ด้วยวิธี Least Square ได้โมเดลของกระบวนการในรูปแบบดีสครีตตามสมการที่ (5.3)

$$\frac{\bar{Y}(z)}{U(z)} = \frac{0.0018z^{-6} + 0.0016z^{-7}}{1 - 1.7008z^{-1} + 0.7111z^{-2}} \quad (5.3)$$



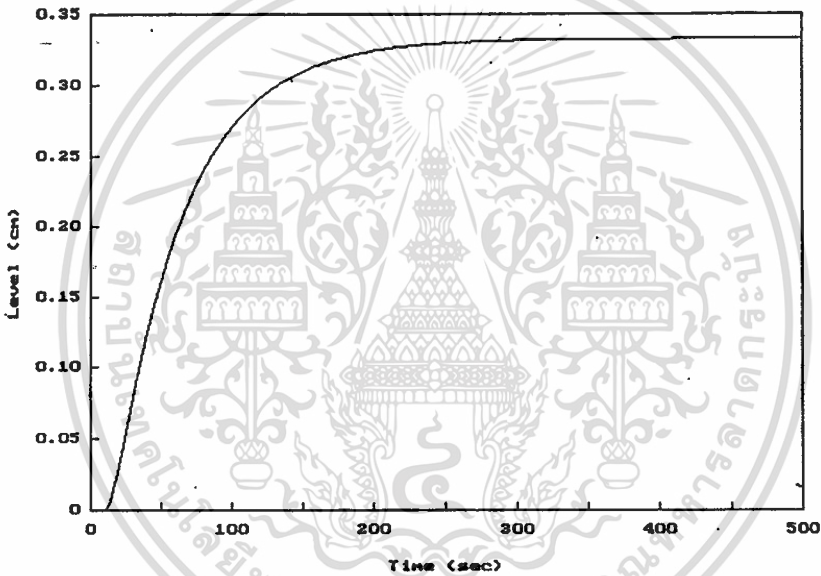
ภาพที่ 28 เปรียบเทียบผลจากกระบวนการจริงกับผลตอบสนองของโมเดล

สำหรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังที่เชื่อมต่อกับถังอีกใบหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2) ผลการออกแบบตัวควบคุม DMC

ใช้โมเดลที่ได้ตามสมการ (5.3) คำนวณหาสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับขนาดหนึ่งหน่วย (Unit step response coefficients) ในที่นี้ขนาดตัวแปรปรับ 1 หน่วย กำหนดเป็น $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ได้ผลตอบสนองดังกราฟดังภาพที่ (29)



ภาพที่ 29 ผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับขนาด $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$

จากการทดสอบกับกระบวนการพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม คือ $N=200$, $P=40$, $M=2$ และ $f=0.02$ ได้ค่าเกนของตัวควบคุม DMC เป็นเมทริกซ์ขนาด 1×40 มีค่าเป็น

$$K_{DMC} = [k_{1,1} \ k_{1,2} \ k_{1,3} \ \cdots \ \cdots \ k_{1,40}]_{1 \times 40} \quad (5.4)$$

เมื่อค่า $k_{1,1} \dots k_{1,40}$ แสดงค่าในตารางที่ (4)

ตารางที่ 4 แสดงค่าของสมาชิกในเมทริกซ์ K_{DMC}

อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก	อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก
k _{1,1}	0.000000	k _{1,21}	2.333248
k _{1,2}	0.000000	k _{1,22}	1.979511
k _{1,3}	0.000000	k _{1,23}	1.633956
k _{1,4}	0.000000	k _{1,24}	1.297799
k _{1,5}	0.000000	k _{1,25}	0.971792
k _{1,6}	1.099636	k _{1,26}	0.656366
k _{1,7}	2.827731	k _{1,27}	0.351732
k _{1,8}	3.953871	k _{1,28}	0.057915
k _{1,9}	4.640312	k _{1,29}	-0.225177
k _{1,10}	5.006979	k _{1,30}	-0.497712
k _{1,11}	5.142459	k _{1,31}	-0.759940
k _{1,12}	5.112135	k _{1,32}	-1.012110
k _{1,13}	4.964217	k _{1,33}	-1.254530
k _{1,14}	4.734199	k _{1,34}	-1.487524
k _{1,15}	4.448181	k _{1,35}	-1.711392
k _{1,16}	4.125288	k _{1,36}	-1.926466
k _{1,17}	3.779504	k _{1,37}	-2.133063
k _{1,18}	3.421023	k _{1,38}	-2.331495
k _{1,19}	3.057206	k _{1,39}	-2.522076
k _{1,20}	2.693358	k _{1,40}	-2.705099

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3) ผลการออกแบบตัวควบคุม PID และตัวชดเชยเดดไทม์

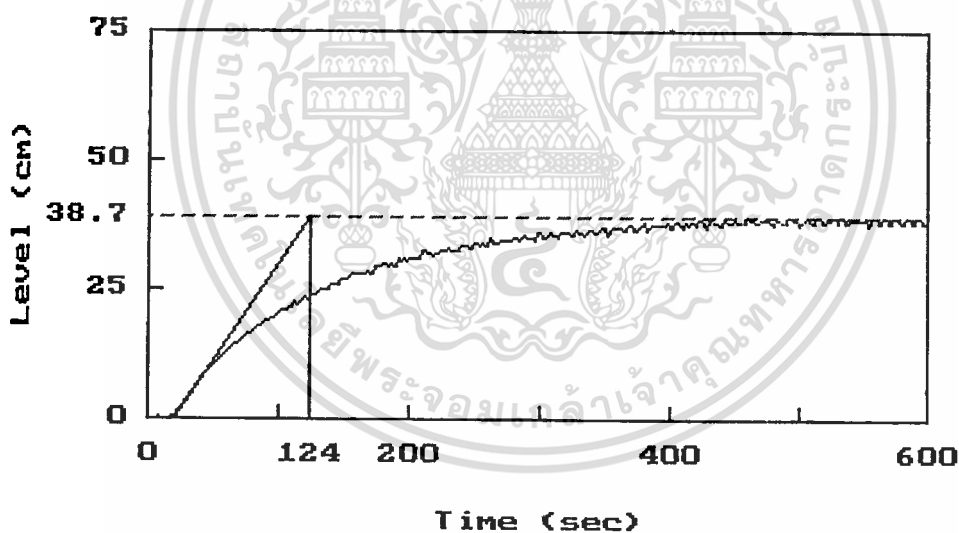
การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ใช้วิธีผลตอบสนองวงรอบเปิดตามวิธีของ Ziegler-Nichols ดังแสดงในภาพ (30) ได้ผลการคำนวณดังนี้

$$\text{Slope} = \frac{38.7}{(124-10)} = 0.34$$

$$K_C = \frac{1.2 \cdot 38.7}{10 \cdot 0.34} = 13.66$$

$$\tau_I = 2 \cdot 10 = 20 \text{ วินาที}$$

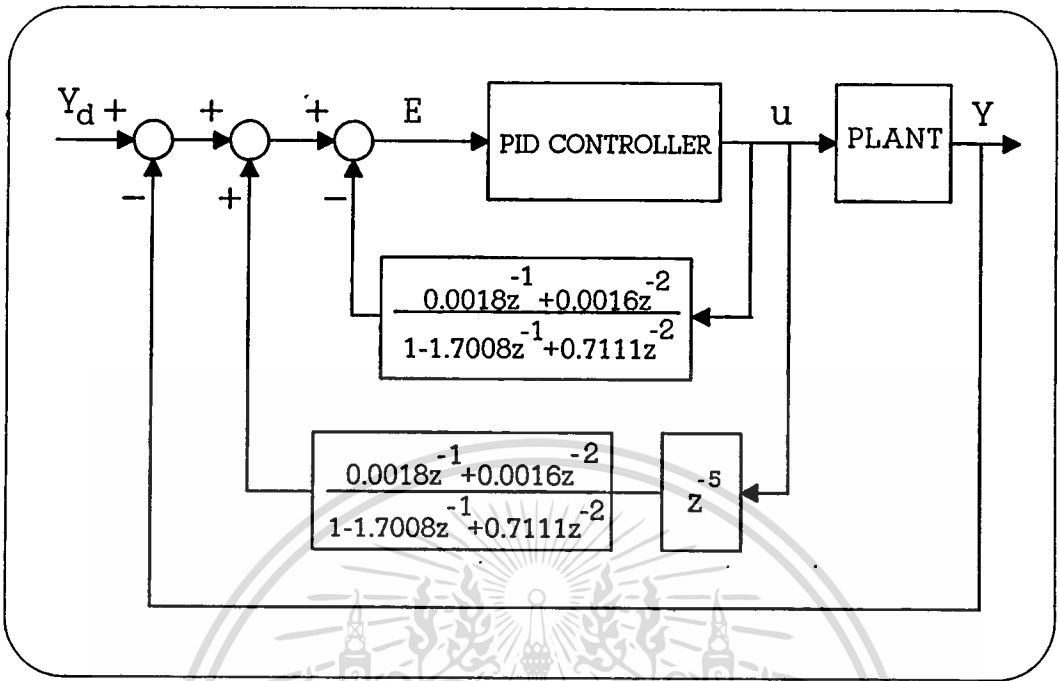
$$\tau_D = 0.5 \cdot 10 = 5 \text{ วินาที}$$



ภาพที่ 30 การหาพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID จากผลตอบสนองวงรอบเปิดของกระบวนการ

เนื่องจากกระบวนการมีเดดไทม์ จึงเพิ่มตัวชดเชยเดดไทม์ หรือ Deadtime compensator เข้าไว้ในตัวควบคุมด้วย และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID อีกครั้งเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด ได้ผลดังนี้ $K_C = 20.8$, $\tau_I = 20$ วินาที และ $\tau_D = 5$ วินาที ผลการออกแบบตัวควบคุม PID ที่มีตัวชดเชยเดดไทม์แสดงเป็นแผนผังได้ตามภาพที่ (31)

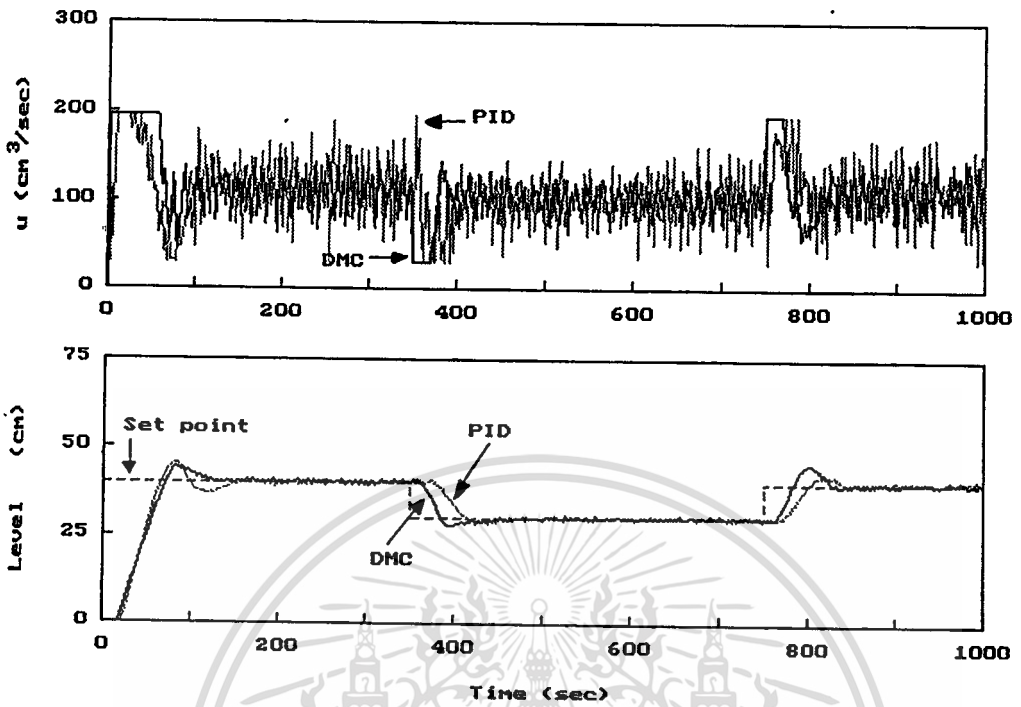
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



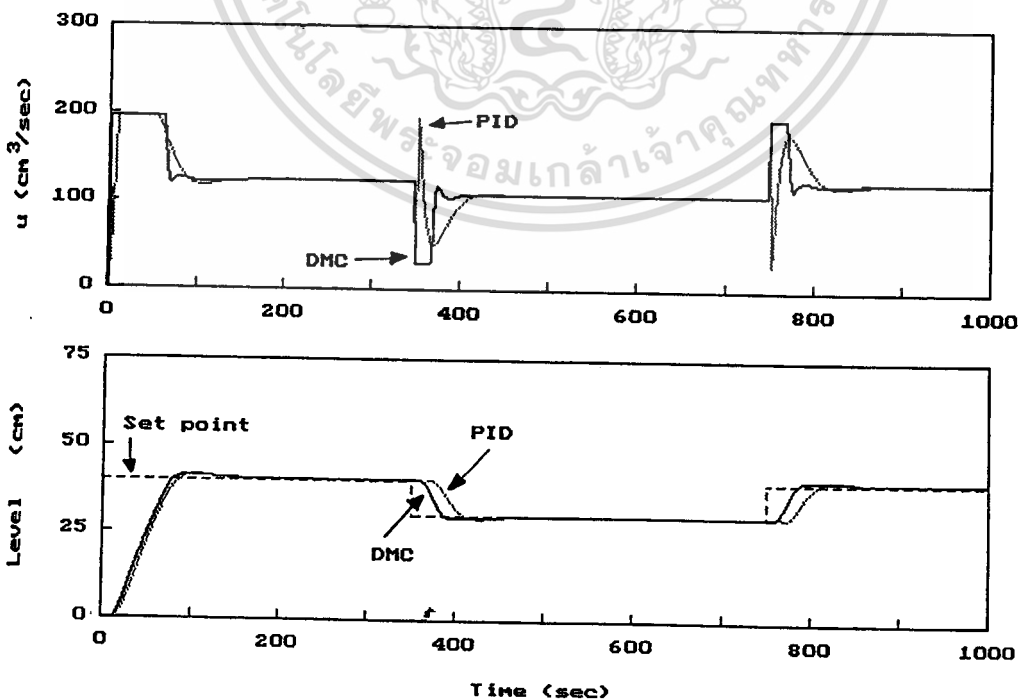
ภาพที่ 31 ผังสัญญาณระบบควบคุม PID มีตัวชดเชยเดดไทม์
สำหรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังที่เชื่อมต่อกับถังอีกใบหนึ่ง

5.2.4) ผลการทดสอบและการจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ

ทำการทดสอบผลตอบสนองที่ระดับปฏิบัติการ 40 เซนติเมตร จากนั้นจะทดสอบความคงทน (Robustness) ของระบบควบคุมโดยการเปลี่ยนระดับปฏิบัติการเป็น 20 และ 55 เซนติเมตร ในแต่ละระดับปฏิบัติการจะทำการรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนระดับสัญญาณอ้างอิงเพิ่มขึ้นหรือลดลงทันทีและโดยการเติมน้ำเข้าสู่ระบบ ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองได้ผลดังต่อไปนี้

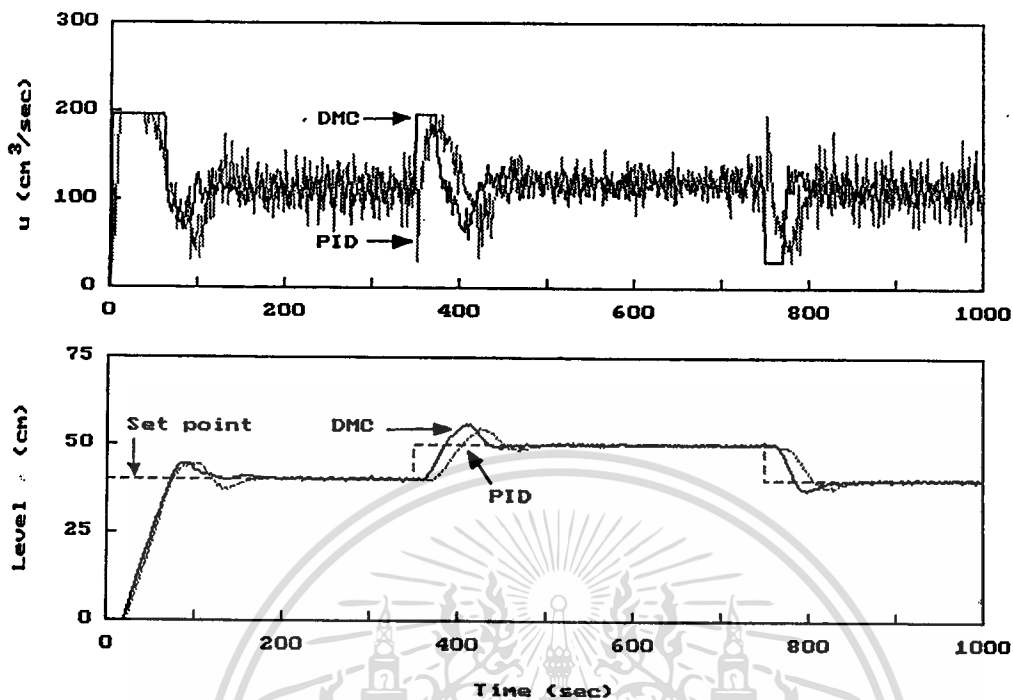


ภาพที่ 32 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.

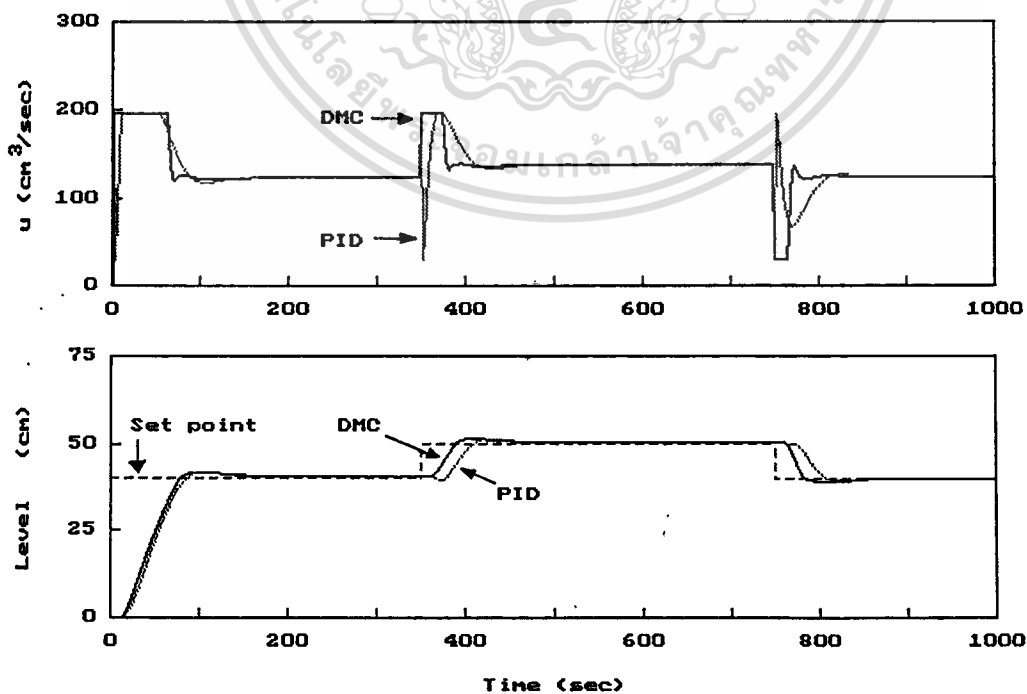


ภาพที่ 33 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.

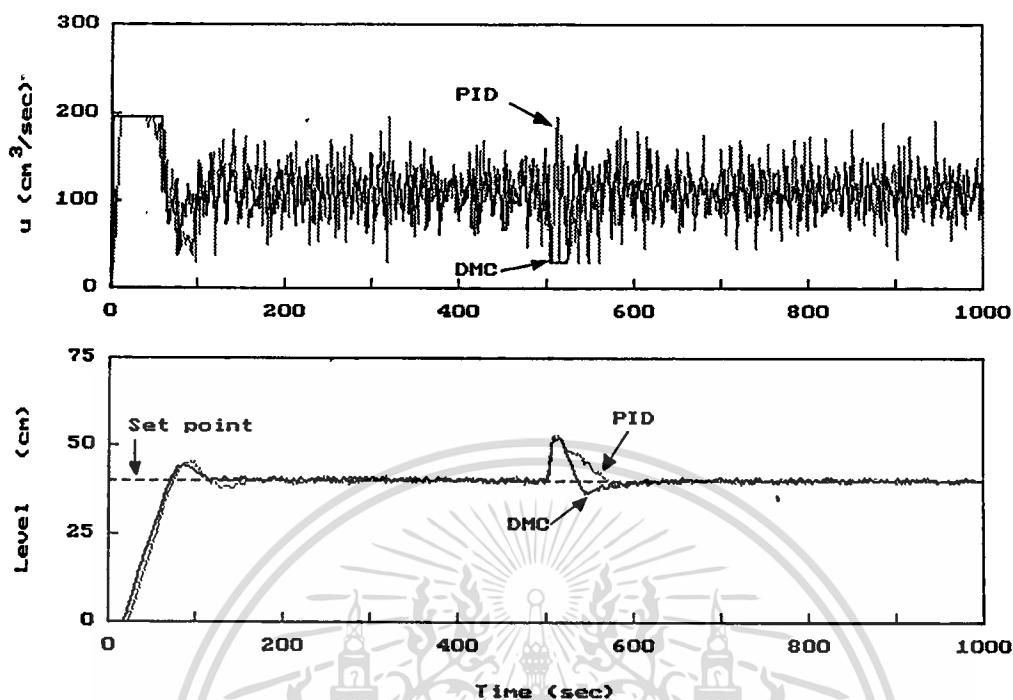
ไม่ว่าการนี้ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



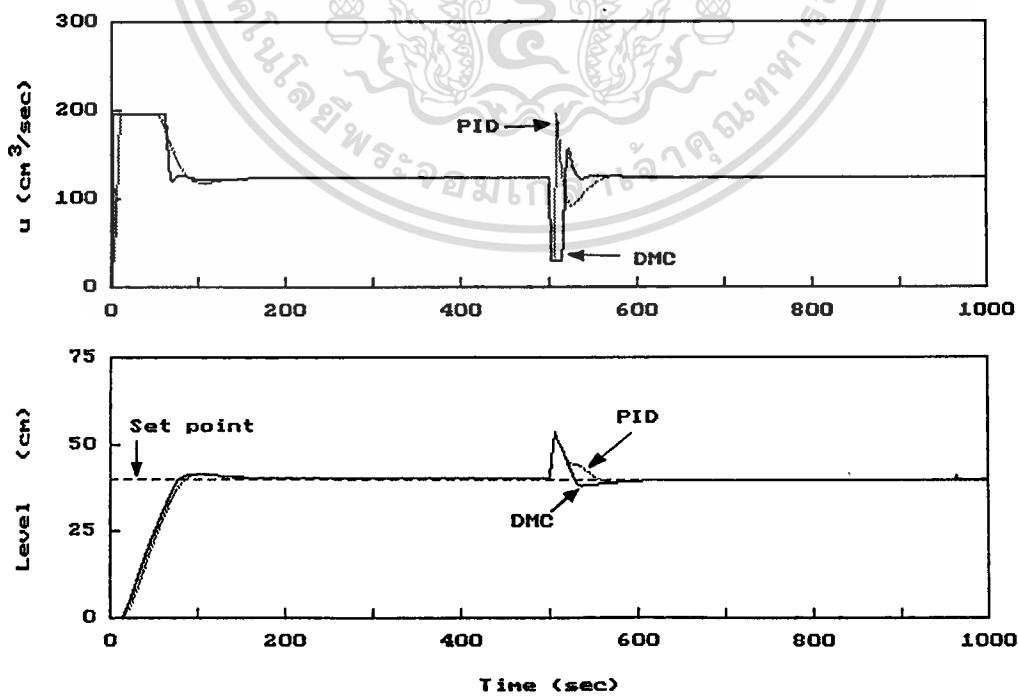
ภาพที่ 34 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 50 ซม.



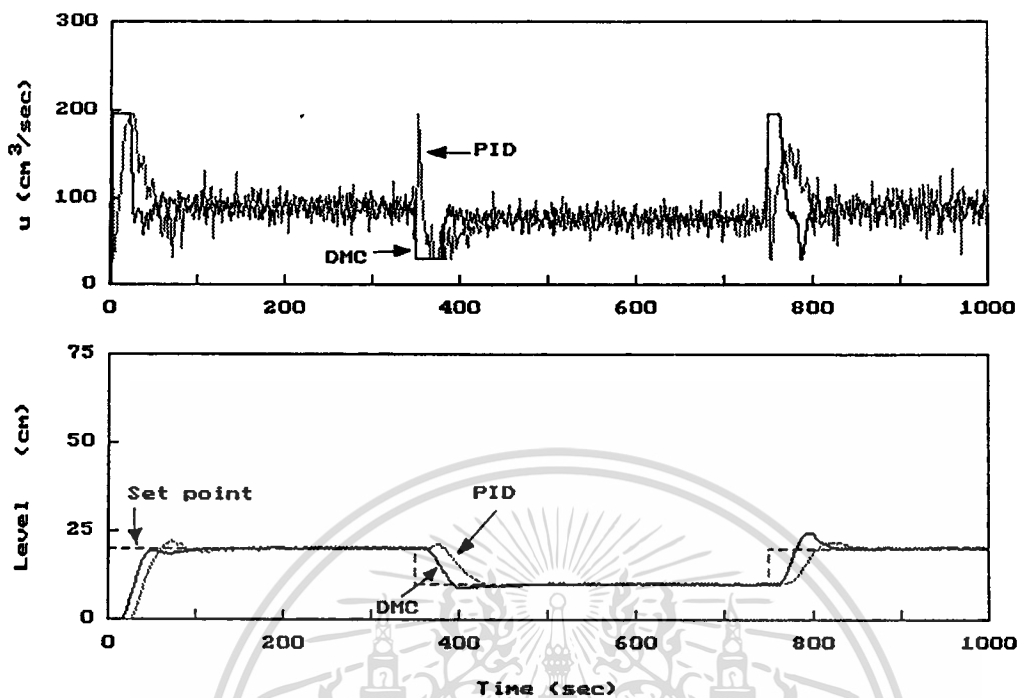
ภาพที่ 35 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 50 ซม.



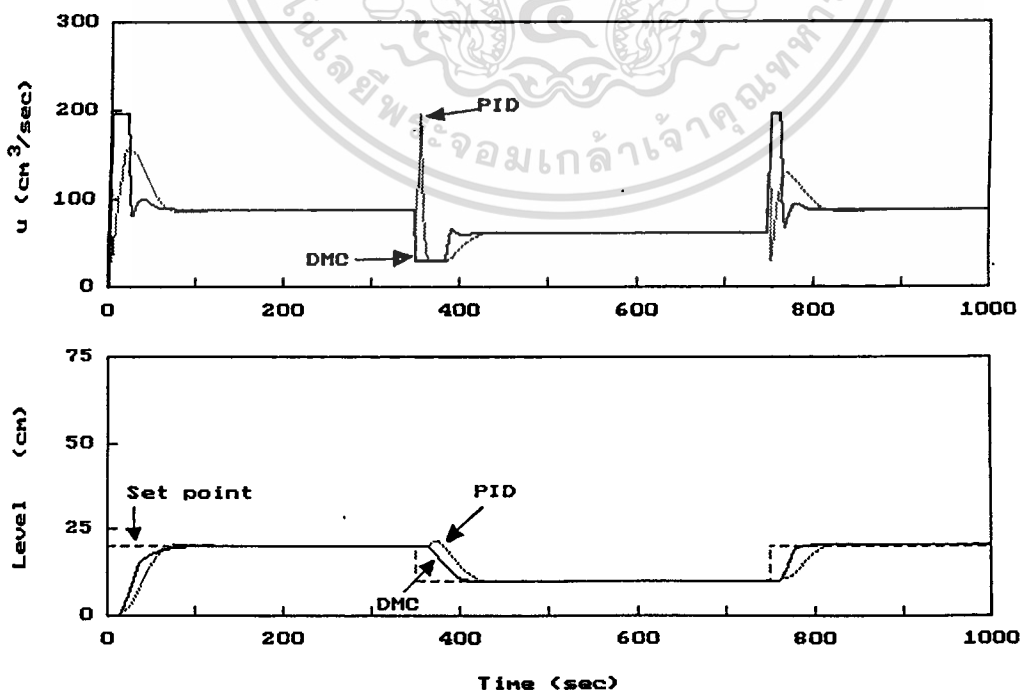
ภาพที่ 36 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที



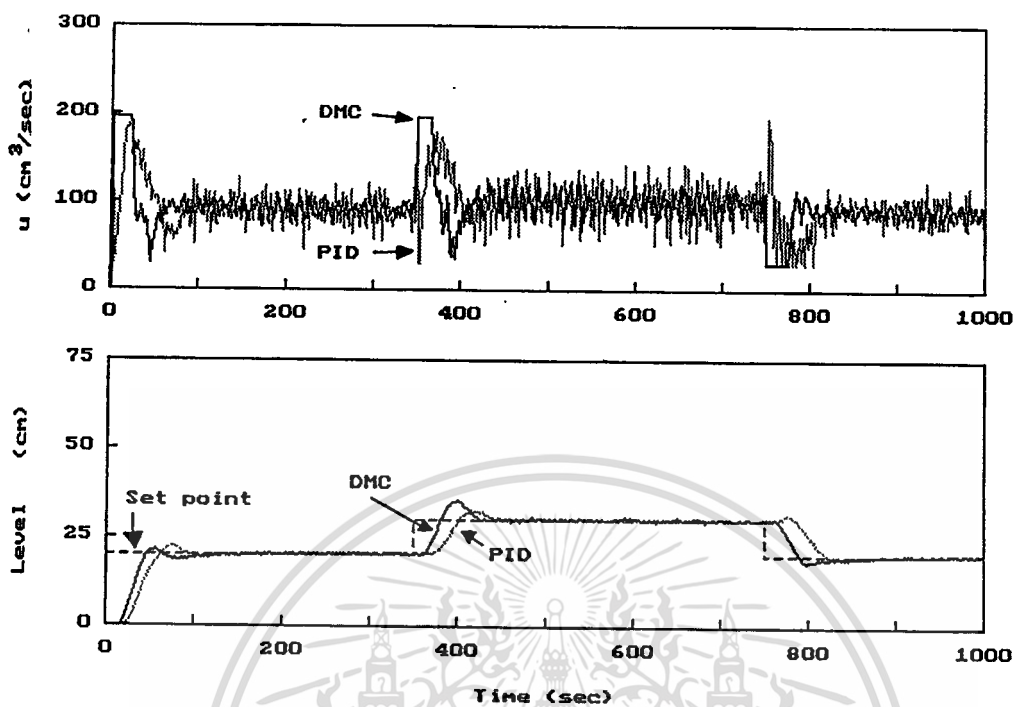
เอกสารภาพที่ 37 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 40 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



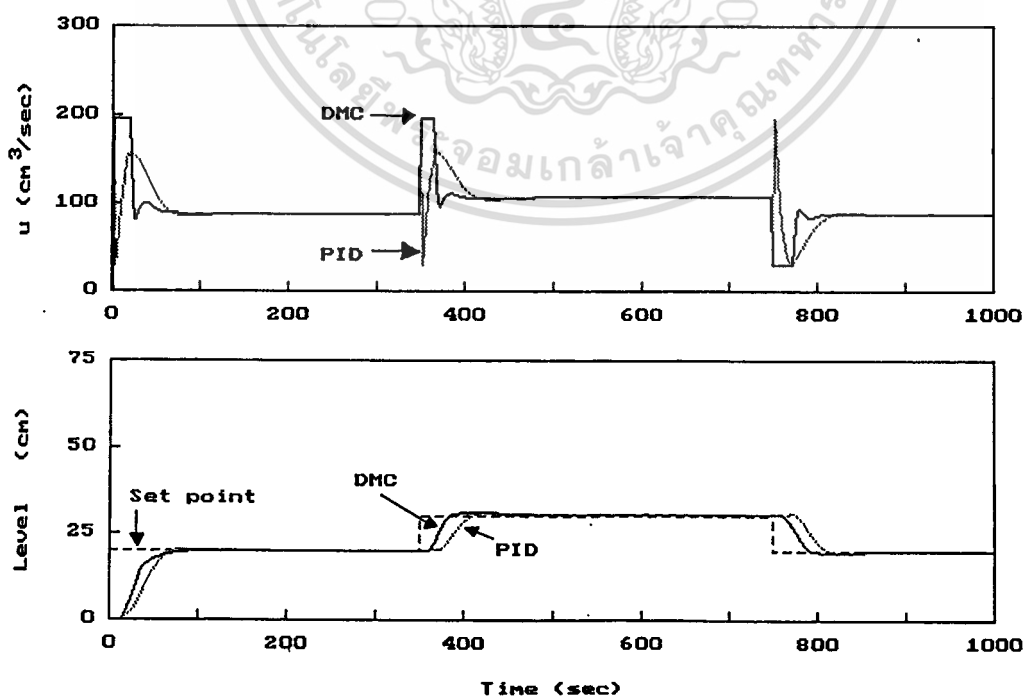
ภาพที่ 38 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 10 ซม.



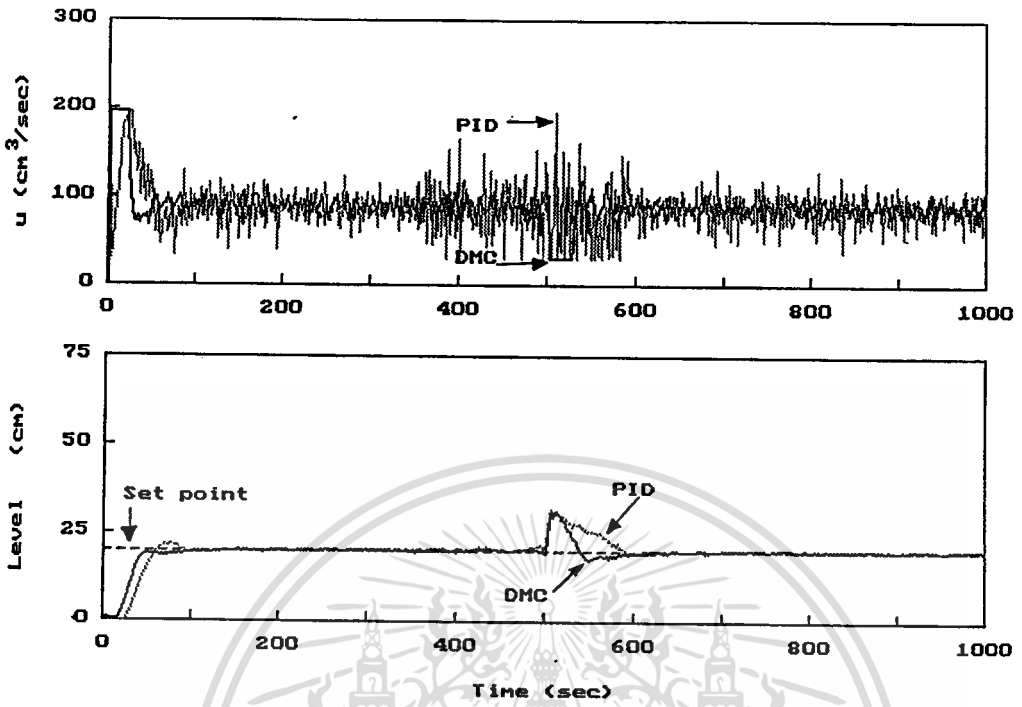
ภาพที่ 39 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 10 ซม.



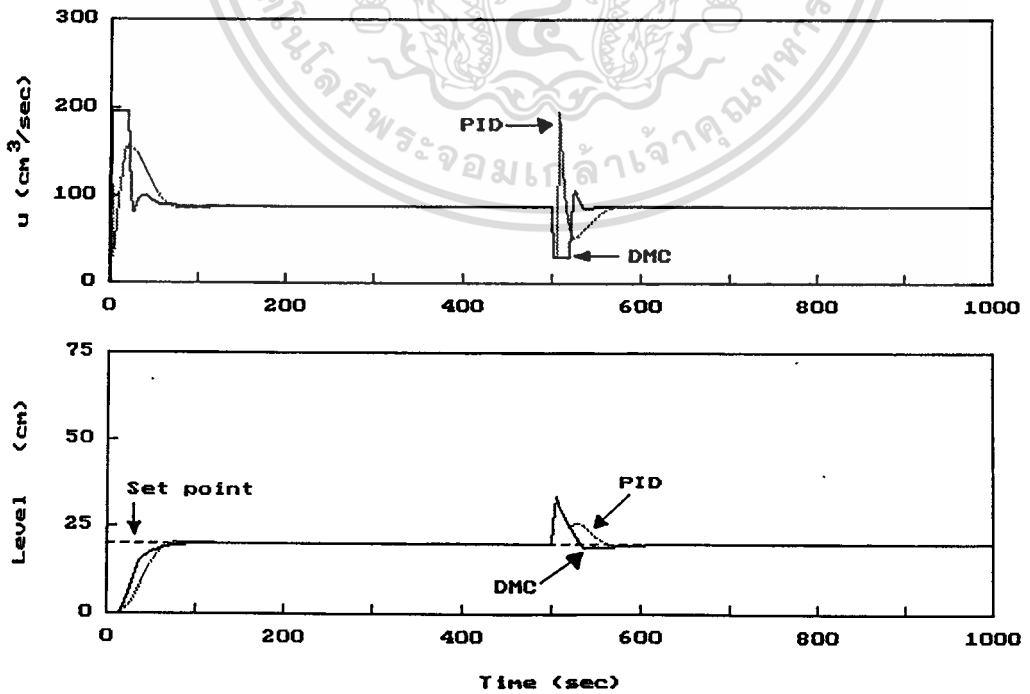
ภาพที่ 40 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.



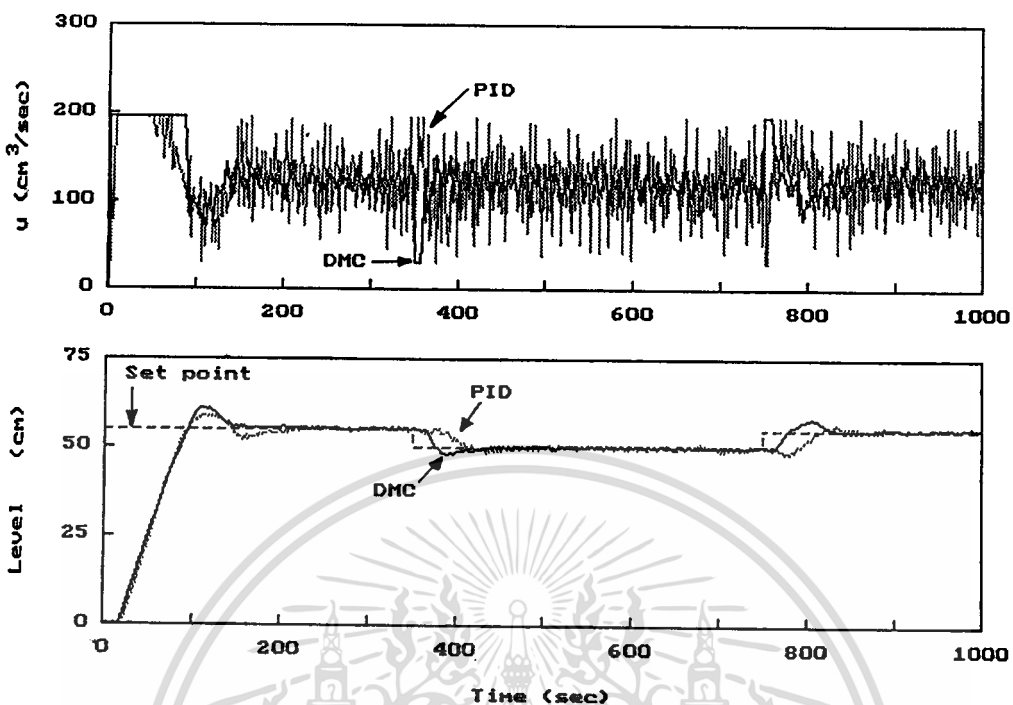
ภาพที่ 41 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 30 ซม.



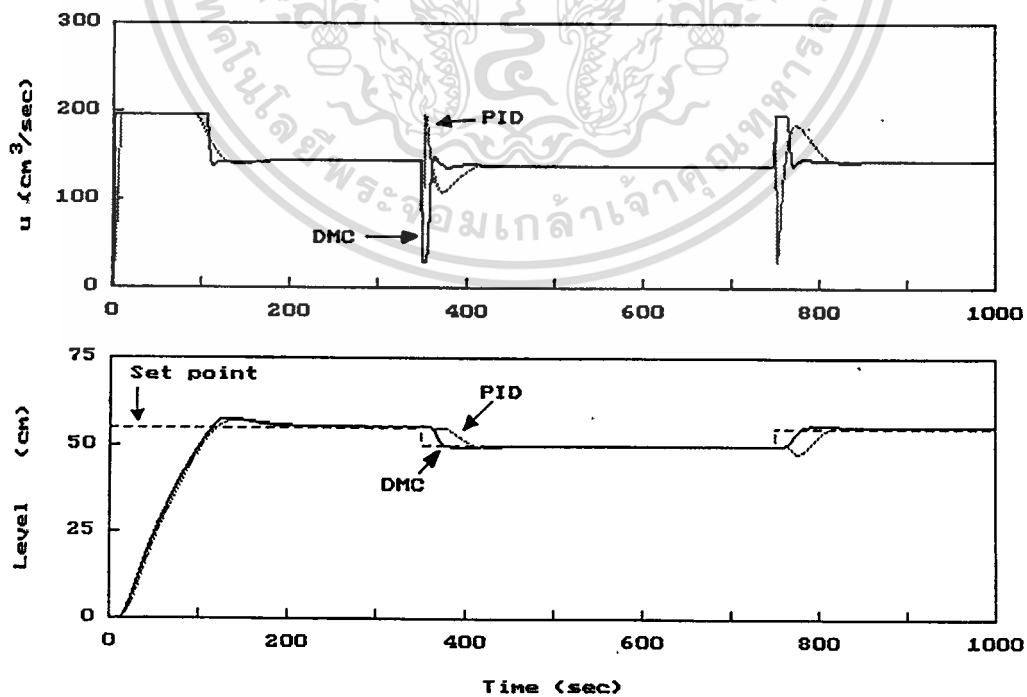
ภาพที่ 42 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที



ภาพที่ 43 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 20 ซม. เติมน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที



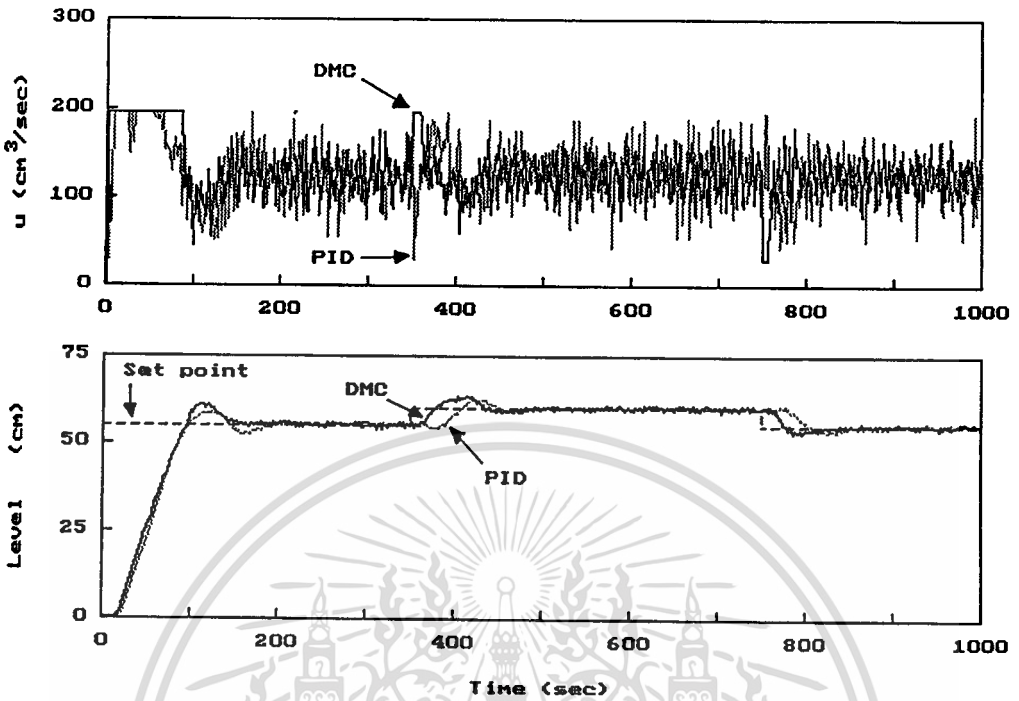
ภาพที่ 44 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 50 ซม.



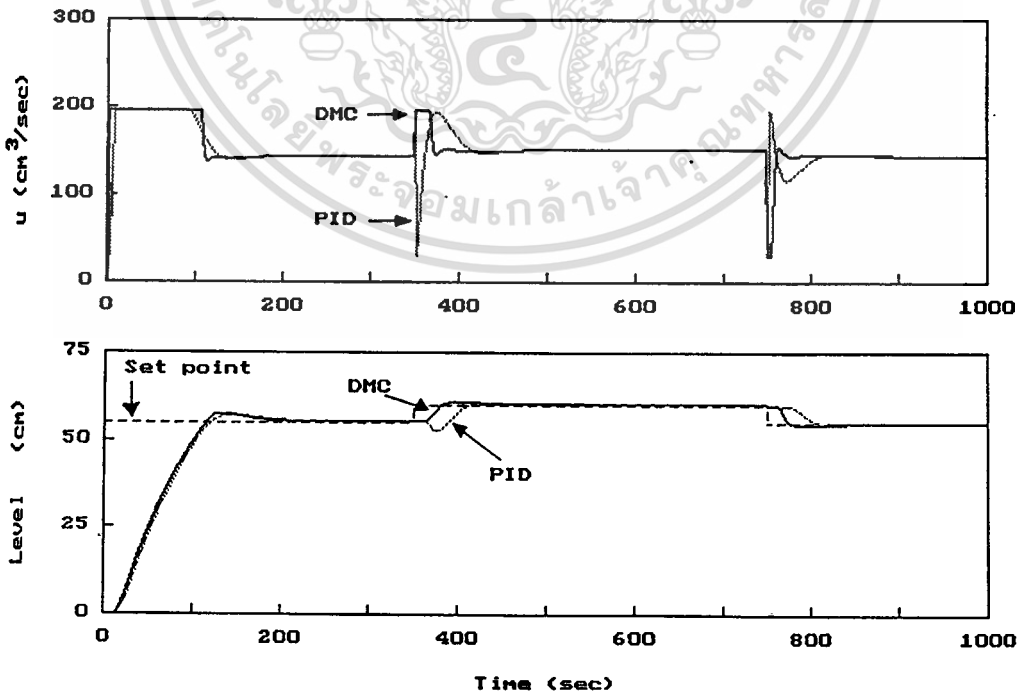
ภาพที่ 45 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 50 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

“ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้”



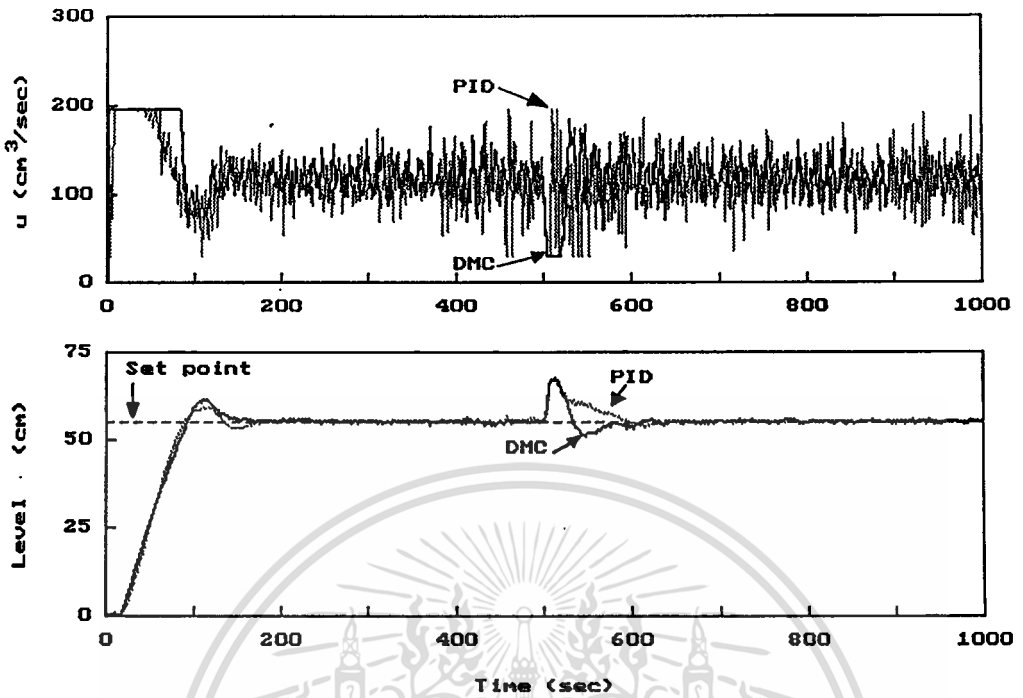
ภาพที่ 46 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 60 ซม.



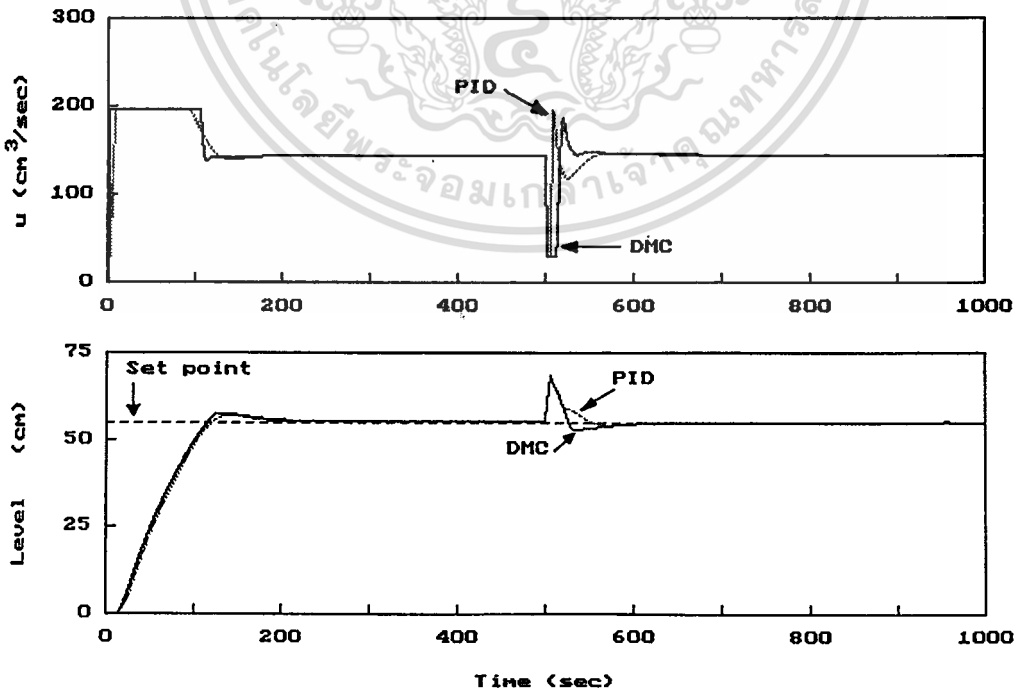
ภาพที่ 47 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม. เปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 60 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานการคัดลอก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 48 ผลการทดลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม. เต็มน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที



ภาพที่ 49 ผลการจำลองที่ระดับปฏิบัติการ 55 ซม. เต็มน้ำรบกวนที่เวลา 500 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ทำการตีพิมพ์สิ่งอื่นอีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5) วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังที่เชื่อมต่อกับถังอีกใบหนึ่ง

กระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังที่เชื่อมต่อกับถังอีกใบหนึ่ง เป็นกระบวนการที่มีรูปแบบเป็นระบบอันดับสอง จากผลการทดลองและผลการจำลองสรุปได้เป็นตารางที่ (5) และ (6) ตามลำดับ ค่า J หาในช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่ระดับเป้าหมาย คือช่วงเวลา 0-300 วินาที ค่า IAE เป็นผลรวมของค่าสมบูรณความผิดพลาดในช่วงที่มีการรบกวนระบบ กล่าวคือกรณีรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนระดับสัญญาณอ้างอิง หา IAE ระหว่างเวลา 300 ถึง 1000 วินาที และกรณีรบกวนด้วยการเติมน้ำ หา IAE ระหว่างเวลา 400 ถึง 700 วินาที จากผลการทดลองและการจำลองวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาที่ระดับปฏิบัติการ 40 เซนติเมตร พบว่าระบบควบคุม DMC และ PID ให้ค่า rise time และ overshoot ใกล้เคียงกัน แต่ระบบควบคุม DMC มีค่า settling time น้อยกว่า PID และเมื่อรบกวนระบบโดยการเติมน้ำหรือเปลี่ยนระดับสัญญาณอ้างอิงพบว่า DMC จะตอบสนองต่อการรบกวนได้ดีกว่า ให้ค่าผลรวมค่าสมบูรณของความผิดพลาด (IAE) ในช่วงเวลาที่มีการรบกวนน้อยกว่าระบบควบคุม PID อย่างชัดเจน กล่าวคือระบบควบคุม DMC ให้ค่า IAE ลดลง 20.9%, 21.8%, 22.8% เมื่อเทียบกับระบบควบคุม PID สำหรับการรบกวนโดยการลดระดับ เพิ่มระดับอ้างอิง และการเติมน้ำรบกวนตามลำดับ

ที่ระดับปฏิบัติการ 20 เซนติเมตร ระบบควบคุม DMC และ PID ให้ค่า settling time ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพราะระบบควบคุม PID เกิด overshoot แต่ระบบควบคุม DMC ไม่เข้าสู่ระดับปฏิบัติการทันที แต่รักษาระดับอยู่ใต้เส้นระดับปฏิบัติการเล็กน้อย จึงทำให้ rise time มากกว่าระบบควบคุม PID มาก แต่จากกราฟจะเห็นว่าระบบควบคุม DMC ใช้เวลาในการเข้าสู่ที่ระดับ 90% ของระดับปฏิบัติการน้อยกว่าเวลาที่ระบบควบคุม PID ใช้ นอกจากนี้พิจารณาในกรณีที่รบกวนระบบ พบว่าระบบควบคุม DMC ลดค่า IAE ได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับระบบควบคุม PID

ที่ระดับปฏิบัติการ 55 เซนติเมตร ระบบควบคุม DMC และ PID มีค่า rise time ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าระบบควบคุม DMC ให้ค่า overshoot มากกว่าระบบควบคุม PID แต่ค่า settling time และ IAE ของระบบควบคุม DMC น้อยกว่า PID อย่างชัดเจน

จากการทดสอบความคงทนโดยการเปลี่ยนระดับปฏิบัติการเป็น 20 และ 55 เซนติเมตร พบว่าทั้งระบบควบคุม DMC และ PID ยังมีความคงทนสามารถควบคุมกระบวนการได้

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบสมรรถนะระบบควบคุมจากการทดลอง

ระดับปฏิบัติการ	ระดับ	ตัวควบคุม	J	Rise time (วินาที)	Settling time (วินาที)	Overshoot (%)	IAE		
							ลดระดับ	เพิ่มระดับ	เติมน้ำ
40	40	DMC	2.342×10^7	71	112	11.5	817	-	-
40	40	PID	-	67	141	15.4	1,033	-	-
40	40	DMC	2.482×10^7	71	123	11.5	-	854	-
40	40	PID	-	73	152	11.5	-	1,092	-
40	40	DMC	2.361×10^7	70	111	11.5	-	-	412
40	40	PID	-	73	150	15.4	-	-	534
20	20	DMC	2.321×10^6	88	88	0	715	-	-
20	20	PID	-	56	88	15.4	1,044	-	-
20	20	DMC	2.319×10^6	41	85	7.7	-	778	-
20	20	PID	-	58	86	15.4	-	1,089	-
20	20	DMC	2.203×10^6	88	88	0	-	-	374
20	20	PID	-	56	88	11.5	-	-	599
55	55	DMC	7.556×10^7	88	144	11.2	437	-	-
55	55	PID	-	88	182	8.4	674	-	-
55	55	DMC	6.693×10^7	94	138	11.2	-	504	-
55	55	PID	-	94	179	7	-	696	-
55	55	DMC	6.620×10^7	88	144	12.6	-	-	436
55	55	PID	-	86	158	8.4	-	-	528

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบสมรรถนะระบบควบคุมจากการจำลองกระบวนการ

ระดับปฏิบัติการ	ระดับ	ตัวควบคุม	J	Rise time (วินาที)	Settling time (วินาที)	Overshoot (%)	IAE		
							ลดระดับ	เพิ่มระดับ	เติมน้ำ
40	DMC	2.264×10^7	73	120	3.9	606	632	288	
40	PID	-	79	120	3.9	914	924	309	
20	DMC	2.249×10^6	90	90	0	575	583	273	
20	PID	-	80	80	0	924	903	340	
55	DMC	6.993×10^7	111	188	5.6	279	286	294	
55	PID	-	117	188	4.2	544	545	285	

จากการพิจารณารูปภาพที่ได้จากการจำลองที่ระดับปฏิบัติการต่างๆ สังเกตได้ว่าผลตอบสนองในการเข้าสู่ระดับปฏิบัติการของระบบควบคุม DMC และ PID ใกล้เคียงกันทั้งในด้าน rise time, settling time และ overshoot แต่เมื่อพิจารณาในเรื่องของผลรวม IAE ในช่วงที่มีการรบกวนระบบ สังเกตได้ระบบควบคุม DMC สามารถลดผลรวมของความผิดพลาดลงได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับระบบควบคุม PID

5.3 กระบวนการควบคุมระดับน้ำ 2 ถังที่เชื่อมต่อกัน

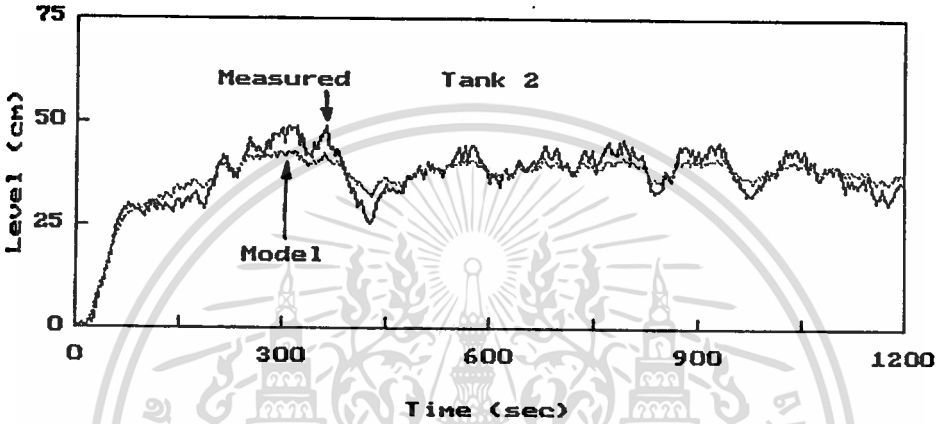
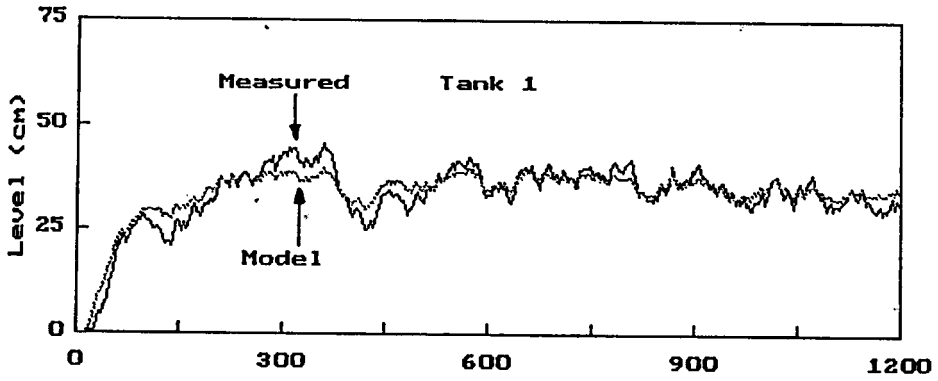
จะทำการทดสอบ 2 ครั้ง โดยการทดสอบครั้งที่สองจะปรับวาล์วต่างๆ ให้แตกต่างจากครั้งแรก

5.3.1) การทดสอบกระบวนการครั้งที่หนึ่ง

5.3.1.1) ผลการหาโมเดลกระบวนการ

กระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังเชื่อมต่อกันแสดงในภาพที่ (7) เป็นกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุตที่มี interaction ระหว่างกัน ผลจากการหาพารามิเตอร์ด้วยวิธี Least Square ได้โมเดลกระบวนการในรูปแบบดีสครีต คาบการเก็บตัวอย่าง 3 วินาที เป็นสมการที่ (5.5) ผลการเปรียบเทียบระหว่างโมเดลกับผลตอบสนองจริงแสดงในภาพ (50)

$$\begin{bmatrix} \overline{Y}_1(z) \\ \overline{Y}_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.018z^{-6}-0.017z^{-7}}{1-1.863z^{-1}+0.868z^{-2}} & \frac{0.005z^{-6}-0.004z^{-7}}{1-1.863z^{-1}+0.868z^{-2}} \\ \frac{0.004z^{-6}-0.004z^{-7}}{1-1.863z^{-1}+0.868z^{-2}} & \frac{0.019z^{-6}-0.017z^{-7}}{1-1.863z^{-1}+0.868z^{-2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(z) \\ U_2(z) \end{bmatrix} \quad (5.5)$$



ภาพที่ 50 เปรียบเทียบผลของกระบวนการจริงกับผลตอบสนองของโมเดล
ของกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุต
ภาพบนเป็นระดับน้ำในถังใบที่หนึ่ง ภาพล่างเป็นระดับน้ำในถังใบที่สอง

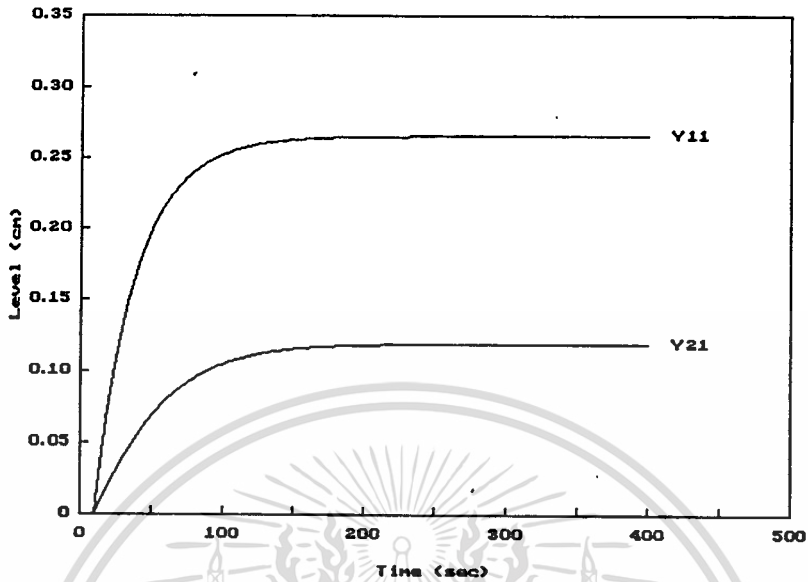
5.3.1.2) ผลการออกแบบตัวควบคุม DMC

ใช้โมเดลที่ได้ตามสมการ (5.5) คำนวณหาสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับแบบฟังก์ชันระดับขนาดหนึ่งหน่วย โดยกำหนดขนาดตัวแปรปรับ 1 หน่วยเป็น $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ได้ผลแสดงเป็นกราฟดังภาพที่ (51) และ (52)

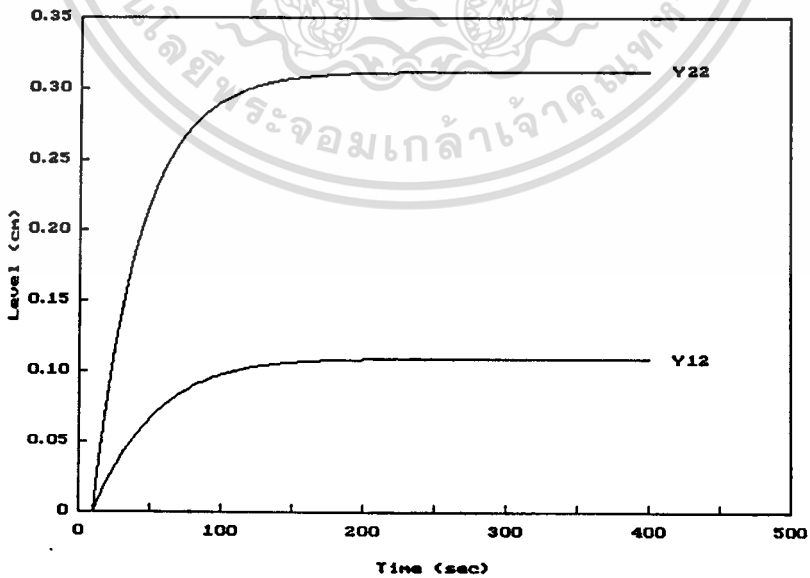
จากการทดสอบกับกระบวนการพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม คือ $N = 200, P = 64, M = 2, f_1 = 0.35$ และ $f_2 = 0.45$ ได้เมทริกซ์ K_{DMC} เป็นตามสมการ (5.6)

$$K_{DMC} = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & k_{1,3} & \cdots & \cdots & k_{1,128} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & k_{2,3} & \cdots & \cdots & k_{2,128} \end{bmatrix}_{2 \times 128} \quad (5.6)$$

ค่า $k_{i,j}$ ในสมการ (5.6) แสดงในตารางที่ (7)



ภาพที่ 51 แสดงผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับตัวที่ 1 ของกระบวนการ (u_1)
โดยตัวแปรปรับมีรูปแบบฟังก์ชันระดับขนาด $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$



ภาพที่ 52 แสดงผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับตัวที่ 2 ของกระบวนการ (u_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยตัวแปรปรับมีรูปแบบฟังก์ชันระดับขนาด $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 แสดงค่าของสมาชิกในเมทริกซ์ K_{DMC}

อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก	อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก
k _{1,1}	0.000000	k _{1,33}	0.046536
k _{1,2}	0.000000	k _{1,34}	0.046157
k _{1,3}	0.000000	k _{1,35}	0.045800
k _{1,4}	0.000000	k _{1,36}	0.045464
k _{1,5}	0.000000	k _{1,37}	0.045149
k _{1,6}	0.074300	k _{1,38}	0.044852
k _{1,7}	0.072206	k _{1,39}	0.044573
k _{1,8}	0.070244	k _{1,40}	0.044311
k _{1,9}	0.068406	k _{1,41}	0.044064
k _{1,10}	0.066682	k _{1,42}	0.043831
k _{1,11}	0.065067	k _{1,43}	0.043613
k _{1,12}	0.063552	k _{1,44}	0.043407
k _{1,13}	0.062131	k _{1,45}	0.043214
k _{1,14}	0.060799	k _{1,46}	0.043031
k _{1,15}	0.059549	k _{1,47}	0.04286
k _{1,16}	0.058377	k _{1,48}	0.042698
k _{1,17}	0.057277	k _{1,49}	0.042546
k _{1,18}	0.056245	k _{1,50}	0.042403
k _{1,19}	0.552760	k _{1,51}	0.042269
k _{1,20}	0.054366	k _{1,52}	0.042142
k _{1,21}	0.053513	k _{1,53}	0.042022
k _{1,22}	0.052711	k _{1,54}	0.041910
k _{1,23}	0.051959	k _{1,55}	0.041804
k _{1,24}	0.051252	k _{1,56}	0.041704
k _{1,25}	0.050588	k _{1,57}	0.041610
k _{1,26}	0.049965	k _{1,58}	0.041522
k _{1,27}	0.049379	k _{1,59}	0.041438
k _{1,28}	0.048829	k _{1,60}	0.041360
k _{1,29}	0.048312	k _{1,61}	0.041286
k _{1,30}	0.047826	k _{1,62}	0.041216
k _{1,31}	0.047369	k _{1,63}	0.041150
k _{1,32}	0.046940	k _{1,64}	0.041089

ตารางที่ 7 (ต่อ)

อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก	อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก
k _{1,65}	0.000000	k _{1,97}	-0.012963
k _{1,66}	0.000000	k _{1,98}	-0.013423
k _{1,67}	0.000000	k _{1,99}	-0.013857
k _{1,68}	0.000000	k _{1,100}	-0.014269
k _{1,69}	0.000000	k _{1,101}	-0.014658
k _{1,70}	0.015695	k _{1,102}	-0.015027
k _{1,71}	0.013760	k _{1,103}	-0.015376
k _{1,72}	0.011922	k _{1,104}	-0.015706
k _{1,73}	0.010176	k _{1,105}	-0.016019
k _{1,74}	0.008518	k _{1,106}	-0.016314
k _{1,75}	0.006944	k _{1,107}	-0.016594
k _{1,76}	0.005450	k _{1,108}	-0.016859
k _{1,77}	0.004033	k _{1,109}	-0.017109
k _{1,78}	0.002687	k _{1,110}	-0.017346
k _{1,79}	0.001411	k _{1,111}	-0.017570
k _{1,80}	0.000200	k _{1,112}	-0.017782
k _{1,81}	-0.000949	k _{1,113}	-0.017983
k _{1,82}	-0.002038	k _{1,114}	-0.018172
k _{1,83}	-0.003071	k _{1,115}	-0.018352
k _{1,84}	-0.004051	k _{1,116}	-0.018521
k _{1,85}	-0.004979	k _{1,117}	-0.018682
k _{1,86}	-0.005859	k _{1,118}	-0.018833
k _{1,87}	-0.006693	k _{1,119}	-0.018977
k _{1,88}	-0.007483	k _{1,120}	-0.019112
k _{1,89}	-0.008232	k _{1,121}	-0.019241
k _{1,90}	-0.008942	k _{1,122}	-0.019362
k _{1,91}	-0.009614	k _{1,123}	-0.019477
k _{1,92}	-0.010251	k _{1,124}	-0.019585
k _{1,93}	-0.010854	k _{1,125}	-0.019687
k _{1,94}	-0.011425	k _{1,126}	-0.019784
k _{1,95}	-0.011966	k _{1,127}	-0.019876
k _{1,96}	-0.012478	k _{1,128}	-0.019963

ตารางที่ 7 (ต่อ)

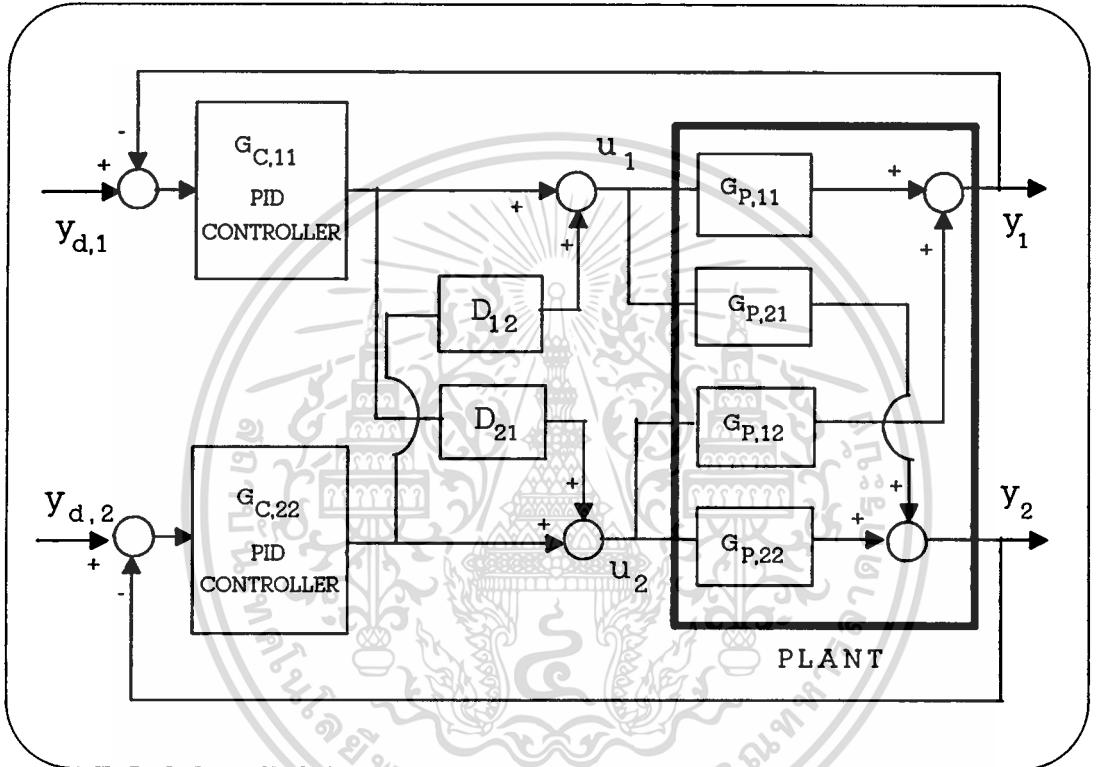
อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก	อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก
k _{2,1}	0.000000	k _{2,33}	-0.015052
k _{2,2}	0.000000	k _{2,34}	-0.015339
k _{2,3}	0.000000	k _{2,35}	-0.015606
k _{2,4}	0.000000	k _{2,36}	-0.015855
k _{2,5}	0.000000	k _{2,37}	-0.016087
k _{2,6}	0.009771	k _{2,38}	-0.016304
k _{2,7}	0.007723	k _{2,39}	-0.016506
k _{2,8}	0.005824	k _{2,40}	-0.016694
k _{2,9}	0.004061	k _{2,41}	-0.016870
k _{2,10}	0.002426	k _{2,42}	-0.017035
k _{2,11}	0.000908	k _{2,43}	-0.017188
k _{2,12}	-0.000500	k _{2,44}	-0.017331
k _{2,13}	-0.001808	k _{2,45}	-0.017465
k _{2,14}	-0.003023	k _{2,46}	-0.017590
k _{2,15}	-0.004150	k _{2,47}	-0.017706
k _{2,16}	-0.005198	k _{2,48}	-0.017815
k _{2,17}	-0.006171	k _{2,49}	-0.017917
k _{2,18}	-0.007076	k _{2,50}	-0.018012
k _{2,19}	-0.007916	k _{2,51}	-0.018102
k _{2,20}	-0.008698	k _{2,52}	-0.018185
k _{2,21}	-0.009424	k _{2,53}	-0.018263
k _{2,22}	-0.010100	k _{2,54}	-0.018335
k _{2,23}	-0.010728	k _{2,55}	-0.018404
k _{2,24}	-0.011312	k _{2,56}	-0.018467
k _{2,25}	-0.011856	k _{2,57}	-0.018527
k _{2,26}	-0.012362	k _{2,58}	-0.018583
k _{2,27}	-0.012833	k _{2,59}	-0.018635
k _{2,28}	-0.013272	k _{2,60}	-0.018684
k _{2,29}	-0.013680	k _{2,61}	-0.018730
k _{2,30}	-0.014060	k _{2,62}	-0.018773
k _{2,31}	-0.014415	k _{2,63}	-0.018813
k _{2,32}	-0.014745	k _{2,64}	-0.018851

ตารางที่ 7 (ต่อ)

อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก	อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก
k _{2,65}	0.000000	k _{2,97}	0.041372
k _{2,66}	0.000000	k _{2,98}	0.041233
k _{2,67}	0.000000	k _{2,99}	0.041100
k _{2,68}	0.000000	k _{2,100}	0.040971
k _{2,69}	0.000000	k _{2,101}	0.040848
k _{2,70}	0.046388	k _{2,102}	0.040729
k _{2,71}	0.046245	k _{2,103}	0.040616
k _{2,72}	0.046084	k _{2,104}	0.040507
k _{2,73}	0.045910	k _{2,105}	0.040402
k _{2,74}	0.045725	k _{2,106}	0.040302
k _{2,75}	0.045530	k _{2,107}	0.040207
k _{2,76}	0.045329	k _{2,108}	0.040115
k _{2,77}	0.045122	k _{2,109}	0.040028
k _{2,78}	0.044913	k _{2,110}	0.039944
k _{2,79}	0.044701	k _{2,111}	0.039864
k _{2,80}	0.044488	k _{2,112}	0.039788
k _{2,81}	0.044276	k _{2,113}	0.039715
k _{2,82}	0.044064	k _{2,114}	0.039646
k _{2,83}	0.043855	k _{2,115}	0.03958
k _{2,84}	0.043649	k _{2,116}	0.039516
k _{2,85}	0.043445	k _{2,117}	0.039456
k _{2,86}	0.043246	k _{2,118}	0.039399
k _{2,87}	0.043050	k _{2,119}	0.039344
k _{2,88}	0.042860	k _{2,120}	0.039292
k _{2,89}	0.042673	k _{2,121}	0.039243
k _{2,90}	0.042492	k _{2,122}	0.039196
k _{2,91}	0.042316	k _{2,123}	0.039151
k _{2,92}	0.042145	k _{2,124}	0.039109
k _{2,93}	0.041980	k _{2,125}	0.039068
k _{2,94}	0.041820	k _{2,126}	0.039030
k _{2,95}	0.041665	k _{2,127}	0.038993
k _{2,96}	0.041516	k _{2,128}	0.038958

5.3.1.3) ผลการออกแบบตัวควบคุม PID และตัว Decoupler

เนื่องจากกระบวนการเป็นระบบสองอินพุตสองเอาต์พุตที่มี interaction ผ่านทางท่อที่เชื่อมต่อกันที่กั้นถัง การออกแบบระบบควบคุมจึงใช้ระบบควบคุม Decoupling Control ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ได้ผลดังต่อไปนี้



ภาพที่ 53 ผังสัญญาณระบบควบคุม Decoupling control

$G_{C,11}$ เป็นตัวควบคุม PID สำหรับถังใบที่ 1 มีค่าพารามิเตอร์เป็น $K_C = 4.9$, $\tau_I = 33$ วินาที และ $\tau_D = 7.4$ วินาที

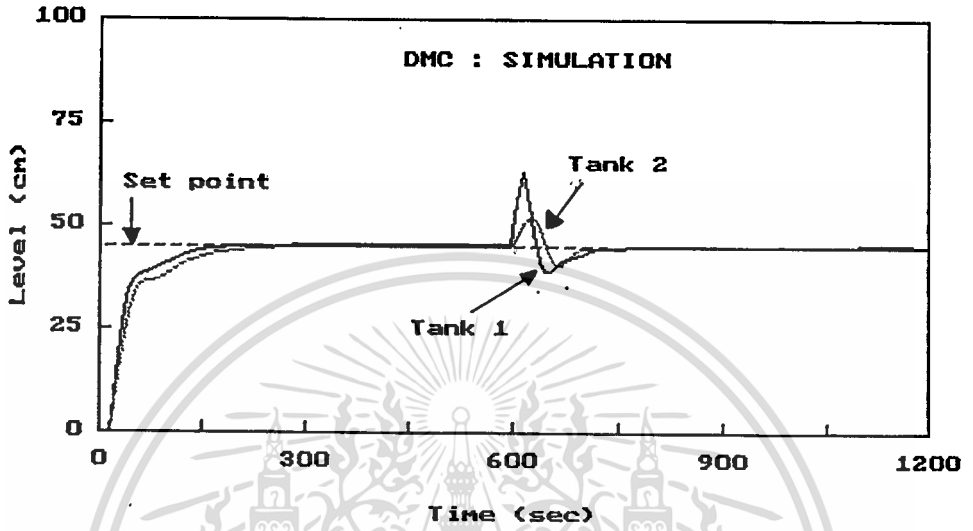
$G_{C,12}$ เป็นตัวควบคุม PID สำหรับถังใบที่ 2 มีค่าพารามิเตอร์เป็น $K_C = 3.8$, $\tau_I = 32$ วินาที และ $\tau_D = 7.2$ วินาที

$$D_{12} = \frac{0.005z^{-6} - 0.004z^{-7}}{0.018z^{-6} - 0.017z^{-7}}$$

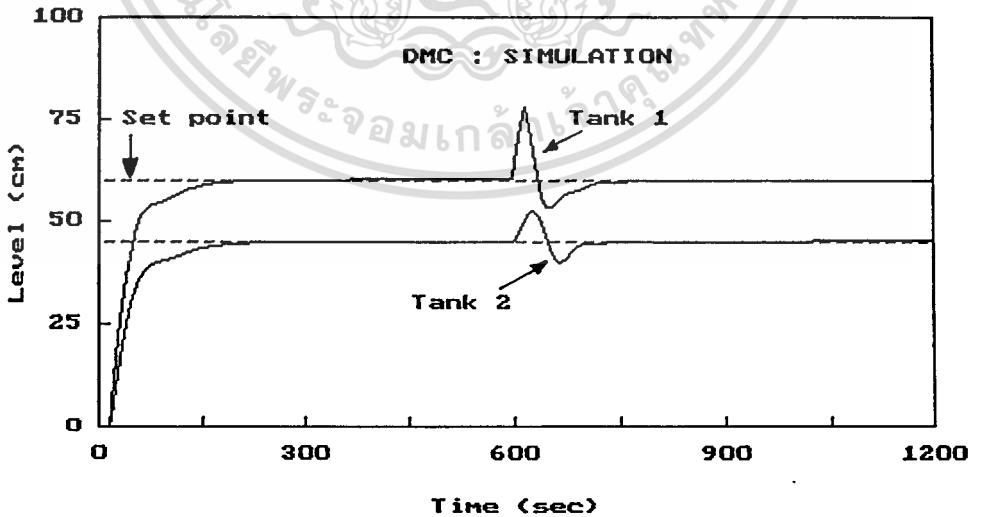
$$D_{21} = \frac{0.004z^{-6} - 0.004z^{-7}}{0.019z^{-6} - 0.017z^{-7}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1.4) ผลการจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ



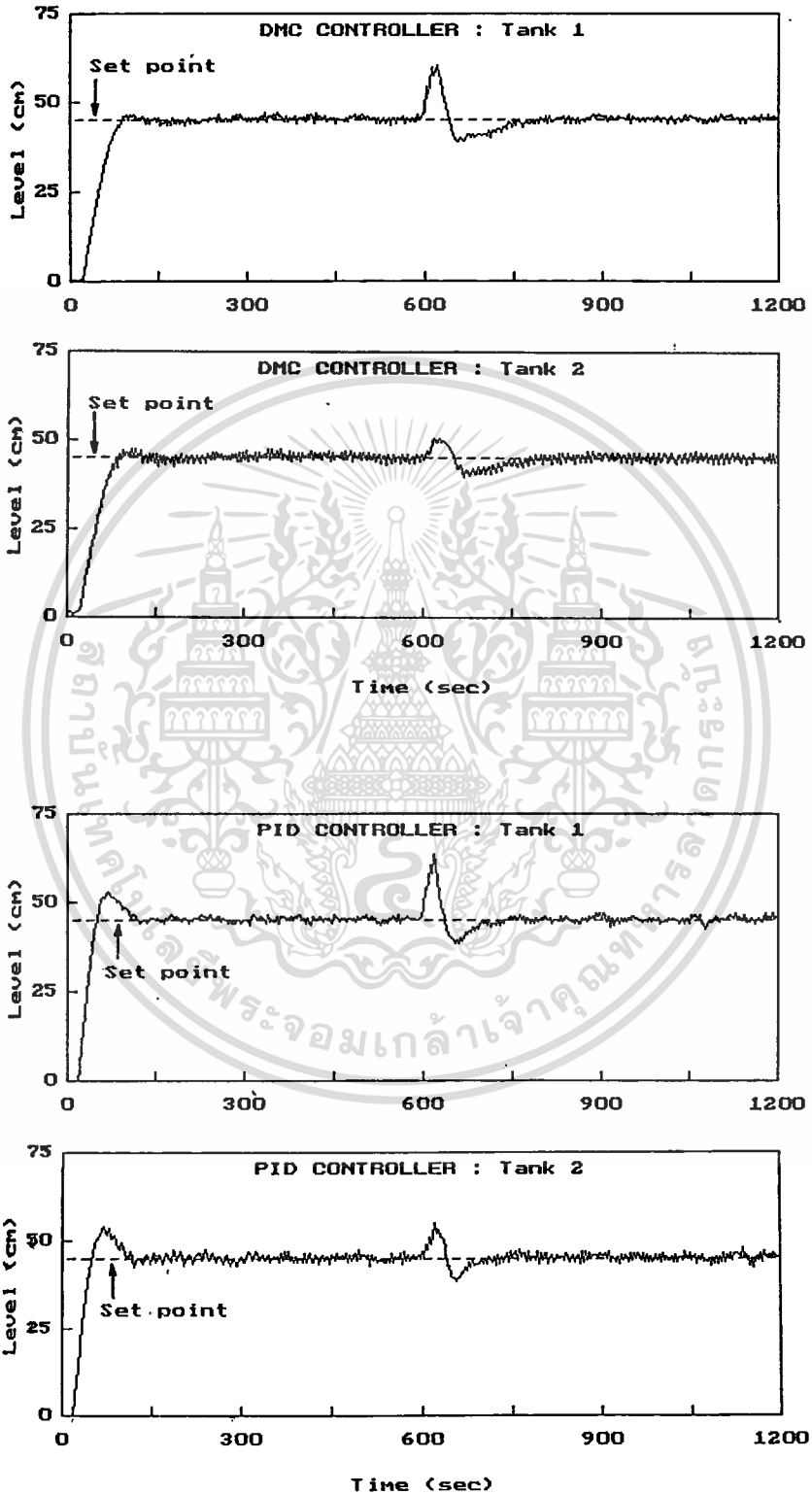
ภาพที่ 54 ผลการจำลองกระบวนการ เมื่อใช้ระบบควบคุม DMC ควบคุมระดับน้ำในถังทั้งสองใบที่ 45 ซม. และเติมน้ำใส่ถังใบที่ 1 ที่เวลา 600 วินาที



ภาพที่ 55 ผลการจำลองกระบวนการ เมื่อใช้ระบบควบคุม DMC ควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 1 ที่ 60 ซม. และระดับน้ำในถังใบที่ 2 ที่ 45 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1.5) ผลการทดลอง

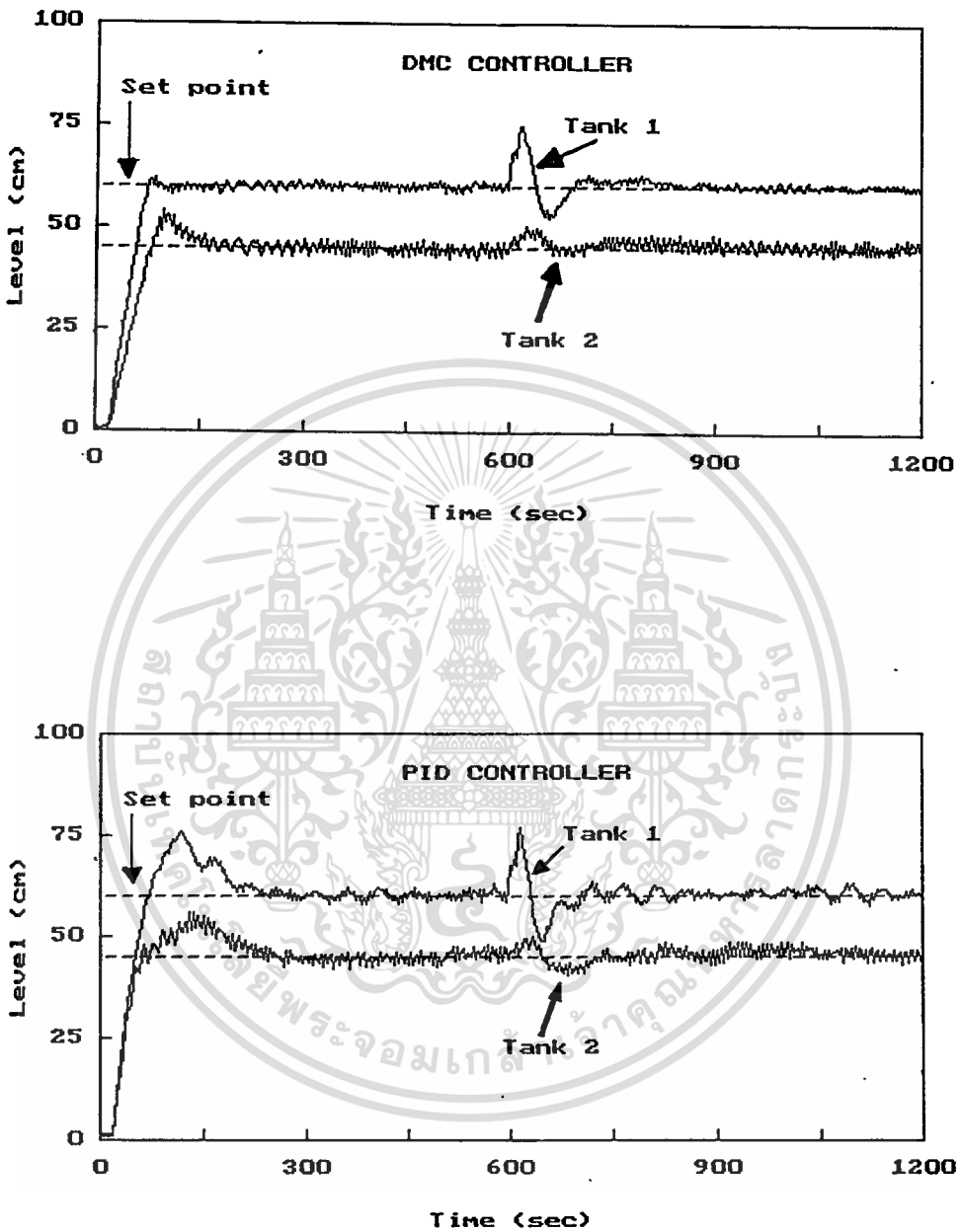


ภาพที่ 56 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID

ควบคุมระดับในถังทั้งสองใบที่ 45 ซม. และเติมน้ำใส่ถังใบที่ 1 ที่เวลา 600 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็น ใบใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 57 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID ควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 1 ที่ 60 ซม. และระดับน้ำในถังใบที่ 2 ที่ 45 ซม. มีการเติมน้ำใส่ถังใบที่ 1 ที่เวลา 600 วินาที

5.3.1.6) วิเคราะห์ผลการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังที่เชื่อมต่อกัน

จากผลการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม PID กับ DMC พบว่าระบบควบคุม PID มี rise time น้อยกว่าเล็กน้อย แต่มี overshoot มากกว่าระบบควบคุม DMC จากภาพที่ (57) ควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 1 ที่ระดับ 60 ซม. และระดับน้ำในถังใบที่ 2 ที่ระดับ 45 ซม. พบว่าระบบควบคุม PID มีค่า overshoot 26% และ 22% สำหรับถังใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนระบบควบคุม DMC มี overshoot เฉพาะถังใบที่ 2 คือ 22% ทำให้ระบบควบคุม PID มีค่า settling time มากกว่า พิจารณาผลการรบกวนโดยการเติมน้ำใส่ถังใบที่ 1 พบว่าระบบควบคุม PID ให้ผลตอบสนองต่อการรบกวนได้ดีกว่าเล็กน้อย แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าที่สภาวะคงตัวผลตอบสนองของระบบควบคุม DMC มีการแกว่งน้อยมาก ในขณะที่ PID มีการแกว่งตัวรอบเส้นระดับอ้างอิงมากกว่า ทั้งนี้่าจะมีสาเหตุจากความผิดพลาดของโมเดลซึ่งเกิดจากกระทำการทดสอบที่ระดับ 60 ซม. แต่โมเดลหาที่ระดับประมาณ 35-50 ซม. เมื่อโมเดลผิดพลาดมีผลต่อการชดเชยการ interaction ระหว่างกันด้วยวิธี Decoupling ผลที่ได้จึงมีการแกว่งตัวรอบเส้นระดับสัญญาณอ้างอิงดังกล่าว แต่สำหรับระบบควบคุม DMC มีค่าพารามิเตอร์ถ่วงน้ำหนัก f เป็นตัวแปรปรับ การตั้งค่า f ให้มีค่าสูงจะเป็นการลดความสำคัญของโมเดลลง ดังนั้นในกรณีที่โมเดลผิดพลาด ระบบควบคุม DMC สามารถควบคุมกระบวนการได้โดยการปรับค่า f ให้เหมาะสม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีข้อหนึ่งของระบบควบคุม DMC

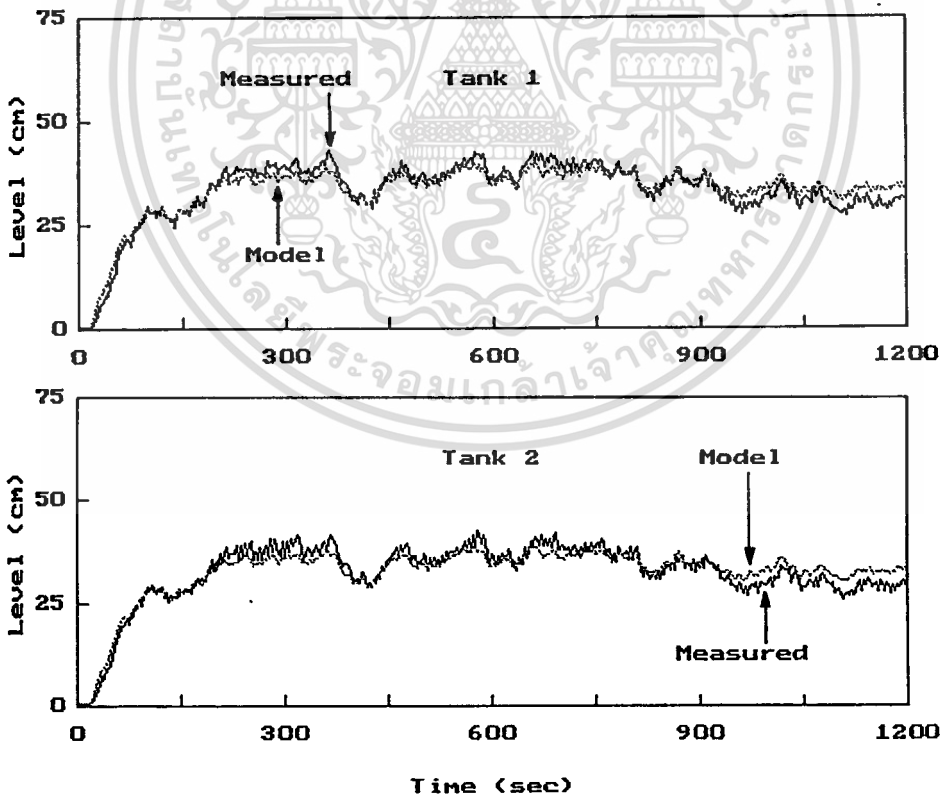
5.3.2) การทดสอบกระบวนการครั้งที่สอง

ปรับวาล์วทางน้ำไหลออกที่กั้นทั้งสองให้เปิดน้อยลง และเปิดวาล์วเชื่อมระหว่างถังมากขึ้น เพื่อให้เกิด interaction กันมากยิ่งขึ้น ได้ผลการทดลองดังนี้

5.3.2.1) ผลการหาโมเดลกระบวนการ

ผลจากการหาโมเดลกระบวนการจากการทดลอง ในรูปแบบดีสครีตมีคาบการเก็บตัวอย่าง 3 วินาที ได้เป็นสมการที่ (5.7) ผลการเปรียบเทียบระหว่างโมเดลกับผลตอบสนองจริงแสดงในภาพ (58)

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_1(z) \\ \bar{Y}_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.018z^{-6}-0.0009z^{-7}}{1-0.882z^{-1}-0.058z^{-2}} & \frac{-0.0005z^{-6}-0.0119z^{-7}}{1-0.882z^{-1}-0.058z^{-2}} \\ \frac{0.005z^{-6}+0.012z^{-7}}{1-0.882z^{-1}-0.058z^{-2}} & \frac{0.003z^{-6}-0.003z^{-7}}{1-0.882z^{-1}-0.058z^{-2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(z) \\ U_2(z) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$



ภาพที่ 58 เปรียบเทียบผลของกระบวนการจริงกับผลตอบสนองของโมเดล
ของกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็น ภาพนี้เป็นระดับน้ำในถังใบที่หนึ่ง ภาพล่างเป็นระดับน้ำในถังใบที่สอง ยืนยันด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2.2) ผลการออกแบบตัวควบคุม DMC

ใช้โมเดลที่ได้ตามสมการ (5.7) คำนวณหาสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองต่อตัวแปรปรับแบบ ฟังก์ชันระดับขนาดหนึ่งหน่วย ($1 \text{ cm}^3/\text{sec}$) จากการทดสอบกับกระบวนการพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม คือ $N=200$, $P=40$, $M=2$, $f_1=0.45$ และ $f_2=0.85$ ได้เมทริกซ์ K_{DMC} เป็นตามสมการ (5.8)

$$K_{DMC} = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \cdots & \cdots & \cdots & k_{1,80} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \cdots & \cdots & \cdots & k_{2,80} \end{bmatrix}_{2 \times 80} \quad (5.8)$$

ค่าของสมาชิก $k_{i,j}$ ในสมการ (5.8) แสดงในตารางที่ (8)



ตารางที่ 8 แสดงค่าของสมาชิกในเมทริกซ์ K_{DMC}

อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก	อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก
k _{1,1}	0.000000	k _{1,21}	0.043447
k _{1,2}	0.000000	k _{1,22}	0.043582
k _{1,3}	0.000000	k _{1,23}	0.043709
k _{1,4}	0.000000	k _{1,24}	0.043829
k _{1,5}	0.000000	k _{1,25}	0.043943
k _{1,6}	0.044964	k _{1,26}	0.044050
k _{1,7}	0.040171	k _{1,27}	0.044151
k _{1,8}	0.040788	k _{1,28}	0.044247
k _{1,9}	0.041052	k _{1,29}	0.044337
k _{1,10}	0.041322	k _{1,30}	0.044422
k _{1,11}	0.041575	k _{1,31}	0.044503
k _{1,12}	0.041814	k _{1,32}	0.044579
k _{1,13}	0.042039	k _{1,33}	0.044651
k _{1,14}	0.042253	k _{1,34}	0.044718
k _{1,15}	0.042454	k _{1,35}	0.044782
k _{1,16}	0.042644	k _{1,36}	0.044843
k _{1,17}	0.042823	k _{1,37}	0.044900
k _{1,18}	0.042993	k _{1,38}	0.044954
k _{1,19}	0.043153	k _{1,39}	0.045005
k _{1,20}	0.043304	k _{1,40}	0.045053

ตารางที่ 8 (ต่อ)

อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก	อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก
k _{1,41}	0.000000	k _{1,61}	0.042078
k _{1,42}	0.000000	k _{1,62}	0.042215
k _{1,43}	0.000000	k _{1,63}	0.042344
k _{1,44}	0.000000	k _{1,64}	0.042467
k _{1,45}	0.000000	k _{1,65}	0.042582
k _{1,46}	0.011481	k _{1,66}	0.042691
k _{1,47}	0.040740	k _{1,67}	0.042794
k _{1,48}	0.039253	k _{1,68}	0.042891
k _{1,49}	0.039653	k _{1,69}	0.042983
k _{1,50}	0.039918	k _{1,70}	0.043069
k _{1,51}	0.040176	k _{1,71}	0.043151
k _{1,52}	0.040419	k _{1,72}	0.043228
k _{1,53}	0.040648	k _{1,73}	0.043301
k _{1,54}	0.040865	k _{1,74}	0.043370
k _{1,55}	0.041069	k _{1,75}	0.043435
k _{1,56}	0.041262	k _{1,76}	0.043497
k _{1,57}	0.041445	k _{1,77}	0.043555
k _{1,58}	0.041617	k _{1,78}	0.043609
k _{1,59}	0.041779	k _{1,79}	0.043661
k _{1,60}	0.041933	k _{1,80}	0.043710

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 (ต่อ)

อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก	อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก
k _{2,1}	0.000000	k _{2,21}	-0.001824
k _{2,2}	0.000000	k _{2,22}	-0.001869
k _{2,3}	0.000000	k _{2,23}	-0.001912
k _{2,4}	0.000000	k _{2,24}	-0.001952
k _{2,5}	0.000000	k _{2,25}	-0.00199
k _{2,6}	-0.000750	k _{2,26}	-0.002027
k _{2,7}	-0.000821	k _{2,27}	-0.002061
k _{2,8}	-0.000924	k _{2,28}	-0.002093
k _{2,9}	-0.001019	k _{2,29}	-0.002123
k _{2,10}	-0.001109	k _{2,30}	-0.002152
k _{2,11}	-0.001194	k _{2,31}	-0.002179
k _{2,12}	-0.001275	k _{2,32}	-0.002204
k _{2,13}	-0.001351	k _{2,33}	-0.002228
k _{2,14}	-0.001422	k _{2,34}	-0.002251
k _{2,15}	-0.001490	k _{2,35}	-0.002273
k _{2,16}	-0.001554	k _{2,36}	-0.002293
k _{2,17}	-0.001614	k _{2,37}	-0.002312
k _{2,18}	-0.001671	k _{2,38}	-0.00233
k _{2,19}	-0.001725	k _{2,39}	-0.002348
k _{2,20}	-0.001776	k _{2,40}	-0.002364

ตารางที่ 8 (ต่อ)

อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก	อันดับสมาชิก	ค่าของสมาชิก
k _{2,41}	0.000000	k _{2,61}	0.002394
k _{2,42}	0.000000	k _{2,62}	0.002348
k _{2,43}	0.000000	k _{2,63}	0.002305
k _{2,44}	0.000000	k _{2,64}	0.002264
k _{2,45}	0.000000	k _{2,65}	0.002225
k _{2,46}	0.003721	k _{2,66}	0.002188
k _{2,47}	0.003399	k _{2,67}	0.002154
k _{2,48}	0.003309	k _{2,68}	0.002121
k _{2,49}	0.003212	k _{2,69}	0.002090
k _{2,50}	0.003120	k _{2,70}	0.002061
k _{2,51}	0.003034	k _{2,71}	0.002034
k _{2,52}	0.002952	k _{2,72}	0.002008
k _{2,53}	0.002875	k _{2,73}	0.001983
k _{2,54}	0.002802	k _{2,74}	0.001960
k _{2,55}	0.002733	k _{2,75}	0.001938
k _{2,56}	0.002668	k _{2,76}	0.001917
k _{2,57}	0.002607	k _{2,77}	0.001898
k _{2,58}	0.002549	k _{2,78}	0.001879
k _{2,59}	0.002495	k _{2,79}	0.001862
k _{2,60}	0.002443	k _{2,80}	0.001846

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2.3) ผลการออกแบบตัวควบคุม PID และตัว Decoupler

จากผังสัญญาณในภาพ (53) ได้ผลดังนี้

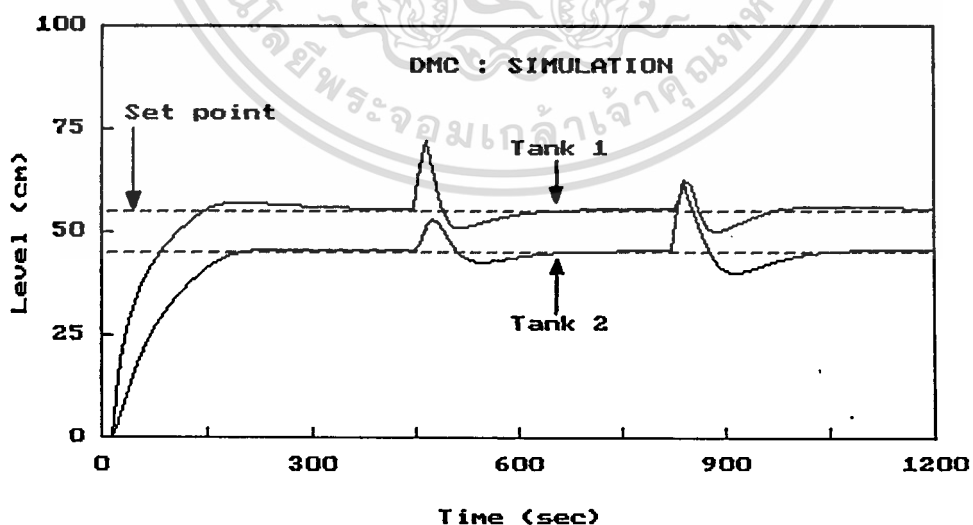
$G_{C,11}$ เป็นตัวควบคุม PID สำหรับถังใบที่ 1 มีค่าพารามิเตอร์เป็น $K_C = 5.2$, $\tau_I = 28$ วินาที และ $\tau_D = 7$ วินาที

$G_{C,22}$ เป็นตัวควบคุม PID สำหรับถังใบที่ 2 มีค่าพารามิเตอร์เป็น $K_C = 2.2$, $\tau_I = 30$ วินาที และ $\tau_D = 7$ วินาที

$$D_{12} = \frac{-0.0005z^{-6} - 0.0119z^{-7}}{0.018z^{-6} - 0.0009z^{-7}}$$

$$D_{21} = \frac{0.005z^{-6} + 0.012z^{-7}}{0.003z^{-6} - 0.003z^{-7}}$$

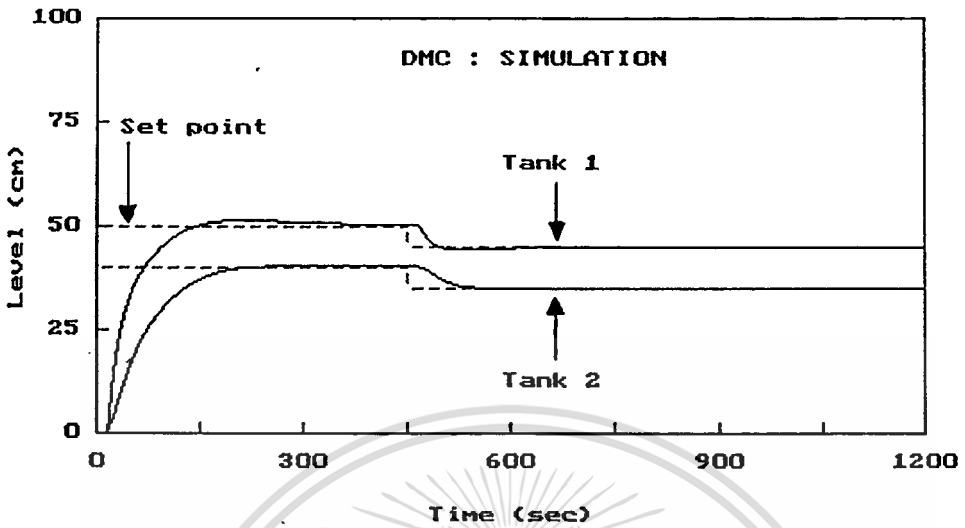
5.3.2.4) ผลการจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ



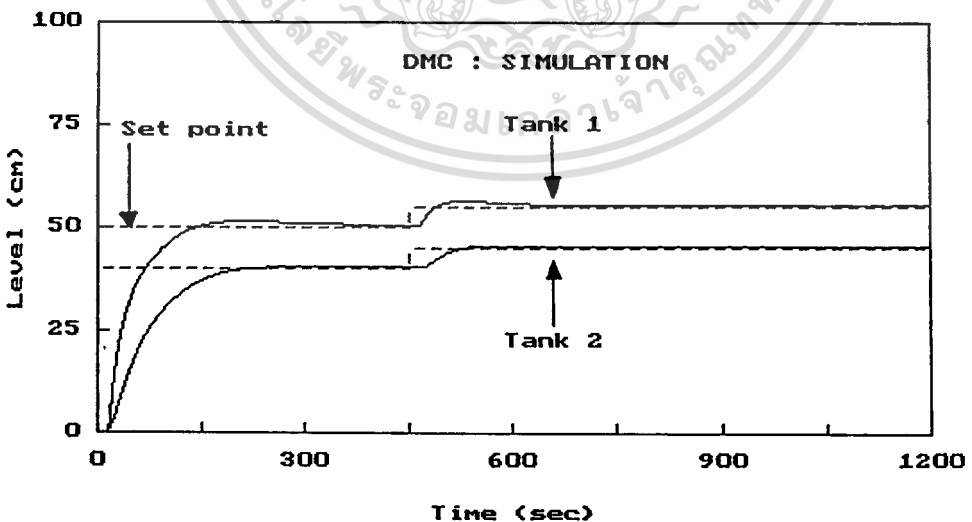
ภาพที่ 59 การจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ เมื่อใช้ระบบควบคุม DMC ควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 1 ที่ 55 ซม. และระดับน้ำในถังใบที่ 2 ที่ 45 ซม.

เอกสารนี้มีการเติมน้ำใส่ถังใบที่ 1 ที่เวลา 450 วินาที และใส่ถังใบที่ 2 ที่เวลา 825 วินาที

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 60 การจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ เมื่อใช้ระบบควบคุม DMC ควบคุมระดับในถังใบที่ 1 ที่ 50 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 45 ซม. ควบคุมระดับในถังใบที่ 2 ที่ 40 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 35 ซม.

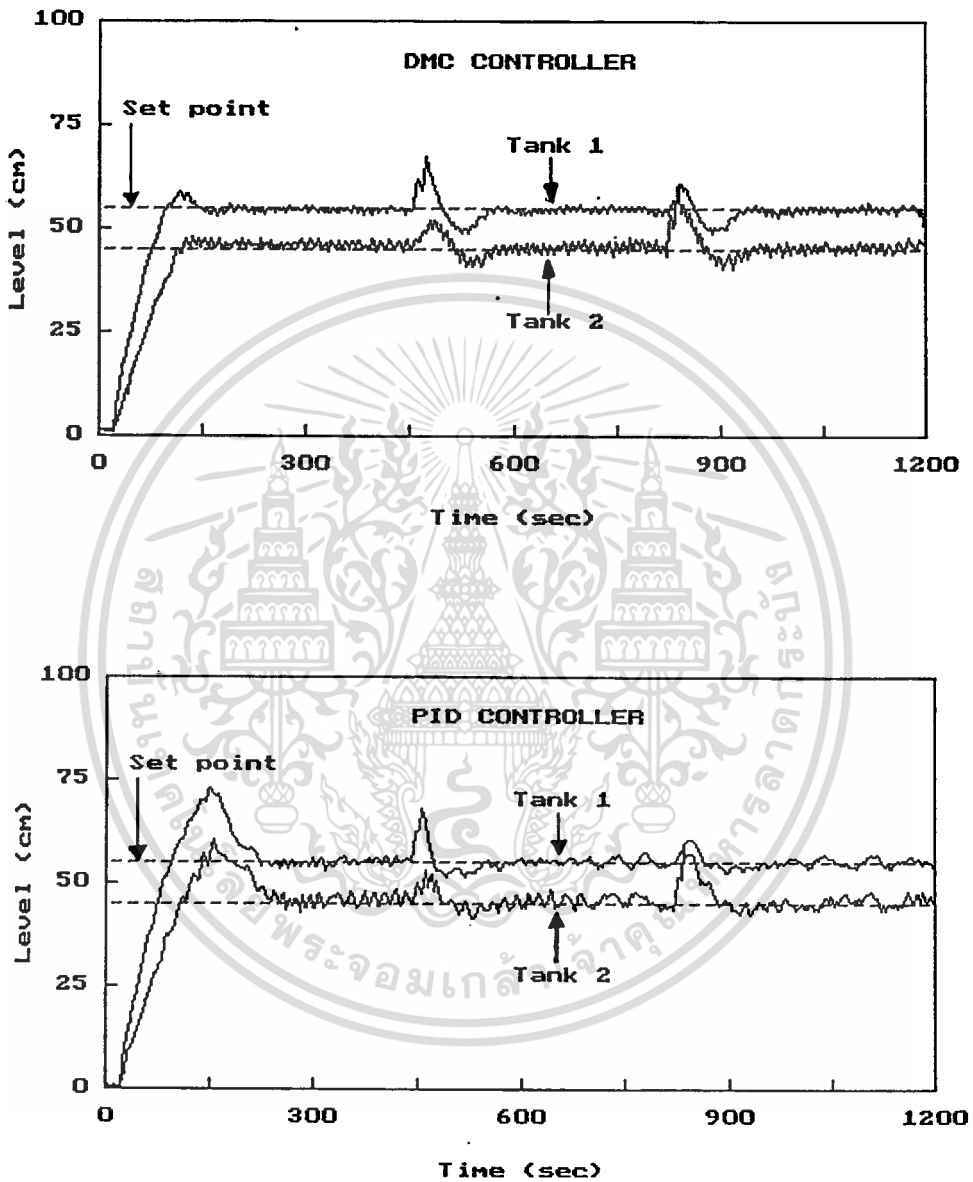


ภาพที่ 61 การจำลองผลตอบสนองของกระบวนการ เมื่อใช้ระบบควบคุม DMC ควบคุมระดับในถังใบที่ 1 ที่ 50 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 55 ซม.

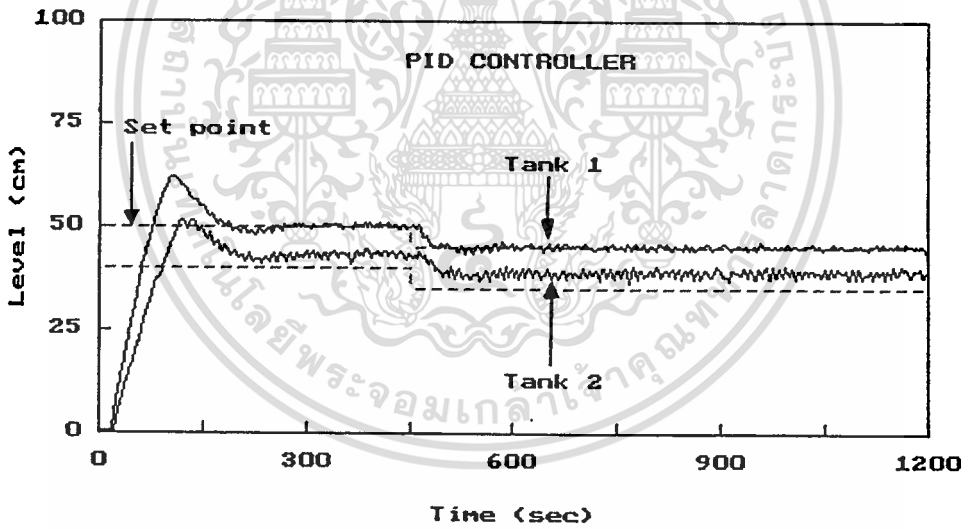
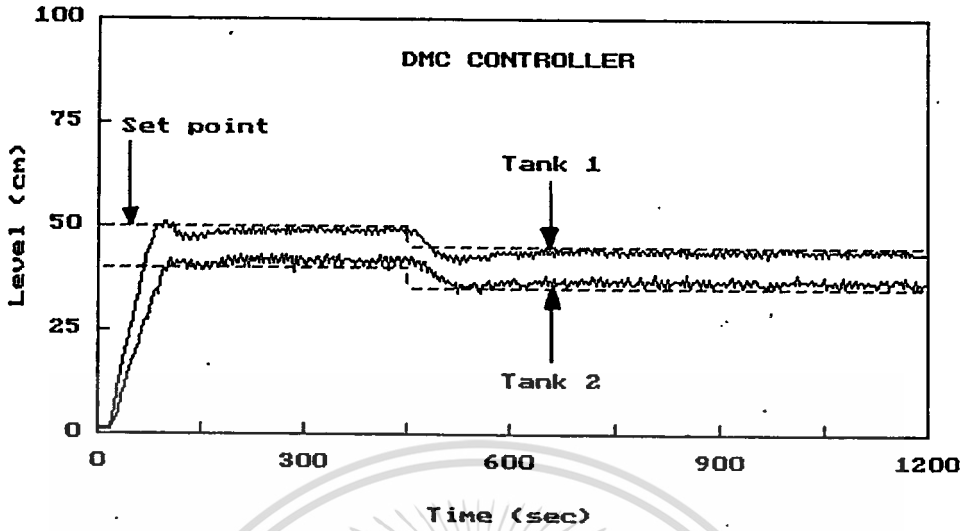
ควบคุมระดับในถังใบที่ 2 ที่ 40 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 45 ซม. โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

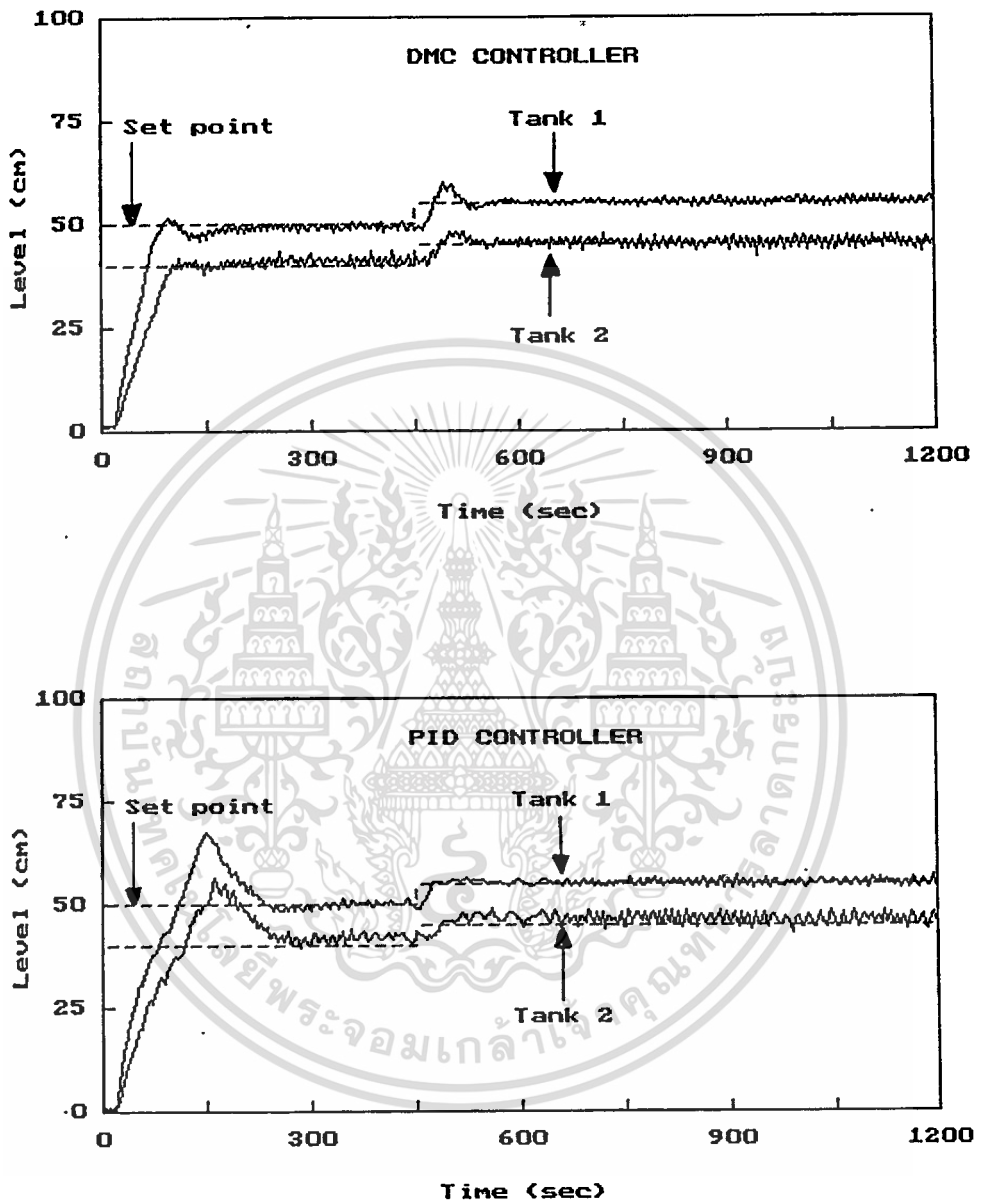
5.3.2.5) ผลการทดลอง



ภาพที่ 62 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID ควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 1 ที่ 55 ซม. และระดับน้ำในถังใบที่ 2 ที่ 45 ซม. มีการเติมน้ำใส่ถังใบที่ 1 ที่เวลา 450 วินาที และใส่ถังใบที่ 2 ที่เวลา 825 วินาที



ภาพที่ 63 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID ควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 1 ที่ 50 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 45 ซม. ควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 2 ที่ 40 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 35 ซม.



ภาพที่ 64 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม DMC กับระบบควบคุม PID ควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 1 ที่ 50 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 55 ซม. ควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 2 ที่ 40 ซม. และเปลี่ยนระดับอ้างอิงเป็น 45 ซม.

5.3.2.6) วิเคราะห์ผลการทดลองกระบวนการครั้งที่สอง

จากผลการทดลองภาพที่ (62)-(64) พบว่าผลตอบสนองในการเข้าสู่ระดับปฏิบัติการของระบบควบคุม DMC และ PID มีค่า rise time ใกล้เคียงกันทั้งในกรณีของระดับน้ำในถังใบที่ 1 และใบที่ 2 แต่ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID ให้ค่า overshoot ค่อนข้างมาก เช่นในกรณีควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 1 ที่ระดับ 55 ซม. ใบที่ 2 ที่ระดับ 45 ซม. ดังภาพที่ (62) ได้ค่า overshoot 31% และ 33% ตามลำดับ แต่ในกรณีของระบบควบคุม DMC จะมีค่า overshoot เฉพาะระดับน้ำในถังใบที่ 1 ประมาณ 9% เท่านั้น ทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID มีค่า settling time มากกว่าระบบควบคุม DMC อย่างชัดเจน

จากผลการทดสอบโดยการเปลี่ยนระดับอ้างอิงใหม่ในทันที ดังภาพที่ (63) และ (64) พบว่าผลตอบสนองของระบบควบคุม PID ใช้เวลาเข้าสู่ระดับสัญญาณอ้างอิงใหม่น้อยกว่า แต่ระบบควบคุม DMC สามารถควบคุมผลตอบสนองให้อยู่ที่ระดับสัญญาณอ้างอิงใหม่ได้ดีกว่า โดยเฉพาะกรณีดังภาพ (63) เป็นการลดระดับสัญญาณอ้างอิงของน้ำถังที่ 2 จาก 40 ซม. เป็น 35 ซม. ระบบควบคุม PID ไม่สามารถได้ที่ระดับ 35 ซม. ได้ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากความผิดพลาดของโมเดลทำให้ผลการชดเชยการ interaction ระหว่าง loop ของตัวควบคุม Decoupling ไม่สมบูรณ์

เมื่อทดสอบโดยการเติมน้ำ ดังภาพที่ (62) เป็นที่น่าสังเกตว่าระบบควบคุม PID ให้ผลตอบสนองต่อการรบกวนไวกว่าระบบควบคุม DMC ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในกระบวนการแรก ดังภาพที่ (56)-(57) อย่างไรก็ตามสังเกตได้ว่าหลังการเติมน้ำรบกวนแล้ว ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID แกว่งตัวรอบเส้นระดับสัญญาณอ้างอิงค่อนข้างมากกว่า

เมื่อพิจารณาภาพรวมในการทดสอบกระบวนการที่ 1 และ 2 พบว่าระบบควบคุม PID มีความไวต่อการตอบสนองการรบกวนโดยการเปลี่ยนระดับหรือการเติมน้ำดีกว่าระบบควบคุม DMC แต่ผลตอบสนองของระบบควบคุม PID ขาดเสถียรภาพ ซึ่งสังเกตได้จากการแกว่งตัวของผลตอบสนองที่สภาวะคงที่ หรือการเกิด offset ในการเข้าสู่ระดับสัญญาณอ้างอิง ทั้งนี้การไม่มีเสถียรภาพของระบบควบคุม PID น่าจะมีสาเหตุจากผลของความผิดพลาดของโมเดล ทำให้การออกแบบชดเชยของระบบควบคุม Decoupling ไม่ถูกต้อง แต่ในกรณีของระบบควบคุม DMC จะยอมให้โมเดลมีความผิดพลาดได้ เนื่องจากผลของตัวแปรถ่วงน้ำหนัก f จะลดความสำคัญของโมเดล และช่วยให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพได้ ดังนั้นจากการทดลองสรุปได้ว่าระบบควบคุม DMC มีคุณสมบัติแก้ปัญหาการเกิด interaction ระหว่าง loop ได้ดีกว่าวิธี Decoupling control

บทที่ 6

บทสรุป

วิทยานิพนธ์ได้เสนอการควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุม DMC โดยเริ่มต้นกล่าวถึงตัวควบคุม DMC แบบดั้งเดิม และพัฒนาอัลกอริทึมให้อยู่ในรูปแบบสถานะปริภูมิ (State space formulation) ซึ่งช่วยให้ใช้เวลาในการคำนวณเร็วขึ้นเนื่องจากลดความซับซ้อนในการคำนวณ ทำให้สามารถใช้ Model Horizon จำนวนมากๆ เพื่อไม่ให้เกิด truncation error แนวความคิดสำคัญของวิธีควบคุมแบบ DMC สรุปได้ดังนี้

- 1) สร้างโมเดลกระบวนการด้วยสมการในรูปแบบ Discrete step response model และใช้โมเดลทำนายผลตอบสนองในอนาคต
- 2) ค่าความแตกต่างระหว่างผลตอบสนองที่วัดได้จริงจากกระบวนการกับผลตอบสนองจากโมเดล ถูกรวมไว้ในตัวควบคุมด้วย เพื่อเป็นการชดเชยความผิดพลาดของโมเดล
- 3) เป็นการควบคุมแบบติดตามเป้าหมาย (Reference trajectory) โดยใช้ทฤษฎีออปติมัลเพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรปรับที่ทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างค่าเป้าหมายและค่าทำนายต่างกัันน้อยที่สุด
- 4) ตัวควบคุมมีพารามิเตอร์ 4 ตัว ได้แก่ จำนวนสัมประสิทธิ์ของโมเดล N , ระยะทำนาย P , ระยะการควบคุม M และตัวแปรถ่วงน้ำหนัก f การปรับพารามิเตอร์ทั้งสี่ตัวให้เหมาะสมจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพในการควบคุมที่ดี

งานวิจัยนี้ได้สร้างชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำซึ่งมีคุณสมบัติค่อนข้างไม่เป็นเชิงเส้น มีเดดไทม์ โดยทำชุดทดลองให้เป็น 3 กระบวนการ สรุปผลได้ดังนี้

- 1) กระบวนการควบคุมระดับน้ำหนึ่งถัง เป็นกระบวนการที่มีรูปแบบเป็นระบบอันดับหนึ่ง (First order system) พบว่าระบบควบคุม DMC มีสมรรถนะเหนือกว่าระบบควบคุม PID โดยพิจารณาในด้านของ rise time, settling time, overshoot และผลรวมของค่าสมบูรณ์ความผิดพลาด (IAE) ในช่วงรบกวนระบบด้วยการเติมน้ำหรือเปลี่ยนระดับสัญญาณอ้างอิง และเมื่อทดสอบความคงทน (Robustness) โดยการเปลี่ยนระดับปฏิบัติการ พบว่าระบบควบคุม DMC มีความคงทนดีกว่าระบบควบคุม PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) กระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังที่เชื่อมต่อกับถังอีกใบหนึ่ง เป็นกระบวนการที่มีรูปแบบระบบอันดับสอง (Second order system) พบว่าระบบควบคุม DMC ให้สมรรถนะดีกว่าระบบควบคุม PID ทั้งในกรณีรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนระดับสัญญาณอ้างอิงและโดยการเติมน้ำ

3) กระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังที่มีท่อต่อถึงกัน ซึ่งเป็นกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุตที่มี interaction ระหว่างกัน พบว่าระบบควบคุม DMC มีเสถียรภาพในการควบคุมกระบวนการได้ดีกว่า มีคุณสมบัติในการแก้ปัญหากลไก interaction ได้ดีกว่าระบบควบคุม PID

งานวิจัยได้ศึกษาการจำลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำ สร้างแบบจำลองของกระบวนการในรูปสมการอนุพันธ์ โดยพิจารณาว่าการไหลออกของน้ำที่กั้นถังเป็นแบบเทอร์บูแลนต์ และการไหลผ่านท่อที่เชื่อมต่อระหว่างถังทั้งสองใบเป็นการไหลแบบเลมินาร์ จากนั้นใช้วิธี Runge-Kutta จำลองกระบวนการ ผลที่ได้จากการจำลองใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง

จากการศึกษาระบบควบคุม DMC สามารถสรุปข้อดีได้ดังนี้

1) เป็นวิธีควบคุมขั้นสูงที่สามารถเข้าใจได้ง่าย เนื่องจากออกแบบในรูปของ Time-domain จึงใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ไม่ซับซ้อน

2) ถึงแม้จะออกแบบในรูปของระบบเชิงเส้น แต่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบที่ค่อนข้างไม่เป็นเชิงเส้นได้เป็นอย่างดี เนื่องจากค่าความผิดพลาดของโมเดลจะถูกชดเชยในตัวควบคุม และยังมีพารามิเตอร์ในการปรับจูนตัวควบคุมอีกด้วย

3) สามารถประยุกต์เข้ากับระบบที่มีเดดไทม์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากผลของเดดไทม์จะถูกรวมเข้าไว้ในตัวควบคุมแล้ว ไม่ต้องสร้างตัวชดเชย (Deadtime compensate) เพิ่มเข้าไป

4) เมื่อมีการรบกวนจากภายนอกสามารถตรวจจับ (Observable) ได้ ตัวควบคุมจะชดเชยผลของการรบกวนไว้

5) สามารถใช้โมเดลของกระบวนการที่มีความผิดพลาดในระดับหนึ่งในการออกแบบระบบควบคุมได้ เนื่องจากมีพารามิเตอร์ตัวแปรถ่วงน้ำหนัก (f) สำหรับปรับค่าให้ระบบมีเสถียรภาพได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสามารถปรับจูนได้จากการทดลองด้วยวิธีลองผิดลองถูก

6) เป็นวิธีการควบคุมที่ประยุกต์ใช้กับระบบ MIMO ได้ดี เนื่องจากการออกแบบในรูปของ MIMO ไม่ซับซ้อน ใช้วิธีในทำนองเดียวกับระบบ SISO และผลของการ Interaction ระหว่างกันของระบบถูกรวมอยู่ในตัวควบคุม จึงไม่ต้องออกแบบตัวชดเชยผลของการ Interaction เพิ่มเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของระบบควบคุม DMC

1) ไม่เหมาะกับระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นมากๆ

2) ในกรณีระบบ MIMO ที่มีหลายๆ loop ทำให้เมทริกซ์ S_p มีขนาดใหญ่ การคำนวณหา Invert matrix ยากลำบาก

ข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อ

1) เนื่องจากกระบวนการในอุตสาหกรรมจะมีข้อจำกัดของอุปกรณ์ ดังนั้นในการแบบตัวควบคุม DMC ควรเพิ่มส่วนของเงื่อนไข (Constrain) ของตัวแปรอินพุทและตัวแปรเอาต์พุทเข้าไปด้วย

2) ด้วยวิธี State Space Formulation สามารถพัฒนาเพิ่มส่วนของตัวสังเกตสถานะในรูปของ Kalman filter ได้ ทำให้สามารถประยุกต์ตัวควบคุม DMC กับกระบวนการที่ไม่สามารถวัดสถานะได้โดยตรงได้



บรรณานุกรม

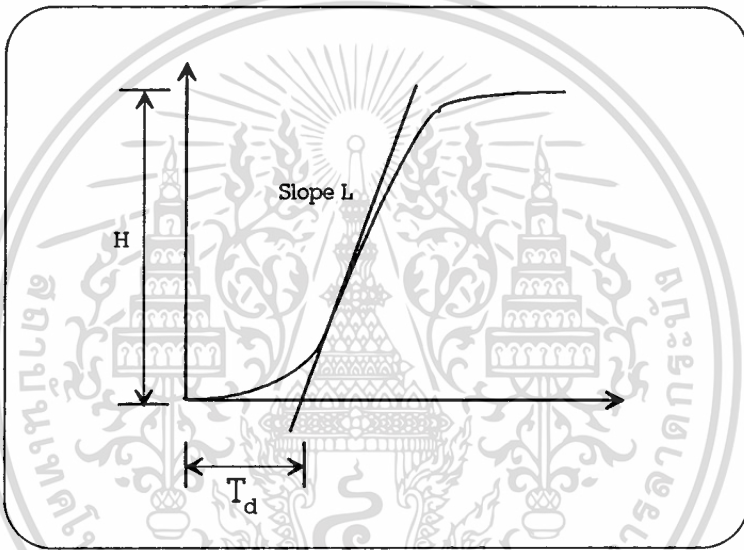
- [1] A.M.Morshedi, C.R.Cutler and T.A.Skrovanek. "Optimal Solution of Dynamic Matrix Control with Linear Programming Techniques (LDMC)", PROC. AM. Control Conf. 1985 : 199-208
- [2] Carlos E.Garcia and Manfred Morari. "Internal Model Control. 1. A Unifying Review and Some New Results", Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. , Vol.21, No.2, 1982 : 308-323
- [3] Carlos E.Garcia and A.M.Morshedi, "Quadratic Programming Solution of Dynamic Matrix Control (QDMC)", Chem. Eng. Commun., Vol 46, 1986
- [4] Dale E. Seborg, Thomas F.Edgar and Duncan A. Mellichamp. Process Dynamics and Control Singapore, John Wiley & Sons, 1989
- [5] David M.Prett and Carlos E.Garcia. Fundamental Process Control , Stoneham, Butterworths, 1988
- [6] Donald R. Coughanowr. Process Systems Analysis and Control , Second Edition, Singapore, McGraw.Hill, 1991
- [7] Jacinto L. Marchetti, Duncan A. Mellichamp and Dale E. Seborg. "Predictive Control Based on Discrete Convolution Models", Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. , Vol.22, 1983 : 488-495
- [8] James C.Hung. "Practical Industrial Control Techniques", IECON'94. 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation , Vol.1, 1994 : 7-14
- [9] Jay H. Lee, Manfred Morari and Carlos E. Garcia, "State-space Interpretation of Model Predictive Control", Automatica , vol.30, No.4, 1994 : 707-717
- [10] Li Sifu, Kian Y.Lim and D.Grant Fisher, "A State Space Formulation for Model Predictive Control", AIChE Journal , Vol.35, No.2, 1989 : 241-249

- [11] P.Lundstrom and others. "Limitations of Dynamic Matrix Control", *Computers Chem. Engng.* Vol.19, No.4, 1995 : 409-421
- [12] Paul R. Maurath, Duncan A. Mellichamp and Dale E. Seborg. "Predictive Controller Design for Single-Input / Single-Output (SISO) Systems", *Ind. Eng. Chem. Res.* , Vol.27, No.6, 1988 : 956-963
- [13] R.B.Newell and P.L.Lee. *Applied Process Control : A case study*, Prentice Hall of Australia, 1989
- [14] Steven C. Chapra and Raymond P. Canale. *Numerical methods for engineers* , Second Edition, Singapore, McGRAW-HILL, 1990 : 604
- [15] William L. Luyben. *Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers* , Second Edition, Singapore, McGraw-Hill, 1990 : 281-287
- [16] มงคล มงคลวงศ์โรจน์ และ จัตรชัย เอี่ยมพรสิน "การประยุกต์ใช้ตัวควบคุม DMC กับระบบควบคุมระดับน้ำ" *การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36*, 4 กุมภาพันธ์ 2541
- [17] วิพันธ์ ปรีชาพานิช *การวิเคราะห์ระบบควบคุมเวลาดีสครีต* กรุงเทพฯ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2537
- [18] สุขสันต์ นุ่นงาม "การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมชนิดการคาดคะเนล่วงหน้ากับกระบวนการที่มีความหน่วงต่ำ" *การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17* พ.ศ.2537
- [19] สุรินทร์ทิพย์ ถาวรทวิวงษ์ "การประยุกต์การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟกับการผสมของเหลว" *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต* กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2538

ภาคผนวก ก

การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID

การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธีวงรอบเปิดของ Ziegler-Nichols ค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมหาได้จาก Process Reaction Curve แสดงในภาพ (ก.1)



ภาพที่ ก.1 แสดงพารามิเตอร์ด้วยวิธี Process Reaction Curve

กำหนดนิยามของพารามิเตอร์ในภาพ (ก.1) ดังต่อไปนี้

H = ขนาดการเปลี่ยนแปลงของจุดปรับตั้ง

L = ความชันมากที่สุด (Maximum Slope) ของผลตอบสนอง

T_d = เดดไทม์ของกระบวนการ

$$L_1 = \frac{L}{H}$$

Ziegler และ Nichols กำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดของการควบคุม PID ได้ดังนี้

$$\text{Proportional gain } (K_C) = \frac{1.2}{T_d L_1}$$

$$\text{Integral time } (\tau_I) = 2T_d$$

$$\text{Derivative time } (\tau_D) = 0.5T_d$$

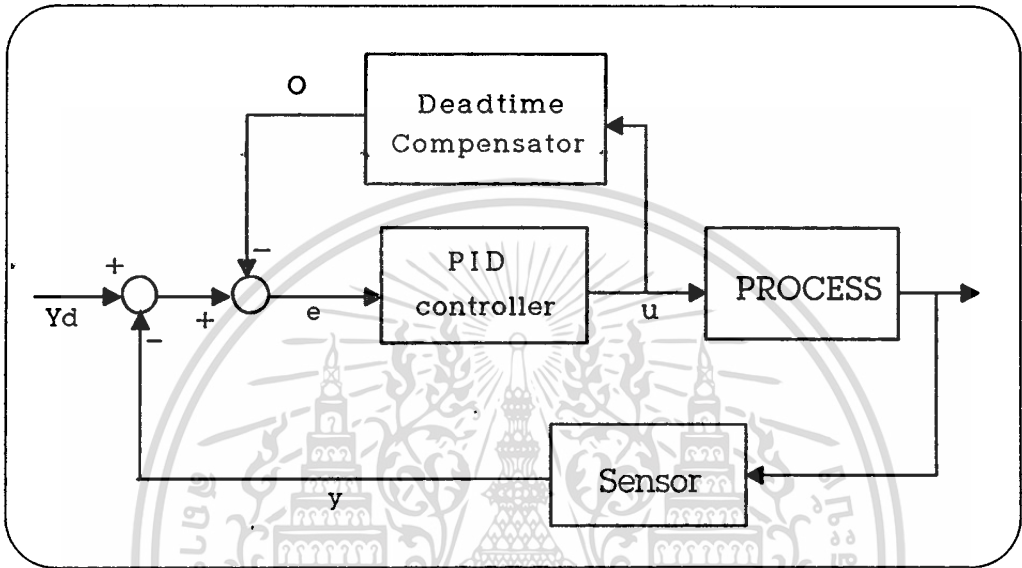
ตัวควบคุม PID ในรูปแบบดิจิทัล มีคาบการเก็บตัวอย่างเป็น T วินาที เขียนได้เป็น

$$u(k) = u(k-1) + K_C \left[(e(k) - e(k-1)) + \frac{T}{\tau_I} e(k) + \frac{\tau_D}{T} (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \right] \quad (\text{ก.1})$$



ภาคผนวก ข

Deadtime Compensator



ภาพที่ ข.1 ระบบควบคุม Deadtime compensator

การออกแบบระบบควบคุมสำหรับกระบวนการที่มีเดดไทม์เป็นเวลา dT ต้องมีตัวชดเชยเดดไทม์ดังแสดงในภาพที่ (ข.1) ตัวชดเชยประกอบด้วยรูปแบบโมเดลของกระบวนการ 2 รูปแบบซึ่งรูปแบบแรกมีเดดไทม์อยู่ดังสมการ (ข.1) กับอีกรูปแบบที่ไม่มีเดดไทม์ดังสมการ (ข.2)

$$Y_1(z) = G_P(z)U(z) = z^{-d}\tilde{G}(z)U(z) \quad (\text{ข.1})$$

$$Y_2(z) = \tilde{G}(z)U(z) \quad (\text{ข.2})$$

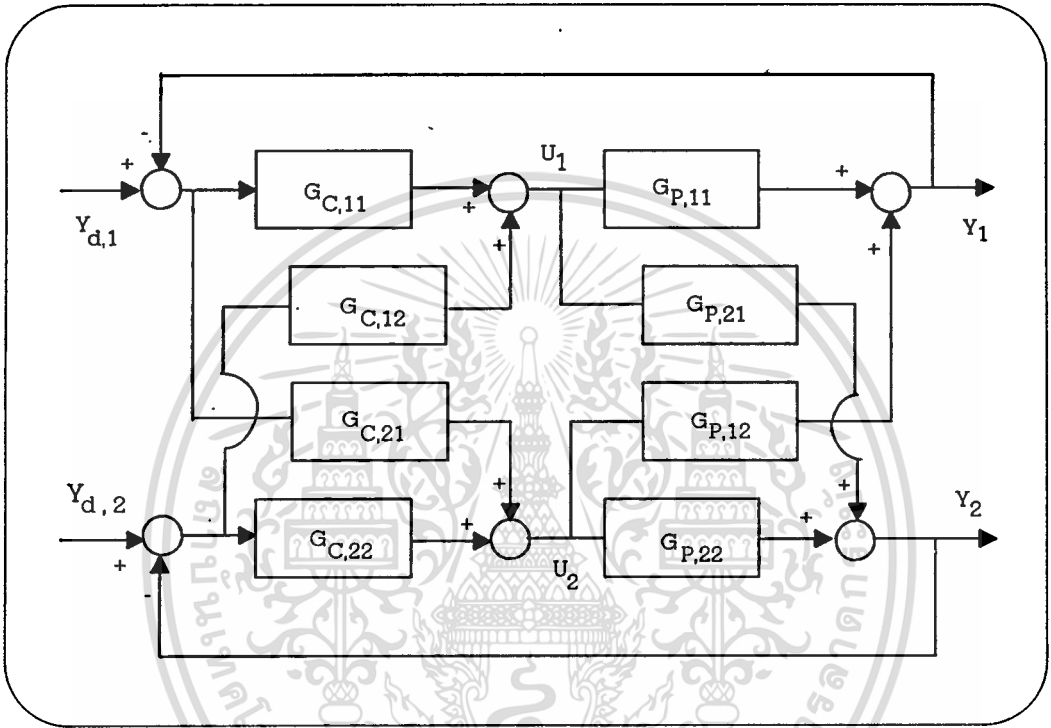
เอาต์พุตของตัวชดเชยเป็นค่าความแตกต่างระหว่างโมเดลทั้งสอง

$$O(z) = Y_2(z) - Y_1(z)$$

$$E(z) = Y_d(z) - Y(z) - O(z)$$

ภาคผนวก ค

Decoupling Control



ภาพที่ ค.1 ระบบควบคุม Decoupling control

ระบบควบคุมแบบ Decoupling Control มีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลของการ interaction ระหว่างลูป สมมติกระบวนการ 2 อินพุต 2 เอาท์พุท มีรูปแบบโมเดลในรูปของเมทริกซ์เป็น

$$Y = G_P U \quad (\text{ค.1})$$

$$\text{เมื่อ } Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix}$$

$$G_P = \begin{bmatrix} G_{P,11} & G_{P,12} \\ G_{P,21} & G_{P,22} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$

จากรูปที่ (ค.1) เมทริกซ์ของตัวแปรปรับมีขนาดเป็น

$$U = G_C E \quad (\text{ค.2})$$

$$E = Y_d - Y \quad (\text{ค.3})$$

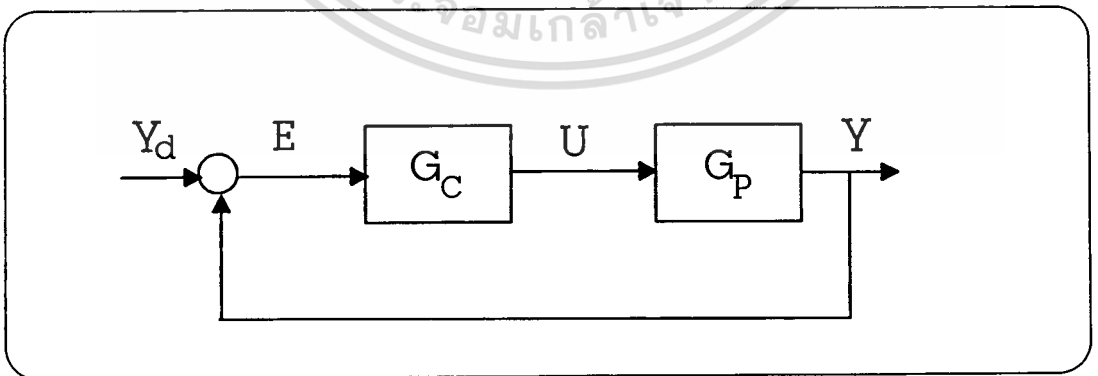
เมื่อ $G_C = \begin{bmatrix} G_{C,11} & G_{C,12} \\ G_{C,21} & G_{C,22} \end{bmatrix}$

$$E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}$$

$$Y_d = \begin{bmatrix} Y_{d,1} \\ Y_{d,2} \end{bmatrix}$$

จากสมการ (ค.1)-(ค.3) จะได้

$$Y = [I + G_P G_C]^{-1} G_P G_C Y_d \quad (\text{ค.4})$$



ภาพที่ ค.2 ผังสัญญาณระบบสองอินพุตสองเอาต์พุตในรูปของตัวแปรเมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

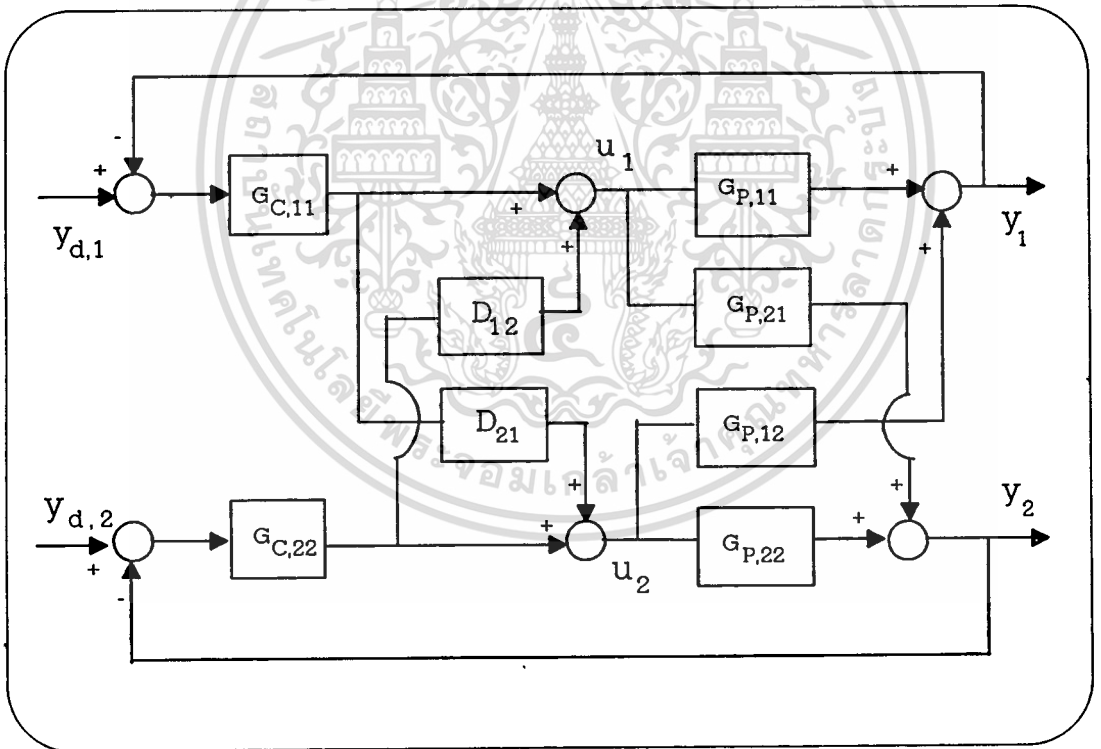
จากสมการที่ (ค.4) เพื่อไม่ให้มีการ interaction ระหว่างลูป จะต้องทำให้ $[I + G_P G_C]^{-1} G_P G_C$ เป็น diagonal matrix ซึ่งจะเป็นได้เมื่อ $G_P G_C$ เป็น diagonal matrix

$$G_P G_C = \begin{bmatrix} G_{P,11} G_{C,11} + G_{P,12} G_{C,21} & G_{P,11} G_{C,12} + G_{P,12} G_{C,22} \\ G_{P,21} G_{C,11} + G_{P,22} G_{C,21} & G_{P,21} G_{C,12} + G_{P,22} G_{C,22} \end{bmatrix} \quad (\text{ค.5})$$

จากสมการที่ (ค.5) $G_P G_C$ เป็น diagonal matrix เมื่อ

$$G_{C,12} = -\frac{G_{P,12} G_{C,22}}{G_{P,11}} \quad (\text{ค.6})$$

$$G_{C,21} = -\frac{G_{P,21} G_{C,11}}{G_{P,22}} \quad (\text{ค.7})$$



ภาพที่ ค.3 ระบบควบคุม Decoupling control แสดงส่วนตัว Decoupler

จากสมการ (ค.6)-(ค.7) จะได้ตัวควบคุม Decoupler ซึ่งแสดงในภาพ (ค.3) เป็น

$$D_{12} = -\frac{G_{P,12}}{G_{P,11}}$$

$$D_{21} = -\frac{G_{P,21}}{G_{P,22}}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

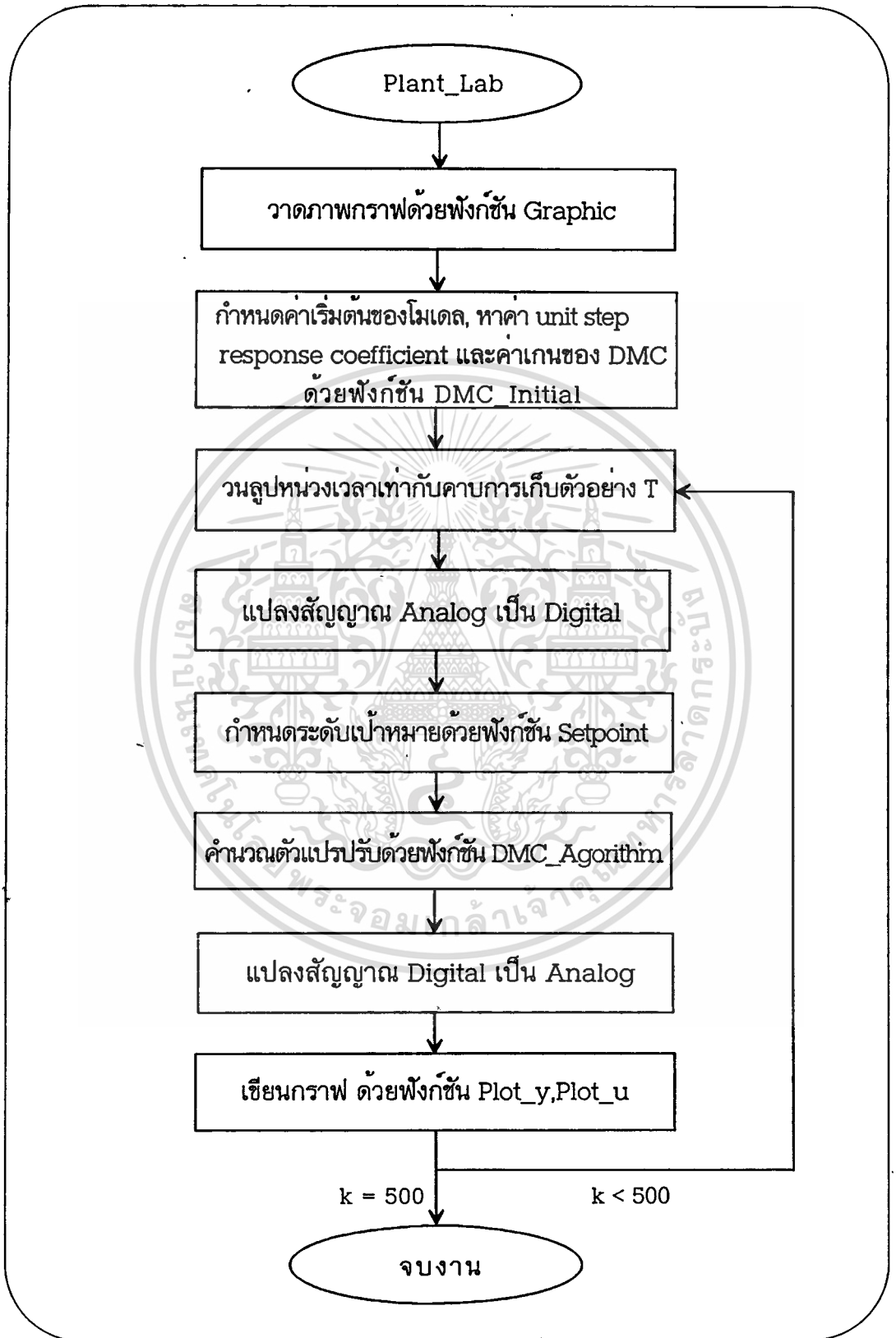
โปรแกรมควบคุมระดับน้ำหนึ่งถัง

โปรแกรมควบคุมระดับน้ำหนึ่งถัง มีฟังก์ชันดังต่อไปนี้

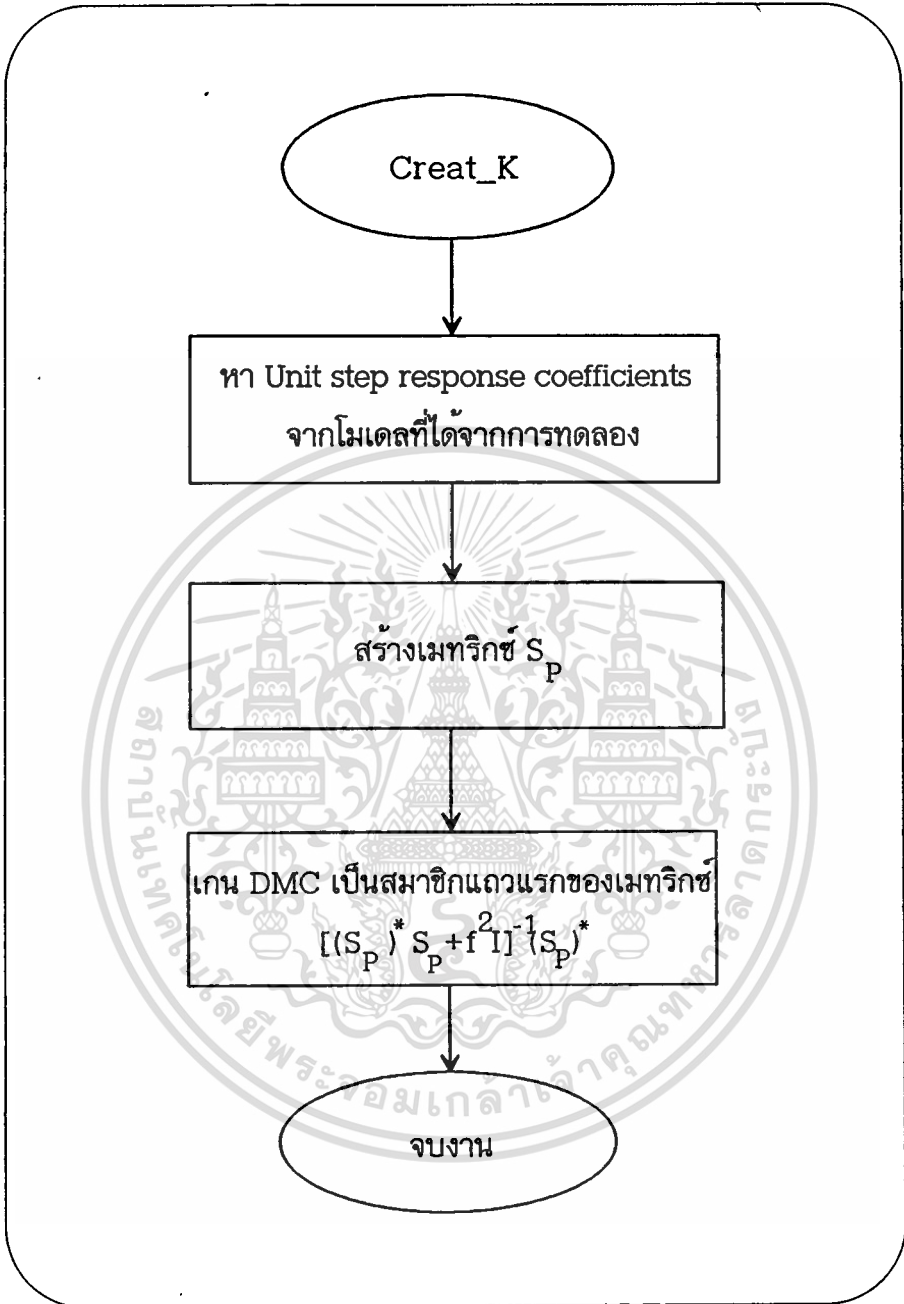
Answer	ฟังก์ชันถามว่าจะรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนระดับปฏิบัติการ หรือโดยการเติมน้ำจากภายนอกรบกวน
DMC_Initial	ฟังก์ชันกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม DMC
DMC_Simulate	ฟังก์ชันจำลองระบบควบคุม DMC
DMC_Agorithm	ฟังก์ชันคำนวณขนาดตัวแปรปรับด้วยตัวควบคุม DMC
PID_Initial	ฟังก์ชันกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม PID
PID_Simulate	ฟังก์ชันจำลองระบบควบคุม PID
PID_Agorithm	ฟังก์ชันคำนวณขนาดตัวแปรปรับด้วยตัวควบคุม PID
Setpoint	ฟังก์ชันกำหนดระดับสัญญาณอ้างอิง
Plant_Simulate	ฟังก์ชันจำลองกระบวนการ
Plant_Lab	ฟังก์ชันทดสอบกับชุดทดลองจริง
Invert	ฟังก์ชันหา Invert of matrix
Creat_K	ฟังก์ชันหาค่า unit step response coefficients และค่าเกนของตัวควบคุม DMC
Graphic	ฟังก์ชันสร้างกราฟ
Head	ฟังก์ชันบอกชนิดของเส้นกราฟที่แสดง
Plot_y	ฟังก์ชันลากเส้นเอทพุท y
Plot_u	ฟังก์ชันลากเส้นอินพุท u
Digital_to_Analog	เปลี่ยนสัญญาณ Digital เป็น Analog ผ่าน PCL-728 Lab card
Analog_to_Digital	เปลี่ยนสัญญาณ Analog เป็น Digital ผ่าน PCL-812 Lab card
IAE	ฟังก์ชันหาค่าผลรวมของค่าสมบูรณ์ความผิดพลาด (IAE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

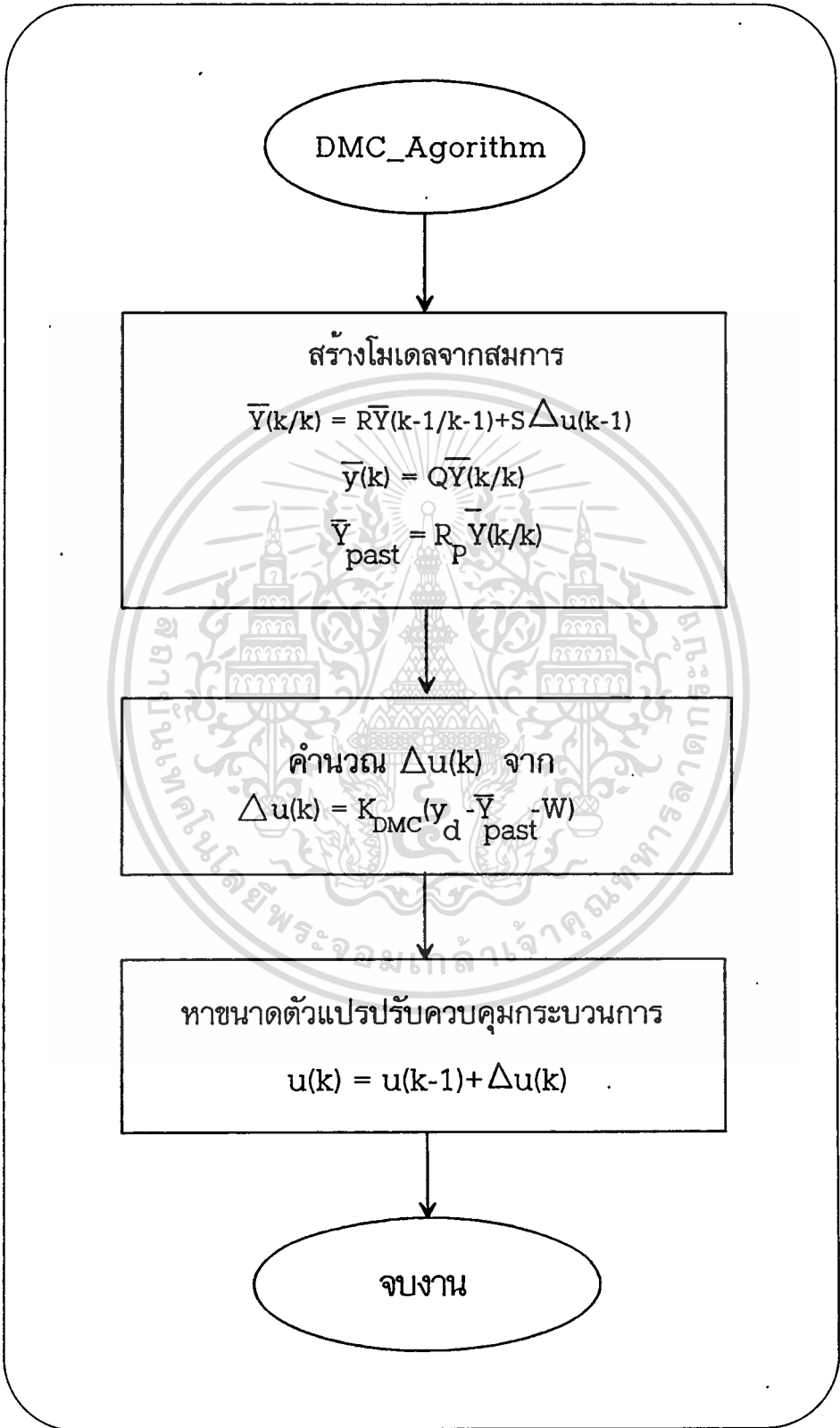
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ๓.๑ โฟลว์ชาร์ทของฟังก์ชัน Plant_Lab



ภาพที่ ง.2 โพล์ซาร์ทของฟังก์ชัน $Creat_K$



รายละเอียดของโปรแกรม

```

#include <bios.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include <graphics.h>
#include <math.h>
#include <process.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>

#define BASE 0x220
#define PORT 0x2C0
#define Number 500
#define T    2
#define dead 18
#define N    200
#define P    55
#define M    1
#define f    0.0

#define KP 2.5

#define KI 60.0

```



```

#define KD 15.0

#define seta1 0.940028

#define seta2 0.019119

#define up_limit 195

#define low_limit 30

void Answer(void);

void DMC_Initial(void);

void DMC_Simulate(void);

void DMC_Agorithm(void);

void PID_Initial(void);

void PID_Simulate(void);

void PID_Agorithm(void);

float Setpoint(void);

void Plant_Simulate(void);

void Plant_Lab(void);

void Invert(double d[M+1], double e[M+1]);

void Creat_K(void);

void Graphic(void);

void Head(void);

void Plot_y(void);

void Plot_u(void);

void Digital_to_Analog(void);

void Analog_to_Digital(void);

void IAE(void);

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

FILE *fp;

FILE *data;

float ref[3],w[3];

float step[Number+5],Gain_DMC[M+1][P+1];

int k;

float yset,y[Number+5],ymodel[Number+N+5];

float u[Number+5],udelta[Number+5];

float error[P+Number+5];

int choice;

int ans;

float Flow;

float T_e;

float out1[Number+10];

float out2[Number+10];

float VoltOut[Number+10];

char file_name[10];

```

```
void main()
```

```
{
```

```
restart :
```

```
clrscr();
```

```
printf(" What do you would like to do ? \n");
```

```
printf(" 1) DMC Experiment \n");
```

```
printf(" 2) PID Experiment \n");
```

```
printf(" 3) Compare DMC with PID : Simulation \n");
```

หากท่านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
printf(" Please select the choice : ");
```

```
scanf("%d",&choice);
```

```
switch(choice)
```

```
{
```

```
case 1 :
```

```
printf("DMC Experiment \n");
```

```
Answer();
```

```
Plant_Lab();
```

```
IAE();
```

```
printf("DMC : IAE = %f\n",T_e);
```

```
closegraph();
```

```
clrscr();
```

```
break;
```

```
case 2 :
```

```
printf("PID Experiment \n");
```

```
Answer();
```

```
Plant_Lab();
```

```
IAE();
```

```
printf("PID : IAE = %f\n",T_e);
```

```
getch();
```

```
closegraph();
```

```
clrscr();
```

```
break;
```



case 3 :

```
printf("Compare DMC wjth PID : Simulation \n");
```

```
Answer();
```

```
Graphic();
```

```
PID_Simulate();
```

```
IAE();
```

```
printf("PID : IAE = %f\n",T_e);
```

```
DMC_Simulate();
```

```
IAE();
```

```
printf("DMC : IAE = %f\n",T_e);
```

```
getch();
```

```
closegraph();
```

```
break;
```

```
default :
```

```
goto restart;
```

```
}
```

```
}
```

```
void Answer(void)
```

```
{
```

```
printf(" What do you would like to test ? \n");
```

```
printf(" 1) Setpoint change.\n");
```

```
printf(" 2) Load change.\n");
```

```

printf(" 3) Exit.\n");

printf(" Please select the answer : "); scanf("%d",&ans);

switch(ans)
{
case 1 :

printf("The frist setpoint is : "); scanf("%f",&ref[1]);
printf("The second setpoint is : "); scanf("%f",&ref[2]);

w[1] = 0;

break;

case 2 :

printf("The Setpoint is : "); scanf("%f",&ref[1]);

ref[2] = ref[1];

printf("The frist disturbance is : "); scanf("%f",&w[1]);

break;

default :

exit(1);

break;

}

}

void Plant_Simulate()

{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float in[Number+5],noise;

float x1,x2,x3,x4,x5,x6;

float y1,y2,y3,y4,y5,y6;

float big = 69.4;

float G_plant = 19.48;

u[0] = 0;

in[0] = 0;

noise = 0;

y[0] = 0;

y[1] = 0;

kd = k-dead;

if(kd < 0) kd = 0;

if( ans == 2 && k >= 250 && k <= 254) noise = w[1];

in[k] = u[kd]+noise;

if( in[k] <= 0 ) in[k] = 0;

y1 = y[k];

x1 = (in[k]-G_plant*sqrt(y1))/big;

y2 = y[k]+0.25*T*x1;

x2 = (in[k]-G_plant*sqrt(y2))/big;

y3 = y[k]+T*x1/8+T*x2/8;

x3 = (in[k]-G_plant*sqrt(y3))/big;

y4 = y[k]-0.5*T*x2+T*x3;

x4 = (in[k]-G_plant*sqrt(y4))/big;

y5 = y[k]+3*T*x1/16+9*T*x4/16;

x5 = (in[k]-G_plant*sqrt(y5))/big;

```

```
y6 = y[k]-3*T*x1/7+2*T*x2/7+12*T*x3/7-12*T*x4/7+8*T*x5/7;
```

```
x6 = (in[k]-G_plant*sqrt(y6))/big;
```

```
y[k+1] = y[k]+T*(7*x1+32*x3+12*x4+32*x5+7*x6)/90;
```

```
if( y[k+1] < 0 ) y[k+1] = 0;
```

```
}
```

```
void DMC_Initial()
```

```
{
```

```
int i,j;
```

```
y[0] = 0;
```

```
y[1] = 0;
```

```
u[0] = 0;
```

```
udelta[0] = 0;
```

```
Creat_K();
```

```
for( i = 0; i <= N-1; i++)
```

```
{
```

```
ymodel[i] = 0;
```

```
}
```

```
}
```

```
void DMC_Agorithm()
```

```
{
```

```
int i,j;
```

```
// Compute the control signals.
```

```
for(i=0; i<=N-2; i++)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
  ymodel[k+i] = ymodel[k+j]+step[i+2]*udelta[k-1];
}

ymodel[k+N-1] = ymodel[k+N-2]+(step[N+1]-step[N])*udelta[k-1];

udelta[k] = 0;

for(j=1;j<=P;j++)
{
  error[k+j] = yset - (ymodel[k+j]+y[k]-ymodel[k]);
  udelta[k] += Gain_DMC{1}[j]*error[k+j];
}
u[k] = u[k-1]+udelta[k];

if( u[k] > up_limit )           // MAXIMUM input
{
  u[k] = up_limit;
  udelta[k] = u[k]-u[k-1];
}

if( u[k] < low_limit )         // MINIMUM inut
{
  u[k] = low_limit;
  udelta[k] = u[k]-u[k-1];
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void DMC_Simulate()
{
    DMC_Initial();
    for( k = 1; k < Number; k++)
    {
        yset = Setpoint();
        DMC_Agorithm();
        Plant_Simulate();
        setcolor(WHITE);
        Plot_y();
        Plot_u();
    }
}

void PID_Initial()
{
    y[0] = 0;
    y[1] = 0;
    error[0] = 0;
    u[0] = 0;
}

```

```

void PID_Simulate()

```

```

{

```

```

    PID_Initial();

```



```
for ( k = 1; k < Number; k++)
```

```
{
```

```
    yset = Setpoint();
```

```
    // Compute the control signals.
```

```
    PID_Agorithm();
```

```
    Plant_Simulate();
```

```
    setcolor(LIGHTMAGENTA);
```

```
    Plot_y();
```

```
    Plot_u();
```

```
}
```

```
}
```

```
void PID_Agorithm()
```

```
{
```

```
    int k1d;
```

```
    out1[0] = 0;
```

```
    out2[0] = 0;
```

```
    k1d = k-1-dead;
```

```
    if( k1d < 0 ) k1d = 0;
```

```
    out1[k] = seta1*out1[k-1]+seta2*u[k1d];
```

```
    out2[k] = seta1*out2[k-1]+seta2*u[k-1];
```

```
    error[k] = yset-(y[k]-out1[k]-out2[k]);
```

```
    if( k <= 2)
```

```
        u[k] = u[k-1]+ KP*( (error[k]-error[k-1]) + (T*error[k]/KI) + (KD*(error[k]-2*error[k-1])/T) );
```

```
    else
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

u[k] = u[k-1]+ KP*( (error[k]-error[k-1]) + (T*error[k]/Ki) + (KD*(error[k]-2*error[k-1]+error[k-2])/T) );
if(u[k] > up_limit)   u[k] = up_limit;
if(u[k] < low_limit)  u[k] = low_limit;
}

```

```

void Plot_y()

```

```

{
if( k == 1)
{
moveto(80+1,420);
lineto(80+1,420-2*y[k]);
}
else
{
moveto(80+(k-2)+1,420-2*y[k-1]);
lineto(80+(k-1)+1,420-2*y[k]);
}
}
}

```

```

void Plot_u()

```

```

{
if( k == 1)
{
moveto(80+1,230);
lineto(80+1,230-u[k]/2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
else
{
moveto(80+k-2+1,230-u[k-1]/2);
liñeto(80+k-1+1,230-u[k]/2);
}
}
}

```

```

void Creat_K(void)
{
int    i,j,l,i1,i1d;
double temp;
double s[P+1][M+1],stran[M+1][P+1];
double StranS[M+1][M+1],SF[M+1][M+1],invert[M+1][M+1],F[M+1][M+1];
float  input[N+10];

// Creat Matrix S

step[0] = 0;
step[1] = 0;
input[0] = 0;

for(i=1; i<= N+1; i++)
{
i1 = i-1;

if(i1 < 0)  i1 = 0;

i1d = i1-dead;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(i1d < 0) i1d = 0;

input[i] = 1;

step[i] = seta1*step[i1]+seta2*input[i1d];
}

for(l = 0; l <= M-1; l++)

{

for(j = 1; j <= P; j++)

{

i = j-1;

if(i <= 1) i = 1;

s[j][l+1] = step[i];

stran[l+1][j] = step[i]; // Transpost of c

}

}

// Creat Matrix [ stran * s ]

for(i = 1; i <= M; i++)

{

for(j = 1; j <= M; j++)

{

temp = 0;

for(l = 1; l <= P; l++)

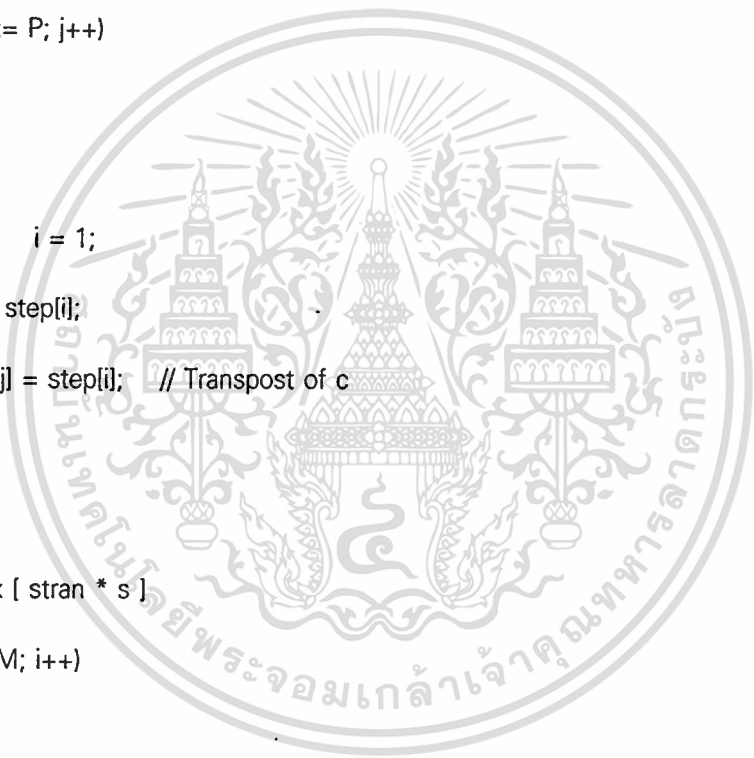
temp += stran[i][l]*s[l][j];

StranS[i][j] = temp;

}

}

```



```

// Creat Matrix [ F ]
for(i = 1; i <= M; i++)
{
for(j = 1; j <= M; j++)
{
F[i][j] = 0;
}
F[i][i] = f*f;
}
// Creat Matrix [ StranS +F ]
for(i = 1; i <= M; i++)
{
for(j = 1; j <= M; j++)
{
SF[i][j] = StranS[i][j] + F[i][j];
}
}
// Creat Invert Matrix
Invert(SF,invert);
// Creat [ invert * stran ]
for(i = 1; i <= M; i++)
{
for(j = 1; j <= P; j++)
{
temp = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(l = 1; l <= M; l++)
temp += invert[l][l]*stran[l][j];
Gain_DMC[i][j] = (float)temp;
}
}
return;
}

void Invert(double d[][M+1], double e[][M+1])
{
int i,j,l,r;
double pivot, Temp, sum, Q;
double A[M+1][2*M+1], test[M+1][M+1];
for( i = 1; i <= M; i++ )
{
for( j = 1; j <= M; j++ )
{
A[i][j] = d[i][j];
}
for( j = M+1; j <= 2*M; j++ )
{
A[i][j] = 0;
}
A[i][M+i] = 1;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// Searching for Pivot element

l = 0;

while (l < M)
{
    r = l;
    pivot = A[l][l];
    for (i = l+1; i <= M; i++)
    {
        if (fabs(A[i][l]) > fabs(pivot))
        {
            pivot = A[i][l];
            r = i;
        }
    }
    if (pivot == 0)
    {
        closegraph();
        clrscr();
        printf("Matrix [A] is singular. Cannot solve.");
        getch();
        exit(1);
    }
    // Swiching row
    for (j = 1; j <= 2*M; j++)
    {
        Temp = A[l][j];

```



```

A[l][j] = A[r][j];
A[r][j] = Temp;
}

// Reduce Matrix [A] to upper Triangular Matrix
for(i = l+1; i <= M; i++)
{
Q = A[i][l];
for(j = 1; j <= 2*M; j++)
{
A[i][j] = A[i][j] - (Q/A[l][l])*A[l][j];
}
}
if(l <= M-1)
{
goto lable;
}

// Reduce Matrix [ A ] to lower Triangular Matrix
l = M+1;
lable2 : l = l-1;
for(i = l-1; i >= 1; i-)
{
Q = A[i][l];
for (j=1; j <= 2*M; j++)
{

```



```

    }
  }
  if(l >= 2)
  {
    goto lable2;
  }

// Reduce [ A ] to [ 1 ]
for(i=1; i <= M; i++)
{
  Q = A[i][i];
  for(j=1; j <= 2*M; j++)
  {
    A[i][j] = A[i][j]/Q;
  }
}

// Create [ e ] from [ A ]
for(i=1; i <= M; i++)
{
  for(j=1; j <= M; j++)
  {
    e[i][j] = A[i][M+j];
  }
}

for(i = 1; i <= M; i++)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(j = 1; j <= M; j++)
{
    Temp = 0;
    for(l = 1; l <= M; l++)
    Temp += d[i][l]*e[l][j];
    test[i][j] = Temp;
}
}
return;
}

```

```

void Plant_Lab()
{
    int i,j,k1;
    int dif;
    long int t{Number+10};
    struct time start, now;
    u[0] = 0;
    y[0] = 0;
    //Close valve
    outportb(PORT+0,15);
    outportb(PORT+1,255);
    printf("\nOpen the water pump\n");
    printf("\n Enter to start \n");
    getch();
}

```



```

clrscr();

Graphic();

// Beginning the Experiment

if (choice == 1) DMC_Initial();

if (choice == 2) PID_Initial();

gettime(&start);

t[0] = 360000.0*start.ti_hour+6000.0*start.ti_min+100*start.ti_sec+start.ti_hund;

for(k = 1; k <= Number; k++)

{

dif = 0.0;

while(dif < T*100)

{

gettime(&now);

t[k] = 360000.0*now.ti_hour+6000.0*now.ti_min+100*now.ti_sec+ now.ti_hund;

dif = t[k]-t[k-1];

}

Analog_to_Digital();

// Compute the control signals.

yset = Setpoint();

if (choice == 1) DMC_Agorithm();

if (choice == 2) PID_Agorithm();

Digital_to_Analog();

Plot_y();

Plot_u();

```

```

//Close valve
outportb(PORT+0,15);
outportb(PORT+1,255);
printf("\nClose the water pump\n");
getch();
//clear buffer
outportb(PORT+0,0);
outportb(PORT+1,0);
}

void Graphic()
{
int i;
char string[5];
int driver = DETECT, mode = VGAHI, errorgraph;
clrscr();
initgraph(&driver,&mode,"\\TC\\BGI");
errorgraph = graphresult();
if(errorgraph != 0)
{
printf("Graphics Function Error : %s\n",grapherrormsg(errorgraph));
printf("Press key to exit :");
getch();
exit(1);
}
}

```



```

setcolor(WHITE);

rectangle(80,80,580,230);

rectangle(80,270,580,420);

settextjustify(1,2);

for(i = 0; i <= 10; i++)

    {

        line(80+i*50,420,80+i*50,415);

        line(80+i*50,230,80+i*50,225);

    }

for(i = 0; i <= 5; i++)

    {

        itoa(i*200,string,10);

        moveto(80+i*100,430);

        outtext(string);

        moveto(80+i*100,240);

        outtext(string);

    }

settextjustify(2,1); // RIGHT_TEXT, CENTER_TEXT

for(i = 0; i <= 3; i++)

    {

        setcolor(WHITE);

        line(80,270+i*50,85,270+i*50);

        itoa(i*25,string,10);

        moveto(73,420-i*50);

        outtext(string);

```



```

int kd;

VoltOut[0] = 5;

kd = k-dead;

if (kd < 0) kd = 0;

VoltOut[k] = 5.075-0.018*u[k];

VoltDigi = VoltOut[kd]*819.0;

HiOut = VoltDigi/256;

LoOut = VoltDigi%256;

outportb(PORT+0,HiOut);
outportb(PORT+1,LoOut);
}

void Analog_to_Digital(void)
{
unsigned char Hiln,LoIn;

float VoltIn;

outportb(BASE+10,9); // channel 1

outportb(BASE+11,1);

outportb(BASE+12,1);

do

{

Hiln = inportb(BASE+5);

}

while (Hiln >= 16);

LoIn = inportb(BASE+4);

```

```
VoltIn = (Hiln*256.0+LoIn)*10.0/4095.0-5.0;
```

```
y[k] = -20.66+19.93*VoltIn;
```

```
}
```

```
float Setpoint()
```

```
{
```

```
float y_d;
```

```
if ( k >= 1 && k < 250 ) y_d = ref[1];
```

```
else if ( k >= 250 && k <= Number ) y_d = ref[2];
```

```
return(y_d);
```

```
}
```

```
void IAE(void)
```

```
{
```

```
float e[Number+10];
```

```
T_e = 0;
```

```
for( k = 200; k < 400; k++)
```

```
{
```

```
yset = Setpoint();
```

```
e[k] = fabs(T*yset-T*(y[k]+y[k+1])/2);
```

```
T_e += e[k];
```

```
}
```

```
return;
```

```
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ดิถีทั้งห้ามิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void Head(void)
{
    settextstyle(0,0,1);
    settextjustify(0,1);
    setcolor(WHITE);
    outtextxy(180,100,"Set point");
    outtextxy(364,100,"DMC");
    outtextxy(505,100,"PID");
    setlinestyle(DASHED_LINE,1,1);
    setcolor(GREEN);
    line(130,100,170,100);
    setlinestyle(SOLID_LINE,1,1);
    setcolor(WHITE);
    line(314,100,354,100);
    setcolor(LIGHTMAGENTA);
    line(455,100,495,100);
}

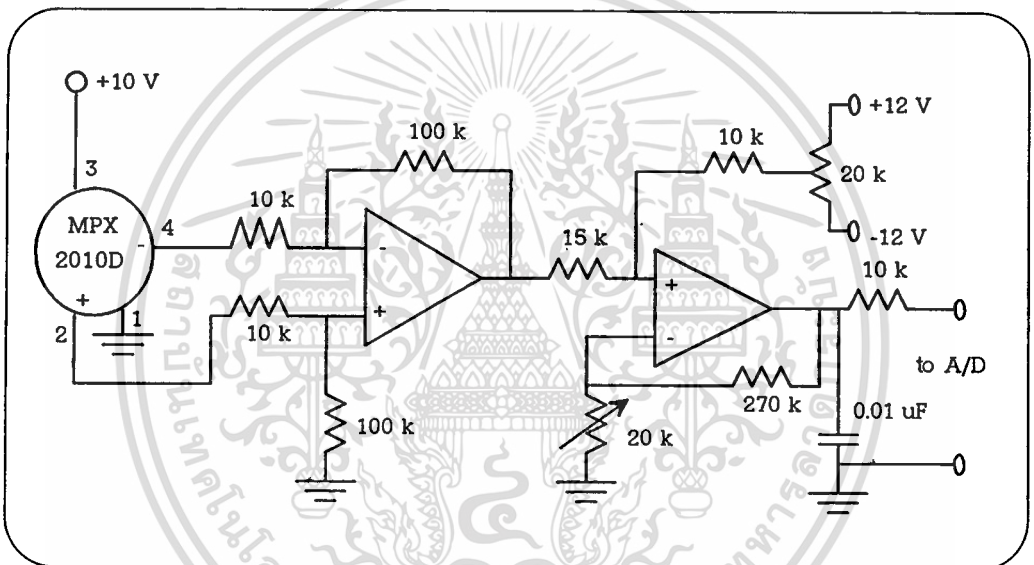
```



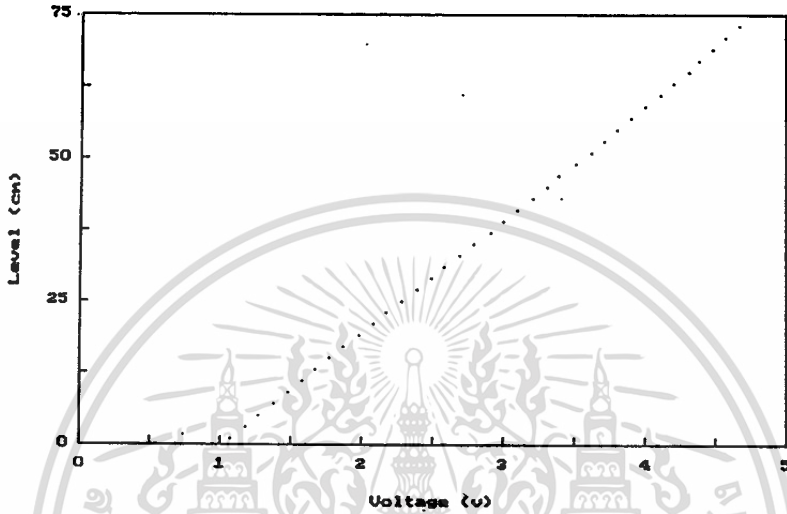
ภาคผนวก จ

Pressure transmitter และวงจรขยายสัญญาณ

การวัดระดับความสูงของน้ำในถังใช้วิธีวัดแรงดันของน้ำที่กั้นถังด้วย Pressure transmitter MPX 2010 ของ Motorola ซึ่งได้เอาท์พุทเป็นแรงดันไฟฟ้าประมาณ 0-25 mV และขยายสัญญาณเป็น 1-5 V ด้วยวงจрдังภาพที่ จ.1



ภาพที่ จ.1 วงจรขยายจาก Pressure transmitter เป็นสัญญาณ 1-5 V ต่อเข้า A/D card



ภาพที่ ๑.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับแรงดันไฟฟ้า

จากการทดลองได้เก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงของน้ำกับแรงดันไฟฟ้าได้เป็นกราฟภาพที่ ๑.2 จากนั้นใช้วิธี Least square หาสมการความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับแรงดันไฟฟ้าได้เป็นสมการเส้นตรง เขียนได้เป็น

$$Level = -20.66 + 19.93 * Voltage \quad (๑.1)$$

0 to 10 kPa (0 to 1.45 PSI) On-Chip Temperature Compensated & Calibrated, Silicon Pressure Sensors

**MPX2010
MPX2012
SERIES**
Motorola Preferred Devices

**X-ducer™
SILICON
PRESSURE SENSORS**

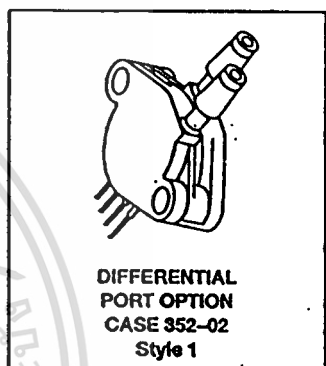
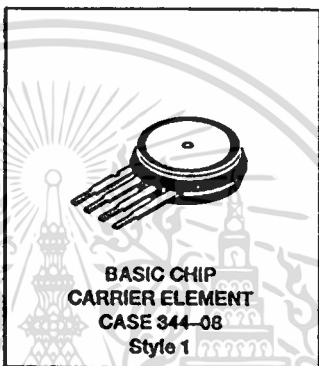
The MPX2010 and MPX2012 series silicon piezoresistive pressure sensors provide a very accurate and linear voltage output — directly proportional to the applied pressure. These sensors house a single monolithic silicon die with the strain gauge and thin-film resistor network integrated on each chip. The sensor is laser trimmed for precise span, offset calibration and temperature compensation.

Features

- Temperature Compensated over 0°C to +85°C
- Full Scale Span Calibrated to 25 mV (typical)
- Unique Silicon Shear Stress Strain Gauge
- ±1.0% (Max) Linearity
- Easy to use Chip Carrier Package Options
- Ratioetric to Supply Voltage
- Differential and Gauge Options

Application Examples

- Respiratory Diagnostics
- Air Movement Control
- Level Indicators
- Controllers
- Pressure Switching



Pin Number			
1	2	3	4
Ground	+V _{out}	V _S	-V _{out}

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Overpressure ⁽⁸⁾ (P1 > P2)	P _{max}	75	kPa
Burst Pressure ⁽⁸⁾ (P1 > P2)	P _{burst}	100	kPa
Storage Temperature	T _{stg}	-50 to +150	°C
Operating Temperature	T _A	-40 to +125	°C

VOLTAGE OUTPUT versus APPLIED DIFFERENTIAL PRESSURE

The differential voltage output of the X-ducer is directly proportional to the differential pressure applied.

The output voltage of the differential or gauge sensor increases with increasing pressure applied to the pressure side (P1) relative to the vacuum side (P2). Similarly, output voltage increases as increasing vacuum is applied to the vacuum side (P2) relative to the pressure side (P1).

Figure 1 shows a block diagram of the internal circuitry on the stand-alone pressure sensor chip.

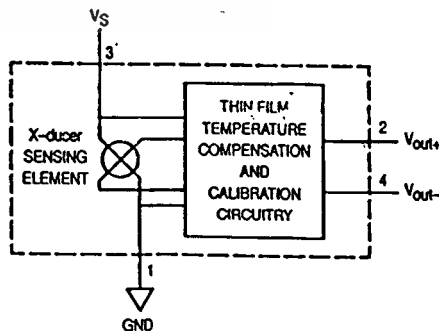


Figure 1. Temperature Compensated Pressure Sensor Schematic

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MPX2010 MPX2012 SERIES

OPERATING CHARACTERISTICS ($V_S = 10\text{ Vdc}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, $P1 > P2$)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	
Pressure Range ⁽¹⁾	POP	0	—	10	kPa	
Supply Voltage ⁽²⁾	V_S	—	10	16	Vdc	
Supply Current	I_o	—	6.0	—	mAdc	
Full Scale Span ⁽³⁾	V_{FSS}	24	25	26	mV	
Offset ⁽⁴⁾	V_{off}	MPX2010 MPX2012	—1.0 —1.5	— —	1.0 1.5	mV
Sensitivity		$\Delta V/\Delta P$	—	2.5	—	mV/kPa
Linearity ⁽⁵⁾	—	—1.0	—	1.0	% V_{FSS}	
Pressure Hysteresis ⁽⁵⁾ (0 to 10 kPa)	—	—	± 0.1	—	% V_{FSS}	
Temperature Hysteresis ⁽⁵⁾ (-40°C to $+125^\circ\text{C}$)	—	—	± 0.5	—	% V_{FSS}	
Temperature Effect on Full Scale Span ⁽⁵⁾	TCV_{FSS}	—1.0	—	1.0	% V_{FSS}	
Temperature Effect on Offset ⁽⁵⁾	TCV_{off}	—1.0	—	1.0	mV	
Input Impedance	Z_{in}	1300	—	2550	Ω	
Output Impedance	Z_{out}	1400	—	3000	Ω	
Response Time ⁽⁶⁾ (10% to 90%)	t_R	—	1.0	—	ms	
Offset Stability ⁽⁵⁾	—	—	± 0.5	—	% V_{FSS}	

MECHANICAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Weight (Basic Element Case 344)	—	—	2.0	—	Grams
Warm-Up	—	—	15	—	Sec
Cavity Volume	—	—	—	0.01	in^3
Volumetric Displacement	—	—	—	0.001	in^3
Common Mode Line Pressure ⁽⁷⁾	—	—	—	690	kPa

NOTES:

- 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
- Device is ratiometric within this specified excitation range. Operating the device above the specified excitation range may induce additional error due to device self-heating.
- Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
- Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure, using end point method, over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C .
 - Offset Stability: Output deviation, after 1000 temperature cycles, -40 to 125°C , and 1.5 million pressure cycles, with zero differential pressure applied.
 - T_C Span: Output deviation at full rated pressure over the temperature range of 0 to 85°C , relative to 25°C .
 - T_C Offset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0 to 85°C , relative to 25°C .
- Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
- Common mode pressures beyond specified may result in leakage at the case-to-lead interface.
- Exposure beyond these limits may cause permanent damage or degradation to the device.

MPX2010 MPX2012 SERIES

ON-CHIP TEMPERATURE COMPENSATION and CALIBRATION

Figure 2 shows the output characteristics of the MPX2010 series at 25°C. The output is directly proportional to the differential pressure and is essentially a straight line.

The effects of temperature on full scale span and offset are very small and are shown under Operating Characteristics.

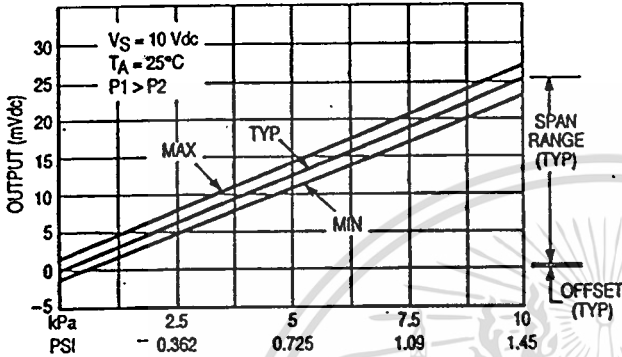


Figure 2. Output versus Pressure Differential

This performance over temperature is achieved by having both the shear stress strain gauge and the thin-film resistor circuitry on the same silicon diaphragm. Each chip is dynamically laser trimmed for precise span and offset calibration and temperature compensation.

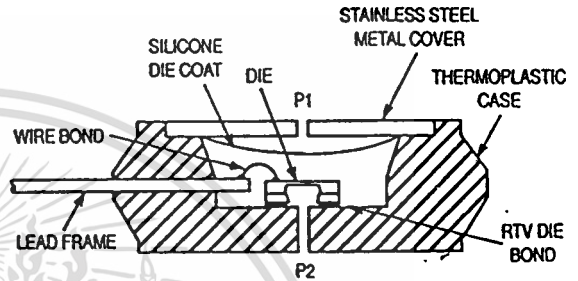


Figure 3. Cross-Sectional Diagram (not to scale)

Figure 3 illustrates the differential/gauge die in the basic chip carrier (Case 344). A silicone gel isolates the die surface and wire bonds from harsh environments, while allowing the pressure signal to be transmitted to the silicon diaphragm.

The MPX2010 series pressure sensor operating charac-

teristics and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media other than dry air may have adverse effects on sensor performance and long term reliability. Contact the factory for information regarding media compatibility in your application.

LINEARITY

Linearity refers to how well a transducer's output follows the equation: $V_{out} = V_{off} + \text{sensitivity} \times P$ over the operating pressure range. There are two basic methods for calculating nonlinearity: (1) end point straight line fit (see Figure 4) or (2) a least squares best line fit. While a least squares fit gives the "best case" linearity error (lower numerical value), the calculations required are burdensome.

Conversely, an end point fit will give the "worst case" error (often more desirable in error budget calculations) and the calculations are more straightforward for the user. Motorola's specified pressure sensor linearities are based on the end point straight line method measured at the midrange pressure.

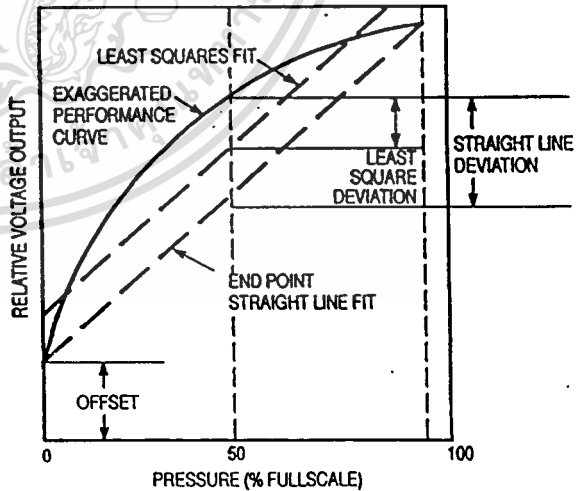


Figure 4. Linearity Specification Comparison

ประวัติผู้เขียน

นายฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน เกิดวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ.2513 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2534

