

การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ขั้นต้นวิธีตัวกรองคาลมานสำหรับกระบวนการเคมี



นายวีรยุทธ เลิศบำรุงสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0359-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

KALMAN FILTER ALGORITHM SOFTWARE DESIGN AND DEVELOPMENT
FOR CHEMICAL PROCESSES



Mr. Veerayut Lersbamrungsuk

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0359-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ขั้นต้นวิธีตัวกรองคาดการณ์สำหรับ
กระบวนการเคมี
โดย นายวีรยุทธ เลิศบำรุงสุข
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติสุขภกร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติสุขภกร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธงไชย ศรีนพคุณ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. มนต์รี วงศ์ศรี)

นายวีรยุทธ เลิศบำรุงสุข: การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ขั้นตอนวิธีตัวกรองคาลมานสำหรับ
กระบวนการเคมี (KALMAN FILTER ALGORITHM SOFTWARE DESIGN AND DEVELOPMENT
FOR CHEMICAL PROCESSES) อ.ที่ปรึกษา: ผศ.ดร. ไพศาล กิตติศุภกร: 139 หน้า.

ISBN 974-13-0359-9

เทคนิคการควบคุมที่อาศัยแบบจำลอง (model-based control) ต้องการการใช้ค่าของสเตทและพารามิเตอร์ อย่างไรก็ตาม ระบบทางเคมีโดยทั่วไปอาจไม่สามารถทราบค่าสเตทและพารามิเตอร์ได้ทั้งหมด เทคนิคการประมาณค่าจึงเป็นที่ต้องการ ตัวกรองคาลมาน (kalman filter) เป็นเทคนิคการประมาณค่าซึ่งพัฒนามาจากวิธีการกำลังสองน้อยสุด (least-square) ซึ่งได้รับความนิยมอย่างมากในปัญหาการควบคุมทางอุตสาหกรรมเคมี เนื่องจากขั้นตอนการคำนวณเป็นแบบวิธีเรียกซ้ำ (recursive) ที่สามารถนำมาซึ่งการคำนวณที่มีประสิทธิภาพและให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้ตัวกรองคาลมานยังทำได้ค่อนข้างลำบากเนื่องจากขั้นตอนการคำนวณที่ยุ่งยาก จึงทำให้มีความต้องการซอฟต์แวร์ตัวกรองคาลมาน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ตัวกรองคาลมาน 2 ซอฟต์แวร์ ซอฟต์แวร์ชิ้นแรกคือ kSTAPEN+ ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เพื่อใช้สำหรับฝึกการใช้งานตัวกรองคาลมาน ซอฟต์แวร์ชิ้นที่สองคือ ซอฟต์แวร์คอมไพเลอร์ kSTAPEN-C ในซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ผู้ใช้สามารถกำหนดระบบที่ต้องการศึกษาด้วยตนเองและเลือกค่าสเตทและพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณได้ ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ กับเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ จากนั้นได้ทำการเทียบผลการจำลองที่ได้กับผลการจำลองที่เขียนขึ้นด้วย Matlab ซึ่งพบว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดสอบซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ กับระบบอื่นๆ เพิ่มเติม คือ เครื่องให้ความร้อน เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง และเครื่องป้อนสารขนาดเล็ก ในส่วนของซอฟต์แวร์ kSTAPEN-C เป็นคอมไพเลอร์ที่ได้พัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีของคอม (component object model, COM) จึงทำให้สามารถใช้คอมไพเลอร์ที่สนับสนุนการใช้งานคอม เช่น บอร์แลนด์เดลไฟ (Borland Delphi) วิวอลเบสิก (Visual Basic) เป็นต้น ในงานวิจัยได้ทดสอบคอมไพเลอร์ kSTAPEN-C กับบอร์แลนด์เดลไฟและวิวอลเบสิก เมื่อเปรียบเทียบผลการประมาณที่ได้กับผลที่ได้จาก kSTAPEN+ พบว่าใกล้เคียงกัน

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

4170531621: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: KALMAN FILTER / ESTIMATION / SOFTWARE

VEERAYUT LERSBAMRUNGSUK: KALMAN FILTER ALGORITHM SOFTWARE DESIGN AND DEVELOPMENT FOR CHEMICAL PROCESSES. THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. PAISAN KITTISUPASORN, PhD. 139 pp. ISBN 974-13-0359-9.

Model based control techniques require values of states and parameters. However, in most of chemical systems, they are not always possible to measure all states and parameters. Therefore, estimation techniques are required. The Kalman filter, an estimation technique, has been developed from a least-square method. The Kalman filter has received more attention on many control problems in chemical industry because the filter algorithm is a recursive method which can provide an efficient computation and good estimation results. However, the application of the Kalman filter is not easy due to its calculation procedure. As a result, Kalman filter software is needed.

The purpose of this research is to design and develop two software programs based on Kalman filter. The first one, named kSTAPEN+, is a software program used for Kalman filter training. The other one, named kSTAPEN-C, is a software component based on Kalman filter. In kSTAPEN+, users can define their own systems including states and parameters to be estimated. After running the program, estimation results are given. This program has been tested with an exothermic batch reactor and the estimates obtained from the kSTAPEN+ have been compared to those obtained from the program written on Matlab. Results have shown that both programs can give equally same estimates. Furthermore, the program has been tested with a heater, a stirred-tank reactor and a microfeeder. In kSTAPEN-C, the component has been developed by using Component Object Model (COM) technology, it can be used with all compilers which support COM technology, such as Borland Delphi, Visual Basic. The component has been tested with Borland Delphi and Visual Basic. The estimates obtained from kSTAPEN-C have been compared to those obtained from kSTAPEN+. Results have shown that both kSTAPEN-C and kSTAPEN+ are equivalent.

Department Chemical Engineering Student's signature

Field of study Chemical Engineering Advisor's signature

Academic year 2001

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องในการวางแผนตลอดจนข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ ประธานกรรมการ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธงไชย ศรีนพคุณ และ อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และรุ่นน้องนิสิต ร่วมสาขาวิชาการควบคุมกระบวนการที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และขอขอบคุณพี่ชายและน้องสาว ซึ่งให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ถ

บทที่

1	บทนำ	1
	1.1.ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2.วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3.ขอบเขตของการวิจัย	2
	1.4.ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	3
	1.5.ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากผลการวิจัย	3
	1.6.ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย	4
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
	2.1. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	6
	2.2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองคาลมาน	8
	2.3. การพัฒนาซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองคาลมาน	10
3	ตัวกรองคาลมาน	15
	3.1. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการประมาณค่า	16
	3.1.1. คุณสมบัติของการประมาณค่า	16

3.1.2. การคำนวณแบบวิธีเรียกซ้ำ	17
3.1.3. การประมาณค่าแบบวิธีกำลังสองน้อยสุด	19
3.1.4. ตัวสังเกตค่า	21
3.2. ตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง	24
3.3. ตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่องอีกรูปแบบหนึ่ง	30
3.4. ตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่อง	34
3.5. ตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย	37
3.5. การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองคาลมาน	42
4 การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์	47
4.1. การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	47
4.1.1. ส่วนของขั้นตอนการคำนวณ	47
4.1.2. ส่วนช่วยเหลือผู้ใช้งาน	54
4.2. การออกแบบและพัฒนาคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมาน	55
4.2.1. ส่วนการรับค่าข้อมูลเข้าสู่คอมโพเนนต์	55
4.2.2. ส่วนการคำนวณ	56
4.2.3. ส่วนการส่งค่าข้อมูลออกจากคอมโพเนนต์	56
5 การทดสอบซอฟต์แวร์	57
5.1. การทดสอบซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	57
5.1.1. เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์	57
5.1.2. เครื่องให้ความร้อน	74
5.1.3. เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง	82
5.1.4. เครื่องป้อนสารขนาดเล็ก	92
5.2. การทดสอบการใช้งานคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมาน	99
5.2.1. การทดสอบคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมานกับบอร์ดแลนดเดิลไฟ.....	99
5.2.2. การทดสอบคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมานกับวิซวลเบสิก	103

บทที่	หน้า	
6	สรุปผล วิจัย และข้อเสนอแนะ	108
6.1.	สรุปผลงานวิจัย	108
6.2.	วิจารณ์งานวิจัย	109
6.3.	ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย	110
6.4.	แนวทางในการทำวิจัยต่อเนื่อง	110
รายการอ้างอิง		112
ภาคผนวก		115
	ภาคผนวก ก คู่มือการใช้งานซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	116
	ภาคผนวก ข คู่มือการใช้งานคอมพิวเตอร์ส่วนตัวของศาลमान	130
	ภาคผนวก ค ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	136
ประวัติผู้วิจัย		139

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	เปรียบเทียบขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง ที่ได้จากในหัวข้อ 3.2 และ 3.3	33
ตารางที่ 3.2	เปรียบเทียบขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง และตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย	41
ตารางที่ 5.1	ค่าสมบัติทางกายภาพของสารและข้อมูลของระบบ	60
ตารางที่ 5.2	ค่าสภาวะเริ่มต้น	60
ตารางที่ 5.3	เปรียบเทียบค่า IAE และ ISE ของ T_r และ Q_r (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+)	67
ตารางที่ 5.4	ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน	69
ตารางที่ 5.5	เปรียบเทียบค่า IAE และ ISE ของ T_r และ Q_r (ผลจาก Matlab)	73
ตารางที่ 5.6	ความหมายของสัญลักษณ์และค่าที่ใช้ในระบบเครื่องให้ความร้อน	75
ตารางที่ 5.7	ค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวควบคุมแบบพีไอดีและ ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	77
ตารางที่ 5.8	ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน	77
ตารางที่ 5.9	ค่า IAE และค่า ISE ของการควบคุมอุณหภูมิขาออก จากเครื่องให้ความร้อน (T_o)	81
ตารางที่ 5.10	ความหมายของสัญลักษณ์และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา	84
ตารางที่ 5.11	ค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวควบคุมแบบพีไอดีและ ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	85
ตารางที่ 5.12	ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน	86
ตารางที่ 5.13	เปรียบเทียบค่า IAE และ ISE ของการควบคุม \tilde{T}	87
ตารางที่ 5.14	ความหมายของสัญลักษณ์และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน การจำลองกระบวนการ	94

ตารางที่ 5.15	ค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวควบคุมแบบพีไอดีและ ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	95
ตารางที่ 5.16	ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน	95
ตารางที่ 5.17	เปรียบเทียบค่า IAE และ ISE ของการควบคุมความสูง ของสารภายในฮอปเปอร์ (h)	96
ตารางที่ 5.18	ความหมายของสัญลักษณ์และค่าต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา	101
ตารางที่ 5.19	ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวกรองคาลมาน	102
ตารางที่ ก.1	ความหมายและสัญลักษณ์ที่กำหนดขึ้นโดยซอฟต์แวร์	122
ตารางที่ ข.1	ขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานที่ใช้ในคอมโพเนนท์	127
ตารางที่ ข.2	คำสั่งของคอมโพเนนท์ที่สามารถเรียกใช้ในบอร์ดแลนดเดิลไฟ	129
ตารางที่ ข.3	คำสั่งของคอมโพเนนท์ที่สามารถเรียกใช้ในวิชวลเบสิก	130

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ซอฟต์แวร์ kSTAPEN	11
รูปที่ 2.2 โปรแกรม Matlab	12
รูปที่ 2.3 คอมพิวเตอร์บอร์ดเดสก์ท็อป	13
รูปที่ 2.4 คอมพิวเตอร์วิซวลเบสิก	14
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง	29
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการทำงานของตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่องร่วมกับระบบ	30
รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณอีกรูปแบบหนึ่งของตัวกรองคาลมาน	33
รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่อง	37
รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย	41
รูปที่ 3.6 กรณีที่ 1 $x_{k k,t=0}=3$, $P_{k k,t=0}=[1]$, $Q=[1]$, $R=[1]$	44
รูปที่ 3.7 กรณีที่ 2 $x_{k k,t=0}=3$, $P_{k k,t=0}=[100]$, $Q=[1]$, $R=[1]$	45
รูปที่ 3.8 กรณีที่ 3 $x_{k k,t=0}=3$, $P_{k k,t=0}=[1]$, $Q=[100]$, $R=[1]$	45
รูปที่ 3.9 กรณีที่ 4 $x_{k k,t=0}=3$, $P_{k k,t=0}=[1]$, $Q=[1]$, $R=[100]$	46
รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	50
รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ กรณีรันแบบลูปเปิด	51
รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ กรณีรันแบบลูปเปิดร่วมกับตัวกรองคาลมาน	52
รูปที่ 4.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ กรณีรันแบบลูปปิดร่วมกับตัวกรองคาลมาน	53
รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมาน	56
รูปที่ 5.1 แผนภาพการควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบทซ์	58
รูปที่ 5.2 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, Tr-X5, Tj-X6, Tjsp-U1sp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, Qr, Qr(est)-Xcap4) กรณีปกติ (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+)	64

- รูปที่ 5.3 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, Tr-X5, Tj-X6, Tj_{sp}-U1sp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, Qr, Qr(est)-Xcap4) กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 0.2 °C (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+) 64
- รูปที่ 5.4 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, Tr-X5, Tj-X6, Tj_{sp}-U1sp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, Qr, Qr(est)-Xcap4) กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+) 65
- รูปที่ 5.5 ผลการประมาณค่า UA กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบ มีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ (UA, UA(est)-Xcap6, ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+) .. 65
- รูปที่ 5.6 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, Tr-X5, Tj-X6, Tj_{sp}-U1sp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, Qr, Qr(est)-Xcap4) กรณีค่าความร้อนของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+) 66
- รูปที่ 5.7 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, Tr-X5, Tj-X6, Tj_{sp}-U1sp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, Qr, Qr(est)-Xcap4) กรณีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+) 66
- รูปที่ 5.8 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, Tr-X5, Tj-X6, Tj_{sp}-U1sp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, Qr, Qr(est)-Xcap4) กรณีค่าโมลเริ่มต้นของสาร A และ B เพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+) 67
- รูปที่ 5.9 ผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (Qr, Qr(est)-Xcap4) กรณีค่าโมลเริ่มต้นของสาร A และ B เพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+) 69
- รูปที่ 5.10 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, -Tr, -.Tj, --Tj_{sp}, .Trsp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, -Qr, -.Qr est.) กรณีปกติ (ผลจาก Matlab) 71

รูปที่ 5.11 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, -Tr, -Tj, --Tjssp, ..Trsp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, -Qr, -.Qr est.) กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 0.2 °C (ผลจาก Matlab)	71
รูปที่ 5.12 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, -Tr, -Tj, --Tjssp, ..Trsp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, -Qr, -.Qr est.) กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจาก Matlab)	72
รูปที่ 5.13 ผลการประมาณค่า UA (-UA, -.UA est.) กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจาก Matlab)	72
รูปที่ 5.14 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, -Tr, -Tj, --Tjssp, ..Trsp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, -Qr, -.Qr est.) กรณีค่าความร้อนของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจาก Matlab)	73
รูปที่ 5.15 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, -Tr, -Tj, --Tjssp, ..Trsp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, -Qr, -.Qr est.) กรณีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจาก Matlab)	73
รูปที่ 5.16 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, -Tr, -Tj, --Tjssp, ..Trsp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, -Qr, -.Qr est.) กรณีค่าโมลเริ่มต้นของสาร A และ B เพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจาก Matlab) ...	74
รูปที่ 5.17 ผลการควบคุมอุณหภูมิ (รูปซ้าย) และผลการประมาณค่าความร้อน (รูปขวา) ที่ได้จาก Cott และ Macchietto (1989) และซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ในกรณีปกติ	75
รูปที่ 5.18 แผนภาพแสดงการควบคุมเครื่องให้ความร้อน	76
รูปที่ 5.19 ผลการควบคุมอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (รูปซ้าย, To-X1) และผลการประมาณของอุณหภูมิที่ผ่านขดลวดความร้อน (รูปขวา, Ts-X2, Ts(est)-Xcap2) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณีปกติ)	80
รูปที่ 5.20 ผลการควบคุมอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (รูปซ้าย, To-X1) และผลการประมาณของอุณหภูมิที่ผ่านขดลวดความร้อน (รูปขวา, Ts-X2, Ts(est)-Xcap2) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีปกติ)	80

รูปที่ 5.21 ผลการควบคุมอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (รูปซ้าย, To-X1) และ
 ผลการประมาณของอุณหภูมิที่ผ่านขดลวดความร้อน (รูปขวา, Ts-X2, Ts(est)-Xcap2)
 กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี
 (กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 1 °C) 81

รูปที่ 5.22 ผลการควบคุมอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (รูปซ้าย, To-X1) และ
 ผลการประมาณของอุณหภูมิที่ผ่านขดลวดความร้อน (รูปขวา, Ts-X2, Ts(est)-Xcap2)
 กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล
 (กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 1 °C) 81

รูปที่ 5.23 ผลการควบคุมอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (รูปซ้าย, To-X1) และ
 ผลการประมาณของอุณหภูมิที่ผ่านขดลวดความร้อน (รูปขวา, Ts-X2, Ts(est)-Xcap2)
 กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณีอุณหภูมิอากาศภายนอกเพิ่มขึ้น 5 K
 ที่เวลา 20 วินาที) 82

รูปที่ 5.24 ผลการควบคุมอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (รูปซ้าย, To-X1) และ
 ผลการประมาณของอุณหภูมิที่ผ่านขดลวดความร้อน (รูปขวา, Ts-X2, Ts(est)-Xcap2)
 กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีอุณหภูมิอากาศภายนอก
 เพิ่มขึ้น 5 K ที่เวลา 20 วินาที) 82

รูปที่ 5.25 แผนภาพแสดงการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง 84

รูปที่ 5.26 รูปซ้ายแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{T} -X2)
 และรูปขวาแสดงผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ
 (\tilde{C} -X1, \tilde{C} (est)-Xcap1) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณีปกติ) 90

รูปที่ 5.27 รูปซ้ายแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{T} -X2)
 และรูปขวาแสดงผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ
 (\tilde{C} -X1, \tilde{C} (est)-Xcap1) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีปกติ) 90

รูปที่ 5.28 รูปซ้ายแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{T} -X2)
 และรูปขวาแสดงผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ
 (\tilde{C} -X1, \tilde{C} (est)-Xcap1) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี
 (กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 0.2) 91

- รูปที่ 5.29 รูปถ่ายแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{T} -X2) และรูปขวาแสดงผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C} -X1, \tilde{C} (est)-Xcap1) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 0.2) 91
- รูปที่ 5.30 รูปถ่ายแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{T} -X2) และรูปขวาแสดงผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C} -X1, \tilde{C} (est)-Xcap1) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณี δ ของระบบลดลง 30 เปอร์เซ็นต์) 92
- รูปที่ 5.31 รูปถ่ายแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{T} -X2) และรูปขวาแสดงผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C} -X1, \tilde{C} (est)-Xcap1) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณี δ ของระบบลดลง 30 เปอร์เซ็นต์) 92
- รูปที่ 5.32 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบไร้มิติ (δ -del, δ (est)-Xcap3) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณี δ ของระบบลดลง 30 เปอร์เซ็นต์) 93
- รูปที่ 5.33 รูปถ่ายแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{T} -X2) และรูปขวาแสดงผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C} -X1, \tilde{C} (est)-Xcap1) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของ q 50 เปอร์เซ็นต์ที่ $\tau=20$) 93
- รูปที่ 5.34 รูปถ่ายแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{T} -X2) และรูปขวาแสดงผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C} -X1, \tilde{C} (est)-Xcap1) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของ q 50 เปอร์เซ็นต์ที่ $\tau=20$) 94
- รูปที่ 5.35 ส่วนฮอปเปอร์ของเครื่องป้อนสารขนาดเล็ก 94
- รูปที่ 5.36 ผลการควบคุมความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ (h -X1) รูปถ่าย-กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี และรูปขวา-กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีปกติ) 99

รูปที่ 5.37 ผลการควบคุมความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ (h-X1) รูปถ่าย-กรณีควบคุม ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี และรูปขวา-กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 1 cm.)	99
รูปที่ 5.38 ผลค่าการวัดความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ (h-Y1) เทียบกับค่าประมาณ ของค่าความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ (h-Xcap1) (กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 1 cm.)	100
รูปที่ 5.39 ผลการควบคุมความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ (h-X1) รูปถ่าย-กรณีควบคุม ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี และรูปขวา-กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีที่ค่า α ของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์)	100
รูปที่ 5.40 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล (α -alpha, α (est)-Xcap2) (กรณีที่ค่า α ของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์)	101
รูปที่ 5.41 ผลการควบคุมความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ (h-X1) กรณีควบคุมด้วย ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลที่ไม่มีการประมาณค่าจากตัวกรองคาลมาน (กรณีที่ค่า α ของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์)	101
รูปที่ 5.42 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่ใช้ในการศึกษา	103
รูปที่ 5.43 ค่าความเข้มข้นของสาร B ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C}_1 -x1, \tilde{C}_1 (est)-xcap1) ผลจากบอร์แลนด์เดลไฟ	105
รูปที่ 5.44 ค่าความเข้มข้นของสาร A ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C}_2 -x2, \tilde{C}_2 (est)-xcap2) ผลจากบอร์แลนด์เดลไฟ	106
รูปที่ 5.45 ค่าความเข้มข้นของสาร B ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C}_1 -x1, \tilde{C}_1 (est)-xcap1) ผลจากวิซวลเบสิก	106
รูปที่ 5.46 ค่าความเข้มข้นของสาร A ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C}_2 -x2, \tilde{C}_2 (est)-xcap2) ผลจากวิซวลเบสิก	107
รูปที่ 5.47 รูปถ่าย-ค่าความเข้มข้นของสาร B ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C}_1 -x1, \tilde{C}_1 (est)-xcap1) รูปขวา-ค่าความเข้มข้นของสาร A ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C}_2 -x2, \tilde{C}_2 (est)-xcap2) ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	107
รูปที่ 6.1 รูปถ่าย-ผลการประมาณค่าความเข้มข้นที่ได้จากการใช้ตัวสังเกตค่าซึ่งแสดงไว้ใน Kantor (1998) รูปขวา-ผลการประมาณค่าความเข้มข้นที่ได้จากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	111

รูปที่ ก.1	หน้าจอหลักของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	117
รูปที่ ก.2	เมนู File ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	118
รูปที่ ก.3	เมนู Clear ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	118
รูปที่ ก.4	เมนู Run ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	120
รูปที่ ก.5	เมนู Process ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	120
รูปที่ ก.6	เมนู Measurement ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	122
รูปที่ ก.7	เมนู Kalman ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	122
รูปที่ ก.8	เมนู Controller ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	123
รูปที่ ก.9	เมนู Help ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	123
รูปที่ ก.10	ปุ่ม Button ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	124
รูปที่ ก.11	ปุ่มไอคอนของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	125
รูปที่ ก.12	การใส่ค่าสมการชดเชยไดนามิกของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	128
รูปที่ ก.13	การกำหนดตัวแปรรบกวนของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	129
รูปที่ ก.14	การรับค่าเมตริกซ์ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+	129
รูปที่ ข.1	การตรวจสอบการติดตั้งคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมานโดยใช้ regedit.exe	130
รูปที่ ข.2	การติดตั้งคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมานในบอร์ดแลนดเดสไฟ	132
รูปที่ ข.3	การใช้คอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมานในบอร์ดแลนดเดสไฟ	133
รูปที่ ข.4	การติดตั้งคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมานในวิซวลเบสิก	135
รูปที่ ค.1	แผนภาพการปรับจูนค่าของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	137

คำอธิบายสัญลักษณ์

บทที่ 3

e	ค่าความคลาดเคลื่อน
u	ตัวแปรปรับกระบวนการ
v	ค่าสัญญาณรบกวนการวัด
w	ค่าสัญญาณรบกวนของแบบจำลอง
x	ค่าสเตรท
\hat{x}	ค่าประมาณของสเตรท
y	ค่าการวัด
\hat{y}	ค่าประมาณของค่าการวัด
A	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเตรทที่เวลา k และค่าสเตรทที่เวลา k+1
B	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเตรทและค่าตัวแปรปรับกระบวนการ
C	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเตรทและค่าการวัด
P	เมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ
Q	เมตริกซ์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง
R	เมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าการวัด
V	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัดและค่าสัญญาณรบกวนการวัด
W	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเตรทและค่าสัญญาณรบกวนของแบบจำลอง

บทที่ 5

เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์

C_{p_A}	ความจุความร้อนจำเพาะเชิงโมลของสาร A , kJ/(kmol °C)
C_{p_B}	ความจุความร้อนจำเพาะเชิงโมลของสาร B , kJ/(kmol °C)
C_{p_C}	ความจุความร้อนจำเพาะเชิงโมลของสาร C , kJ/(kmol °C)
C_{p_D}	ความจุความร้อนจำเพาะเชิงโมลของสาร D , kJ/(kmol °C)
C_{p_j}	ความจุความร้อนจำเพาะเชิงมวลของสารภายในแจ๊คเก็ต , kJ/(kg °C)

F_j	อัตราการไหลของสายเข้าแจ๊คเก็ต , m^3/min
ΔH_1	ความร้อนของปฏิกิริยาที่ 1 , $kJ/kmol$
ΔH_2	ความร้อนของปฏิกิริยาที่ 2 , $kJ/kmol$
k_1^1	ค่าคงที่ที่กำหนดขึ้นในกฎอัตราของปฏิกิริยาที่ 1
k_1^2	ค่าคงที่ที่กำหนดขึ้นในกฎอัตราของปฏิกิริยาที่ 1
k_2^1	ค่าคงที่ที่กำหนดขึ้นในกฎอัตราของปฏิกิริยาที่ 2
k_2^2	ค่าคงที่ที่กำหนดขึ้นในกฎอัตราของปฏิกิริยาที่ 2
MW_A	น้ำหนักโมเลกุลของสาร A , $kg/kmol$
MW_B	น้ำหนักโมเลกุลของสาร B , $kg/kmol$
MW_C	น้ำหนักโมเลกุลของสาร C , $kg/kmol$
MW_D	น้ำหนักโมเลกุลของสาร D , $kg/kmol$
Q_r	ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา , kJ/min
r	รัศมีของเครื่องปฏิกรณ์ , m
T_j	อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ , $^{\circ}C$
T_r	อุณหภูมิภายในแจ๊คเก็ต , $^{\circ}C$
U_r	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ , $kJ/(min m^2 ^{\circ}C)$
V_j	ปริมาตรของแจ๊คเก็ต , m^3
ρ_r	ความหนาแน่นของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ , kg/m^3
ρ_j	ความหนาแน่นของสารภายในแจ๊คเก็ต , kg/m^3

เครื่องให้ความร้อน

h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ , $W/m^2.K$
v	ความเร็วของอากาศ , ft/s
C_p	ความจุความร้อนของอากาศ , $J/kg.K$
F_i	อัตราการไหลของอากาศขาเข้า , ft^3/s
F_o	อัตราการไหลของอากาศขาออก , ft^3/s
I_p	ค่ากระแสไฟฟ้า , amp
L	ความยาวของเครื่องให้ความร้อน , ft
LL	ความยาวของขดลวดความร้อน , ft
R	รัศมีของเครื่องให้ความร้อน , ft

V	ปริมาตรของเครื่องให้ความร้อน , ft^3
V_c	ปริมาตรของขดลวดให้ความร้อน , ft^3
V_p	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า , volt
T_i	อุณหภูมิของอากาศภายนอก , K
T_o	อุณหภูมิของอากาศขาออก , K
T_s	อุณหภูมิของอากาศเมื่อผ่านขดลวด , K
$\text{Cos}\phi$	เฟสของไฟฟ้า
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ , kg/ft^3

เครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง

q	อัตราการไหลของสารในรูปแบบไร้มิติ
u	อัตราการไหลของสายน้ำเย็นในรูปแบบไร้มิติ
\tilde{C}	ความเข้มข้นของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ
\tilde{T}	อุณหภูมิของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ
β	ความร้อนของปฏิกิริยาในรูปแบบไร้มิติ
δ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบไร้มิติ
γ	พลังงานกระตุ้นในรูปแบบไร้มิติ
ϕ	Damkohler number
τ	ค่าเวลาในรูปแบบไร้มิติ

เครื่องป้อนสารขนาดเล็ก

d_1	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านบนของฮอปเปอร์ , cm
d_2	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างของฮอปเปอร์ , cm
h	ความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ , cm
q_i	อัตราการไหลของสารที่เข้าสู่ฮอปเปอร์ , cm^3/s
q_o	อัตราการไหลของสารที่ออกจากฮอปเปอร์ , cm^3/s
α	สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล , cm^2/s

เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (ที่ใช้ในการทดสอบคอมโพเนนท์ตัวกรองคาถมาน)

k_1	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา , h^{-1}
k_2	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา , h^{-1}
t	เวลา , h
C_{Af}	ค่าความเข้มข้นของสาร A ขาเข้า , $kmol/m^3$
C_B	ค่าความเข้มข้นของสาร B , $kmol/m^3$
\tilde{C}_1	ค่าความเข้มข้นของสาร B ในรูปแบบไร้มิติ
\tilde{C}_2	ค่าความเข้มข้นของสาร A ในรูปแบบไร้มิติ
F	อัตราการไหลของสารเข้า-ออกเครื่องปฏิกรณ์ , m^3h^{-1}
V	ปริมาตรของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ , m^3



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคนิคการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นเทคนิคการควบคุมแบบเชิงเส้นหรือแบบไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบดั้งเดิมที่จะใช้ตัวควบคุมแบบพีโอดีซึ่งจะให้ผลการควบคุมได้ไม่ดีนัก อย่างไรก็ตาม เทคนิคการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองและการใช้ค่าของสเตทและพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง แต่ในความเป็นจริงแบบจำลองที่หามาได้อาจไม่สามารถแทนระบบจริงได้อย่างถูกต้องเนื่องจากความยุ่งยากและซับซ้อนของระบบ เพื่อชดเชยความผิดพลาดของแบบจำลอง การใช้ค่าของสเตทและพารามิเตอร์ที่ถูกต้องจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยทั่วไปค่าของสเตทและพารามิเตอร์มักจะได้มาจากวัดหรือสมมติขึ้นด้วยประสบการณ์ บางครั้งค่าที่ได้จากการวัดอาจขาดความถูกต้องเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนในการวัด นอกจากนี้ค่าของสเตทและพารามิเตอร์นั้นๆ อาจไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นการประมาณค่าของสเตทและพารามิเตอร์จึงเป็นสิ่งที่มีอาจหลีกเลี่ยงได้

การประมาณค่าของสเตทและพารามิเตอร์นั้นจะอาศัยการวัดค่าของเอาต์พุตที่สามารถวัดได้มาใช้ในการประมาณค่าของสเตทและพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่า ณ เวลานั้นๆ และนำค่าประมาณที่ได้นี้ไปใช้ร่วมกับตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองเพื่อทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพดีขึ้น และเนื่องจากการประมาณค่าของสเตทและพารามิเตอร์สามารถทำนายค่าของตัวแปรที่ไม่สามารถวัดได้ จึงทำให้เป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมตัวแปรที่ไม่สามารถวัดค่าได้ ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์อย่างมากในแง่ของการควบคุมกระบวนการ

ตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) เป็นเทคนิคการประมาณค่าวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมและมีการประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นงานในด้านของสาขาวิชาการบิน สาขาวิชาการเดินเรือทางทะเล สาขาวิชาการผลิต รวมถึงงานทางด้านวิศวกรรมเคมีด้วย ตัวกรองคาลมานเป็นเทคนิคการประมาณค่าแบบเรียกซ้ำที่อาศัยแบบจำลองของระบบที่พัฒนามาจากวิธีการของกำลังสองน้อยสุด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าสเตททั้งในอดีต ปัจจุบัน และอนาคตได้ โดยสามารถประมาณค่าของสเตทได้อย่างถูกต้อง

อย่างไรก็ตาม การนำตัวกรองคาลมานไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางเคมีนั้นยังทำได้ไม่สะดวกนัก ทั้งนี้เนื่องจากเทคนิคการประมาณค่าแบบตัวกรองคาลมานนั้นเป็นเทคนิคที่ต้องอาศัยการคำนวณทางด้านคณิตศาสตร์และสถิติ และมีขั้นตอนการคำนวณหลายขั้นตอน อีกทั้งซอฟต์แวร์สำเร็จรูปที่ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับศึกษาหรือใช้งานตัวกรองคาลมานนั้นยังมีค่อนข้างน้อย เนื่องจากผู้สร้างซอฟต์แวร์จะต้องเป็นผู้ที่มีความรู้ความชำนาญทั้งในด้านคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์เป็นอย่างมาก จากที่กล่าวมา จะเห็นว่าการสร้างซอฟต์แวร์สำเร็จรูปที่ดีเป็นงานที่สำคัญ เพื่อที่ผู้ใช้จะสามารถนำไปใช้งานได้โดยทันที และผู้พัฒนาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาหรือปรับปรุงต่อไปได้

ในงานวิจัยนี้ได้ตระหนักถึงความสำคัญของการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ดี จึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อใช้สำหรับศึกษาการใช้งานตัวกรองคาลมานในการประมาณค่าสเททและพารามิเตอร์กับกระบวนการทางวิศวกรรมเคมี เพื่อให้ผู้ใช้สามารถที่จะเข้าใจถึงการนำตัวกรองคาลมานมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมกระบวนการทางเคมี และเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ทางด้านการควบคุมกระบวนการสืบเนื่องต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับศึกษาการประมาณค่าสเททและพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการทางเคมีโดยอาศัยขั้นตอนวิธีตัวกรองคาลมาน (Kalman filter algorithm)
2. ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ขั้นตอนวิธีตัวกรองคาลมานเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอร์ เช่น บอร์ดแลนดเดสไฟ วิชาลเบสิก เป็นต้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับศึกษาขั้นตอนวิธีตัวกรองคาลมานเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 98
2. ทดสอบการใช้งานซอฟต์แวร์กับระบบเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ และทดสอบความถูกต้องของผลที่ได้โดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับโปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วย Matlab
3. ทดสอบการใช้งานซอฟต์แวร์กับระบบต่างๆ เพิ่มเติม คือ ระบบเครื่องให้ความร้อน ระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง และระบบเครื่องป้อนสารขนาดเล็ก

4. ทดสอบการใช้งานซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ร่วมกับคอมพิวเตอร์ เช่น บอร์ดแลนดเดสไฟ วิชาลเบสิก เป็นต้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนวิธีตัวกรองคาลมาน
2. ศึกษาทฤษฎีและซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการพัฒนาซอฟต์แวร์
3. ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์
4. ทดสอบซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นกับระบบเครื่องปฏิบัติการโดยความร้อนแบบแบทช์ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วยภาษา Matlab
5. ทดสอบซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นกับระบบอื่นๆ เพิ่มเติม คือ ระบบเครื่องให้ความร้อน ระบบเครื่องปฏิบัติการ ดังกวนแบบต่อเนื่อง และระบบเครื่องป้อนสารขนาดเล็ก
6. ทดสอบซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นกับคอมพิวเตอร์ เช่น บอร์ดแลนดเดสไฟ วิชาลเบสิก เป็นต้น
7. จัดทำคู่มือการใช้งานซอฟต์แวร์
8. จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อใช้งานในด้านของการควบคุมกระบวนการ
2. เพื่อให้ผู้ใช้สามารถนำซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอร์ต่างๆ เช่น บอร์ดแลนดเดสไฟ วิชาลเบสิก เป็นต้น
3. สามารถนำไปใช้เป็นซอฟต์แวร์ประกอบการเรียนการสอนวิชาการควบคุมกระบวนการขั้นสูง (Advance process control) ซึ่งจะทำให้ผู้ศึกษาสามารถเข้าใจถึงความสำคัญ ประโยชน์ และการประยุกต์ใช้งานของตัวกรองคาลมาน
4. เพื่อลดต้นทุนในเรื่องของค่าใช้จ่ายในการซื้อซอฟต์แวร์จากต่างประเทศ ซึ่งมักจะมีราคาค่อนข้างสูง และบางครั้งสามารถใช้งานได้ค่อนข้างจำกัด

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนองานวิจัย

ในเอกสารงานวิจัยนี้ จะแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ด้วยกัน 7 ส่วน ดังต่อไปนี้

1.6.1 บทที่ 1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

1.6.2 บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองคาลมาน และการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองคาลมาน ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ตัวกรองคาลมานร่วมกับกระบวนการทางเคมี

1.6.3 บทที่ 3 ตัวกรองคาลมาน

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีของตัวกรองคาลมาน ซึ่งเป็นเทคนิคการประมาณค่าที่งานวิจัยนี้ได้นำมาพัฒนาขึ้นเป็นซอฟต์แวร์ โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานในการทำความเข้าใจกับตัวกรองคาลมาน และจะแสดงถึงรูปแบบการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบต่างๆ

1.6.4 บทที่ 4 การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัย โดยจะแสดงถึงแนวความคิดและหลักการที่ใช้ในการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ตัวกรองคาลมาน และคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมาน ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

1.6.5 บทที่ 5 การทดสอบซอฟต์แวร์

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบซอฟต์แวร์ตัวกรองคาลมานที่ได้พัฒนาขึ้นกับระบบต่างๆ คือ ระบบเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ ระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง และระบบเครื่องป้อนสารขนาดเล็ก และจะกล่าวถึงการทดสอบคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมานกับระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง

1.6.6 บทที่ 6 สรุปผล วิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผล วิจัย ผลการทดสอบซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ และคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์กตัวกรองคาลมาน รวมไปถึงข้อเสนอแนะต่างๆ เกี่ยวกับซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ และคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์กตัวกรองคาลมาน

1.6.7 ภาคผนวก

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงคู่มือการใช้งานซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ การใช้งานคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์กตัวกรองคาลมาน และตัวควบคุมแบบเซนเซอร์โมเดล



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เมื่อพิจารณาถึงการควบคุมกระบวนการทางเคมีจะพบว่าบ่อยครั้งค่าของสเททและพารามิเตอร์อาจไม่สามารถวัดหรือทราบค่าที่แน่นอนได้ ซึ่งค่าที่ผิดพลาดเหล่านี้อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพของการควบคุมลดลง เพื่อให้ได้มาซึ่งการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ เทคนิคการประมาณค่าจึงเป็นสิ่งที่มีความหลีกเลี่ยงไม่ได้

ตัวกรองคาลมานเป็นเทคนิคการประมาณค่าที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานทางด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นในด้านของวิศวกรรมการบิน วิศวกรรมการเดินเรือ วิศวกรรมไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการทางเคมีได้อีกด้วย ตัวกรองคาลมานเป็นเทคนิคการประมาณค่าเหมาะสม (optimal) ที่สามารถให้ผลการประมาณค่าของสเททและพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

ภายในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ โดยหัวข้อแรกจะกล่าวถึงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลในการควบคุมกระบวนการทางเคมี หัวข้อที่สองจะกล่าวถึงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตัวกรองคาลมานมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับงานกระบวนการทางเคมี และหัวข้อที่สามจะกล่าวถึงการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองคาลมาน

2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

ในปี ค.ศ. 1988 Lee และ Sullivan ได้เสนอบทความในหัวข้อเรื่องตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล โดยได้กล่าวถึงหลักการ การออกแบบ และอัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล และด้วยการที่ตัวควบคุมแบบเจนเนริกมีอัลกอริทึมการคำนวณที่ง่าย และสามารถให้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นในอัลกอริทึมของตัวควบคุมได้เลย จึงทำให้มีการประยุกต์ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลกันอย่างแพร่หลาย ดังจะเห็นได้จาก

Lee และ Newell (1989) ได้ทำการทดสอบการใช้งานตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลในการควบคุมระบบเครื่องระเหยแบบขั้นเดียว (single-stage evaporator) ซึ่งเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในบทความได้ทำการควบคุมระดับของเหลวภายในเครื่องแยกไอ ความเข้มข้นของสารภายในเครื่องระเหย และค่าความ

ต้นภายในเครื่องระเหย ซึ่งพบว่าตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถให้ผลการควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ในบทความยังได้ทำการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมซึ่งพบว่าตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลยังสามารถให้ผลการควบคุมได้ดีแม้จะมีความผิดพลาดของแบบจำลองที่ใช้ก็ตาม

Cott และ Macchietto (1989) ได้ทำการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลการควบคุมที่ได้จากการใช้ตัวควบคุมแบบคู่ (dual-mode controller) และตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล ตัวควบคุมแบบคู่เป็นเทคนิคการควบคุมที่ใช้วิธีการควบคุมแบบออน-ออฟในช่วงการให้ความร้อนเริ่มต้น (initial heat-up) โดยการให้ความร้อนสูงในช่วงต้น เมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มมาถึงจุดหนึ่งก็จะหยุดการให้ความร้อนและเปลี่ยนเป็นการหล่อเย็นแทน และเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิมีค่าเท่าศูนย์ก็จะทำการเปลี่ยนโหมดการควบคุมไปสู่ตัวควบคุมแบบพีไอดี และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายต่อไป อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบคู่มีความยุ่งยากในการนำไปใช้งาน ในบทความจึงได้เสนอการใช้ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ ซึ่งพบว่าสามารถใช้งานได้ง่ายกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบคู่ นอกจากนี้ ในบทความยังได้ทำการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมทั้งสองในกรณีต่างๆ ซึ่งพบว่าตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถให้ผลการควบคุมได้ดีกว่าในทุกกรณีที่ทำการทดสอบ

นุศรา บุญประเสริฐ (1999) ได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์การเกิดโพลีไวนิลคลอไรด์ โดยเปรียบเทียบผลการควบคุมที่ได้จากการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลในกรณีปกติและในกรณีที่มีความผิดพลาดต่างๆ ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถให้ผลการควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลให้การควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถใช้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นในอัลกอริทึมของการคำนวณได้เลย และมีขั้นตอนการคำนวณที่ง่ายในงานวิจัยจึงได้นำตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลมาเป็นส่วนหนึ่งในซอฟต์แวร์ที่จะทำการพัฒนา เพื่อให้ผู้ใช้จะสามารถศึกษาถึงการใช้งานตัวกรองคาลมานร่วมกับตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลในการควบคุมกระบวนการต่างๆ ได้

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองคาลมาน

นับตั้งแต่ที่ได้มีการตีพิมพ์บทความของ R.E.Kalman ในปี ค.ศ.1960 ซึ่งได้อธิบายถึงขั้นตอนแก้ปัญหาแบบเรียกซ้ำ (recursive solution) เพื่อใช้เป็นตัวกรอง (filter) สำหรับระบบเชิงเส้น ซึ่งนับเป็นการค้นพบที่เป็นประโยชน์อย่างมากในด้านของการคำนวณทางด้านดิจิทัล ด้วยข้อดีของขั้นตอนการคำนวณแบบเรียกซ้ำซึ่งประหยัดเวลาและหน่วยความจำในการคำนวณ นอกจากนี้ วิธีการของตัวกรองคาลมานยังสามารถประมาณค่าสเทตและพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้อง จึงทำให้การศึกษาค้นคว้าและการประยุกต์ใช้งานของตัวกรองคาลมานได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในสาขาของระบบอัตโนมัติ อุตสาหกรรมการบิน และการเดินเรือ ตัวอย่างเช่น การนำตัวกรองคาลมานไปประยุกต์ใช้เพื่อทำนายตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องบิน การหาวิถีวงโคจรของดวงดาว การตรวจจับหาตำแหน่งของเรือรบ เป็นต้น

ในส่วนของการศึกษาและการประยุกต์ใช้งานของตัวกรองคาลมานในด้านวิศวกรรมเคมีนั้น ได้มีการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

Hamilton และคณะ (1973) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองคาลมาน โดยได้ศึกษาการใช้งานตัวกรองคาลมานกับเครื่องระเหย (evaporator) ขนาดจำลอง โดยได้ใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของสารภายในเครื่องระเหย ซึ่งพบว่าตัวกรองคาลมานสามารถให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้องในกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง และมีสัญญาณรบกวน อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ตัวกรองคาลมานไม่รู้ถึงผลการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรรบกวน ผลการประมาณที่ได้จะมีความผิดพลาดอยู่ ซึ่งในบทความได้กล่าวถึงวิธีการแก้ไขความผิดพลาด ซึ่งอาจจะทำได้โดยการจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองคาลมานใหม่ หรือเพิ่มส่วนในการประมาณค่าตัวแปรรบกวนเข้าไป

Jutila และคณะ (1981) ได้ทำการศึกษาการควบคุมค่าพีเอชของระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง เนื่องจากกระบวนการควบคุมพีเอชนี้มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งก่อให้เกิดผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของสาร จึงนำตัวกรองคาลมานมาช่วยในการประมาณค่าความเข้มข้นของสารที่มีอาจทราบได้ ค่าพีเอชที่วัดได้จะถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการประมาณ

Valliere และ Bonvin (1989) ได้ทำการศึกษาถึงเทคนิคการประมาณค่าสเทตและพารามิเตอร์กับระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทช์ โดยได้แสดงถึงเทคนิคการนำตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายมาช่วยในการ

ประมาณค่าพารามิเตอร์ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนได้คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ค่าความจุความร้อนของสาร และค่าคงที่ทางจลนศาสตร์

Kershenbaum และ Kittisupakorn (1994) ได้ศึกษาถึงการควบคุมอุณหภูมิของระบบเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ โดยกล่าวว่าค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกริยานั้นเป็นค่าที่ไม่สามารถวัดได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกริยานั้นจำเป็นต้องใช้ในอัลกอริทึมของตัวควบคุม จึงได้นำตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายมาช่วยในประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกริยา ซึ่งจากการจำลองกระบวนการพบว่า สามารถประมาณค่าความร้อนได้ดีในกรณีที่ไม่มี ความผิดพลาดของแพลนท์หรือแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีความผิดพลาดของแพลนท์หรือแบบจำลองเกิดขึ้น ค่าความร้อนที่ประมาณได้ยังคงมีความผิดพลาดไปจากค่าจริง

Zhou และ Luecke (1995) ได้ศึกษาถึงเทคนิคการหาค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของแบบจำลองและเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของการวัด ซึ่งเป็นค่าจูนที่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของตัวกรองคาลมาน โดยพบว่าถ้าความคลาดเคลื่อนของค่าจูนมีค่าต่างไปจากค่าที่เหมาะสมเกิน 25 เปอร์เซ็นต์ ตัวกรองคาลมานจะไม่สามารถให้ผลการประมาณค่าที่ดีได้

Gudi และคณะ (1995) ได้แสดงถึงการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์เซ็นเซอร์ (software sensor) สำหรับกระบวนการเคมี โดยได้กล่าวไว้ในบทความว่าปัญหาในกระบวนการเคมีและชีวเคมีที่พบบ่อยครั้งคือความยากในการทราบค่าตัวแปรของกระบวนการแบบออนไลน์ จึงได้นำตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายมาใช้เพื่อช่วยในการประมาณค่าออนไลน์ และได้ทำการทดสอบเซ็นเซอร์กับระบบเครื่องปฏิกรณ์การหมักแบบแบทช์ ซึ่งพบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

Woo และคณะ (1996) ได้นำตัวกรองคาลมานมาประยุกต์ใช้กับระบบการตกตะกอนของไอสารเคมีโลหะอินทรีย์ (Metal-organic chemical vapor deposition) เพื่อประมาณค่าอัตราการตกตะกอน และชั้นความหนาของตะกอนของไอ ซึ่งพบว่าสามารถประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง

RÉGnier และคณะ (1996) ได้ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์เซ็นเซอร์เพื่อใช้สำหรับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ โดยใช้หลักการของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายมาช่วยในการพัฒนา ค่าการวัดของอุณหภูมิจะถูกนำมาใช้เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนได้ในสมการดุลพลังงานและสมการจลนศาสตร์ ซึ่งพบว่า การชดเชยความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีผลทำให้ค่าประมาณของความร้อนที่เกิดจากปฏิกริยานั้นมีความถูกต้องมากขึ้น

Mutha และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาถึงเทคนิคการประมาณค่าและการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์การเกิดพอลิเมอร์ โดยได้ทำการทดลองกับระบบเครื่องปฏิกรณ์การเกิดพอลิเมอร์แบบต่อเนื่องของเมทิลเมทาครีเลต ในบทความได้นำตัวกรองคอลมานแบบยืดขยายมาช่วยในการประมาณค่าของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงน้ำหนักของพอลิเมอร์ และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของโมโนเมอร์

Baratti และคณะ (1998) ได้แสดงถึงนำตัวกรองคอลมานแบบยืดขยายมาใช้ในการประมาณค่าสัดส่วนของสารที่ออกจากระบบคอลัมน์การกลั่นที่มีหลายส่วนประกอบ (multicomponent distillation columns) โดยได้ทดสอบความสามารถในการประมาณค่ากับแพลนท์ขนาดจำลองของระบบสารผสม 3 องค์ประกอบ ที่ประกอบด้วย เอทานอล, 3-เอทานอล และ น้ำ ซึ่งพบว่า ตัวกรองคอลมานสามารถให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง แม้แบบจำลองที่ใช้จะมีการตั้งสมมติฐานเพื่อให้มีความยุ่งยากน้อยลงก็ตาม

สงค์ บำรุงวงศ์ดี (2541) ได้ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ KSTAPEN ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับศึกษาผลของการใช้ตัวกรองคอลมานในการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ และศึกษาถึงผลของการใช้ตัวกรองคอลมานร่วมกับตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลอง โดยสามารถใช้ในการศึกษากับระบบถังพัก ระบบเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ และระบบเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่อง

จากที่ได้กล่าวมา จะเห็นว่าตัวกรองคอลมานเป็นเทคนิคการประมาณค่าที่ได้รับความนิยมและสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านของการควบคุมกระบวนการทางเคมีได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม การที่จะสามารถนำตัวกรองคอลมานมาประยุกต์ใช้งานได้นั้นต้องการความรู้และความเข้าใจเป็นอย่างมาก การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อช่วยงานจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ

2.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองคอลมาน

ปัจจุบัน ด้วยความหน้าของเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ประกอบกับราคาที่ลดลงจึงทำให้มีการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในงานอุตสาหกรรมมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานคอมพิวเตอร์กับงานทางด้านอุตสาหกรรมนั้น เพื่อให้ได้มาซึ่งซอฟต์แวร์การใช้งานที่มีประสิทธิภาพนั้น ผู้พัฒนาซอฟต์แวร์จำเป็นจะต้องมีความรู้ความเข้าใจการเขียนโปรแกรมและอุตสาหกรรมนั้นๆ เป็นอย่างดี เมื่อพิจารณาถึงซอฟต์แวร์การควบคุมสำหรับกระบวนการทางเคมี จะเห็นว่าผู้พัฒนาซอฟต์แวร์จำเป็นจะต้องมีความรู้ทั้งในด้านของการควบคุมและกระบวนการทางเคมีเป็นอย่างดี

จากเอกสารต่างๆ ที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 2.1 จะพบว่าได้มีผู้ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองกาลมาน ดังนี้คือ

- Ravindra และคณะ (1995) นั้นได้พัฒนาซอฟต์แวร์เซ็นเซอร์เพื่อใช้งานกับระบบเครื่องปฏิกรณ์การหมักแบบแบทช์

- RÉGnier และคณะ (1996) ได้ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์เซ็นเซอร์เพื่อใช้กับระบบเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์

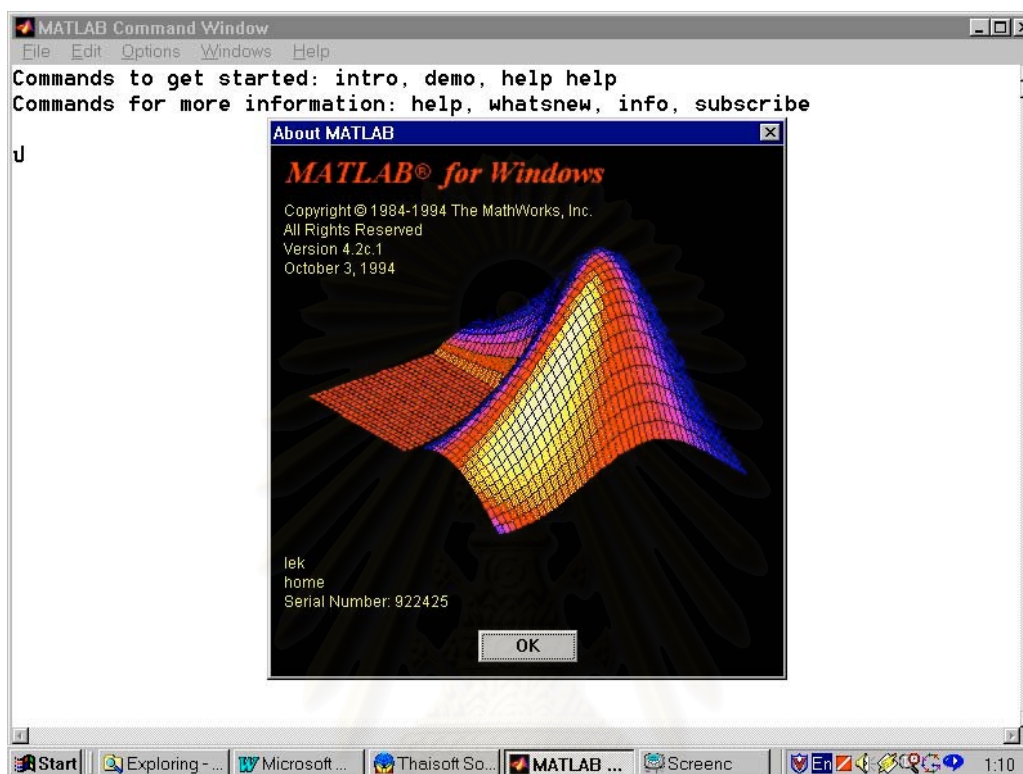
- สงค์ บำรุงวงศ์ดี (2541) ได้ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ kSTAPEN ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับศึกษาถึงผลของการประยุกต์ใช้ตัวกรองกาลมานกับระบบถังพัก ระบบเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ และระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง ซอฟต์แวร์ kSTAPEN แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ซอฟต์แวร์ kSTAPEN

จากที่ได้กล่าวมา จะเห็นว่าการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองกาลมานนั้นยังมีค่อนข้างน้อย นอกจากนี้ ซอฟต์แวร์ที่ได้ยังมีการใช้งานที่ค่อนข้างจำกัด กล่าวคือ สามารถใช้ได้กับเพียงระบบที่ได้ทำการศึกษาเท่านั้น ปัจจุบันแม้ว่าจะมีซอฟต์แวร์สำเร็จรูปต่างๆ เพื่อช่วยงานในด้านการจำลองกระบวนการ

การมากมาย เช่น Matlab เป็นต้น Matlab เป็นโปรแกรมภาษาซึ่งได้รับความนิยมอย่างมากในด้านการเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองในด้านการควบคุมกระบวนการ โปรแกรม Matlab แสดงดังรูปที่ 2.2

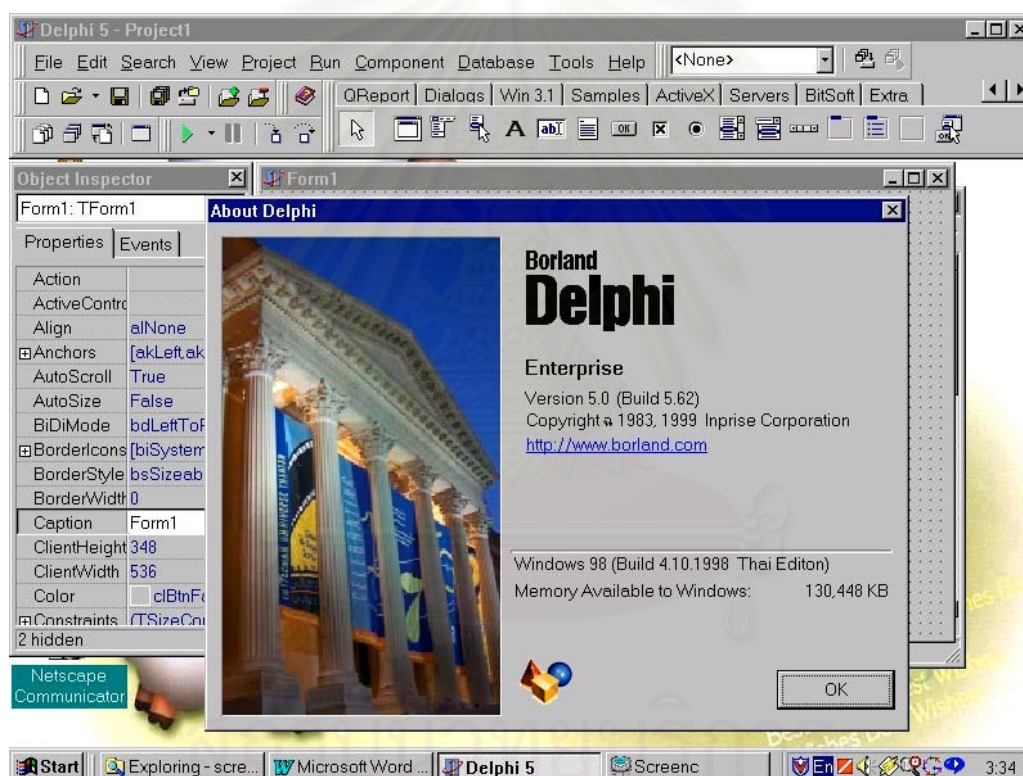


รูปที่ 2.2 โปรแกรม Matlab

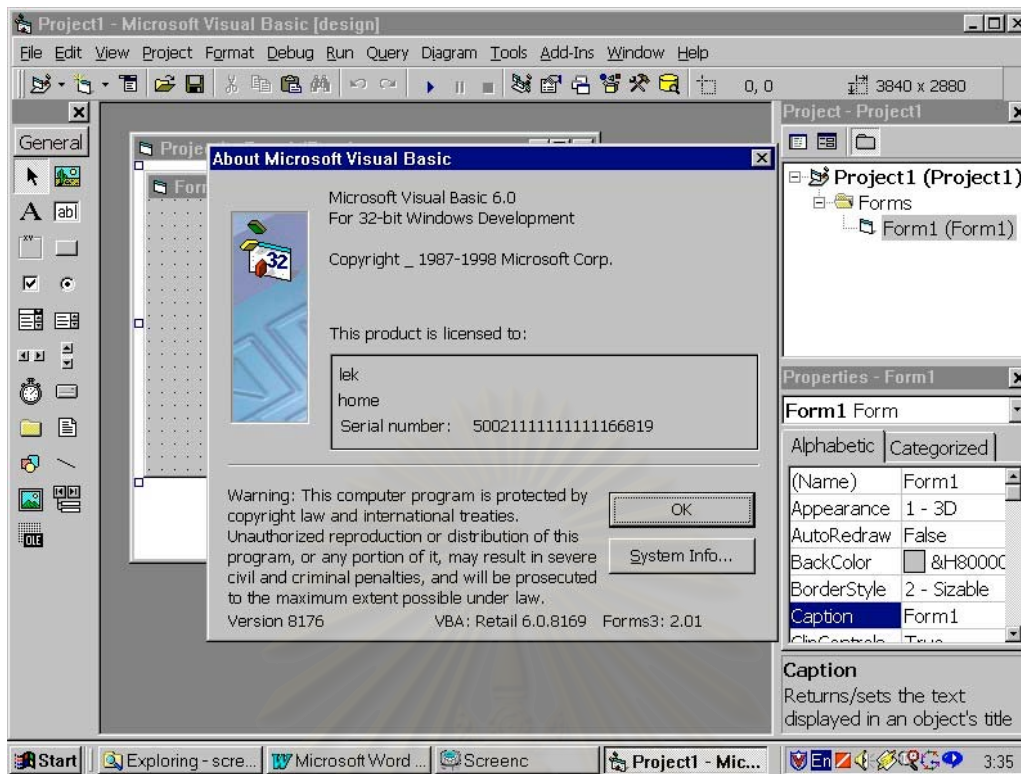
อย่างไรก็ตาม แม้ว่า Matlab จะมีฟังก์ชันสนับสนุนการทำงานในด้านการเขียนโปรแกรมมากมาย แต่ผู้ใช้อีกยังคงต้องมีความรู้ความเข้าใจในด้านการเขียนโปรแกรมอยู่ในระดับหนึ่ง นอกจากนี้ ผู้ใช้ยังต้องมีความรู้ในด้านการควบคุมกระบวนการอีกด้วย

งานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาซอฟต์แวร์จึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อช่วยสำหรับศึกษาถึงผลของการใช้ตัวกรองคาลมานร่วมกับการควบคุมกระบวนการทางเคมี เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจถึงการใช้งานตัวกรองคาลมานในการควบคุมกระบวนการทางเคมี ภายในซอฟต์แวร์ผู้ใช้สามารถที่จะกำหนดสมการแบบจำลองของระบบที่ต้องการศึกษาได้เองตามต้องการ ผู้ใช้สามารถที่จะศึกษาถึงสิ่งต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการใช้งานตัวกรองคาลมานร่วมกับตัวควบคุม เช่น ผลจากตัวแปรรอบวน สัญญาณรบกวนการวัด การผิดพลาดของแพลนท์หรือแบบจำลอง (Plant/Model

mismatch) การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองกาลมาน เป็นต้น โดยผู้ใช้ไม่ต้องเสียเวลาในการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้สำหรับศึกษาด้วยตนเอง นอกจากนี้ยังอาจใช้เป็นตัวเปรียบเทียบผลเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรมที่ผู้ใช้เขียนขึ้นเองในกรณี que ผู้ใช้ไม่มั่นใจกับผลที่ได้ และเพื่อความสะดวกต่อผู้ใช้ที่ต้องการศึกษาการเขียนโปรแกรมจำลองกระบวนการด้วยตนเอง ในงานวิจัยจึงได้มีการพัฒนาซอฟต์แวร์คอมโพเนนท์ตัวกรองกาลมาน ซึ่งเป็นคอมโพเนนท์ที่ผู้ใช้สามารถที่จะนำไปใช้งานร่วมกับการเขียนโปรแกรมภายในภาษาคอมไพเลอร์ต่างๆ เช่น บอร์แลนด์เดลไฟ วิซวลเบสิก เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้ไม่ต้องเสียเวลาในการพัฒนาส่วนของตัวกรองกาลมานขึ้นเอง และสามารถเขียนโปรแกรมได้ง่ายยิ่งขึ้น โปรแกรมบอร์แลนด์เดลไฟ และวิซวลเบสิก แสดงดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 คอมไพเลอร์บอร์แลนด์เดลไฟ



รูปที่ 2.4 คอมพิวเตอร์วิซวลเบสิก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ตัวกรองคาลมาน

ตัวกรองคาลมานเป็นเทคนิคการประมาณค่าที่งานวิจัยนี้ได้นำมาพัฒนาขึ้นเป็นซอฟต์แวร์เพื่อการศึกษาดังการประยุกต์ใช้ตัวกรองคาลมานกับการควบคุมกระบวนการทางเคมี ตัวกรองคาลมานเป็นเทคนิคการประมาณค่าที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากวิธีของกำลังสองน้อยสุดในรูปแบบของสเตทสเปซ ด้วยข้อดีที่สำคัญคือ แบบจำลองของตัวแปรที่ต้องการทราบค่าจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณ และขั้นตอนการคำนวณเป็นแบบวิธีเรียกซ้ำจึงทำให้ประหยัดหน่วยความจำและเวลาในการคำนวณ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองคาลมาน โดยภายในบทจะแบ่งออกเป็น 6 หัวข้อ ได้แก่

3.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการประมาณค่า จะเป็นการกล่าวถึงแนวคิดและทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นเพื่อใช้ในการทำความเข้าใจกับทฤษฎีของตัวกรองคาลมาน

3.2 ตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของตัวกรองคาลมาน โดยจะกล่าวถึงรูปแบบขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานที่เป็นที่นิยมและมีการนำไปใช้บ่อยครั้ง ซึ่งจะถูกนำมาสรุปเป็นขั้นตอนการคำนวณเพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้

3.3 ตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่องอีกรูปแบบหนึ่ง จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงรูปแบบขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานอีกรูปแบบหนึ่งที่แตกต่างกันออกไปจากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2 ซึ่งจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป

3.4 ตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่อง จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีของตัวกรองคาลมานในรูปแบบที่มีเวลาต่อเนื่อง ซึ่งจะมีขั้นตอนการคำนวณที่แตกต่างไปจากตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง

3.5 ตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายซึ่งดัดแปลงมาจากตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กับกรณีที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น

3.6 การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองคาลมาน จะเป็นการกล่าวถึงการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองคาลมาน ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการประมาณค่าของตัวกรองคาลมานโดยตรง

3.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการประมาณค่า

3.1.1 คุณสมบัติของการประมาณค่า

เทคนิคการประมาณค่าที่ใช้กันโดยทั่วไป เพื่อที่จะสามารถมั่นใจได้ว่าแนวโน้มของค่าประมาณที่ได้มีแนวโน้มที่ถูกต้อง เทคนิคการประมาณค่านั้นๆ ควรจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- การประมาณที่ไม่อคติ/อคติ (Unbiased/Biased Estimates)

จากค่าประมาณ \hat{x} ที่ได้ ถ้าเงื่อนไข $E\{\hat{x}\} = E\{x\} = \bar{x}$ เป็นจริง จะเรียกการประมาณค่านั้นเป็น "การประมาณค่าไม่มีอคติ" ถ้านิยามเทอมความคลาดเคลื่อน η ดังสมการ

$$\eta = E\{\hat{x}\} - x \quad (3.1)$$

ถ้าค่า η เป็นศูนย์จะเรียกเป็น "การประมาณค่าที่ไม่อคติ" ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว จะเรียกเป็น "อคติเชิงบวก" (positive bias) เมื่อค่า η มีค่าเป็นบวก และ "อคติเชิงลบ" (negative bias) เมื่อค่า η มีค่าเป็นลบ

- การประมาณที่ถูกต้อง (Consistent Estimates)

ถ้าค่าประมาณ \hat{x} ที่ได้ มีค่าลู่เข้าสู่ช่วงความน่าจะเป็นของ x เช่น

$$\text{Prob}[|\hat{x}_k - x| \geq \varepsilon] = 0 \quad (3.2)$$

เมื่อ ε เป็นค่าน้อยๆ ที่สมมติขึ้น

จะเรียกการประมาณค่านั้นเป็น "การประมาณที่ถูกต้อง"

- การประมาณที่มีประสิทธิภาพ (Efficient Estimates)

การประมาณที่มีประสิทธิภาพ หมายถึง การประมาณที่ไม่มีอคติของ x ที่มีความแปรปรวนน้อยที่สุด เช่น

$$\delta_x^2 = E\{|\hat{x} - x|^2\} \leq E\{|\hat{y} - x|^2\} \quad (3.3)$$

สำหรับทุกค่าประมาณของการวัด \hat{y} ของ x

- การประมาณที่เพียงพอ (Sufficient Estimates)

การประมาณค่า \hat{x} จะเรียกว่า "มีความเพียงพอ" ถ้าข้อมูลค่าการวัด y ที่ได้มานั้นมีความเกี่ยวข้องกับค่าตัวแปร x ที่ถูกประมาณ

3.1.2 การคำนวณแบบวิธีเรียกซ้ำ

ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลแบบดีสครีตนั้น สิ่งสำคัญก็คือความถูกต้องในเชิงคณิตศาสตร์ และความเป็นไปได้ของวิธีการคำนวณ ตัวอย่างที่จะกล่าวดังต่อไปนี้จะเป็นปัญหาในการประมาณค่าเฉลี่ยของตัวแปรซึ่งมีค่าคงที่แต่ไม่ทราบค่าที่แน่นอน โดยอาศัยผลที่ได้จากการวัดแบบออนไลน์ (มีสัญญาณรบกวนอยู่ตลอดเวลา) มาช่วยในการปรับค่าประมาณให้มีความถูกต้องมากขึ้น

- วิธีคำนวณแบบที่ 1

1. ทำการวัดครั้งที่ 1: เก็บค่าที่ได้ในตัวแปร y_1 จากนั้นนำค่าการวัด y_1 ที่ได้มาใช้เป็นค่าประมาณ

$$\hat{y}_1 = y_1 \quad (3.4)$$

2. ทำการวัดครั้งที่ 2: เก็บค่าที่ได้ในตัวแปร y_2 จากนั้นนำค่าการวัด y_1 และ y_2 ที่ได้มาคำนวณค่าประมาณ

$$\hat{y}_2 = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (3.5)$$

3. ทำการวัดครั้งที่ 3: เก็บค่าที่ได้ในตัวแปร y_3 จากนั้นนำค่าการวัด y_1, y_2 และ y_3 ที่ได้มาคำนวณค่าประมาณ

$$\hat{y}_3 = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \quad (3.6)$$

4. ทำการวัดครั้งที่ k : ซึ่งจะสามารถสรุปเป็นสูตรในการหาค่าประมาณของค่าเฉลี่ยได้ ดังนี้

$$\hat{y}_k = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_k}{k} \quad (3.7)$$

จากวิธีการดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่าสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าประมาณของค่าเฉลี่ยได้อย่างถูกต้อง แต่ในความเป็นจริงนั้นวิธีการนี้ไม่สามารถนำไปใช้ได้ เพราะเมื่อเวลาผ่านไปจะต้องใช้หน่วยความจำในการเก็บข้อมูลมากขึ้น และเมื่อข้อมูลมากขึ้นเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณออเปอเรชัน (Operation) ทางคณิตศาสตร์ก็จะมากขึ้นไปด้วย

จะเห็นว่าการคำนวณด้วยวิธีที่ 1 นั้นมีปัญหาในเรื่องขนาดของหน่วยความจำและเวลาในการคำนวณ เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว พิจารณาวิธีการคำนวณหาค่าประมาณโดยอาศัยค่าประมาณในอดีตร่วมกับค่าการวัดในปัจจุบัน ซึ่งจะได้เป็นวิธีการคำนวณแบบที่ 2 ดังนี้

• วิธีคำนวณแบบที่ 2

1. ทำการวัดครั้งที่ 1: เก็บค่าที่ได้ในตัวแปร y_1 จากนั้นนำค่าการวัดที่ได้มาใช้เป็นค่าประมาณ

$$\hat{y}_1 = y_1 \quad (3.8)$$

เก็บค่าลงในตัวแปร \hat{y}_1 ลบตัวแปร y_1

2. ทำการวัดครั้งที่ 2: เก็บค่าที่ได้ในตัวแปร y_2 จากนั้นคำนวณค่าประมาณจากผลบวกแบบถ่วงน้ำหนักของค่าประมาณในอดีตและค่าการวัดปัจจุบัน

$$\hat{y}_2 = \frac{1}{2}\hat{y}_1 + \frac{1}{2}y_2 \quad (3.9)$$

เก็บค่าลงในตัวแปร \hat{y}_2 ลบตัวแปร \hat{y}_1 และ y_2

3. ทำการวัดครั้งที่ 3: เก็บค่าที่ได้ในตัวแปร y_3 จากนั้นคำนวณค่าประมาณจากผลบวกแบบถ่วงน้ำหนักของค่าประมาณในอดีตและค่าการวัดปัจจุบัน

$$\hat{y}_3 = \frac{2}{3}\hat{y}_2 + \frac{1}{3}y_3 \quad (3.10)$$

เก็บค่าลงในตัวแปร \hat{y}_3 ลบตัวแปร \hat{y}_2 และ y_3

4. ทำการวัดครั้งที่ k : ซึ่งจะสามารถสรุปเป็นสูตรในการคำนวณหาค่าประมาณได้ ดังนี้

$$\hat{y}_k = \left(\frac{k-1}{k}\right)\hat{y}_{k-1} + \left(\frac{1}{k}\right)y_k \quad (3.11)$$

$$\text{หรือ} \quad \hat{y}_k = \hat{y}_{k-1} + \frac{1}{k}[y_k - \hat{y}_{k-1}] \quad (3.12)$$

จากวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าผลการคำนวณที่ได้จากทั้ง 2 วิธีนั้นมีค่าที่เหมือนกัน แต่วิธีคำนวณแบบที่ 2 นั้นไม่ต้องเก็บข้อมูลค่าการวัดทั้งหมด โดยต้องการเพียงค่าประมาณในอดีต ณ เวลาที่เพิ่งผ่านมา และค่าการวัด ณ เวลาปัจจุบันเท่านั้น ซึ่งทำให้สามารถประหยัดหน่วยความจำในการเก็บข้อมูลได้มาก นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาในการคำนวณ เพราะใช้ตัวแปรในการคำนวณเพียง 2 ค่าเท่านั้น

วิธีคำนวณแบบที่ 2 นั้นเป็นตัวอย่างของวิธีคำนวณแบบเรียกซ้ำ ซึ่งสิ่งสำคัญของวิธีคำนวณแบบเรียกซ้ำก็คือ การใช้ค่าในอดีตมาช่วยในการคำนวณหาค่าในปัจจุบัน

3.1.3 การประมาณค่าแบบวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least-Squares Estimation)

วิธีกำลังสองน้อยสุดได้ถูกกล่าวอ้างว่าค้นพบโดย Carl Friedrich Gauss ในปี ค.ศ.1795 วิธีการของวิธีกำลังสองน้อยสุดถือเป็นวิธีแรกในเรื่องของการประมาณค่าที่เหมาะสม (optimal estimate) แนวคิดของวิธีการนี้จะเกี่ยวข้องกับการหาค่าประมาณที่เหมาะสมเพื่อทำให้สมการเงื่อนไขกำลังสองที่ต้องการมีค่าต่ำที่สุด ดังตัวอย่างที่จะกล่าวต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1

พิจารณากลุ่มของค่าการวัด $\{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ ของตัวแปร y โดยสมมติให้ค่าการวัดมีสัญญาณรบกวนตลอดเวลา ดังสมการ

$$y_i = y + \text{error} \quad \text{เมื่อ } i = 1, \dots, k \quad (3.13)$$

ถ้าต้องการหาค่าประมาณ \hat{y} ที่ทำให้สมการ

$$LS = \sum_{i=1}^k \|\hat{y} - y_i\|^2 \quad \text{มีค่าน้อยที่สุด} \quad (3.14)$$

อาจทำได้โดยการทำอนุพันธ์ของสมการ LS ดังนี้

$$\frac{\partial LS}{\partial \hat{y}} = 2 \sum_{i=1}^k (\hat{y} - y_i) = 0 \quad (3.15)$$

จะได้

$$\hat{y} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i \quad (3.16)$$

แต่เนื่องจากสมการที่ได้นี้ไม่อยู่ในรูปที่เหมาะสมจะนำไปใช้งานได้ เนื่องจากรูปแบบการคำนวณของสมการไม่อยู่ในรูปแบบของวิธีการคำนวณแบบเรียกซ้ำ ซึ่งจะทำให้เสียหน่วยความจำในการเก็บข้อมูลและเวลาในการคำนวณมาก

$$\text{จากสมการ} \quad \hat{y} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i \quad (3.17)$$

เมื่อนำมากระจายเทอม k จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned}\hat{y}_1 &= \frac{1}{1} \sum_{i=1}^1 y_i \\ \hat{y}_2 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 y_i \\ &\dots\dots\dots \\ \hat{y}_k &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i \\ \hat{y}_{k+1} &= \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^{k+1} y_i\end{aligned}\quad (3.18)$$

เมื่อนำมาจัดรูปจะได้

$$\hat{y}_{k+1} = \left[\frac{k}{k+1} \right] \hat{y}_k + \frac{y_{k+1}}{k+1} \quad (3.19)$$

หรือ

$$\hat{y}_{k+1} = \hat{y}_k + \frac{1}{k+1} [y_{k+1} - \hat{y}_k] \quad (3.20)$$

ถ้ากำหนดให้ $Kc = \frac{1}{k+1}$ จะได้

$$\hat{y}_{k+1} = \hat{y}_k + Kc[y_{k+1} - \hat{y}_k] \quad (3.21)$$

จากสมการ 3.21 จะเห็นว่าค่าประมาณ \hat{y}_{n+1} ซึ่งก็คือค่าประมาณ ณ เวลาปัจจุบัน ซึ่งสามารถหาได้จากการนำค่าประมาณในอดีต ณ เวลา k มาบวกกับเทอมค่าคงที่คูณกับผลต่างระหว่างค่าการวัด ณ เวลาปัจจุบันกับค่าประมาณในอดีต ณ เวลา k เทอมผลต่างนี้จะเป็นเทอมที่ใช้ในการปรับค่าประมาณให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถเรียกสมการในรูปแบบนี้ได้ว่า "สมการการปรับปรุง" (Update equation)

ตัวอย่างที่ 2

พิจารณาสมการในรูปเมตริกซ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

หรือ

$$y = Cx \quad (3.23)$$

ถ้าต้องการหาเมตริกซ์ค่าประมาณ \hat{x} ซึ่งทำให้สมการ $|C\hat{x} - y|^2$ มีค่าน้อยที่สุด อาจทำได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\varepsilon^2(\hat{x}) &= |C\hat{x} - y|^2 \\ &= \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^n c_{ij}\hat{x}_j - y_i \right]^2\end{aligned}\quad (3.24)$$

เมื่อ i, j แทนแถวและคอลัมน์ของเมตริกซ์ ตามลำดับ

ทำการหาอนุพันธ์ของ $\varepsilon^2(\hat{x})$ เทียบกับ \hat{x}_k แล้วกำหนดให้เท่ากับศูนย์ จะได้

$$\begin{aligned}0 &= \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \hat{x}_k} \\ &= 2 \sum_{i=1}^m c_{ik} \left[\sum_{j=1}^n c_{ij}\hat{x}_j - y_i \right], \quad \text{เมื่อ } k = 1, 2, 3, \dots, n\end{aligned}\quad (3.25)$$

$$\begin{aligned}\text{ถ้ากำหนดให้ } \left[\sum_{j=1}^n c_{ij}\hat{x}_j - y_i \right] &= \{C\hat{x} - y\}_i \text{ จะได้} \\ &= 2 \sum_{i=1}^m c_{ik} \{C\hat{x} - y\}_i\end{aligned}\quad (3.26)$$

ซึ่งเมื่อแทน k ตั้งแต่ 1 ถึง n จะได้

$$\begin{aligned}0 &= 2C^T[C\hat{x} - y] \\ &= C^T C\hat{x} - C^T y\end{aligned}\quad (3.27)$$

เมื่อทำการจัดรูป จะได้สมการสำหรับประมาณค่า \hat{x} ดังนี้

$$\hat{x} = (C^T C)^{-1} C^T y \quad (3.28)$$

โดยค่า \hat{x} จะสามารถหาค่าได้ก็ต่อเมื่อ $(C^T C)^{-1}$ สามารถหาค่าได้

3.1.4 ตัวสังเกตค่า (Observer)

ตัวสังเกตค่าถูกนำมากล่าวเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1964 โดย Luenberger โดยกล่าวถึงหลักการประมาณค่าเวกเตอร์สถานะของระบบเชิงเส้นโดยการสังเกตค่าอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งเทคนิคการออกแบบตัวสังเกตค่านี้จะใช้หลักการคล้ายกับที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับ กล่าวคือ ค่าเกนจะ

สามารถหาได้จากการกำหนดค่าโพลในกรณีลูปิดของตัวสังเกตค่า (poles of closed loop observer) โดยถ้าค่าโพลที่กำหนดอยู่ในด้านซ้ายมือของระนาบเชิงซ้อน เทอมความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าสแตตจริงและค่าสแตตที่ได้จากการประมาณจะมีค่าลู่เข้าสู่ศูนย์

พิจารณาสมการแบบจำลองในรูปแบบเชิงเส้นของระบบ ดังนี้

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \quad (3.29)$$

และสมการค่าการวัด คือ

$$y_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k \quad (3.30)$$

เมื่อ

\mathbf{x}_k คือ ค่าของสแตต ณ เวลา k

\mathbf{u}_k คือ ค่าตัวแปรปรับกระบวนการ ณ เวลา k

y_k คือ ค่าการวัดของสแตต ณ เวลา k

\mathbf{A} คือ เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสแตต ณ เวลา k กับค่าสแตต ณ เวลา $k+1$

\mathbf{B} คือ เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสแตตกับค่าตัวแปรปรับกระบวนการ

\mathbf{C} คือ เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัดกับค่าสแตต

ถ้ากำหนดให้ $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ เป็นค่าประมาณ ณ เวลา $k+1$ ที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยค่าข้อมูลในอดีต ณ เวลา k ดังสมการ

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \quad (3.31)$$

เมื่อ $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ คือ ค่าประมาณ ณ เวลา k ที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยค่าข้อมูลของ $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ และค่าการวัด y_k

และกำหนดให้

$$\mathbf{e}_{k+1|k} = \mathbf{x}_{k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \quad (3.32)$$

$$\mathbf{e}_{k|k-1} = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \quad (3.33)$$

เมื่อแทนสมการที่ 3.29 และ 3.31 ลงในสมการ 3.32 จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ในรูปของสมการปรับปรุงค่า $\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}(y_k - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})$ จะได้

$$\begin{aligned}
e_{k+1|k} &= A(x_k - \hat{x}_{k|k}) \\
&= A[x_k - \hat{x}_{k|k-1} - K(y_k - C\hat{x}_{k|k-1})] \\
&= A[x_k - \hat{x}_{k|k-1} - KC(x_k - \hat{x}_{k|k-1})] \\
&= A(e_{k|k-1} - KCe_{k|k-1}) \\
&= (A - AKC)e_{k|k-1}
\end{aligned} \tag{3.34}$$

เมื่อ K คือ เมตริกซ์เกนถ่วงน้ำหนัก ซึ่งสามารถหาได้จากการกำหนดค่าเจาะจง (eigenvalues) ของสมการ 3.34 ค่า K จะเป็นตัวกำหนดแนวโน้มของค่า $e_{k+1|k}$ โดยถ้าค่า K ทำให้ค่าเจาะจงมีค่าเป็นลบ จะทำให้ค่า $e_{k+1|k}$ มีเสถียรภาพ และถ้าค่า K ทำให้ค่าเจาะจงมีค่าเป็นศูนย์จะเรียกว่าเป็นตัวสังเกตค่าแบบเดดบีท (deadbeat observer)

สรุปเป็นขั้นตอนการคำนวณของตัวสังเกตค่าได้ดังนี้

1. คำนวณค่า $\hat{x}_{k+1|k}$ จากสมการ

$$\hat{x}_{k+1|k} = A\hat{x}_{k|k} + Bu_k \tag{3.35}$$

2. ทำการหาค่า K จากสมการ

$$e_{k+1|k} = (A - AKC)e_{k|k-1} \tag{3.36}$$

3. คำนวณค่า $\hat{x}_{k+1|k+1}$ จากสมการ

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K(y_{k+1} - C\hat{x}_{k+1|k}) \tag{3.37}$$

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่าตัวสังเกตค่าเป็นเทคนิคการประมาณค่าที่อาศัยแบบจำลองของสแตท โดยจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของการทำนาย (Prediction) และ ส่วนของการปรับปรุงค่า (Updating) โดยส่วนของการทำนายจะเป็นส่วนของการใช้ค่าข้อมูลที่เวลา k เพื่อใช้ในการทำนายค่าของสแตทที่เวลา $k+1$ ดังแสดงในสมการที่ 3.35 จากนั้นจะนำค่าที่ได้จากแบบจำลองมาทำการปรับปรุงค่าเพื่อให้ความถูกต้องมากขึ้นโดยการบวกด้วยเทอมถ่วงน้ำหนักคูณกับผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง ดังแสดงในสมการ 3.37 โดยที่ค่าถ่วงน้ำหนัก K จะสามารถหาได้จากการกำหนดค่าเจาะจง ของสมการที่ 3.36

3.2 ตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง

ปัญหาโดยทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองคาลมานนั้นจะเป็นการประมาณค่าสเทตของระบบ โดยสมการแบบจำลองในรูปแบบเชิงเส้นของระบบสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (3.38)$$

และสมการค่าการวัด คือ

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (3.39)$$

โดยที่ \mathbf{w}_k และ \mathbf{v}_k เป็นตัวแปรสุ่มสัญญาณรบกวนของระบบและค่าการวัด โดยสมมติให้ทั้ง \mathbf{w}_k และ \mathbf{v}_k เป็นอิสระซึ่งกันและกันและมีการกระจายแบบปกติซึ่งคือ

$$\text{Pr ob}(\mathbf{w}_k) \approx N(0, \mathbf{Q}) \quad (3.40)$$

$$\text{Pr ob}(\mathbf{v}_k) \approx N(0, \mathbf{R}) \quad (3.41)$$

เมื่อ $E(\mathbf{w}_k \cdot \mathbf{w}_k^T) = \mathbf{Q}_k$ คือ ความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนของแบบจำลอง

$E(\mathbf{v}_k \cdot \mathbf{v}_k^T) = \mathbf{R}_k$ คือ ความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนของการวัด

ถ้ากำหนดให้จำนวนสเทตเท่ากับ n จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการเท่ากับ r และจำนวนค่าการวัดเท่ากับ m จะได้ว่าเมตริกซ์ \mathbf{A}_k ซึ่งเป็นเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเทต ณ เวลา k กับค่าสเทต ณ เวลา $k+1$ มีมิติ $n \times n$ เมตริกซ์ \mathbf{B}_k ซึ่งเป็นเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรปรับกระบวนการและค่าสเทตมีมิติ $n \times r$ และ \mathbf{C}_k ซึ่งเป็นเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัดกับค่าสเทตมีมิติ $m \times n$

ถ้ากำหนดให้ $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ เป็นค่าประมาณ ณ เวลา $k+1$ ที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยค่าข้อมูลในอดีต ณ เวลา k และกำหนดให้ $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1}$ เป็นค่าประมาณ ณ เวลา $k+1$ ที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยค่าข้อมูลของ $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ และค่าการวัด \mathbf{y}_{k+1} จะสามารถนิยามคลาดเคลื่อนของค่าประมาณได้ ดังนี้

$$\mathbf{e}_{k+1|k} = \mathbf{x}_{k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \quad (3.42)$$

และ
$$\mathbf{e}_{k+1|k+1} = \mathbf{x}_{k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} \quad (3.43)$$

จะได้เมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน ดังนี้

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = E[\mathbf{e}_{k+1|k} \cdot \mathbf{e}_{k+1|k}^T] \quad (3.44)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1} = E[\mathbf{e}_{k+1|k+1} \cdot \mathbf{e}_{k+1|k+1}^T] \quad (3.45)$$

ค่าของ $\hat{x}_{k+1|k}$ จะได้จากการคำนวณโดยอาศัยสมการแบบจำลอง ดังนี้

$$\hat{x}_{k+1|k} = A_k \hat{x}_{k|k} + B_k u_k \quad (3.46)$$

ค่าของ $\hat{x}_{k+1|k+1}$ จะได้จากการคำนวณโดยการรวมเทอมของ $\hat{x}_{k+1|k}$ กับค่าถ่วงน้ำหนักคูณกับผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าการวัดที่ได้จากการทำนาย ซึ่งเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1|k}) \quad (3.47)$$

เทอมของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าการวัดที่ได้จากการทำนายนี้จะเป็นส่วนที่ใช้ในการปรับความถูกต้องให้กับค่า $\hat{x}_{k+1|k}$ ที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งเรียกว่า "Residual"

เมตริกซ์ K_{k+1} ซึ่งมีมิติ $n \times m$ ในสมการ 3.47 จะเรียกว่า "เมตริกซ์เกนคาลมาน (Kalman gain matrix)" ซึ่งจะสามารถหาได้จากการแทนค่าของสมการ 3.47 ลงในสมการ 3.45 แล้วทำการหาค่าเมตริกซ์ K_{k+1} ที่ทำให้สมการ 3.45 มีค่าต่ำที่สุด

จากการแทนสมการที่ 3.47 ลงในสมการ 3.45 จะได้

$$\begin{aligned} P_{k+1|k+1} &= E[e_{k+1|k+1} \cdot e_{k+1|k+1}^T] \\ &= E\{[x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k+1}][x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k+1}]^T\} \\ &= E\{[(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k}) - K_{k+1}(C_{k+1}x_{k+1} + v_{k+1} - C_{k+1}\hat{x}_{k+1|k})] \\ &\quad [(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k}) - K_{k+1}(C_{k+1}x_{k+1} + v_{k+1} - C_{k+1}\hat{x}_{k+1|k})]^T\} \end{aligned} \quad (3.48)$$

ทำการแทน $x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k}$ ด้วย $e_{k+1|k}$ จะได้

$$\begin{aligned} P_{k+1|k+1} &= E\{[e_{k+1|k} - K_{k+1}(C_{k+1}e_{k+1|k} + v_{k+1})] \\ &\quad [e_{k+1|k} - K_{k+1}(C_{k+1}e_{k+1|k} + v_{k+1})]^T\} \end{aligned} \quad (3.49)$$

เมื่อทำการกระจายเทอมของสมการ 3.49 และกำหนดให้ $e_{k+1|k}$ ไม่มีความสัมพันธ์ (uncorrelated) กับ v_{k+1} จะได้

$$\begin{aligned} P_{k+1|k+1} &= E\{[e_{k+1|k} - K_{k+1}C_{k+1}e_{k+1|k} - K_{k+1}v_{k+1}][e_{k+1|k}^T - e_{k+1|k}^T C_{k+1}^T K_{k+1}^T - v_{k+1}^T K_{k+1}^T]\} \\ &= E\{e_{k+1|k}e_{k+1|k}^T - e_{k+1|k}e_{k+1|k}^T C_{k+1}^T K_{k+1}^T - e_{k+1|k}v_{k+1}^T K_{k+1}^T \\ &\quad - K_{k+1}C_{k+1}e_{k+1|k}e_{k+1|k}^T + K_{k+1}C_{k+1}e_{k+1|k}e_{k+1|k}^T C_{k+1}^T K_{k+1}^T + K_{k+1}C_{k+1}e_{k+1|k}v_{k+1}^T K_{k+1}^T \\ &\quad - K_{k+1}v_{k+1}e_{k+1|k}^T + K_{k+1}v_{k+1}e_{k+1|k}^T C_{k+1}^T K_{k+1}^T + K_{k+1}v_{k+1}v_{k+1}^T K_{k+1}^T\} \\ &= P_{k+1|k} - P_{k+1|k}C_{k+1}^T K_{k+1}^T - K_{k+1}C_{k+1}P_{k+1|k} + K_{k+1}C_{k+1}P_{k+1|k}C_{k+1}^T K_{k+1}^T + K_{k+1}R_{k+1}K_{k+1}^T \\ &= [I - K_{k+1}C_{k+1}]P_{k+1|k} - [I - K_{k+1}C_{k+1}]P_{k+1|k}C_{k+1}^T K_{k+1}^T + K_{k+1}R_{k+1}K_{k+1}^T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= [I - K_{k+1} C_{k+1}] P_{k+1|k} [I - C_{k+1}^T K_{k+1}^T] + K_{k+1} R_{k+1} K_{k+1}^T \\
&= (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1|k} (I - K_{k+1} C_{k+1})^T + K_{k+1} R_{k+1} K_{k+1}^T \quad (3.50)
\end{aligned}$$

ในการหาค่าที่เหมาะสมของ K_{k+1} เพื่อที่จะทำให้ค่า $P_{k+1|k+1}$ มีค่าต่ำที่สุดนั้นอาจทำได้หลายวิธี ซึ่งวิธีการหนึ่งอาจจะแสดงได้ตามขั้นตอนดังจะกล่าวต่อไปนี้

จากสมการที่ 3.50 เมื่อทำการกระจายเทอมจะได้

$$\begin{aligned}
P_{k+1|k+1} &= (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1|k} (I - K_{k+1} C_{k+1})^T + K_{k+1} R_{k+1} K_{k+1}^T \\
&= P_{k+1|k} - K_{k+1} C_{k+1} P_{k+1|k} - P_{k+1|k} C_{k+1}^T K_{k+1}^T + K_{k+1} (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1}) K_{k+1}^T \quad (3.51)
\end{aligned}$$

เนื่องจากเทอม $K_{k+1} (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1}) K_{k+1}^T$ เป็นกำลังสองในเทอม K_{k+1} ซึ่งถ้าสมมติให้เทอม $K_{k+1} (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1}) K_{k+1}^T$ เป็นเมตริกซ์สมมาตร (Symmetric) และมีนิยามเชิงบวก (positive definite) และทำการนิยามเทอม $C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1}$ ด้วย SS^T ซึ่งก็คือ

$$SS^T \approx C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1} \quad (3.52)$$

จะได้

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - K_{k+1} C_{k+1} P_{k+1|k} - P_{k+1|k} C_{k+1}^T K_{k+1}^T + K_{k+1} SS^T K_{k+1}^T \quad (3.53)$$

ถ้าเขียน $P_{k+1|k+1}$ ในรูปของสมการกำลังสอง ดังนี้

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} + (K_{k+1} S - H)(K_{k+1} S - H)^T - H H^T \quad (3.54)$$

และกำหนดให้เทอมของ H ไม่มี K_{k+1} เข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อเปรียบเทียบกับเทอมในสมการ 3.54 กับสมการ 3.53 จะได้

$$K_{k+1} S H^T + H S^T K_{k+1}^T = K_{k+1} C_{k+1} P_{k+1|k} + P_{k+1|k} C_{k+1}^T K_{k+1}^T \quad (3.55)$$

เมื่อเทียบเทอมสัมประสิทธิ์หน้า K_{k+1}^T ของด้านซ้ายและขวาของสมการ 3.55 จะได้

$$H = P_{k+1|k} C_{k+1}^T (S^T)^{-1} \quad (3.56)$$

เนื่องจากเทอมในแนวทแยงมุมของเมตริกซ์ $P_{k+1|k+1}$ จะแทนถึงความแปรปรวนของค่าสแตตนั้นๆ โดยตรง ดังนั้นในที่นี้จะพิจารณากรณีที่ $P_{k+1|k+1}$ เป็นเมตริกซ์ในแนวทแยงมุม (diagonal) ซึ่งเมื่อพิจารณา

สมการ 3.54 จะเห็นว่ามีเพียงเทอมกลางของสมการทางด้านขวาเท่านั้นที่เกี่ยวข้องกับ K_{k+1} และเทอมกลางนี้ไม่สามารถมีค่าในแนวทแยงมุมเป็นค่าลบได้เนื่องจากเป็นผลคูณของเมตริกซ์และทรานสโพส (transpose) ของเมตริกซ์นั่นเอง ดังนั้นวิธีที่ดีที่สุดที่จะทำให้ $P_{k+1|k+1}$ มีค่าน้อยที่สุดก็คือ การหาค่า K_{k+1} ที่ทำให้เทอมกลางมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งก็คือ

$$K_{k+1}S = H \quad (3.57)$$

หรือ

$$K_{k+1} = HS^{-1} \quad (3.58)$$

เมื่อทำการแทนสมการ 3.56 ลงในสมการ 3.58 จะได้

$$\begin{aligned} K_{k+1} &= P_{k+1|k} C_{k+1}^T (S^T)^{-1} S^{-1} \\ &= P_{k+1|k} C_{k+1}^T (SS^T)^{-1} \end{aligned} \quad (3.59)$$

เมื่อแทนค่าของ SS^T จากสมการ 3.52 ลงในสมการ 3.59 จะได้

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} \quad (3.60)$$

จากสมการ 3.60 ถ้าค่าของความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อน $P_{k+1|k}$ มีค่าน้อยๆ จะทำให้สมการ 3.47 มีการถ่วงน้ำหนักของส่วน Residual น้อยลง

$$\lim_{P_{k+1|k} \rightarrow 0} K_{k+1} = 0 \quad (3.61)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าค่าของความแปรปรวนของค่าการวัด R_{k+1} มีค่าน้อยๆ จะทำให้สมการ 3.47 มีการถ่วงน้ำหนักของส่วน Residual มากขึ้น

$$\lim_{R_{k+1} \rightarrow 0} K_{k+1} = C_{k+1}^{-1} \quad (3.62)$$

จากที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าถ้า $P_{k+1|k}$ มีค่าน้อยๆ ซึ่งหมายถึงค่าที่ได้จากแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือมาก จึงทำให้สมการ 3.47 มีการถ่วงน้ำหนักของส่วน Residual น้อย ในทำนองเดียวกันถ้า R_{k+1} มีค่าน้อยๆ ซึ่งหมายถึงค่าที่ได้จากการวัดจริงมีความน่าเชื่อถือมาก จึงทำให้สมการที่ 3.47 มีการถ่วงน้ำหนักของส่วน Residual มาก

พิจารณาค่า $P_{k+1|k+1}$ จากสมการ 3.50 เมื่อทำการกระจายเทอมจะได้

$$\begin{aligned} P_{k+1|k+1} &= (I - K_{k+1}C_{k+1})P_{k+1|k}(I - K_{k+1}C_{k+1})^T + K_{k+1}R_{k+1}K_{k+1}^T \\ &= P_{k+1|k} - K_{k+1}C_{k+1}P_{k+1|k} - P_{k+1|k}C_{k+1}^TK_{k+1}^T + K_{k+1}(C_{k+1}P_{k+1|k}C_{k+1}^T + R_{k+1})K_{k+1}^T \end{aligned} \quad (3.63)$$

เมื่อแทนค่า K_{k+1} จากสมการ 3.60 ลงในสมการ 3.63 จะได้

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - P_{k+1|k}C_{k+1}^T(C_{k+1}P_{k+1|k}C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1}C_{k+1}P_{k+1|k} \quad (3.64)$$

หรือ

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - K_{k+1}(C_{k+1}P_{k+1|k}C_{k+1}^T + R_{k+1})K_{k+1}^T \quad (3.65)$$

หรือ

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1}C_{k+1})P_{k+1|k} \quad (3.66)$$

จากรูปแบบของการหาค่าของ $P_{k+1|k+1}$ ที่ได้ สมการ 3.66 นั้นมีรูปแบบที่ง่ายที่สุดจึงเป็นที่นิยมใช้กัน อย่างไรก็ตามค่าของ $P_{k+1|k+1}$ ที่หามาได้ในสมการ 3.64, 3.65 และ 3.66 นั้นเป็นเพียงรูปแบบหนึ่งที่ได้จากการแทนค่า K_{k+1} ซึ่งคำนวณจากวิธีการที่ได้แสดงไว้ในข้างต้นเท่านั้น

จากสมการ 3.44 เมื่อแทนค่า $e_{k+1|k} = A_k e_{k|k} + w_k$ และกำหนดให้ w_k ไม่มีความสัมพันธ์กับ $e_{k|k}$ จะได้

$$\begin{aligned} P_{k+1|k} &= E[e_{k+1|k} \cdot e_{k+1|k}^T] \\ &= E[(A_k e_{k|k} + w_k) \cdot (A_k e_{k|k} + w_k)^T] \\ &= A_k P_{k|k} A_k^T + Q_k \end{aligned} \quad (3.67)$$

จากสมการที่ได้แสดงมาทั้งหมด สมการ 3.46, 3.47, 3.60, 3.66 และ 3.67 จะถูกนำมารวมเป็นขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมาน ซึ่งจะวนเป็นรอบการคำนวณซ้ำไปจนถึงเวลาที่ต้องการ ดังจะกล่าวต่อไปดังนี้

ขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง

จากสมการด้านบนที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าตัวกรองคาลมานจะทำการประมาณค่าของสเตทจากแบบจำลองก่อนจากนั้นจึงทำการปรับปรุงแก้ไขค่าเพื่อให้มีความถูกต้องมากขึ้น ดังนั้น กลุ่มของสมการตัวกรองคาลมานจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ สมการการทำนาย (Predictor equations หรือ Time update equations) และสมการการแก้ไข (Corrector equations หรือ Measurement update equations) ซึ่งสามารถนำมาสรุปเป็นขั้นตอนการคำนวณ และแผนภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 3.1

สมการการทำนาย

- คำนวณค่าประมาณโดยอาศัยค่าข้อมูลในอดีต

$$\hat{x}_{k+1|k} = A_k \hat{x}_{k|k} + B_k u_k$$

- คำนวณเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนที่ได้จากค่าข้อมูลในอดีต

$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + Q_k$$

สมการการแก้ไข

- คำนวณค่าเมตริกซ์เกนคาลมาน

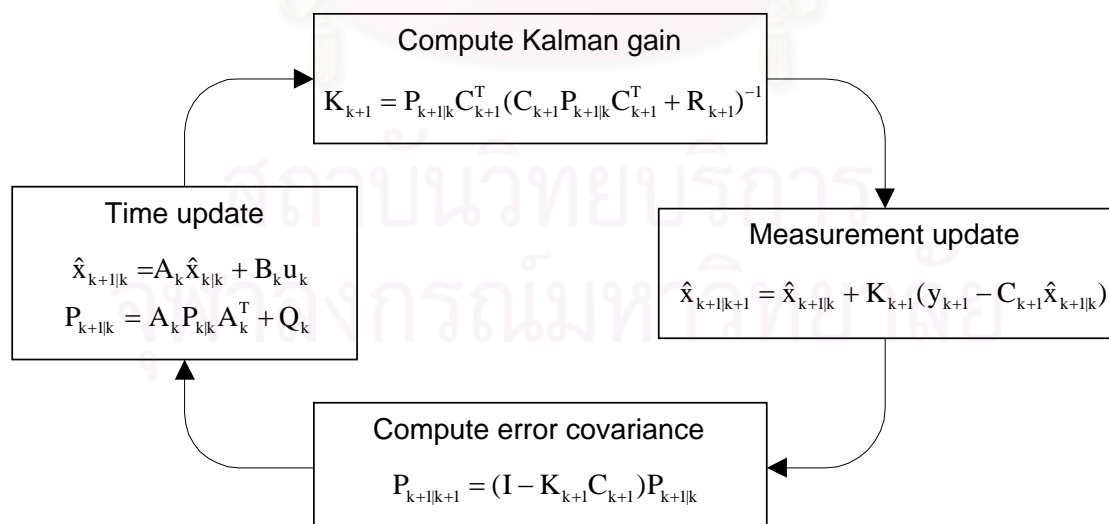
$$K_{k+1} = P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1}$$

- คำนวณค่าประมาณค่าใหม่

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1|k})$$

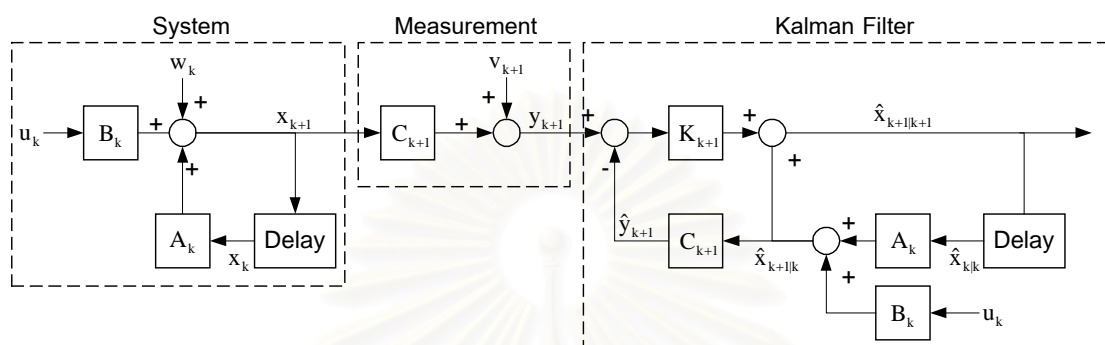
- คำนวณค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนค่าใหม่

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1|k}$$



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง

จากรูป 3.1 จะเห็นว่าในการคำนวณจะเริ่มจากสมการการทำนายเพื่อคำนวณค่า $\hat{x}_{k+1|k}$ และ $P_{k+1|k}$ จากนั้นจะทำการคำนวณค่าเมตริกซ์เกน K_{k+1} เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาค่าประมาณค่าใหม่ $\hat{x}_{k+1|k+1}$ และค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนค่าใหม่ $P_{k+1|k+1}$ ซึ่งเป็นค่าที่จะนำกลับไปใช้ในสมการการทำนายอีกครั้ง จะเห็นว่าขั้นตอนการคำนวณจะวนซ้ำไปเรื่อยๆ จนถึงเวลาที่ต้องการ



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการทำงานของตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่องร่วมกับระบบ

จากรูป 3.2 จะเป็นแผนผังแสดงการทำงานของตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่องร่วมกับระบบ เมื่อพิจารณาบล็อกของระบบจะเห็นว่าจะมีการใช้ค่าข้อมูลต่างๆ ที่เวลา k ในการคำนวณค่าสเททที่เวลา $k+1$ ค่า x_{k+1} ที่ได้จะถูกส่งกลับไปเข้าสู่หน่วยหน่วงเวลา (delay) เพื่อนำกลับไปใช้ในการคำนวณค่าสเททที่เวลาต่อไป นอกจากนี้ ค่า x_{k+1} ยังถูกส่งเข้าสู่หน่วยการวัดด้วย จากค่าการวัดที่ได้จะถูกส่งไปสู่ตัวกรองคาลมานเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าประมาณ $\hat{x}_{k+1|k+1}$ โดยค่า $\hat{x}_{k+1|k+1}$ ที่ได้จะถูกส่งออกจากลูปเพื่อนำไปใช้งานต่อไป และจะถูกส่งเข้าสู่หน่วยหน่วงเวลาเพื่อนำกลับไปใช้ในการคำนวณค่าประมาณ $\hat{x}_{k+1|k}$ เพื่อนำไปใช้คำนวณค่า $\hat{x}_{k+1|k+1}$ ที่เวลาถัดไป

3.3 ตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่องอีกรูปแบบหนึ่ง

รูปแบบของสมการการคำนวณในตัวกรองคาลมานนั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบ ซึ่งในหัวข้อ 3.2 ที่ผ่านมานั้นเป็นเพียงรูปแบบหนึ่งที่ยอมรับกันมาก อย่างไรก็ตาม ในบางปัญหานั้นสมการการคำนวณในรูปแบบเดิมนั้นอาจไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เช่น ในกรณีของปัญหาที่ค่าเริ่มต้นมีความไม่แน่นอนอย่างมาก ซึ่งอาจจะต้องการค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณเริ่มต้นเป็นค่าอนันต์ รูปแบบของสมการดังแสดงในรูปที่ 3.1 ไม่สามารถใช้กับกรณีนี้ได้เนื่องจากเมื่อทำการคำนวณค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณที่เวลาถัดไปจะได้ค่าที่เป็นอนันต์ซ้ำไปเรื่อยๆ

รูปแบบของสมการการคำนวณของตัวกรองคาลมานที่จะเสนอในหัวข้อนี้จะเป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่ สามารถนำไปประยุกต์กับกรณีของปัญหาที่ต้องการค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณเริ่มต้นมี ค่าเป็นอนันต์ และยังสามารนำไปประยุกต์ใช้กับกรณีอื่นๆ ได้อีกด้วย

พิจารณาสมการความไม่แน่นอนของค่าประมาณ ดังนี้

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1|k} \quad (3.68)$$

และสมการค่าเกนของตัวกรองคาลมาน

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} \quad (3.69)$$

เมื่อทำการแทนสมการ 3.69 ลงในสมการ 3.68 จะได้

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} C_{k+1} P_{k+1|k} \quad (3.70)$$

ถ้าเมตริกซ์ผกผันของ $P_{k+1|k+1}$, $P_{k+1|k}$ และ R สามารถหาค่าได้ จะสามารถแสดงเมตริกซ์ผกผันของ $P_{k+1|k+1}$ ได้ดังนี้

$$P_{k+1|k+1}^{-1} = P_{k+1|k}^{-1} + C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} C_{k+1} \quad (3.71)$$

สมการ 3.71 สามารถตรวจสอบความถูกต้องได้โดยนำเทอมขวามือของสมการ 3.70 และ 3.71 มา ทำการคูณกัน ซึ่งจะได้ผลเป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์

การเปลี่ยนรูปค่าเกนของตัวกรองคาลมาน จะทำโดยการแทรกเทอม $P_{k+1|k+1} P_{k+1|k+1}^{-1}$ และ $R_{k+1}^{-1} R_{k+1}$ ลงในสมการ 3.69 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} K_{k+1} &= P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} \\ &= P_{k+1|k+1} P_{k+1|k+1}^{-1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} R_{k+1} (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} \\ &= P_{k+1|k+1} P_{k+1|k+1}^{-1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} + I)^{-1} \end{aligned} \quad (3.72)$$

แทนค่าสมการ 3.71 ลงในสมการ 3.72 และทำการจัดรูปจะได้

$$\begin{aligned} K_{k+1} &= P_{k+1|k+1} P_{k+1|k+1}^{-1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} + I)^{-1} \\ &= P_{k+1|k+1} [P_{k+1|k+1}^{-1} + C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} C_{k+1}] P_{k+1|k} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} + I)^{-1} \\ &= P_{k+1|k+1} (I + C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} C_{k+1} P_{k+1|k}) C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} + I)^{-1} \\ &= P_{k+1|k+1} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} (I + C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1}) (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} + I)^{-1} \end{aligned}$$

$$= P_{k+1|k+1} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} \quad (3.73)$$

จากสมการ 3.71 และ 3.73 สามารถนำมาสรุปเป็นขั้นตอนการคำนวณและแผนภาพขั้นตอนการคำนวณอีกรูปแบบหนึ่งของตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่องได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

สมการการทำนาย

- คำนวณค่าประมาณโดยอาศัยค่าข้อมูลในอดีต

$$\hat{x}_{k+1|k} = A_k \hat{x}_{k|k} + B_k u_k$$

- คำนวณเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนที่ได้จากค่าข้อมูลในอดีต

$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + Q_k$$

สมการการแก้ไข

- คำนวณค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนค่าใหม่

$$P_{k+1|k+1}^{-1} = P_{k+1|k}^{-1} + C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} C_{k+1}$$

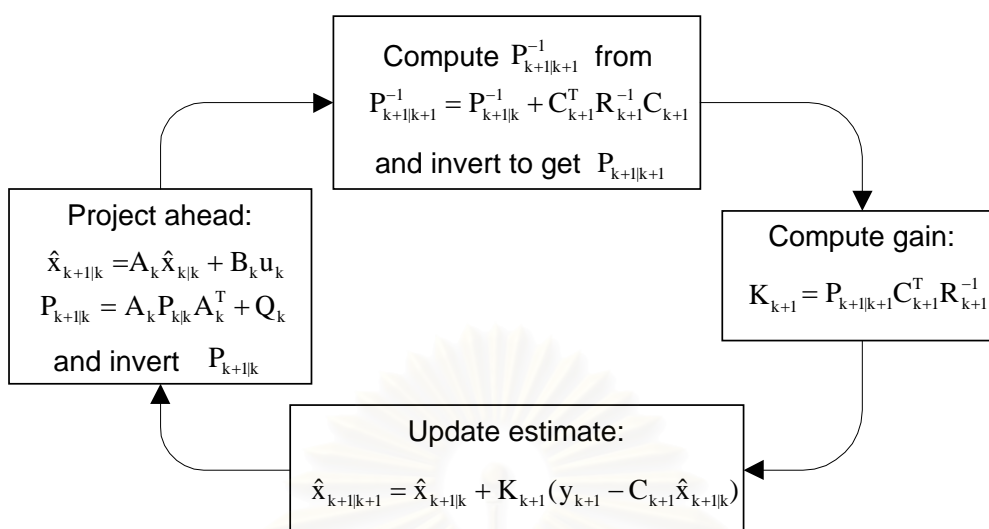
- คำนวณค่าเมตริกซ์เกนคาลมาน

$$K_{k+1} = P_{k+1|k+1} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1}$$

- คำนวณค่าประมาณค่าใหม่

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1|k})$$

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าค่า $P_{k+1|k+1}$ สามารถคำนวณได้โดยไม่ต้องอาศัยค่าเกน K_{k+1} ในขณะที่การคำนวณค่าเกน K_{k+1} จะเกี่ยวข้องกับค่า $P_{k+1|k+1}$ ซึ่งจะกลับกันกับขั้นตอนการคำนวณในรูปที่ 3.1 ซึ่งจะมีการคำนวณค่า $P_{k+1|k+1}$ ก่อนแล้วจึงทำการคำนวณค่าเกน K_{k+1} อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาสมการการคำนวณในรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าเมตริกซ์ผกผันในแต่ละรอบของการคำนวณมากกว่าในรูปที่ 3.1 ซึ่งในกรณีที่เมตริกซ์มีขนาดใหญ่จะต้องใช้เวลาในการคำนวณแต่ละรอบนานมากขึ้น ซึ่งเป็นข้อเสียของรูปแบบการคำนวณนี้



รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณอีกรูปแบบหนึ่งของตัวกรองคาลมาน

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่องที่ได้จากในหัวข้อ 3.2 และ 3.3

ตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง (จาก 3.2)	ตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง (จาก 3.3)
<p><u>สมการการทำนาย</u></p> <ol style="list-style-type: none"> $\hat{x}_{k+1 k} = A_k \hat{x}_{k k} + B_k u_k$ $P_{k+1 k} = A_k P_{k k} A_k^T + Q_k$ <p><u>สมการการแก้ไข</u></p> <ol style="list-style-type: none"> $K_{k+1} = P_{k+1 k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1 k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1}$ $\hat{x}_{k+1 k+1} = \hat{x}_{k+1 k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1 k})$ $P_{k+1 k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1 k}$ 	<p><u>สมการการทำนาย</u></p> <ol style="list-style-type: none"> $\hat{x}_{k+1 k} = A_k \hat{x}_{k k} + B_k u_k$ $P_{k+1 k} = A_k P_{k k} A_k^T + Q_k$ <p><u>สมการการแก้ไข</u></p> <ol style="list-style-type: none"> $P_{k+1 k+1}^{-1} = P_{k+1 k}^{-1} + C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} C_{k+1}$ $K_{k+1} = P_{k+1 k+1} C_{k+1}^T R_{k+1}^{-1}$ $\hat{x}_{k+1 k+1} = \hat{x}_{k+1 k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1 k})$

3.4 ตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่อง (Continuous Kalman Filter)

เป็นเวลาหนึ่งปีหลังจากที่ R.E.Kalman ได้เสนอบทความเรื่องตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง ในปี ค.ศ.1961 R.E.Kalman ได้ร่วมกับ R.S.Bucy เสนอบทความชิ้นที่สองในหัวข้อเรื่องตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่อง ซึ่งได้รับการยกย่องให้เป็นจุดเริ่มต้นของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการกรองสัญญาณที่เหมาะสม (optimal filtering) ในเรื่องของทฤษฎีตัวกรองคาลมานนั้นเป็นที่น่าสังเกตว่าจะเริ่มต้นด้วยการพิสูจน์สมการในรูปแบบดิฟเฟอเรนเชียล จากนั้นจึงมาทำการพิสูจน์ในรูปแบบที่มีเวลาต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างจากวิธีการคำนวณทั่วไปที่จะเริ่มต้นด้วยการพิสูจน์ในรูปแบบที่มีเวลาต่อเนื่องแล้วจึงทำการประมาณให้อยู่ในรูปแบบดิฟเฟอเรนเชียล ดังนั้นสมการดิฟเฟอเรนเชียลของตัวกรองคาลมานที่ได้พิสูจน์มานั้นจึงมีความแน่นอนและไม่ได้เป็นผลมาจากการประมาณ

จากที่กล่าวมา จะเห็นว่าตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่องนั้นอาจจะไม่มีมีความสำคัญเท่ากับตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากในการประยุกต์ใช้งานจริง โดยทั่วไปนั้นจะเป็นรูปแบบการคำนวณแบบดิฟเฟอเรนเชียล อย่างไรก็ตาม ตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่องยังคงมีความสำคัญในด้านของเหตุผลทางด้านความคิดและด้านทฤษฎี ดังจะกล่าวต่อไปนี้

จากสมการแบบจำลองของระบบและสมการค่าการวัด

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ww \quad (3.74)$$

$$y = Cx + Vv \quad (3.75)$$

เมื่อ

$$E[w(t)w^T(\tau)] = Q\delta(t - \tau) \quad (3.76)$$

$$E[v(t)v^T(\tau)] = R\delta(t - \tau) \quad (3.77)$$

$$E[w(t)v^T(\tau)] = 0 \quad (3.78)$$

จากสมการที่กล่าวมาสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q ของตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง และตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่อง ได้ดังนี้

จากนิยามของ Q_k ในรูปแบบดิฟเฟอเรนเชียล

$$Q_k \approx \iint_{\text{small}\Delta t} W(t)E[w(t)w^T(\tau)]W^T(t)dt d\tau \quad (3.79)$$

แทนสมการ 3.76 ลงในสมการ 3.79 จากนั้นทำการอินทิเกรตบนช่วง Δt มีค่าน้อยๆ จะได้

$$Q_k = WQW^T \Delta t \quad (3.80)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R ของตัวกรองคาลมานที่มีเวลาไม่ต่อเนื่อง และตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่อง สามารถพิสูจน์ได้โดยพิจารณาสมการ

$$\begin{aligned} y_{k+1} &= \frac{1}{\Delta t} \int_{t_k}^{t_{k+1}} y(t) dt \\ &= \frac{1}{\Delta t} \int_{t_k}^{t_{k+1}} [Cx(t) + Vv(t)] dt \\ &\approx C_{k+1} x_{k+1} + \frac{1}{\Delta t} \int_{t_k}^{t_{k+1}} Vv(t) dt \end{aligned} \quad (3.81)$$

เมื่อเทียบสมการ 3.81 กับสมการค่าการวัดในรูปแบบดิสครีต $y_{k+1} = C_{k+1} x_{k+1} + V_{k+1} v_{k+1}$ จะได้

$$v_{k+1} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_k}^{t_{k+1}} v(t) dt \quad (3.82)$$

และใช้นิยามของ R_k ที่ว่า

$$R_{k+1} = E[v_{k+1} v_{k+1}^T] = \frac{1}{\Delta t^2} \iint_{\text{small } \Delta t} E[v(t) v^T(\tau)] dt d\tau \quad (3.83)$$

แทนสมการ 3.77 ลงในสมการ 3.83 และทำการอินทิเกรตบนช่วง Δt มีค่าน้อยๆ จะได้

$$R_{k+1} = \frac{R}{\Delta t} \quad (3.84)$$

พิจารณาค่าเกินของตัวกรองคาลมานที่มีเวลาไม่ต่อเนื่อง

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} \quad (3.85)$$

แทนสมการ 3.84 ลงในสมการสมการ 3.85 และเนื่องจากที่ช่วง Δt มีค่าน้อยๆ จะทำให้ $R / \Delta t \gg C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T$ ซึ่งจะได้

$$K_{k+1} \approx P_{k+1|k} C_{k+1}^T R^{-1} \Delta t \quad (3.86)$$

เนื่องจาก $P_{k+1|k} \rightarrow P_{k+1|k+1}$ เมื่อ $\Delta t \rightarrow 0$ ดังนั้นในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์ P แทนเทอมความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนในกรณีของตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่อง

จากสมการ 3.86 ถ้านิยามให้เทอมสัมประสิทธิ์หน้า Δt เป็นค่าเกณฑ์ของตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่องจะได้

$$\mathbf{K} = \mathbf{P} \mathbf{C}_{k+1}^T \mathbf{R}^{-1} \quad (3.87)$$

ซึ่งจะได้

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{K} \Delta t = \mathbf{P} \mathbf{C}_{k+1}^T \mathbf{R}^{-1} \Delta t \quad (3.88)$$

พิจารณาเทอมความแปรปรวนของคลาดเคลื่อน $\mathbf{P}_{k+1|k}$ ต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k+1|k} &= \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k|k} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_k \\ &= \mathbf{A}_k (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{C}_{k+1}^T) \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_k \end{aligned} \quad (3.89)$$

ถ้ากำหนดให้ $\mathbf{A}_k \approx \mathbf{I} + \mathbf{A} \Delta t$ และใช้นิยามของ \mathbf{K}_{k+1} จากสมการ 3.86 หลังจากนั้นทำการละเทอมที่เป็นกำลังสองของ Δt จะได้

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{P}_{k|k-1} + \mathbf{A} \mathbf{P}_{k|k-1} \Delta t + \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{A}^T \Delta t - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{C}_{k+1}^T \mathbf{P}_{k|k-1} + \mathbf{Q}_k \quad (3.90)$$

เมื่อทำการแทนค่าสมการ 3.80 และ 3.86 ลงในสมการ 3.90 และทำการจัดรูป จะได้

$$\frac{\mathbf{P}_{k+1|k} - \mathbf{P}_{k|k-1}}{\Delta t} = \mathbf{A} \mathbf{P}_{k|k-1} + \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{A}^T - \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{C}_{k+1}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C}_{k+1} \mathbf{P}_{k|k-1} + \mathbf{W} \mathbf{Q} \mathbf{W}^T \quad (3.91)$$

ทำการใส่ลิมิต $\Delta t \rightarrow 0$ และทำการยกเลิกตัวห้อยในสมการ 3.91 จะได้

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{A} \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}^T - \mathbf{P} \mathbf{C}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C} \mathbf{P} + \mathbf{W} \mathbf{Q} \mathbf{W}^T \quad (3.92)$$

พิจารณาสมการการปรับปรุง ดังนี้

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = \mathbf{x}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{C}_{k+1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}) \quad (3.93)$$

แทนสมการ $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k$ ลงในสมการ 3.93 จะได้

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{K}_{k+1} [\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{C}_{k+1} (\mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k)] \quad (3.94)$$

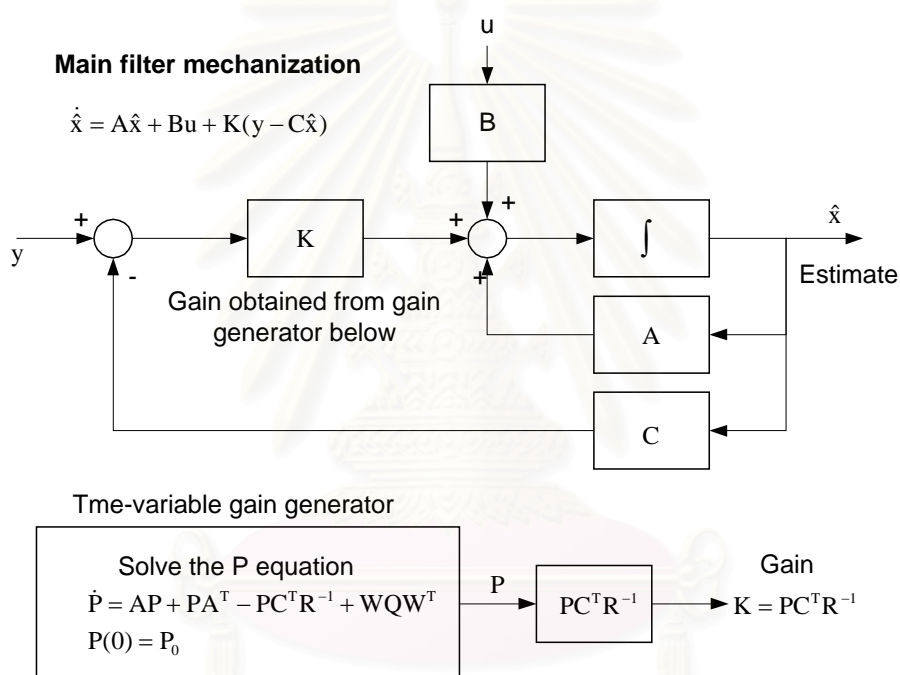
กำหนดให้ $\mathbf{A}_k \approx \mathbf{I} + \mathbf{A} \Delta t$ และ $\mathbf{B}_k = \mathbf{B} \Delta t$ แทนลงในสมการ 3.94 และละเทอมที่เป็นกำลังสองของ Δt จะได้

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}_{k|k} \Delta t + \mathbf{B} \mathbf{u}_k \Delta t + \mathbf{K} \Delta t (\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{C}_{k+1} \hat{\mathbf{x}}_{k|k}) \quad (3.95)$$

จากนั้นทำการหารตลอดด้วย Δt แล้วใส่ลิมิต $\Delta t \rightarrow 0$ และทำการยกเลิกตัวห้อย จะได้

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K(y - C\hat{x}) \quad (3.96)$$

สมการ 3.87, 3.92 และ 3.96 จะถูกนำมาใช้เป็นสมการการคำนวณของตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่อง ซึ่งสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และจากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าค่าของ P นั้นสามารถหาได้จากการคำนวณแบบออฟไลน์ (off-line) ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าเกน K เก็บไว้ก่อนได้ โดยที่ยังไม่ต้องทำการออนไลน์



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่อง

3.5 ตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย (The Extended Kalman Filter, EKF)

ดังได้กล่าวมาข้างต้นว่าปัญหาโดยทั่วไปของตัวกรองคาลมานนั้นจะเกี่ยวข้องกับการประมาณค่าสเททของระบบเชิงเส้น แต่ระบบจริงในทางอุตสาหกรรมนั้นมักจะเป็นระบบไม่เชิงเส้นและความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเททกับค่าการวัดนั้นอาจไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงแก้ไขขั้นตอนการคำนวณ

บางขั้นตอนเพื่อให้สามารถนำตัวกรองคาลมานไปประยุกต์ใช้งานกับระบบไม่เชิงเส้นได้ จึงเป็นที่มาของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย

พิจารณาแบบจำลองของระบบไม่เชิงเส้น ดังนี้

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k) \quad (3.97)$$

และสมการค่าการวัด คือ

$$y_k = h(x_k, v_k) \quad (3.98)$$

เมื่อ ฟังก์ชัน f คือ สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเตท ณ เวลา k และค่าสเตท ณ เวลา $k+1$

ฟังก์ชัน h คือ สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัด y_k และค่าสเตท x_k

w_k และ v_k เป็นตัวแปรสุ่มสัญญาณรบกวนของระบบและค่าการวัดที่เป็นอิสระซึ่งกันและกันและมีการกระจายแบบปกติ ซึ่งก็คือ $\text{Prob}(w_k) \approx N(0, Q_k)$ และ $\text{Prob}(v_k) \approx N(0, R_k)$

เนื่องจากในทางปฏิบัติค่าสัญญาณรบกวน w_k และ v_k นั้นเป็นค่าที่ไม่สามารถทราบได้อย่างแน่นอน ดังนั้นจึงทำการประมาณสมการ 3.97 และ 3.98 ดังนี้

$$\tilde{x}_{k+1|k} = f(\hat{x}_{k|k}, u_k, 0) \quad (3.99)$$

$$\tilde{y}_{k+1} = h(\tilde{x}_{k+1|k}, 0) \quad (3.100)$$

จากอนุกรมเทย์เลอร์ ถ้าทำการลিনিยไรซ์รอบค่าประมาณของฟังก์ชันระบบและฟังก์ชันค่าการวัดในสมการ 3.97 และ 3.98 จะได้

$$x_{k+1} = \tilde{x}_{k+1|k} + A_k(x_k - \hat{x}_{k|k}) + W_k w_k \quad (3.101)$$

$$y_{k+1} = \tilde{y}_{k+1} + C_{k+1}(x_{k+1} - \tilde{x}_{k+1|k}) + V_{k+1} v_{k+1} \quad (3.102)$$

เมื่อ x_k และ y_{k+1} คือ ค่าสเตทและค่าการวัดจริงของระบบ

$\tilde{x}_{k+1|k}$ และ \tilde{y}_{k+1} คือ ค่าประมาณของสเตทและค่าการวัดที่ได้จากแบบจำลองของสมการ 3.99 และ 3.100 ตามลำดับ

$\hat{x}_{k|k}$ คือ ค่าประมาณจริงของสเตท ณ เวลา k

A_k คือ เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix) อนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชัน f เมื่อเทียบกับ x ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$A_{k[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}(\hat{x}_{k|k}, u_k, 0)}{\partial x_{k[j]}} \quad (3.103)$$

W คือ เมตริกซ์จาโคเบียนอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชัน f เมื่อเทียบกับ w ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$W_{k[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}(\hat{x}_{k|k}, u_k, 0)}{\partial w_{k[j]}} \quad (3.104)$$

H คือ เมตริกซ์จาโคเบียนอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชัน h เมื่อเทียบกับ z ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$C_{k+1[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}(\tilde{x}_{k+1|k}, 0)}{\partial y_{k+1[j]}} \quad (3.105)$$

V คือ เมตริกซ์จาโคเบียนอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชัน h เมื่อเทียบกับ v ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$V_{k+1[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}(\tilde{x}_{k+1|k}, 0)}{\partial v_{k+1[j]}} \quad (3.106)$$

ถ้านิยามเทอมความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าสเตทจริงกับค่าประมาณที่ได้จากแบบจำลอง

$$\tilde{\epsilon}_{x_{k+1}} = x_{k+1} - \tilde{x}_{k+1|k} \quad (3.107)$$

และเทอม Residual ของค่าการวัดที่ได้จากแบบจำลอง

$$\tilde{\epsilon}_{y_{k+1}} = y_{k+1} - \tilde{y}_{k+1} \quad (3.108)$$

จะได้

$$\tilde{\epsilon}_{x_{k+1}} = A(x_k - \hat{x}_{k|k}) + \epsilon_k \quad (3.109)$$

และ
$$\tilde{\epsilon}_{y_{k+1}} = C_{k+1} \tilde{\epsilon}_{x_{k+1}} + \eta_{k+1} \quad (3.110)$$

เมื่อ ϵ_k คือ ค่าตัวแปรสุ่มซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีเมตริกซ์ความแปรปรวน คือ WQW^T

$$\text{หรือ } P(\epsilon_k) \sim N(0, WQ_k W^T)$$

η_{k+1} คือ ค่าตัวแปรสุ่มซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีเมตริกซ์ความแปรปรวน คือ VRV^T

$$\text{หรือ } P(\eta_{k+1}) \sim N(0, VR_{k+1} V^T)$$

เนื่องจากค่าสเตทจริง x_{k+1} นั้นเป็นค่าที่ไม่สามารถทราบค่าได้อย่างแน่นอน ในขณะที่ค่าการวัดจริง y_{k+1} นั้นเป็นค่าที่สามารถทราบได้ ดังนั้น จึงอาจจะใช้ค่าการวัดจริง y_{k+1} มาช่วยในการหาค่าสเตท x_{k+1} ซึ่งอาจจะใช้ในรูป Residual ของค่าการวัดในทำนองเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในสมการ 3.47

ถ้านิยามเทอมคลาดเคลื่อนระหว่างค่าประมาณจริงกับค่าประมาณที่ได้จากแบบจำลอง

$$\hat{e}_{k+1} = \hat{x}_{k+1|k+1} - \tilde{x}_{k+1|k} \quad (3.111)$$

จะได้

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \tilde{x}_{k+1|k} + \hat{e}_{k+1} \quad (3.112)$$

จากสมการ 3.112 ถ้าชดเชยเทอมความคลาดเคลื่อน \hat{e}_{k+1} ด้วยเทอมของค่าถ่วงน้ำหนักคูณกับ Residual ของค่าการวัด จะได้

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \tilde{x}_{k+1|k} + K_{k+1} \tilde{y}_{k+1} \quad (3.113)$$

หรือ

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \tilde{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - \tilde{y}_{k+1}) \quad (3.114)$$

จากที่กล่าวมา เมื่อทำการเปลี่ยนสัญลักษณ์ $\tilde{x}_{k+1|k}$ เป็น $\hat{x}_{k+1|k}$ จะสามารถนำมาสรุปเป็นขั้นตอนการคำนวณและแผนภาพของตัวกรองคาลมานแบบยัดขยายได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5

สมการการทำนาย

- คำนวณค่าประมาณโดยอาศัยค่าข้อมูลในอดีต

$$\hat{x}_{k+1|k} = f(\hat{x}_{k|k}, u_k, 0)$$

- คำนวณเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนที่ได้จากค่าข้อมูลในอดีต

$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + W_k Q_k W_k^T$$

สมการการแก้ไข

- คำนวณค่าเมตริกซ์เกนคาลมาน

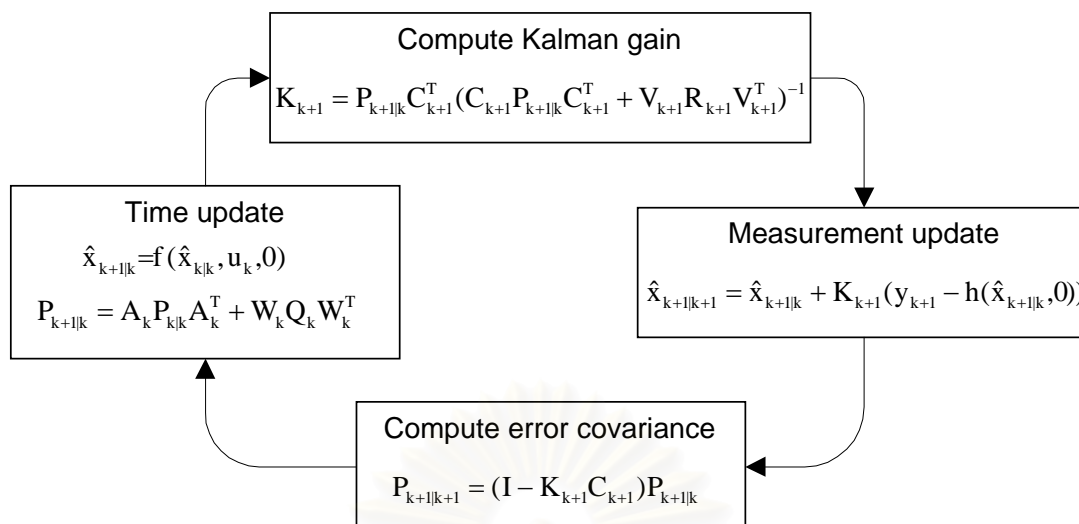
$$K_{k+1} = P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + V_{k+1} R_{k+1} V_{k+1}^T)^{-1}$$

- คำนวณค่าประมาณค่าใหม่

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - h(\hat{x}_{k+1|k}, 0))$$

- คำนวณค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนค่าใหม่

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1|k}$$



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นว่าขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายที่กล่าวในหัวข้อนี้จะคล้ายกับขั้นตอนการคำนวณที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งจะต่างกันที่การคำนวณค่า $\hat{x}_{k+1|k}$ และค่าประมาณของค่าการวัด \hat{y}_{k+1} ในสมการการปรับปรุง ซึ่งจะทำให้การคำนวณจากสมการในรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้นเลย ในขณะที่ขั้นตอนการคำนวณอื่นยังคงเป็นรูปแบบเดิม

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่องและตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย

ตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง	ตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย
<p><u>สมการการทำนาย</u></p> <ol style="list-style-type: none"> $\hat{x}_{k+1 k} = A_k \hat{x}_{k k} + B_k u_k$ $P_{k+1 k} = A_k P_{k k} A_k^T + Q_k$ <p><u>สมการการแก้ไข</u></p> <ol style="list-style-type: none"> $K_{k+1} = P_{k+1 k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1 k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1}$ $\hat{x}_{k+1 k+1} = \hat{x}_{k+1 k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1 k})$ $P_{k+1 k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1 k}$ 	<p><u>สมการการทำนาย</u></p> <ol style="list-style-type: none"> $\hat{x}_{k+1 k} = f(\hat{x}_{k k}, u_k, 0)$ $P_{k+1 k} = A_k P_{k k} A_k^T + W_k Q_k W_k^T$ <p><u>สมการการแก้ไข</u></p> <ol style="list-style-type: none"> $K_{k+1} = P_{k+1 k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1 k} C_{k+1}^T + V_{k+1} R_{k+1} V_{k+1}^T)^{-1}$ $\hat{x}_{k+1 k+1} = \hat{x}_{k+1 k} + K_{k+1} (y_{k+1} - h(\hat{x}_{k+1 k}, 0))$ $P_{k+1 k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1 k}$

3.6 การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองคาลมาน

จากขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานพบว่า ต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ค่าประมาณ $x_{k|k}$ และเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ $P_{k|k}$ นอกจากนี้ยังต้องกำหนดค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง Q_k และเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของการวัด R_k ซึ่งหลักในการกำหนดค่าดังกล่าวอาจพอสรุปได้ ดังนี้

3.6.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ค่าประมาณ ($x_{k|k}$) และเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ ($P_{k|k}$)

การกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ค่าประมาณ $x_{k|k}$ นั้น จะขึ้นอยู่กับค่าสมมติค่าของผู้ใช้ ซึ่งอาจมาจากประสบการณ์หรืออาศัยค่าการวัดในอดีต ส่วนการกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ $P_{k|k}$ จะขึ้นอยู่กับความเชื่อมั่นในค่าที่สมมติขึ้น ซึ่งถ้าไม่แน่ใจในค่าที่สมมติก็อาจกำหนดค่าเมตริกซ์ $P_{k|k}$ ให้มีค่ามากๆ โดยค่าที่ตำแหน่งทะแยงมุมของเมตริกซ์ $P_{k|k}[i, i]$ จะแทนความไม่แน่นอนของค่าประมาณ $x_{k|k}[i]$ เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$ ส่วนค่าที่ไม่อยู่ในตำแหน่งทะแยงมุม $P_{k|k}[i, j]$ เมื่อ $i \neq j$ จะเป็นค่าความไม่แน่นอนร่วมของค่าประมาณ $x_{k|k}[i]$ และ $x_{k|k}[j]$ โดยทั่วไปจะสมมติให้ค่าประมาณ $x_{k|k}[i]$ และ $x_{k|k}[j]$ ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน นั่นก็คือ ค่าที่ไม่อยู่ในแนวทะแยงมุมของเมตริกซ์ $P_{k|k}$ จะถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์นั่นเอง

3.6.2 การกำหนดค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Q_k)

โดยทั่วไปเพื่อความง่าย เมตริกซ์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง Q_k จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ โดยการกำหนดค่าเมตริกซ์ Q_k จะขึ้นอยู่กับว่าแบบจำลองที่หามาได้นั้นมีความถูกต้องมากน้อยเพียงไร โดยถ้าเชื่อว่าแบบจำลองที่หามาได้มีความถูกต้อง ก็อาจกำหนดค่าของเมตริกซ์ Q_k ให้มีค่าน้อยๆ ในการตรวจสอบว่าแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องหรือไม่ อาจทำได้โดยการตรวจสอบค่าที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริง (ทั้งนี้เครื่องมือวัดที่ใช้กันควรจะมีความน่าเชื่อถือ) อย่างไรก็ตามในการกำหนดค่าเมตริกซ์ Q_k นั้นอาจถูกกำหนดให้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับไดนามิกของระบบ เช่น อาจกำหนดให้ Q_k มีค่าน้อยๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางไดนามิกอย่างช้าๆ และกำหนดให้ Q_k มีค่ามากๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางไดนามิกอย่างรวดเร็ว

3.6.3 การกำหนดค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าการวัด (R_k)

การกำหนดค่าเมตริกซ์ R_k โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยหลักในการกำหนดค่าจะขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวัด ซึ่งถ้าเครื่องมือวัดมีความน่าเชื่อถือน้อยก็อาจกำหนดค่าของเมตริกซ์ R_k ให้มีค่ามากๆ อย่างไรก็ตามค่าของเมตริกซ์ R_k นั้นอาจจะหาได้จากการสอบเทียบกับเครื่องมือวัด และเช่นเดียวกับการกำหนดค่าเมตริกซ์ Q_k ค่าของเมตริกซ์ R_k อาจถูกกำหนดให้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ เช่น ในกรณีที่เครื่องมือวัดได้รับผลกระทบจากแหล่งกำเนิดสัญญาณเคลื่อนที่

หมายเหตุ ในการกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ $P_{k|k}$ อาจทำได้โดยการกำหนดค่าของเมตริกซ์ Q_k แล้วจึงทำการแก้สมการ $P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + W_k Q_k W_k^T$ โดยสมมติให้ $P_{k+1|k} = P_{k|k}$

3.6.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ตัวกรองคาลมานในการประมาณค่าคงที่

ตัวอย่างนี้จะแสดงให้เห็นถึงเทคนิคการประยุกต์ใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อช่วยในการประมาณตัวแปรค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยสมมติให้ตัวแปรนั้นสามารถถูกวัดได้ แต่เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนในการวัดจึงทำให้ไม่สามารถทราบค่าที่ถูกต้องแน่นอน

สมการแบบจำลอง

จากข้อกำหนดสามารถเขียนเป็นสมการแบบจำลองได้ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = 0 \quad (3.115)$$

และ สมการการวัด

$$y_k = x_k + v_k \quad (3.116)$$

ในตัวอย่างนี้จะสมมติให้ค่าของตัวแปรมีค่าคงที่อยู่ที่ค่า 5 และการวัดถูกรบกวนด้วยระดับสัญญาณรบกวน 0.5 ซึ่งจะทำให้ค่าที่วัดได้มีค่าแกว่งอยู่ในช่วงค่า 4.5-5.5

สมการแบบจำลองในตัวกรองคาลมาน

จากข้อมูลสามารถเขียนแบบจำลองที่ใช้ในตัวกรองคาลมานได้ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = 0 \quad (3.117)$$

หรือ สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t} = 0 \quad (3.118)$$

$$x_{k+1} = x_k \quad (3.119)$$

เมื่อเทียบกับรูปแบบของสมการ

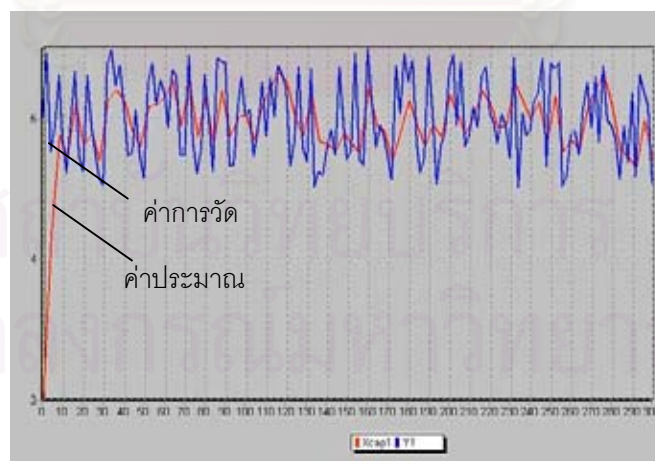
$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k U_k \quad (3.120)$$

ซึ่งจะได้

$$A_k = [1] \quad B_k = [0] \quad U_k = 0$$

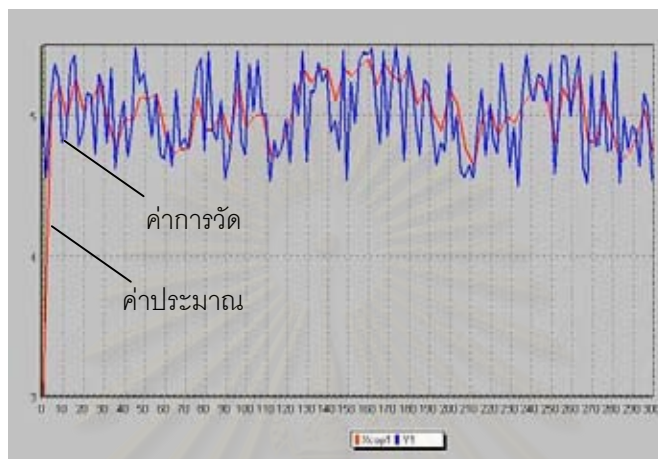
จากสมการทั้งหมดที่ได้กล่าวมา สามารถนำมาทำการจำลองกระบวนการเพื่อดูผลการประมาณค่า โดยในตัวอย่างนี้ จะแสดงให้เห็นถึงผลการการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองคาลมานที่มีผลต่อค่าประมาณต่างๆ ดังจะแสดงต่อไปนี้

ผลการจำลองกระบวนการ



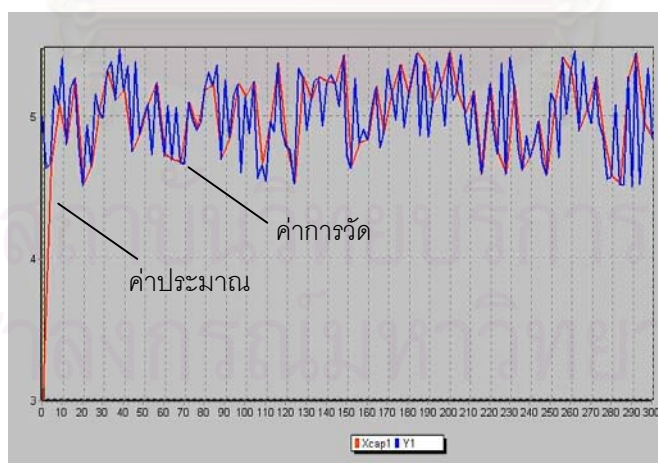
รูปที่ 3.6 กรณีที่ 1 $x_{k|k,t=0} = 3$, $P_{k|k,t=0} = [1]$, $Q = [1]$, $R = [1]$

กรณีนี้จะเป็นกรณีที่กำหนดให้ตัวกรองคาดหมายเชื่อค่าประมาณเริ่มต้น แบบจำลอง และค่าการวัด ในระดับที่เท่ากันหมด จึงให้ค่าพามิเตอร์ $P_{k|k,t=0}$, Q , R มีค่าเป็น 1 เท่ากันหมด จากรูปจะเห็นว่าตัวกรอง คาดหมายสามารถให้ผลการประมาณค่าที่มีความถูกต้องในระดับหนึ่ง โดยค่าที่ประมาณได้มีความใกล้เคียง 5 มากกว่าค่าที่ได้จากการวัด



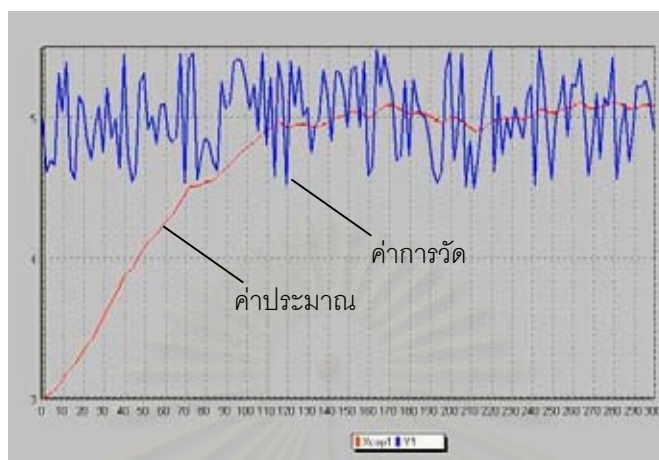
รูปที่ 3.7 กรณีที่ 2 $x_{k|k,t=0} = 3$, $P_{k|k,t=0} = [100]$, $Q = [1]$, $R = [1]$

กรณีนี้จะเป็นกรณีที่กำหนดให้ตัวกรองคาดหมายไม่เชื่อค่าประมาณเริ่มต้น ดังนั้นจึงกำหนดให้ เมตริกซ์ $P_{k|k,t=0}$ มีค่าเป็น 100 ซึ่งจากผลที่ได้จะเห็นว่าค่าประมาณสามารถเข้าสู่ค่า 5 ได้เร็วขึ้น



รูปที่ 3.8 กรณีที่ 3 $x_{k|k,t=0} = 3$, $P_{k|k,t=0} = [1]$, $Q = [100]$, $R = [1]$

กรณีนี้เป็นกรณีที่กำหนดให้ตัวกรองคาลมานไม่เชื่อแบบจำลอง ดังนั้นจึงกำหนดให้เมตริกซ์ Q มีค่าเป็น 100 ซึ่งจากผลที่ได้จะเห็นว่าค่าประมาณที่ได้เข้าใกล้ค่าการวัดมากขึ้น



รูปที่ 3.9 กรณีที่ 4 $x_{k|k,t=0} = 3$, $P_{k|k,t=0} = [1]$, $Q = [1]$, $R = [100]$

กรณีนี้เป็นกรณีที่กำหนดให้ตัวกรองคาลมานไม่เชื่อค่าจากการวัด ดังนั้นจึงกำหนดให้เมตริกซ์ R มีค่าเป็น 100 ซึ่งจากผลที่ได้จะเห็นว่าค่าประมาณที่ได้จะลู่เข้าสู่ค่า 5 อย่างช้าๆ (เพราะตัวกรองคาลมานไม่เชื่อว่าค่าที่วัดได้นั้นจะถูกต้องจึงเพิ่มค่าจาก 3 อย่างช้าๆ) อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงที่เวลาประมาณ 100 ตัวกรองคาลมานก็สามารถให้ค่าประมาณที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าจริง

ดังแสดงในตัวอย่างที่ผ่านมา จะเห็นว่าการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองคาลมานเป็นสิ่งที่สำคัญ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของการจูนที่แตกต่างกันสามารถให้มาซึ่งผลการประมาณค่าที่แตกต่างกัน ดังแสดงในผลการจำลองของตัวอย่างที่ได้แสดงผ่านมา ค่าการจูนที่เหมาะสมสามารถให้มาซึ่งผลการประมาณค่าที่มีประสิทธิภาพ ในทางตรงกันข้ามค่าการจูนที่ไม่ดีจะให้มาซึ่งผลการประมาณค่าที่ไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งในบางกรณีกับระบบที่ค่อนข้างว่องไว ค่าการจูนที่ไม่ดีอาจนำไปสู่การประมาณค่าที่ผิดพลาดได้

บทที่ 4

การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์

ในส่วนของงานการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์นั้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้คอมพิวเตอร์บอร์ด เดสท็อปในการพัฒนาซอฟต์แวร์ บอร์ดเดสท็อปเป็นคอมพิวเตอร์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการพัฒนา โปรแกรมบนวินโดวส์ในรูปแบบวิซวล (visual) ที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากภาษาบอร์ดเดสท็อปเป็นภาษาที่ได้รับการพัฒนามาจากภาษาปาสคาลซึ่งเป็นภาษาที่มีโครงสร้าง การใช้งานที่ง่าย นอกจากนี้ บอร์ดเดสท็อปยังสนับสนุนการเขียนโปรแกรมในรูปแบบเชิงวัตถุ (object-oriented programming) ซึ่งเป็นรูปแบบของการเขียนโปรแกรมเพื่อให้ผู้พัฒนารุ่นต่อไปสามารถนำมา พัฒนาต่อได้โดยง่าย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ KSTAPEN+ ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เพื่อใช้สำหรับศึกษาการ ประยุกต์ใช้งานตัวกรองคาลมานในกระบวนการทางวิศวกรรมเคมี และนอกจากนี้ยังได้ทำการพัฒนา ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ตัวกรองคาลมานอีกด้วย เพื่อให้ผู้ศึกษาสามารถนำคอมพิวเตอร์ที่ตัวกรองคาลมานที่ ได้ไปใช้ร่วมกับงานเขียนโปรแกรมภายในคอมพิวเตอร์ต่างๆ ได้ การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ KSTAPEN+ และคอมพิวเตอร์ที่ตัวกรองคาลมานจะกล่าวได้ดังต่อไปนี้

4.1 การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ KSTAPEN+

การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ KSTAPEN+ นั้น ในงานวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ส่วน ของการคำนวณ และส่วนช่วยเหลือผู้ใช้งาน

4.1.1 ส่วนของขั้นตอนการคำนวณ

4.1.1.1 ส่วนการรับค่าข้อมูล

ในส่วนนี้จะเกี่ยวกับการรับค่าข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นก่อนที่จะทำการรันโปรแกรม ซึ่งจะสามารถแบ่ง ออกเป็นส่วนต่างๆ ได้อีกดังนี้

4.1.1.1.1 ส่วนรับค่าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ

- การรับค่าจำนวนสเตท ตัวแปรปรับกระบวนการ และตัวแปรรบกวน
- การรับข้อมูลสมการแบบจำลองของกระบวนการ และสถานะของการวัด
- การรับข้อมูลพารามิเตอร์ซึ่งใช้ในสมการแบบจำลองของกระบวนการ
- การรับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวน
- การรับค่าเริ่มต้นของค่าสเตท และตัวแปรปรับกระบวนการ
- การรับค่าเวลา และค่าช่วงกว้างของการคำนวณ (step size)

4.1.1.1.2 ส่วนรับค่าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวัด

ในส่วนนี้เป็นการรับค่าสัญญาณรบกวนการวัด และช่วงเวลาในการวัด (sampling time)

4.1.1.1.3 ส่วนรับค่าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองคาลมาน

- การรับค่าจำนวนตัวแปรที่ต้องการประมาณ
- การรับข้อมูลสมการแบบจำลองที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน
- การรับข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใส่เพิ่มเติมที่กำหนดในแบบจำลองที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน
- การรับค่าเริ่มต้นของค่าประมาณ
- การรับค่าพารามิเตอร์จูนนิ่งของตัวกรองคาลมาน
- การรับค่าเมตริกซ์ C
- การรับค่าช่วงเวลาในการประมาณค่า

4.1.1.1.4 ส่วนรับค่าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุม

- การรับค่าขอบเขตของค่าตัวแปรปรับกระบวนการ
- การรับค่าข้อมูลของตัวควบคุมแบบพีไอดี
- การรับค่าข้อมูลของตัวควบคุมแบบเงินเนริกโมเดล
- การรับค่าข้อมูลสมการเพื่อชดเชยไดนามิกของกระบวนการ

4.1.1.2 ส่วนการรันของโปรแกรม

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของรันโปรแกรมเพื่อทำการจำลองกระบวนการ ในส่วนนี้จะมีการรับข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณจากส่วนที่ 1 ข้อมูลที่รับมานี้จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของการรัน โดยจะแบ่งรูปแบบของการรันโปรแกรมเป็นลักษณะต่างๆ ดังนี้

4.1.1.2.1 การรันแบบลูปเปิด (open loop)

ในการรันแบบลูปเปิด ข้อมูลที่ต้องการ คือ ส่วนที่ 4.1.1.1.1 และ 4.1.1.1.2

4.1.1.2.2 การรันแบบลูปเปิดร่วมกับตัวกรองคาลมาน

ในการรันแบบลูปเปิดร่วมกับตัวกรองคาลมาน ข้อมูลที่ต้องการ คือ ส่วนที่ 4.1.1.1.1, 4.1.1.1.2 และ 4.1.1.1.3

4.1.1.2.3 การรันแบบลูปปิดร่วมกับตัวกรองคาลมาน

การรันแบบลูปปิดร่วมกับตัวกรองคาลมานในขั้นนี้จะแบ่งลักษณะของการรันออกเป็นอีก 2 ลักษณะ คือ

- การรันแบบลูปปิดโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับตัวกรองคาลมาน

ในการรันแบบลูปปิดโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับตัวกรองคาลมาน ข้อมูลที่ต้องการ คือ ส่วนที่ 4.1.1.1.1, 4.1.1.1.2, 4.1.1.1.3 และ 4.1.1.1.4

- การรันแบบลูปปิดโดยใช้ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลร่วมกับตัวกรองคาลมาน

ในการรันแบบลูปปิดโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับตัวกรองคาลมาน ข้อมูลที่ต้องการ คือ ส่วนที่ 4.1.1.1.1, 4.1.1.1.2, 4.1.1.1.3 และ 4.1.1.1.4

4.1.1.3 ส่วนการแสดงผล

ในส่วนนี้ ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณในส่วนที่ 2 จะถูกเลือกเพื่อนำมาแสดงผล โดยการแสดงผลจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ในรูปของข้อมูลเชิงตัวเลข และในรูปแบบของกราฟ

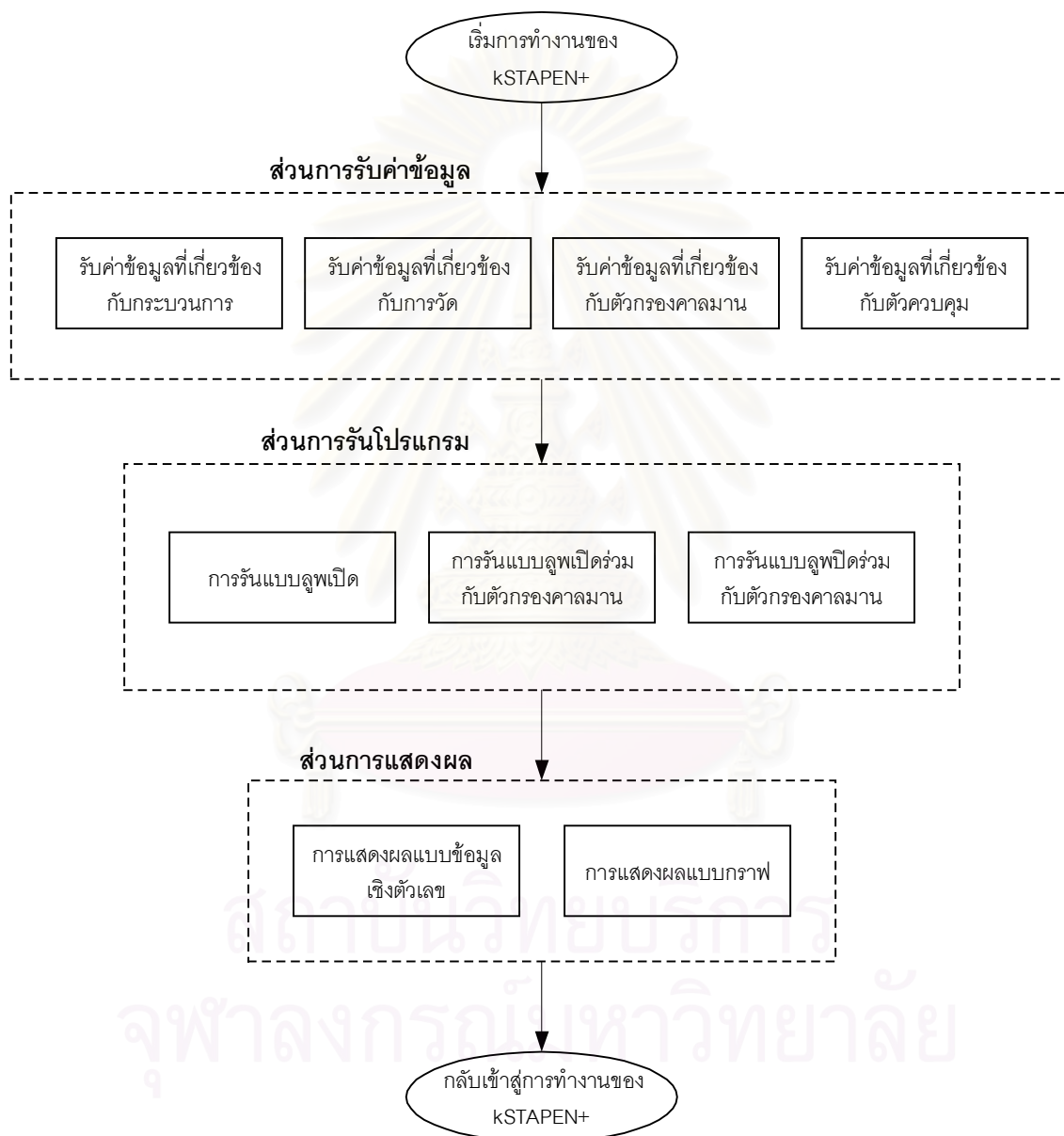
4.1.1.3.1 การแสดงผลแบบข้อมูลเชิงตัวเลข

การแสดงผลแบบข้อมูลเชิงตัวเลขจะทำโดยการนำข้อมูลที่ถูกเลือกมาเก็บไว้ในไฟล์รูปแบบไฟล์ข้อความ (text file type) ในหนึ่งไฟล์ข้อมูลจะประกอบด้วยคู่ของชุดข้อมูลเวลาและค่าของตัวแปรนั้นๆ ซึ่งผู้ใช้สามารถที่จะนำไปเปิดด้วยโปรแกรมต่างๆ เช่น โน้ตแพด (Notepad), เวิร์ด (word), เอ็กเซล (Excel) เป็นต้น

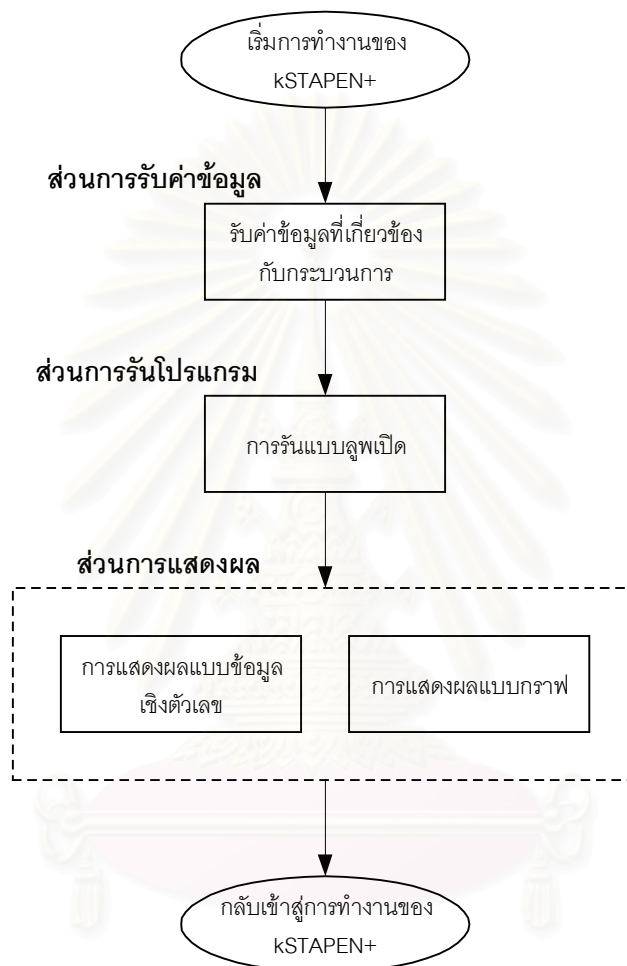
4.1.1.3.2 การแสดงผลแบบกราฟ

การแสดงผลในรูปแบบนี้ ข้อมูลที่ถูกเลือกมาจะถูกนำมาเสนอในรูปแบบกราฟ และเพื่อความสะดวกต่อผู้ใช้ จึงได้มีการเพิ่มเติมส่วนช่วยเหลือในการย่อขยายกราฟ การกำหนดช่วงข้อมูลในแกน XY นอกจากนี้ ยังได้เพิ่มส่วนการทำสำเนาและเก็บกราฟไว้ในรูปแบบของไฟล์รูปภาพอีกด้วย

จากส่วนของขั้นตอนการคำนวณที่ได้กล่าวมาสามารถนำมาสรุปเป็นแผนภาพ โดยแบ่งตามรูปแบบของการรันโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.4

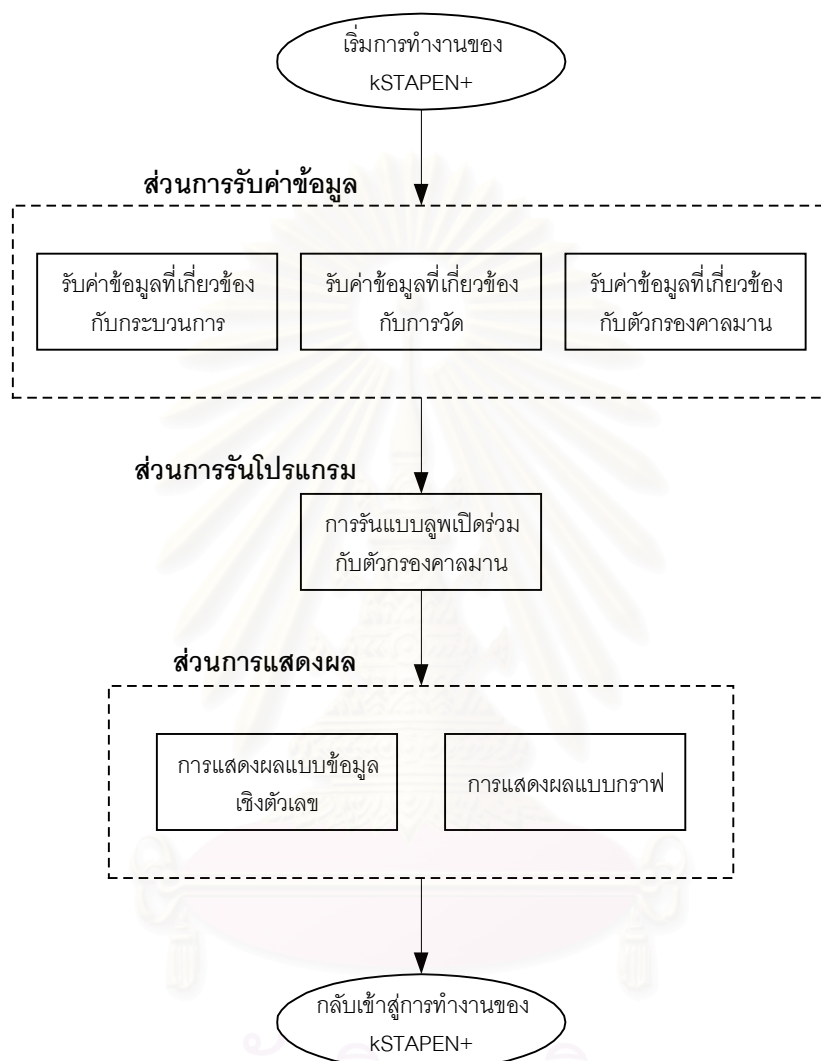


รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

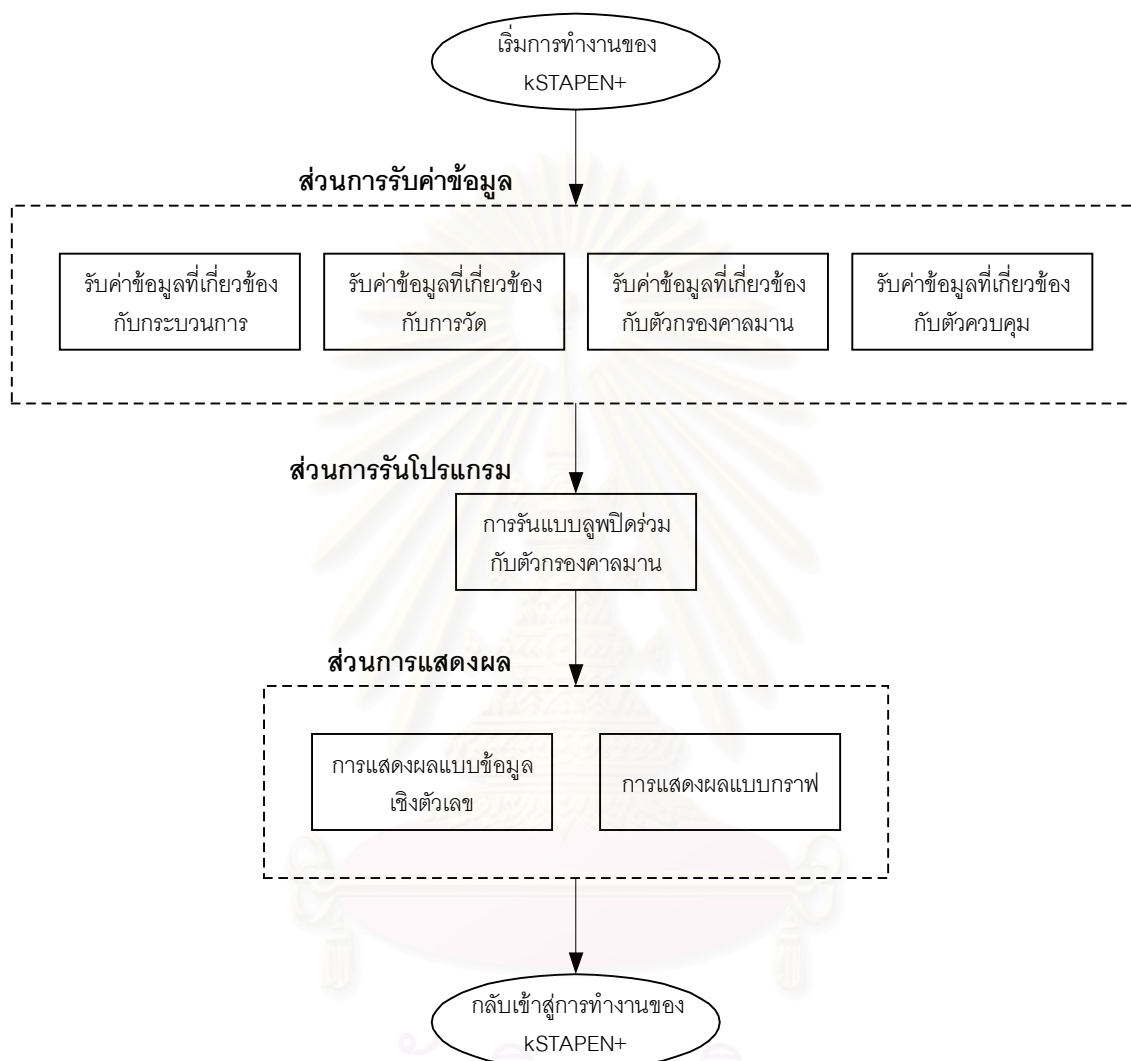


รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+
กรณีรันแบบลูปเปิด

สภามหาวิทยาลัยบูรพา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ กรณีรันแบบลูปเปิดร่วมกับตัวกรองคาลมาน



รูปที่ 4.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

กรณีรันแบบลูเปิดร่วมกับตัวกรองคาลมาน

4.1.2 ส่วนช่วยเหลือผู้ใช้งาน

นอกจากส่วนของ การคำนวณที่ได้กล่าวมาแล้ว ในงานวิจัยนี้ยังได้มีการสร้างส่วนช่วยเหลือเพื่อความสะดวกและง่ายต่อผู้ใช้งาน อีกทั้งเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานซอฟต์แวร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซอฟต์แวร์ KSTAPEN+ จะประกอบด้วยส่วนช่วยเหลือต่างๆ ดังนี้

4.1.2.1 ส่วนการเก็บและโหลดข้อมูลจากไฟล์

เพื่อให้ผู้ใช้งานจะสามารถกลับมาศึกษาระบบเดิมได้อีกครั้ง โดยไม่ต้องทำการกำหนดข้อมูลต่างๆ ใหม่ ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการเพิ่มเติมส่วนการเก็บและโหลดข้อมูลจากไฟล์ขึ้นมา โดยผู้ใช้งานที่จะเก็บข้อมูลต่างๆ ที่ได้เคยใส่ไว้ในซอฟต์แวร์ลงในไฟล์ข้อมูลในรูปแบบไฟล์นามสกุลเคเอสเอฟ (ksf) ซึ่งเป็นรูปแบบของไฟล์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้งานในซอฟต์แวร์ KSTAPEN+ และเมื่อผู้ใช้งานต้องการจะกลับมาศึกษาระบบเดิมอีกครั้งก็สามารถทำได้โดยการโหลดข้อมูลจากไฟล์

4.1.2.2 ส่วนการตรวจสอบความผิดพลาด

ในการพัฒนาซอฟต์แวร์นั้น เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถที่จะแก้ปัญหาความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ด้วยตนเองและเพื่อให้ซอฟต์แวร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง การตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากผู้ใช้งานจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ ในงานวิจัยจึงได้มีการเพิ่มเติมส่วนการตรวจสอบความผิดพลาดจากการใส่ค่าข้อมูล ซึ่งจะเตือนผู้ใช้งานเมื่อผู้ใช้งานใส่ค่าข้อมูลผิดไปจากรูปแบบที่กำหนดไว้ในซอฟต์แวร์

4.1.2.3 ส่วนการเตือนความจำ

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของข้อความเพื่อใช้เตือนความจำของผู้ใช้งาน เนื่องจากในบางครั้งผู้ใช้อาจมีการเก็บกรณีศึกษาไว้ในไฟล์ข้อมูลมากมาย ซึ่งเมื่อทำการโหลดข้อมูลขึ้นมาอาจไม่สามารถทราบได้ว่าเป็นกรณีศึกษาใด

4.1.2.4 ตัวอย่างการใช้งานซอฟต์แวร์

เพื่อที่จะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าใจถึงการใช้งานซอฟต์แวร์ได้อย่างรวดเร็ว ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการเพิ่มเติมส่วนการฝึกสอนการใช้งานขึ้นมา ในส่วนนี้จะประกอบด้วยเอกสารอธิบายถึงการใช้งานซอฟต์แวร์ KSTAPEN+ กับระบบตัวอย่าง

4.1.2.5 ส่วนของไฟล์ช่วยเหลือ (help file)

ไฟล์ช่วยเหลือการใช้งานอาจนับเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการพัฒนาซอฟต์แวร์ทุกประเภท เนื่องจากผู้ใช้ที่ยังไม่เคยใช้งานซอฟต์แวร์มาก่อนอาจไม่สามารถเข้าใจถึงวิธีการใช้งาน อีกทั้งในกรณีที่มีปัญหาที่เกิดขึ้นขณะใช้งาน ผู้ใช้อาจไม่สามารถแก้ปัญหาได้ ในงานวิจัยจึงได้มีการจัดทำส่วนของไฟล์ช่วยเหลือการใช้งาน เพื่อใช้ในการสอนอ้างอิงสำหรับผู้ใช้งานซอฟต์แวร์

นอกจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ที่ได้พัฒนาขึ้นแล้ว ในงานวิจัยยังได้มีการพัฒนาคอมโพเนนต์ (component) เพื่อช่วยในการใช้งานตัวกรองคาลมานภายในโปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วยคอมไพเลอร์ชนิดต่างๆ โดยได้ทำการพัฒนาคอมโพเนนต์ในรูปแบบของคอม (Component Object Model, COM) ซึ่งเป็นรูปแบบคอมโพเนนต์ที่ได้รับการสนับสนุนให้สามารถใช้งานได้ ในคอมไพเลอร์ชนิดต่างๆ บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 98 เช่น บอร์แลนด์เดลไฟ วิศวลเบสิก เป็นต้น ซึ่งผู้ใช้งานคอมโพเนนต์สามารถเลือกใช้คอมไพเลอร์เพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรมได้เองตามต้องการ การออกแบบและพัฒนาคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมาน สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

4.2 การออกแบบและพัฒนาคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมาน

จากขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จะเห็นว่าในแต่ละรอบของการคำนวณของตัวกรองคาลมานนั้นจะต้องมีการรับส่งข้อมูลเสมอ ซึ่งก็คือค่าของ $\hat{x}_{k+1|k+1}$ และ $P_{k+1|k+1}$ จะถูกนำไปใช้ป้อนค่า $\hat{x}_{k|k}$ และ $P_{k|k}$ ที่รอบการคำนวณถัดไป ในงานวิจัยได้พิจารณาถึงรอบการทำงานของตัวกรองคาลมาน จึงได้ทำการแบ่งส่วนประกอบของคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมานออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

4.2.1 ส่วนการรับค่าข้อมูลเข้าสู่คอมโพเนนต์

ส่วนการรับค่าข้อมูลเข้าสู่คอมโพเนนต์นี้จะเป็นการรับค่าเมตริกซ์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมาน ดังนี้

4.2.1.1 แบบจำลองของระบบและการวัด ได้แก่ A_k , B_k และ C_k

4.2.1.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองคาลมาน ได้แก่ $P_{k|k}$, Q_k และ R_k

4.2.1.3 ค่าสแตต ตัวแปรปรับกระบวนการ และค่าการวัด ได้แก่ $\hat{x}_{k|k}$, u_k และ y_{k+1}

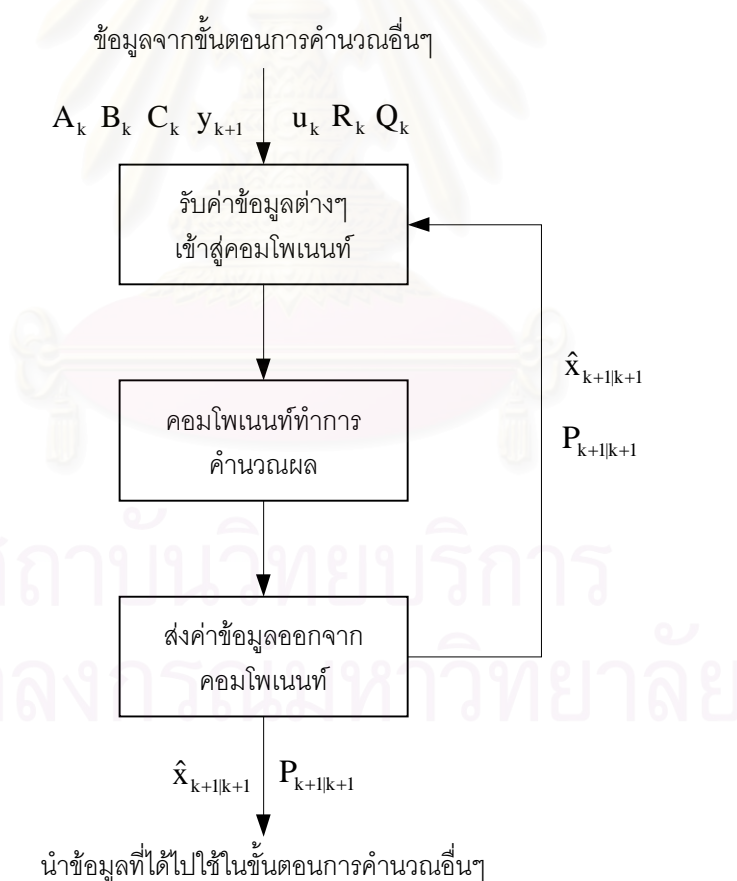
4.2.2 ส่วนการคำนวณ

ในส่วนนี้ค่าต่างๆ ที่ได้จากการกำหนดในหัวข้อ 4.2.1 จะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานเพื่อคำนวณหาค่าประมาณ $\hat{x}_{k+1|k+1}$ และค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนของค่าประมาณ $P_{k+1|k+1}$

4.2.3 ส่วนการส่งค่าข้อมูลออกจากคอมโพเนนท์

ในส่วนนี้จะเป็นการส่งค่าประมาณ $\hat{x}_{k+1|k+1}$ และค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนของค่าประมาณ $P_{k+1|k+1}$ เพื่อที่จะสามารถนำค่าที่ได้ไปใช้งานในขั้นตอนการคำนวณอื่นที่ผู้ใช้งานต้องการต่อไป

จากที่ได้กล่าวมาสามารถนำมาสรุปเป็นแผนภาพแสดงการทำงานของคอมโพเนนท์ที่ได้ดังนี้



รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมาน

บทที่ 5

การทดสอบซอฟต์แวร์

บทนี้จะแสดงถึงการทดสอบการใช้งานซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ร่วมกับกรณีศึกษาต่างๆ คือ ระบบเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ ระบบเครื่องให้ความร้อน ระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง และระบบเครื่องป้อนสารขนาดเด็ก และเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ในงานวิจัยจึงได้มีการเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วย Matlab โดยจะเลือกระบบเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ในการเปรียบเทียบผลเพื่อทดสอบความถูกต้อง

ในส่วนของ การทดสอบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์กของคาลมานั้น ในงานวิจัยจะทำการทดสอบการใช้งานคอมพิวเตอร์กับคอมพิวเตอร์แลนด์เดลไฟ และวิซวลเบสิก โดยจะทำการศึกษากับระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีการเกิดปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องกัน (consecutive reaction)

5.1 การทดสอบซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

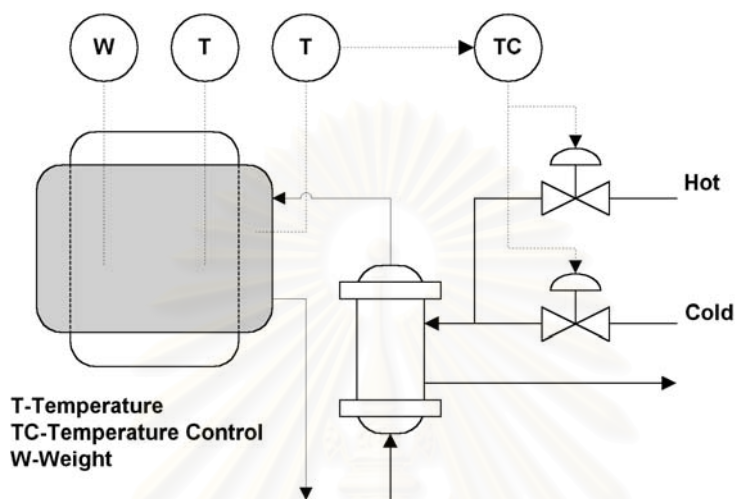
5.1.1 เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์

ปัญหาการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ถือเป็นปัญหาซึ่งยากต่อการควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มาจนถึงที่จุดหนึ่ง ปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยและเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรง เมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นขนาดมากเกินความสามารถของระบบหล่อเย็นก็จะไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในที่สุด ซึ่งจะส่งผลกระทบอย่างมากต่อทั้งบุคลากร อุปกรณ์ และผลิตภัณฑ์

กรณีศึกษานี้จะเป็นการศึกษาถึงการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ โดยใช้ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล เนื่องจากในแบบจำลองของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลต้องการค่าของความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาซึ่งเป็นค่าที่ไม่สามารถวัดได้ ดังนั้น ตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายจะถูกนำมาใช้ช่วยในการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา

5.1.1.1 แบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทช์ที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองของระบบที่ใช้ในการศึกษาจะอาศัยข้อมูลจาก Cott และ Macchietto (1989) ในการจำลองกระบวนการ ดังนี้



รูปที่ 5.1 แผนภาพการควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทช์

ระบบที่ใช้ในการศึกษานี้ จะพิจารณาระบบเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนที่มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ และการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบวัฏภาคของเหลว โดยจะมีการเกิดปฏิกิริยา 2 ปฏิกิริยา ดังนี้

ปฏิกิริยาที่ 1 : $A + B \rightarrow C$

ปฏิกิริยาที่ 2 : $A + C \rightarrow D$

เมื่อ C เป็นผลิตภัณฑ์สารที่ต้องการ และ D เป็นผลิตภัณฑ์สารที่ไม่ต้องการ และปฏิกิริยาทั้ง 2 นี้ เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อนที่มีค่าความร้อนของปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้ระบบนี้มีการคายความร้อนอย่างรุนแรง

ในการออกแบบการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ จะใช้แจ๊คเก็ตแบบไหลผ่านครั้งเดียว (single-pass jacket) ในระบบการให้ความร้อนและหล่อเย็น โดยมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิของสารที่ไหลเข้าแจ๊คเก็ตเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ในช่วง $90-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งในที่นี้จะทำการควบคุมที่ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ และสมมติให้อุณหภูมิของแจ๊คเก็ตนั้นถูกจำกัดอยู่ในช่วง $20-120\text{ }^{\circ}\text{C}$

แบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทช์ที่ใช้ในการศึกษา สามารถแสดงได้ดังนี้

สมการดุลมวลของสาร A

$$\frac{dM_A}{dt} = -R_1 - R_2 \quad (5.1)$$

สมการดุลมวลของสาร B

$$\frac{dM_B}{dt} = -R_1 \quad (5.2)$$

สมการดุลมวลของสาร C

$$\frac{dM_C}{dt} = R_1 - R_2 \quad (5.3)$$

สมการดุลมวลของสาร D

$$\frac{dM_D}{dt} = R_2 \quad (5.4)$$

เมื่อ $R_1 = k_1 M_A M_B \quad (5.5)$

$$R_2 = k_2 M_A M_C \quad (5.6)$$

$$k_1 = \exp(k_1^1 - k_1^2 / (Tr - 273.15)) \quad (5.7)$$

$$k_2 = \exp(k_2^1 - k_2^2 / (Tr - 273.15)) \quad (5.8)$$

สมการดุลพลังงานรอบเครื่องปฏิกรณ์

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{Q_r + Q_j}{M_r C_{p_r}} \quad (5.9)$$

สมการดุลพลังงานรอบแจ็กเก็ต

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{F_j \rho_j C_{p_j} (T_j^{sp} - T_j) - Q_j}{V_j \rho_j C_{p_j}} \quad (5.10)$$

เมื่อ $W_r = MW_A M_A + MW_B M_B + MW_C M_C + MW_D M_D \quad (5.11)$

$$M_r = M_A + M_B + M_C + M_D \quad (5.12)$$

$$C_{p_r} = (C_{p_A} M_A + C_{p_B} M_B + C_{p_C} M_C + C_{p_D} M_D) / M_r \quad (5.13)$$

$$V_r = W_r / \rho_r \quad (5.14)$$

$$A_r = 2V_r / r \quad (5.15)$$

$$Q_j = U_r A_r (T_j - T_r) \quad (5.16)$$

$$Q_r = -\Delta H_1 R_1 - \Delta H_2 R_2 \quad (5.17)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าสมบัติทางกายภาพของสารและข้อมูลของระบบ

$MW_A = 30 \text{ kg/kmol}$	$MW_B = 100 \text{ kg/kmol}$
$MW_C = 130 \text{ kg/kmol}$	$MW_D = 160 \text{ kg/kmol}$
$Cp_A = 75.31 \text{ kJ/(kmol } ^\circ\text{C)}$	$Cp_B = 167.36 \text{ kJ/(kmol } ^\circ\text{C)}$
$Cp_C = 217.57 \text{ kJ/(kmol } ^\circ\text{C)}$	$Cp_D = 334.73 \text{ kJ/(kmol } ^\circ\text{C)}$
$k_1^1 = 20.9057$	$k_1^2 = 10000$
$k_2^1 = 38.9057$	$k_2^2 = 17000$
$\Delta H_1 = -41840 \text{ kJ/kmol}$	$\Delta H_2 = -25105 \text{ kJ/kmol}$
$\rho_r = 1000 \text{ kg/m}^3$	$r = 0.5 \text{ m}$
$U_r = 40.842 \text{ kJ/(min m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$\rho_j = 1000 \text{ kg/m}^3$
$Cp_j = 1.8828 \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)}$	$F_j = 0.348 \text{ m}^3/\text{min}$
$V_j = 0.6812 \text{ m}^3$	

ตารางที่ 5.2 ค่าสภาวะเริ่มต้น

$M_A^0 = 12 \text{ kmol}$	$M_B^0 = 12 \text{ kmol}$
$M_C^0 = 0 \text{ kmol}$	$M_D^0 = 0 \text{ kmol}$
$T_r^0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_j^0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

5.1.1.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลเป็นตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองที่สามารถใช้ได้กับแบบจำลองทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ด้วยความง่ายของอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณจึงทำให้การประยุกต์ใช้งานตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง อัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = K_1(x^{sp} - x) + K_2 \int_0^t (x^{sp} - x) dt \quad (5.18)$$

เมื่อ K_1 , K_2 คือ ค่าคงที่ของการจูน

อุณหภูมิของแจ๊คเก็ต (T_j) จะถูกใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการเพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (T_r) เข้าสู่ค่าอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งจากการทำดุลพลังงานรอบเครื่องปฏิกรณ์โดยไม่คิดผลจากการสะสมความร้อนในผนังเครื่องปฏิกรณ์ จะได้

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{Q_r + UA(T_j - T_r)}{M_r C_{p_r}} \quad (5.19)$$

ทำการแทนสมการ 5.19 ลงในสมการ 5.18 และทำการจัดรูปให้อยู่ในเทอมของ T_j จะได้

$$T_j = T_r + \frac{M_r C_{p_r}}{UA} \left(K_1(T_r^{sp} - T_r) + K_2 \int_0^t (T_r^{sp} - T_r) dt \right) - \frac{Q_r}{UA} \quad (5.20)$$

เมื่อทำสมการ 5.20 ให้อยู่ในรูปดิครีตจะได้

$$T_j^{(k)} = T_r^{(k)} + \frac{M_r C_{p_r}}{UA} \left(K_1(T_r^{sp} - T_r^{(k)}) + K_2 \sum_0^k (T_r^{sp} - T_r^{(k)}) \Delta t \right) - \frac{Q_r^{(k)}}{UA} \quad (5.21)$$

สมการ 5.21 ที่ได้ นี้ จะเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิภายในแจ๊คเก็ตที่ต้องการเพื่อทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เข้าสู่ค่าอุณหภูมิเป้าหมาย (T_r^{sp}) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอุณหภูมิของแจ๊คเก็ตนั้นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ค่าที่ต้องการได้ทันที ทั้งนี้เนื่องจากความประพฤติในทางไดนามิก (dynamic) ของแจ๊คเก็ต เพื่อชดเชยความช้าในส่วนไดนามิกของแจ๊คเก็ต สมการในรูปแบบเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งจะถูกนำมาใช้ ดังนี้

$$T_j^{(k)} = T_j^{(k-1)} + \frac{\Delta t (T_j^{sp(k)} - T_j^{(k-1)})}{\tau_j} \quad (5.22)$$

ซึ่งจะได้

$$T_j^{sp(k)} = T_j^{(k-1)} + \frac{\tau_j (T_j^{(k)} - T_j^{(k-1)})}{\Delta t} \quad (5.23)$$

เมื่อ $T_j^{sp(k)}$ คือค่าอุณหภูมิเป้าหมายของแจ๊คเก็ต เพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิภายในแจ๊คเก็ต (T_j) มีค่าเข้าสู่ค่าอุณหภูมิภายในแจ๊คเก็ตที่ได้จากการคำนวณของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

5.1.1.3 แบบจำลองสำหรับประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา

ในปี คศ.1994 Kershenbaum และ Kittisupakorn ได้ประยุกต์ใช้ตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายในการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา เพื่อใช้งานร่วมกับตัวควบคุมแบบเจเนเนริกโมเดลในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ โดย Kershenbaum และ Kittisupakorn ได้เสนอแบบจำลองในรูปแบบเชิงเส้นคู่ โดยกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารทั้งหมด (R) แปรผันแบบเชิงเส้นกับมวลรวมของสาร (M_r) และอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (T_r) ดังนี้

$$\frac{dM_r}{dt} = -R = -bM_rT_r \quad (5.24)$$

เมื่อ b คือ ค่าคงที่

ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาถูกกำหนดให้มีค่าดังสมการ คือ

$$Q_r = R(-\Delta H) = -bM_rT_r\Delta H \quad (5.25)$$

เมื่อ ΔH คือ ค่าความร้อนของปฏิกิริยา

ทำการกำหนดเทอม N โดยสมมติให้ N มีค่าเป็นดังนี้

$$N \equiv -bM_r\Delta H \quad (5.26)$$

ซึ่งจะได้สมการแบบจำลองเพื่อใช้สำหรับประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา ดังนี้

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{Q_r + Q_j}{M_r C_{p_r}} \quad (5.27)$$

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{F_j \rho_j C_{p_j} (T_j^{sp} - T_j) - Q_j}{V_j \rho_j C_{p_j}} \quad (5.28)$$

$$\frac{dN}{dt} = -bNT_r \quad (5.29)$$

$$\frac{dQ_r}{dt} = N \frac{dT_r}{dt} + T_r \frac{dN}{dt} \quad (5.30)$$

$$\frac{db}{dt} = 0 \quad (5.31)$$

สมการ 5.27-5.31 จะถูกนำมาใช้ในตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายเพื่อประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา โดยอาศัยข้อมูลจากการวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ และอุณหภูมิภายในแจ็กเก็ตมาช่วยในการประมาณค่า

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากผลของการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจากแบบจำลองนี้ยังมีความผิดพลาดอยู่ในระดับหนึ่งเมื่อแบบจำลองที่ใช้มีการผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์เกิดขึ้น เช่น ความผิดพลาดของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U), ค่าพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน (A), ค่าโมลรวมของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ (M_r) และ ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยเชิงโมล (C_{p_r}) เป็นต้น เพื่อเป็นการชดเชยความผิดพลาดที่เกิดขึ้น การประมาณค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จึงเป็นสิ่งจำเป็น เมื่อพิจารณาสมการแบบจำลองที่ใช้ในตัวควบคุมและการประมาณค่า จะพบว่าสามารถลดเทอมตัวแปรในการประมาณค่าลงได้ โดยการรวมผลคูณระหว่างค่า U และ A เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่ง ซึ่งในบทความนี้จะเพิ่มการประมาณค่า UA ควบคู่ไปด้วยในการประมาณค่า โดยจะอาศัยความสัมพันธ์ที่ว่าค่า UA ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dUA}{dt} = 0 \quad (5.32)$$

สมการ 5.32 จะถูกนำมาใช้เพื่อเป็นการชดเชยความผิดพลาดที่เกิดจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน

5.1.1.4 ผลการจำลองกระบวนการ

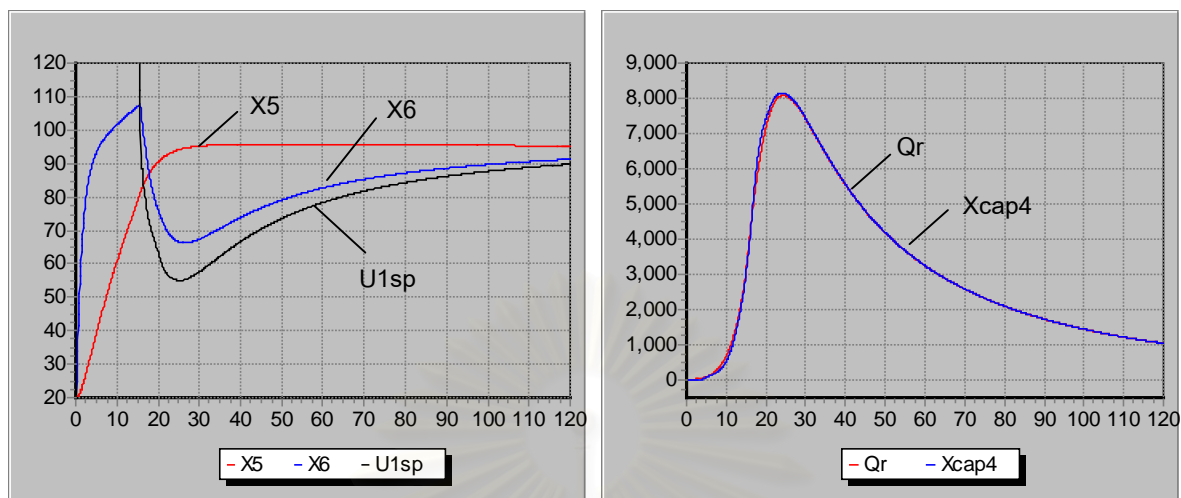
ผลการจำลองกระบวนการจากการทดสอบความผิดพลาดต่างๆ จะถูกแสดงในรูปที่ 5.2-5.8 การแสดงประสิทธิภาพของการควบคุมจะแสดงในรูปของค่า IAE (integral absolute error) และค่า ISE (integral square error) และประสิทธิภาพของการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจะถูกแสดงอยู่ในรูปของ $\sum_0^k |Q_r^{(k)} - \hat{Q}_r^{(k)}| \Delta t$ และ $\sum_0^k (Q_r^{(k)} - \hat{Q}_r^{(k)})^2 \Delta t$ ดังแสดงในตาราง 5.4

กรณีปกติ

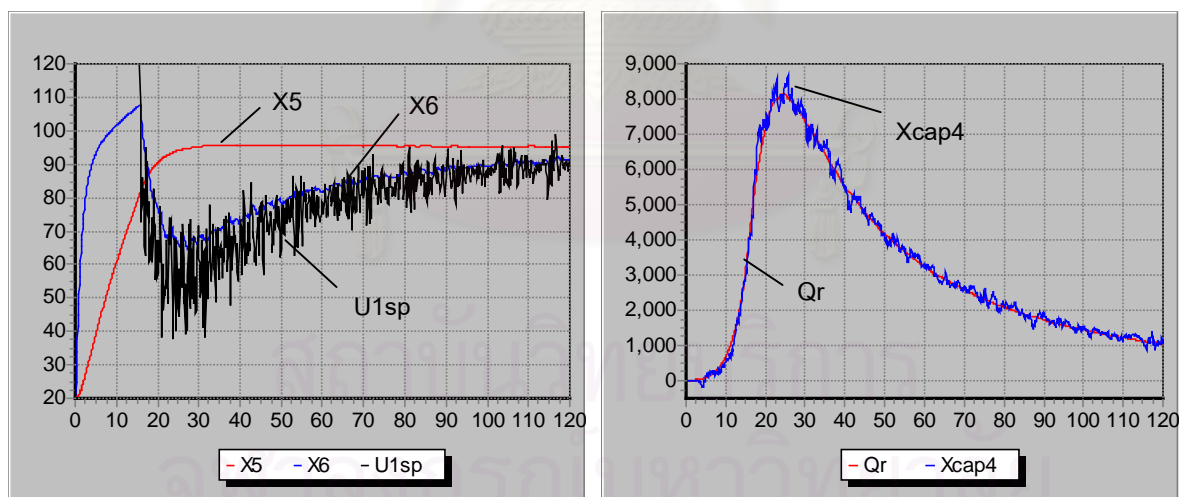
จากรูปที่ 5.2 จะพบว่าในกรณีปกติ ตัวกรองคาลมานสามารถให้ผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาได้อย่างถูกต้อง ทำให้ตัวควบคุมแบบเจนเนริกสามารถให้ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ได้ดีโดยไม่เกิดโอเวอร์ชูท

กรณีมีสัญญาณรบกวนในการวัด 0.2°C

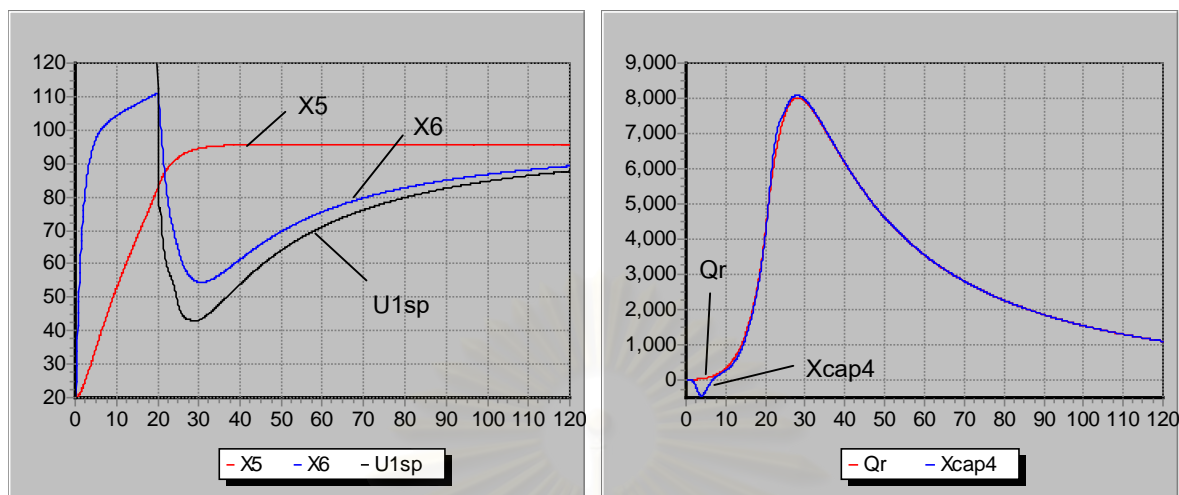
จากรูปที่ 5.3 จะพบว่าในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 0.2°C ตัวกรองคาลมานยังสามารถให้ผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาได้ดี โดยค่าประมาณค่าที่ได้จะกระจายอยู่รอบค่าจริงในช่วงแคบๆ อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมเจนเนริกโมเดลยังสามารถให้ผลการควบคุมได้ดีเทียบเท่ากับกรณีปกติ คือให้ค่าของ IAE และ ISE ที่ต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.4



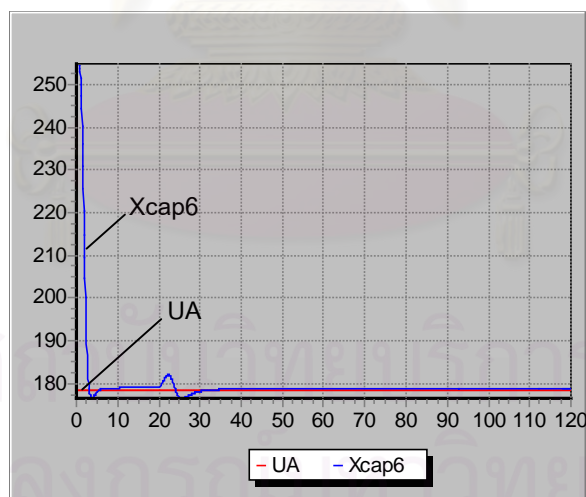
รูปที่ 5.2 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, Tr -X5, Tj -X6, $Tjsp$ -U1sp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, Q_r , $Q_r(\text{est})$ -Xcap4) กรณีปกติ (ผลจากซอฟต์แวร์ KSTAPEN+)



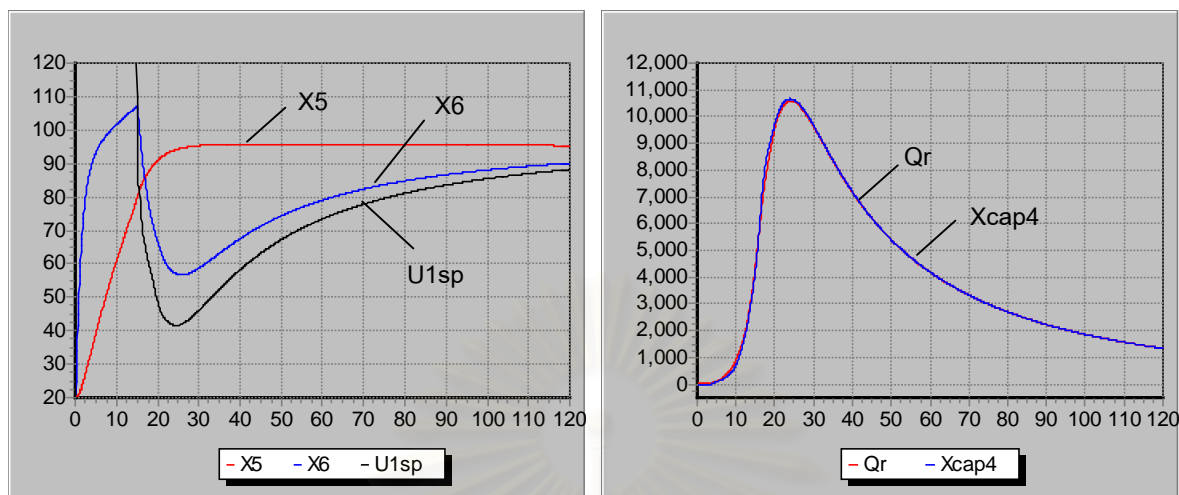
รูปที่ 5.3 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, Tr -X5, Tj -X6, $Tjsp$ -U1sp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, Q_r , $Q_r(\text{est})$ -Xcap4) กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 0.2°C (ผลจากซอฟต์แวร์ KSTAPEN+)



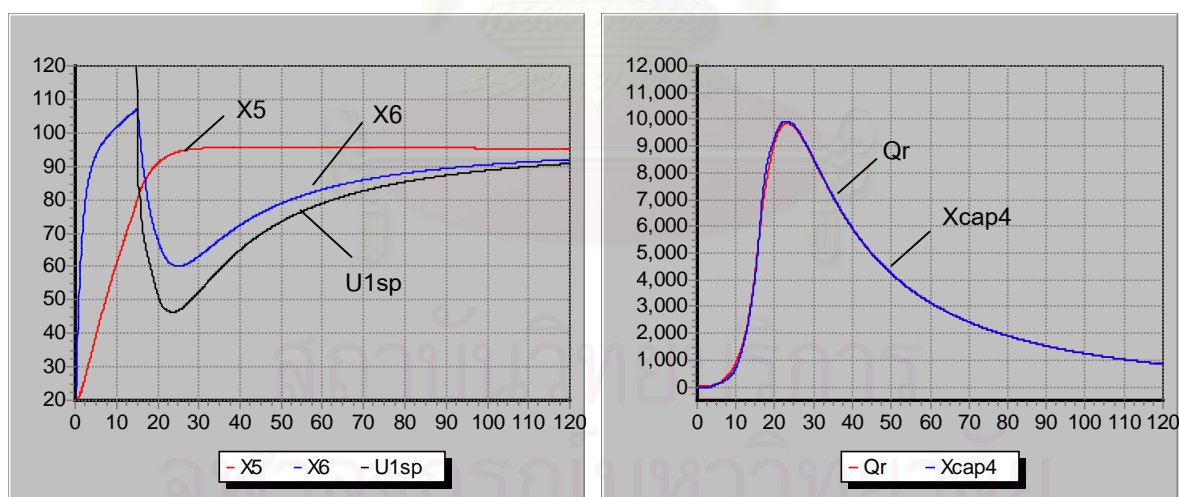
รูปที่ 5.4 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, Tr - $X5$, Tj - $X6$, $Tjsp$ - $U1sp$) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, Qr , $Qr(est)$ - $Xcap4$) กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+)



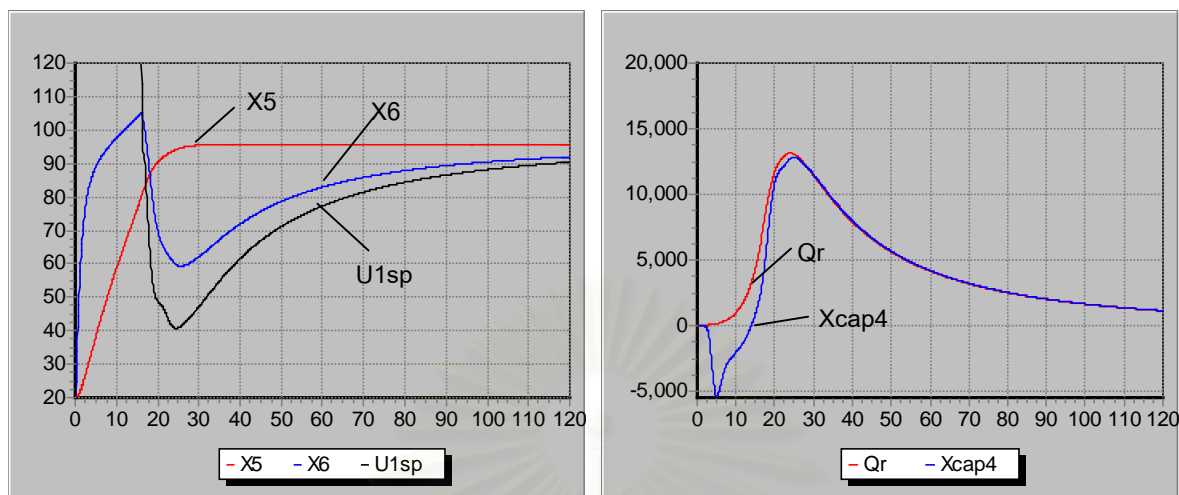
รูปที่ 5.5 ผลการประมาณค่า UA กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ (UA, UA(est)- $Xcap6$, ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+)



รูปที่ 5.6 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, Tr-X5, Tj-X6, Tjsp-U1sp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, Qr, Qr(est)-Xcap4) กรณีค่าความร้อนของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+)



รูปที่ 5.7 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, Tr-X5, Tj-X6, Tjsp-U1sp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, Qr, Qr(est)-Xcap4) กรณีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+)



รูปที่ 5.8 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, Tr-X5, Tj-X6, Tj-sp-U1sp) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, Qr, Qr(est)-Xcap4) กรณีค่าโมลเริ่มต้นของสาร A และ B เพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+)

ตารางที่ 5.3 ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน

$T_r^0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_j^0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
$N^0 = 0.5539$	$Q_r^0 = 0 \text{ kJ/min}$
$b^0 = 5.5157 \times 10^{-7}$	$UA^0 = 254.854 \text{ kJ/min.}^\circ\text{C}$
$P(1,1) = 1$	$P(2,2) = 1$
$P(3,3) = 20000$	$P(4,4) = 20$
$P(5,5) = 0.0001$	$P(6,6) = 2000$
$Q(1,1) = 1$	$Q(2,2) = 1$
$Q(3,3) = 100000$	$Q(4,4) = 200$
$Q(5,5) = 0.0001$	$Q(6,6) = 2000$
$R(1,1) = 100$	$R(2,2) = 100$

กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 5.4 จะพบว่าผลการประมาณค่าความร้อนที่ได้จะมีความผิดพลาดอยู่บ้างในช่วงเวลาแรก โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาแรกนี้เป็นผลมาจากความผิดพลาดของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปจนถึงที่เวลาประมาณ 8 นาที จะพบว่าผลการประมาณค่าความร้อนที่ได้จะเริ่มเข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง เนื่องจากค่าประมาณค่าของ UA สามารถเข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ความผิดพลาดของค่า UA ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลให้ประสิทธิภาพของการควบคุมลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากค่า IAE และค่า ISE ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเป็น 958.1340 และ 45884 ตามลำดับ

กรณีค่าความร้อนของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 5.6 จะพบว่าแม้ค่าความร้อนของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ ตัวกรองคาลมานยังสามารถให้ผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้เนื่องจากค่าความร้อนของปฏิกิริยามีได้ถูกใช้ในแบบจำลอง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของปฏิกิริยาจึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการประมาณค่าความร้อน จึงทำให้ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถให้ผลการควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังค่า IAE และ ISE ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.4 จะเห็นว่าค่าที่ใกล้เคียงกับในกรณีปกติ

กรณีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์

เช่นเดียวกับในกรณีที่ค่าความร้อนของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของปฏิกิริยานั้นไม่มีผลกระทบต่อการประมาณค่าความร้อนที่ได้จากแบบจำลอง เนื่องจากค่าคงที่ของปฏิกิริยามีได้ถูกใช้ในแบบจำลอง จึงเป็นผลให้ตัวกรองคาลมานสามารถประมาณค่าความร้อนได้อย่างถูกต้อง ตัวควบคุมจึงสามารถให้ผลการควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5.7

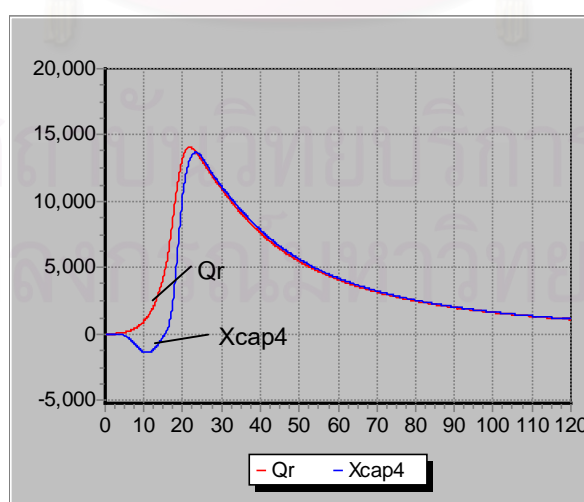
กรณีค่าโมลเริ่มต้นของสาร A และ B เพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 5.8 จะพบว่าในกรณีที่ค่า M_A^0 และ M_B^0 เพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์นั้น ตัวกรองคาลมานให้ผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาได้ไม่ดัดนัก เนื่องจากค่าของ $M_r C_{p_r}$ ที่ใช้ในแบบจำลองของตัวกรองคาลมานเป็นเพียงค่าคงที่ที่กำหนดขึ้นในตอนเริ่มต้นเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้จากเทอมค่า $\sum_0^k |Q_r^{(k)} - \hat{Q}_r^{(k)}| \Delta t$ และ $\sum_0^k (Q_r^{(k)} - \hat{Q}_r^{(k)})^2 \Delta t$ ที่มีค่าถึง 63172 และ 2.0383e+008 และเป็นผลให้ประสิทธิภาพของการควบคุมอุณหภูมิลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากค่า IAE และค่า ISE ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่า IAE และ ISE ของ T_r และ Q_r (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+)

กรณีของความผิดพลาด	อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์		ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา	
	IAE	ISE	$\sum_0^k Q_r^{(k)} - \hat{Q}_r^{(k)} \Delta t$	$\sum_0^k (Q_r^{(k)} - \hat{Q}_r^{(k)})^2 \Delta t$
ปกติ	787.9083	3.7081e+004	3.379e+003	6.4559e+005
สัญญาณรบกวน 0.2 °C	784.9563	3.7079e+004	1.4768e+004	3.3607e+006
U ของระบบลดลง 30%	958.1340	4.5884e+004	4.584e+003	1.0740e+006
ΔH เพิ่ม 30%	783.82	3.6873e+003	3.940e+003	8.8244e+005
k เพิ่ม 30%	780.1013	3.6872e+004	4.028e+003	9.8872e+005
M_A^0, M_B^0 เพิ่ม 30%	821.5609	3.8707e+004	6.3172e+004	2.0383e+008

จากผลการจำลองในกรณีของค่าโมลเริ่มต้นของสาร A และ B เพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ผลการประมาณค่าความร้อนที่ได้มีความผิดพลาดค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากค่า $M_r C_{p_r}$ ที่ใช้ในแบบจำลองของตัวกรองคาลมานถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ แต่ในความเป็นจริง $M_r C_{p_r}$ มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา การชดเชยผลของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้อาจทำได้ 2 วิธี วิธีแรกคือ เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ความไม่แน่นอนของแบบจำลองให้มีค่ามากขึ้น คือ ใช้ $Q(1,1) = 100$, $Q(2,2) = 100$ และ $Q(4,4) = 2000$ ผลการประมาณค่าความร้อนแสดงดังรูปที่ 5.9 ซึ่งจะพบว่าได้ผลการประมาณค่าดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลการประมาณที่ได้ยังคงมีความผิดพลาดอยู่บ้าง ทั้งนี้เนื่องจากในตัวกรองคาลมานสมมติให้ค่า w_k ซึ่งแทนถึงความผิดพลาดต่างๆ ของแบบจำลองมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งมีอาจแทนความผิดพลาดของค่า $M_r C_{p_r}$ ได้



รูปที่ 5.9 ผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (Q_r , $Q_r(\text{est}) - X_{\text{cap4}}$) กรณีค่าโมลเริ่มต้นของสาร A และ B เพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+)

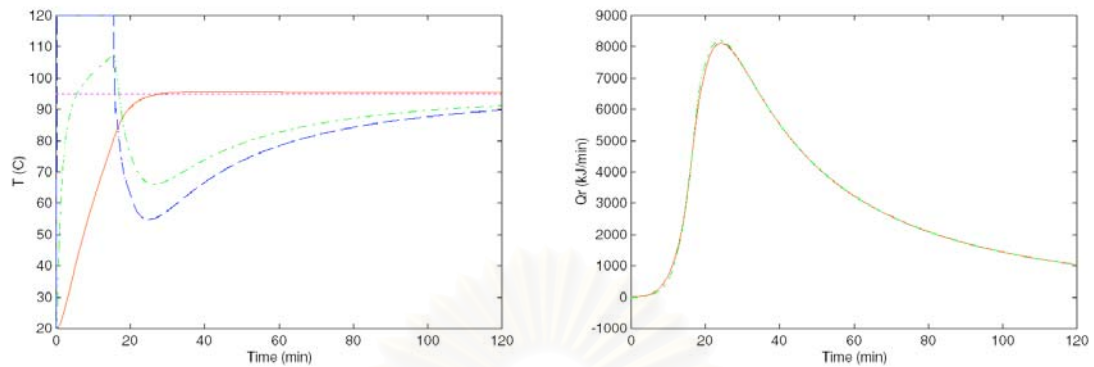
วิธีที่สองคือ ทำการประมาณค่า $M_r C_{p_r}$ ควบคู่ไปด้วย ซึ่งในงานวิจัยได้ทดลองใช้สมมติฐานที่ว่าค่า $M_r C_{p_r}$ เปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างช้าๆ จึงเพิ่มสมการ $\frac{dM_r C_{p_r}}{dt} = 0$ เข้าไปในแบบจำลองของตัวกรองคาลมาน อย่างไรก็ตาม เมื่อทดสอบความสามารถในการสังเกตได้ (observability) จะพบว่าไม่สามารถสังเกตได้

5.1.1.5 สรุปผล

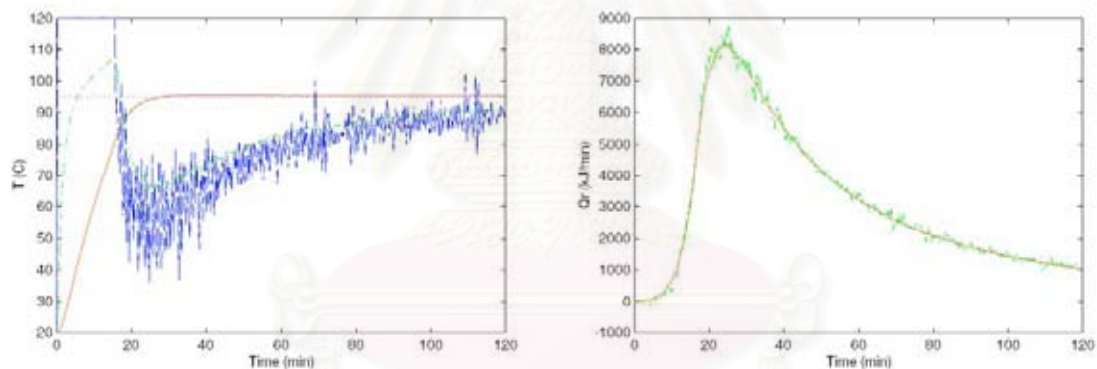
จากการจำลองกระบวนการจะพบว่า ตัวกรองคาลมานสามารถให้ผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาได้อย่างถูกต้องทั้งในกรณีปกติ และในกรณีที่มีความผิดพลาดต่างๆ คือ กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ กรณีค่าความร้อนของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ และกรณีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของค่าโมลเริ่มต้นของสาร A และ B 30 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่าผลการประมาณค่าความร้อนที่ได้มีความผิดพลาดค่อนข้างสูง เนื่องจากความผิดพลาดของค่า $M_r C_{p_r}$ ในงานวิจัยจึงเพิ่มค่าความไม่แน่นอนของแบบจำลองซึ่งพบว่าได้ผลการประมาณค่าดีขึ้น นอกจากนี้ ในงานวิจัยได้ทดลองประมาณค่า $M_r C_{p_r}$ โดยเพิ่มสมการ $\frac{dM_r C_{p_r}}{dt} = 0$ ไปในแบบจำลองของตัวกรองคาลมาน แต่พบว่าระบบไม่สามารถสังเกตได้

5.1.1.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ และผลที่ได้จาก Matlab

จากผลการจำลองที่ได้จากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ เพื่อเป็นการทดสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์ในงานวิจัยจึงได้มีการเขียนโปรแกรมจำลองกรณีศึกษาขึ้นอีกครั้งโดยใช้ Matlab ผลการจำลองกระบวนการที่ได้จาก Matlab สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10-5.16 และค่าแสดงประสิทธิภาพของการควบคุมและการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจะถูกแสดงดังตารางที่ 5.5

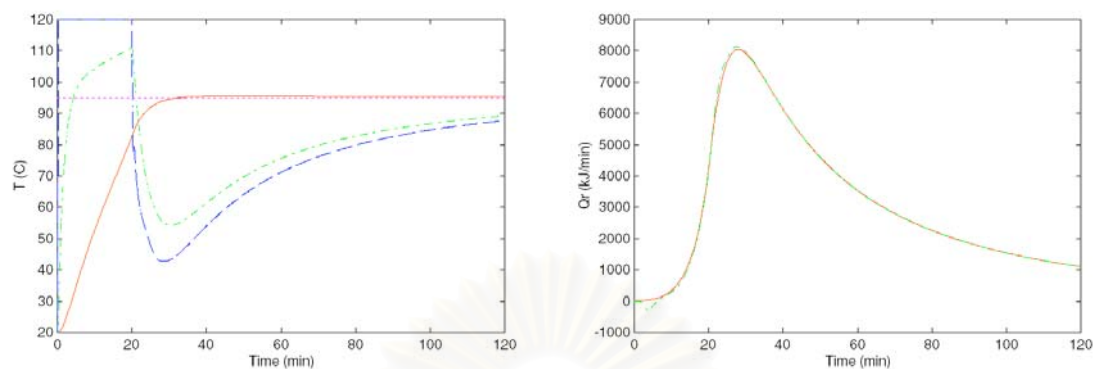


รูปที่ 5.10 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, $-Tr$, $-Tj$, $--Tjsp$, $..Trsp$) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, $-Qr$, $-Qr(est)$) กรณีปกติ (ผลจาก Matlab)

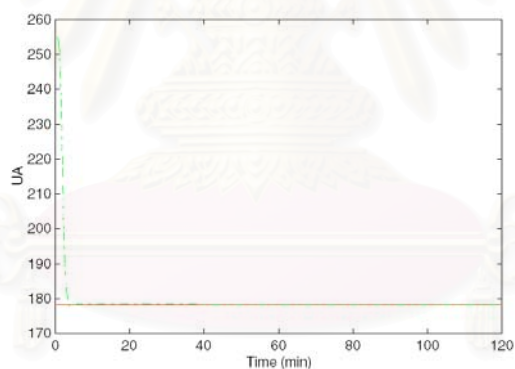


รูปที่ 5.11 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, $-Tr$, $-Tj$, $--Tjsp$, $..Trsp$) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, $-Qr$, $-Qr(est)$) กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 0.2°C (ผลจาก Matlab)

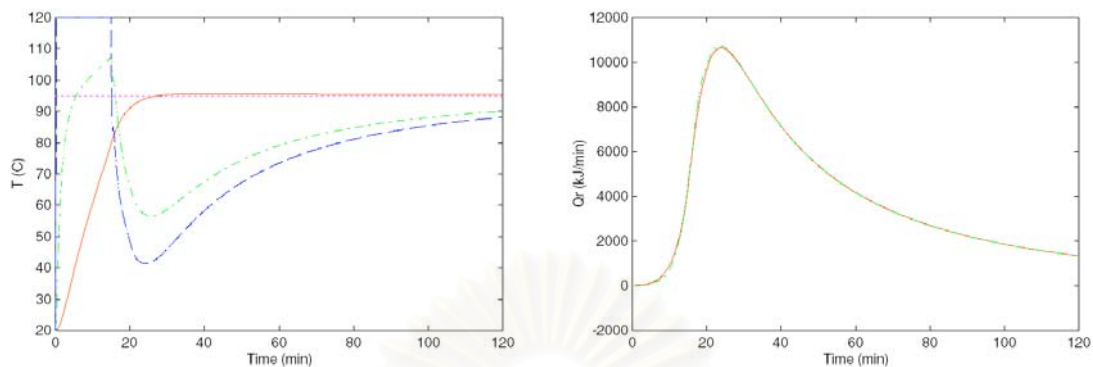
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



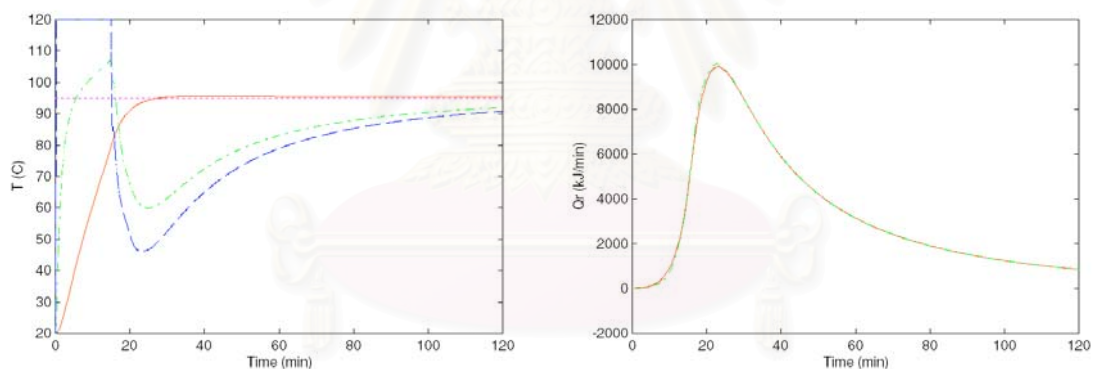
รูปที่ 5.12 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, $-Tr$, $-Tj$, $--Tjsp$, $..Trsp$) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, $-Qr$, $-Qr(est)$) กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจาก Matlab)



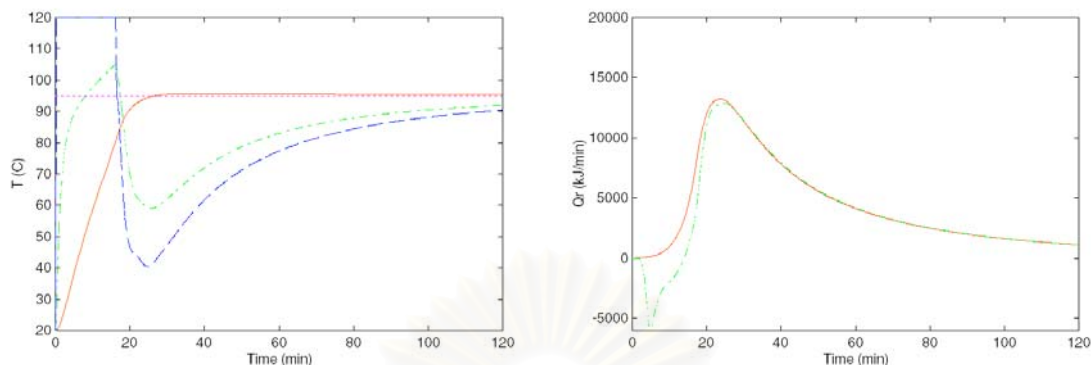
รูปที่ 5.13 ผลการประมาณค่า UA ($-UA$, $-UA(est)$) กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจาก Matlab)



รูปที่ 5.14 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, $-Tr$, $-Tj$, $--Tjsp$, $..Trsp$) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, $-Qr$, $-.Qr(est)$) กรณีค่าความร้อนของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจาก Matlab)



รูปที่ 5.15 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, $-Tr$, $-Tj$, $--Tjsp$, $..Trsp$) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, $-Qr$, $-.Qr(est)$) กรณีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจาก Matlab)



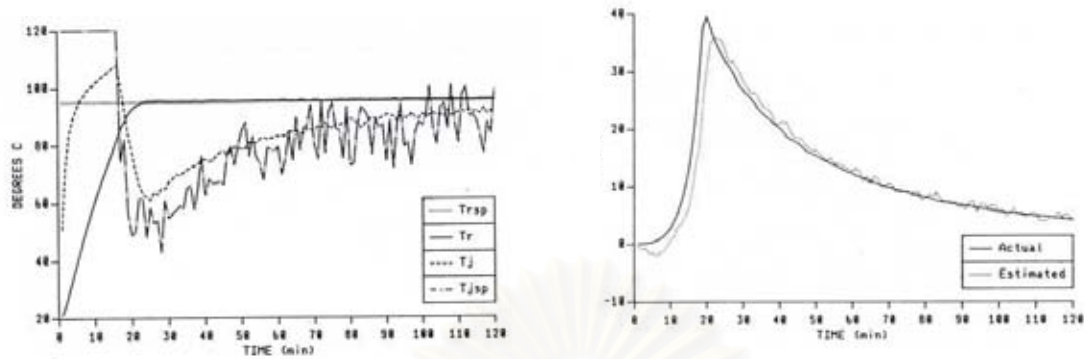
รูปที่ 5.16 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปซ้าย, $-Tr$, $-Tj$, $--Tj_{sp}$, $..Tr_{sp}$) และผลการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (รูปขวา, $-Q_r$, $-.Q_r(est)$) กรณีค่าโมลเริ่มต้นของสาร A และ B เพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ (ผลจาก Matlab)

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่า IAE และ ISE ของ T_r และ Q_r (ผลจาก Matlab)

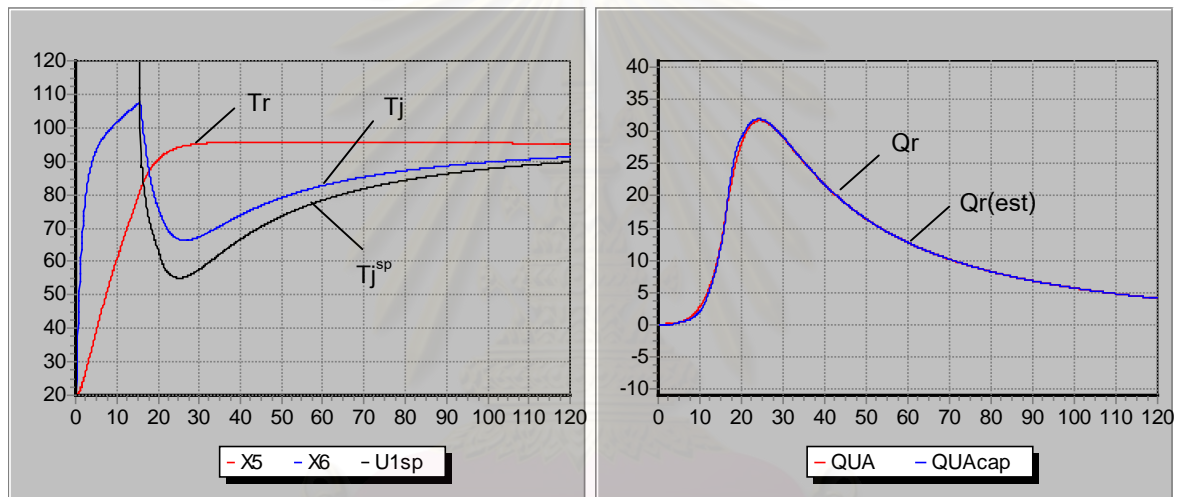
กรณีของความผิดพลาด	อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์		ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา	
	IAE	ISE	$\sum_0^k Q_r^{(k)} - \hat{Q}_r^{(k)} \Delta t$	$\sum_0^k (Q_r^{(k)} - \hat{Q}_r^{(k)})^2 \Delta t$
ปกติ	782.9879	3.6878e+004	3.0043e+003	4.4320e+005
สัญญาณรบกวน 0.2 °C	781.1110	3.6876e+004	1.3339e+004	2.8308e+006
U ของระบบลดลง 30%	953.3385	4.5667e+004	3.6143e+003	5.8617e+005
ΔH เพิ่ม 30%	778.4823	3.6667e+004	3.5930e+003	6.4655e+005
K เพิ่ม 30%	774.8968	3.6668e+004	3.6142e+003	6.6610e+005
M_A^0, M_B^0 เพิ่ม 30%	815.1770	3.8505e+004	6.3942e+004	2.1525e+008

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ และ Matlab จะพบว่าซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ สามารถให้ผลการจำลองกระบวนการได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จาก Matlab ซึ่งเป็นการพิสูจน์ได้ว่าซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ สามารถใช้งานกับระบบดังกล่าวได้ นอกจากนี้ ในงานวิจัยยังได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ กับผลที่ได้จาก Cott และ Macchietto (1989) ดังแสดงในรูปที่ 5.17

ผลจาก Cott และ Macchietto (1989)



ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+



รูปที่ 5.17 ผลการควบคุมอุณหภูมิ (รูปซ้าย) และผลการประมาณค่าความร้อน (รูปขวา) ที่ได้จาก Cott และ Macchietto (1989) และซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ในกรณีปกติ

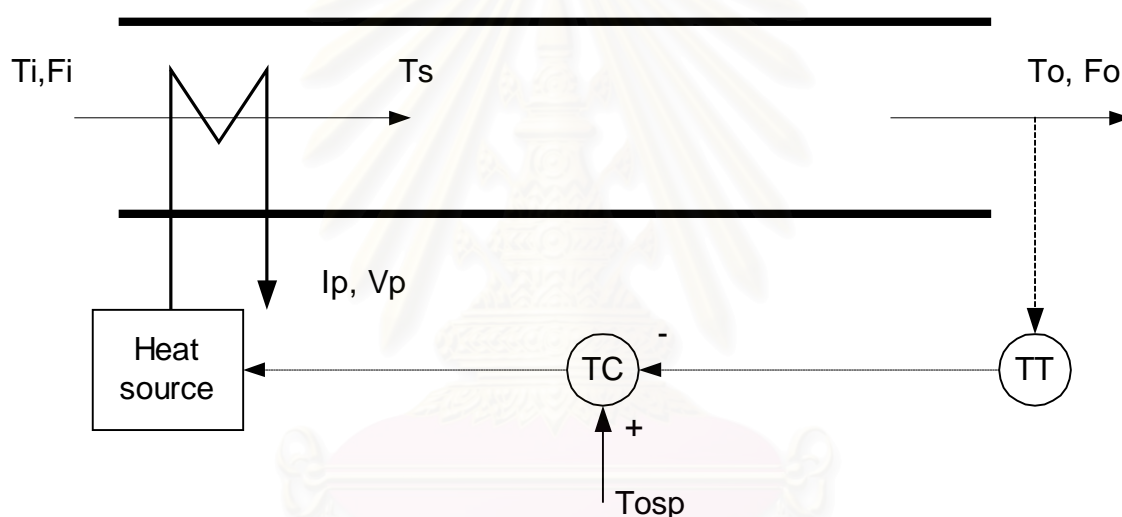
จากรูปที่ 5.17 จะเห็นว่าซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ สามารถให้ผลการจำลองได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จาก Cott และ Macchietto (1989) ซึ่งเป็นการพิสูจน์ได้ว่าซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

5.1.2 เครื่องให้ความร้อน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ กับระบบเครื่องให้ความร้อน โดยในการศึกษานี้จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องให้ความร้อนเพื่อให้ได้มาซึ่งอากาศที่มีอุณหภูมิตามที่ต้องการเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการอื่นๆ ต่อไป

5.1.2.1 แบบจำลองของเครื่องให้ความร้อน

พิจารณารูปที่ 5.18 จะเป็นแผนภาพแสดงการควบคุมของเครื่องให้ความร้อน ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาเครื่องให้ความร้อนที่มีรูปร่างเป็นแบบทรงกระบอก ดังนี้



รูปที่ 5.18 แผนภาพแสดงการควบคุมเครื่องให้ความร้อน

ในส่วนของระบบเครื่องให้ความร้อนที่ใช้ในการศึกษานี้จะอาศัยสมมติฐาน ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศภายในท่อมีค่าคงที่ ค่าความหนาแน่นและความจุความร้อนของอากาศมีค่าคงที่ อัตราการสูญเสียความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ความร้อนสูญเสียเกิดจากการพาความร้อนเพียงอย่างเดียว และผนังของเครื่องให้ความร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

จากรูปที่ 5.18 และสมมติฐานที่กำหนด สามารถทำการหาแบบจำลองของระบบได้ดังนี้

สมการดุลมวลของอากาศ

$$F_i = F_o \quad (5.33)$$

สมการดุลพลังงานรอบเครื่องให้ความร้อน

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{v}{L}(T_i - T_o) + \frac{3V_p I_p \cos \phi}{\rho C_p V} - \frac{2h(T_s - T_i)}{\rho C_p r} \quad (5.34)$$

สมการดุลพลังงานรอบขดลวดให้ความร้อน

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{v}{LL}(T_i - T_s) + \frac{3V_p I_p \cos \phi}{\rho C_p V_c} \quad (5.35)$$

ตารางที่ 5.6 ความหมายของสัญลักษณ์และค่าที่ใช้ในระบบเครื่องให้ความร้อน

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าที่ใช้
C_p	ความจุความร้อนของอากาศ	1008 J/kg.K
F_i	อัตราการไหลของอากาศขาเข้า	0.018 ft ³ /s
F_o	อัตราการไหลของอากาศขาออก	0.018 ft ³ /s
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ	5 W/m ² .K
L	ความยาวของเครื่องให้ความร้อน	0.9186 ft
LL	ความยาวของขดลวดความร้อน	0.125 ft
R	รัศมีของเครื่องให้ความร้อน	0.0711 ft
v	ความเร็วของอากาศ	1.15 ft/s
V	ปริมาตรของเครื่องให้ความร้อน	0.015 ft ³
V_c	ปริมาตรของขดลวดให้ความร้อน	0.002 ft ³
V_p	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า	220 volt
I_p^0	ค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลาเริ่มต้น	0 amp
T_i	อุณหภูมิของอากาศภายนอก	298 K
T_o^0	อุณหภูมิของอากาศขาออกที่เวลาเริ่มต้น	298 K
T_s^0	อุณหภูมิของอากาศเมื่อผ่านขดลวดที่เวลาเริ่มต้น	298 K
T_o^{sp}	ค่าอุณหภูมิเป้าหมาย	353 K
$\text{Cos}\phi$	เฟสของไฟฟ้า	0.86
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ	0.03 kg/ft ³

ในการควบคุมอุณหภูมิที่ออกจากเครื่องให้ความร้อนจะทำโดยการปรับค่ากระแสไฟฟ้าภายในขดลวดให้ความร้อน ซึ่งในที่นี้จะทำการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล เพื่อนำผลการควบคุมที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกัน

5.1.2.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

อัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = K_1(x^{sp} - x) + K_2 \int_0^t (x^{sp} - x) dt \quad (5.36)$$

เมื่อ K_1 , K_2 คือ ค่าคงที่ของการจูน

เมื่อทำการแทนสมการ 5.34 ลงในสมการ 5.36 โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า (I_p) เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ จะได้สมการอัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสำหรับระบบเครื่องให้ความร้อนดังนี้

$$I_p^{(k)} = \frac{K_1(T_0^{sp} - T_o^{(k)}) + K_2 \int_0^t (T_o^{sp} - T_o^{(k)}) dt - \left[\frac{v}{L} (T_i^{(k)} - T_o^{(k)}) - \frac{2h(T_s^{(k)} - T_i^{(k)})}{\rho C_p r} \right]}{\frac{3V_p \cos \phi}{\rho C_p V}} \quad (5.37)$$

จากแบบจำลองของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล จะเห็นว่าเทอมของค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการพาต้องการค่าอุณหภูมิที่ออกจากขดลวด (T_s) ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สามารถทราบได้ ดังนั้น ตัวกรองคาลมานจะถูกนำมาใช้เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิที่ออกจากขดลวด

5.1.2.3 แบบจำลองสำหรับการประมาณค่าที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน

สมการดุลพลังงานรอบเครื่องให้ความร้อนและสมการดุลพลังงานรอบขดลวดให้ความร้อนจะถูกนำมาใช้ในตัวกรองคาลมาน ดังนี้

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{v}{L} (T_i - T_o) + \frac{3V_p I_p \cos \phi}{\rho C_p V} - \frac{2h(T_s - T_i)}{\rho C_p r} \quad (5.38)$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{v}{LL} (T_i - T_s) + \frac{3V_p I_p \cos \phi}{\rho C_p V_c} \quad (5.39)$$

ในการประมาณค่าอุณหภูมิที่ออกจากขดลวด (T_s) จะทำโดยอาศัยข้อมูลการวัดอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (T_o)

5.1.2.4 ผลการจำลองกระบวนการ

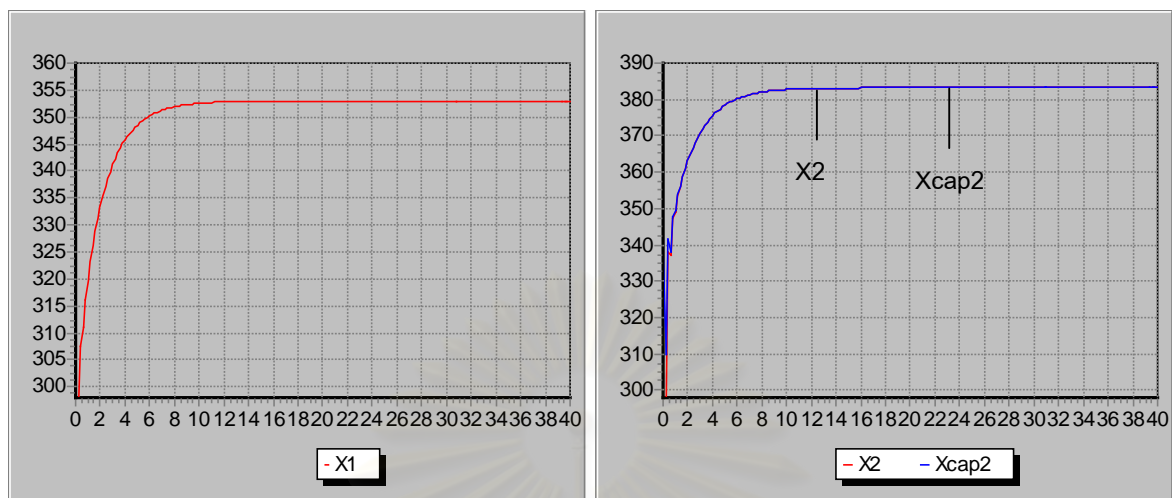
ในการจำลองกระบวนการจะทำการเปรียบเทียบผลการควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอดี และตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลในกรณีต่างๆ คือ กรณีปกติ กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ และกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศภายนอก ผลการจำลองกระบวนการจะถูกแสดงดังรูปที่ 5.19-5.24 ค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลจะถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 5.7 ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวกรองคาลมานที่ใช้ในการจำลองกระบวนการถูกแสดงดังตารางที่ 5.8 ค่า IAE และค่า ISE ของการควบคุมอุณหภูมิขาออกจากเครื่องให้ความร้อนจะถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.7 ค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

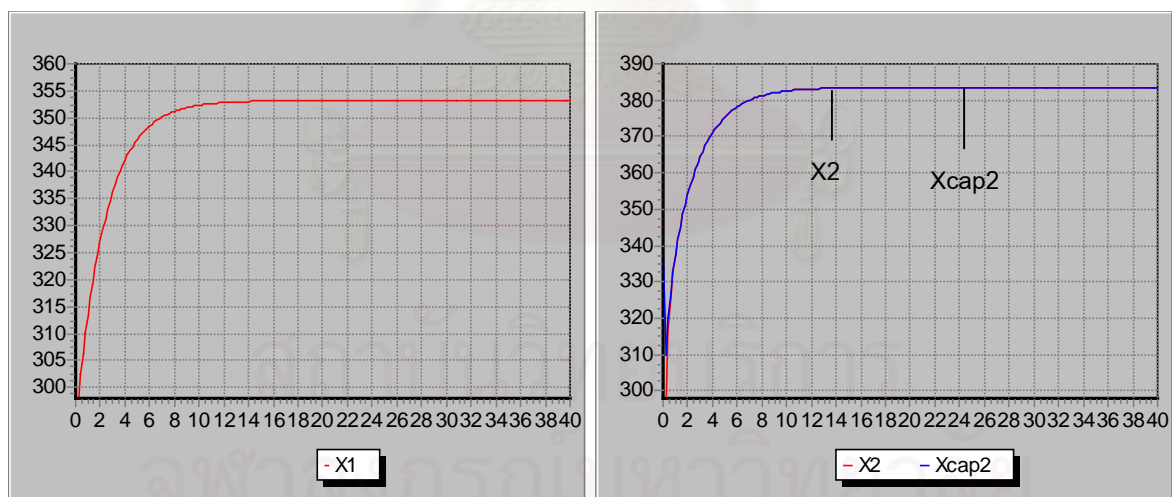
ตัวควบคุมแบบพีไอดี	$K_c = 0.008, \tau_i = 1, \tau_d = 0.5$
ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	$K_1 = 0.5, K_2 = 6.25e-04$

ตารางที่ 5.8 ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน

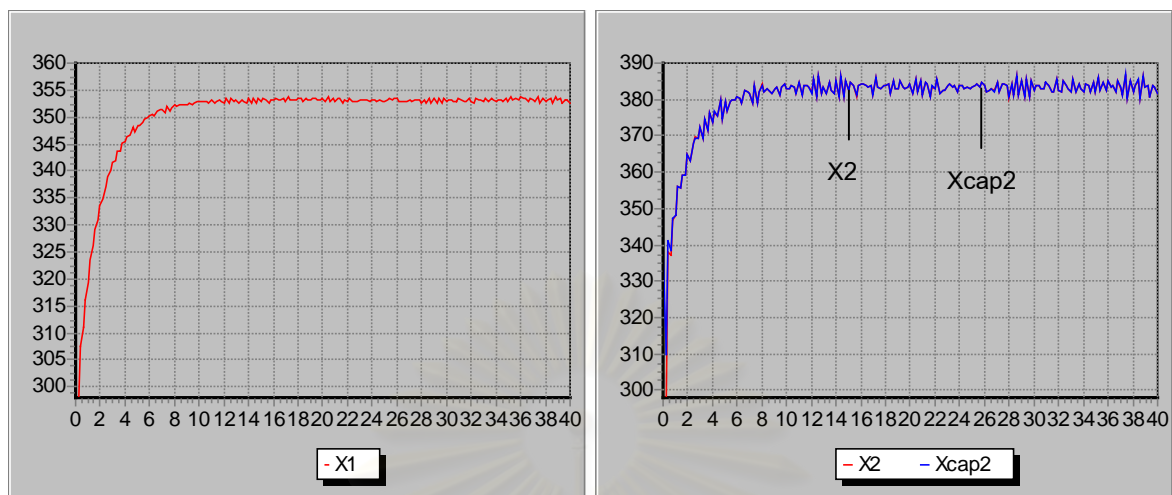
$T_o^0 = 298\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_s^0 = 338\text{ }^{\circ}\text{C}$
$P(1,1) = 1$	$P(2,2) = 1$
$Q(1,1) = 1$	$Q(2,2) = 2$
$R(1,1) = 5$	



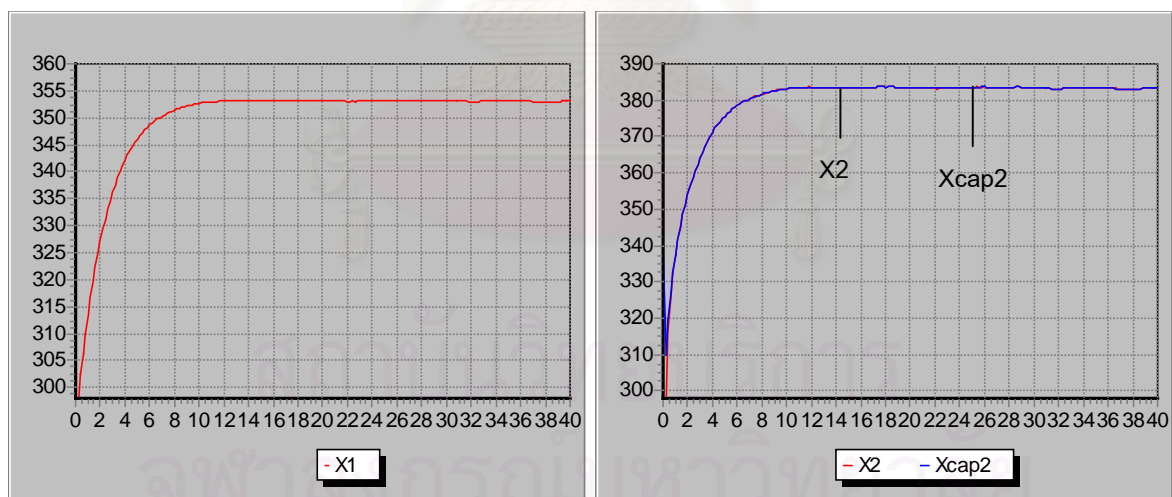
รูปที่ 5.19 ผลการควบคุมอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (รูปซ้าย, T_o - X_1) และผลการประมาณของอุณหภูมิที่ผ่านขดลวดความร้อน (รูปขวา, T_s - X_2 , T_s (est)- X_{cap2}) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณีปกติ)



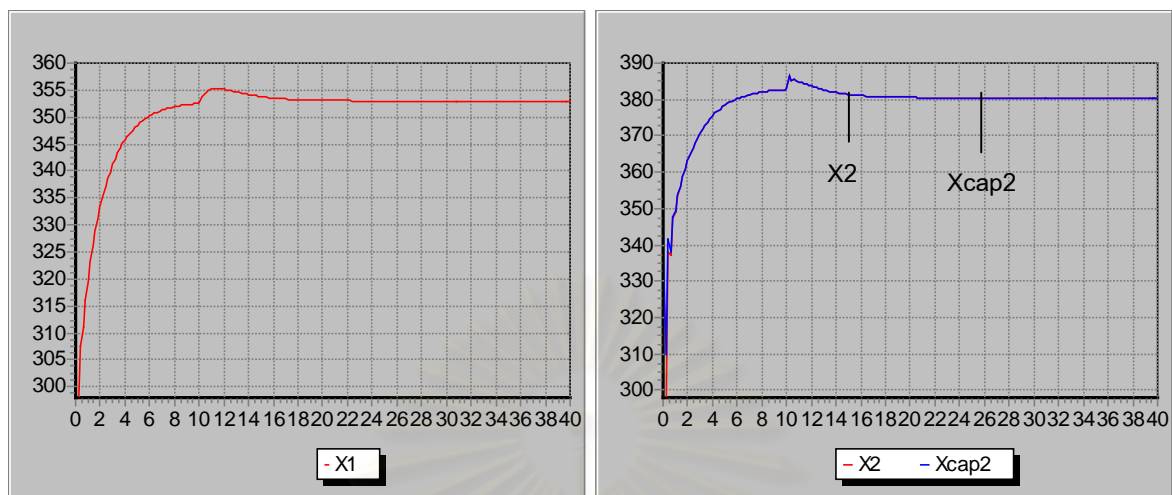
รูปที่ 5.20 ผลการควบคุมอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (รูปซ้าย, T_o - X_1) และผลการประมาณของอุณหภูมิที่ผ่านขดลวดความร้อน (รูปขวา, T_s - X_2 , T_s (est)- X_{cap2}) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีปกติ)



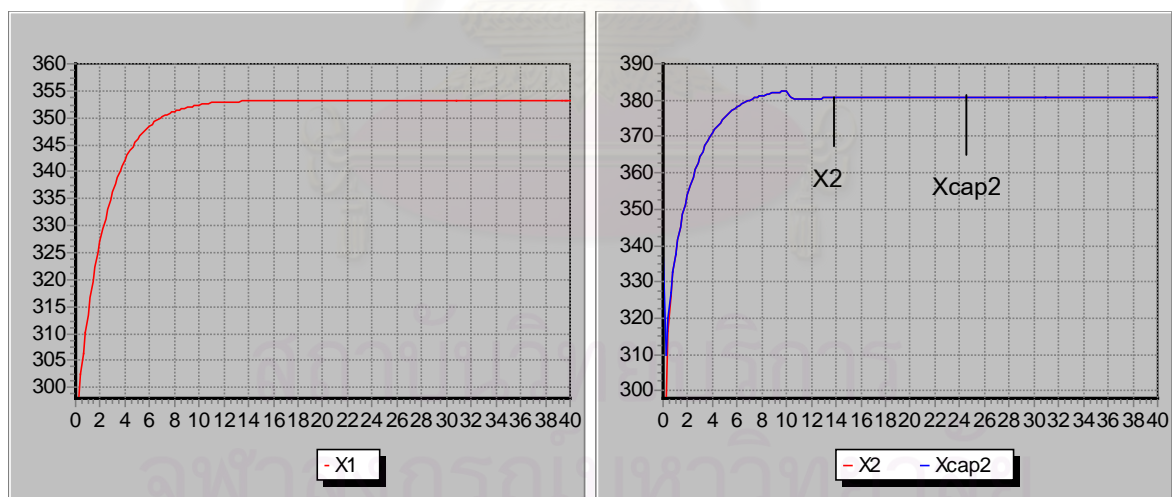
รูปที่ 5.21 ผลการควบคุมอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (รูปซ้าย, T_o -X1) และผลการประมาณของอุณหภูมิที่ผ่านขดลวดความร้อน (รูปขวา, T_s -X2, T_s (est)-Xcap2) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด $1\text{ }^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 5.22 ผลการควบคุมอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (รูปซ้าย, T_o -X1) และผลการประมาณของอุณหภูมิที่ผ่านขดลวดความร้อน (รูปขวา, T_s -X2, T_s (est)-Xcap2) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด $1\text{ }^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 5.23 ผลการควบคุมอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (รูปซ้าย, T_o -X1) และผลการประมาณของอุณหภูมิที่ผ่านขดลวดความร้อน (รูปขวา, T_s -X2, $T_s(\text{est})$ -Xcap2) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณีอุณหภูมิอากาศภายนอกเพิ่มขึ้น 5 K ที่เวลา 10 วินาที)



รูปที่ 5.24 ผลการควบคุมอุณหภูมิขาออกของเครื่องให้ความร้อน (รูปซ้าย, T_o -X1) และผลการประมาณของอุณหภูมิที่ผ่านขดลวดความร้อน (รูปขวา, T_s -X2, $T_s(\text{est})$ -Xcap2) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีอุณหภูมิอากาศภายนอกเพิ่มขึ้น 5 K ที่เวลา 10 วินาที)

กรณีปกติ

จากรูปที่ 5.19 และ 5.20 จะพบว่าทั้งตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถให้ผลการควบคุมได้ดี โดยกรณีใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีจะได้ค่า IAE และค่า ISE เท่ากับ 116.0132 และ 3430.213 ในขณะที่กรณีใช้ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลจะได้ค่า IAE และค่า ISE เท่ากับ 148.7933 และ 4506.096 เมื่อพิจารณาผลของการประมาณค่า T_c จะพบว่าตัวกรองคาลมานสามารถให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง

กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 1°C

จากรูปที่ 5.21 และ 5.22 จะพบว่าตัวควบคุมทั้งสองยังสามารถให้ผลการควบคุมได้ดีทั้งคู่ โดยค่า IAE และค่า ISE ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากกรณีปกติ อย่างไรก็ตาม ในกรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีจะเห็นว่า ค่าอุณหภูมิ T_o ที่ได้จะแกว่งมากกว่าในกรณีที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล เนื่องจากค่า T_o ที่ใช้ในตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นค่าที่ได้จากการวัดซึ่งมีสัญญาณรบกวน ขณะที่ค่า T_o ที่ใช้ในตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลเป็นค่าที่ได้จากตัวกรองคาลมานซึ่งได้มีการกำจัดผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัด

กรณีอุณหภูมิอากาศภายนอกเพิ่มขึ้น 5 K ที่เวลา 10 วินาที

จากรูปที่ 5.23 และ 5.24 จะพบว่าในกรณีที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี เมื่ออุณหภูมิของอากาศภายนอกเพิ่มขึ้น 5 K ที่เวลา 10 วินาที จะทำให้เกิดโอเวอร์ชูทขึ้น ในขณะที่กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลจะไม่เกิดโอเวอร์ชูท เมื่อพิจารณาถึงผลของการประมาณค่า T_c จะพบว่าตัวกรองคาลมานสามารถให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 5.9 ค่า IAE และค่า ISE ของการควบคุมอุณหภูมิขาออกจากเครื่องให้ความร้อน (T_o)

กรณีของความผิดพลาด	ตัวควบคุมแบบพีไอดี		ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	
	IAE	ISE	IAE	ISE
ปกติ	116.0132	3430.213	148.7933	4506.096
สัญญาณรบกวนการวัด 1°C	123.6142	3437.028	145.6111	4505.857
อุณหภูมิขาเข้าเพิ่มขึ้น 5°C	124.8018	3444.054	148.5938	4505.961

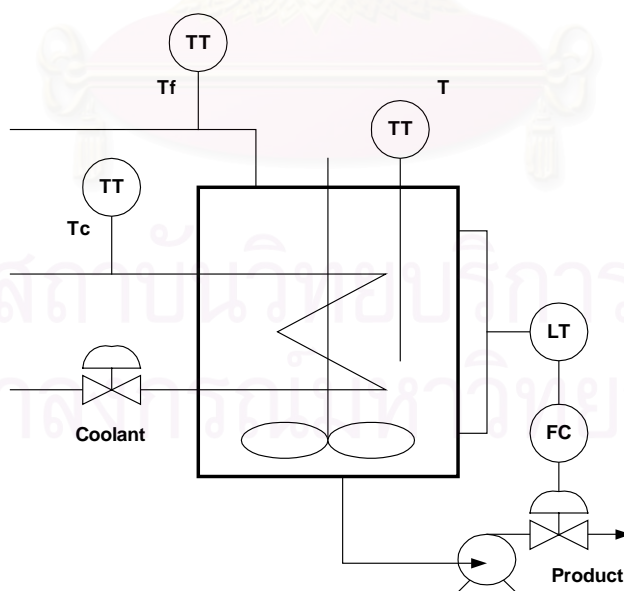
5.1.2.4 สรุปผลการจำลองกระบวนการ

จากผลการจำลองกระบวนการจะพบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถให้ผลการควบคุมได้ดีในกรณีปกติ และกรณีที่มีสัญญาณรบกวน 1°C อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิของอากาศภายนอกเปลี่ยนแปลงไป 5°C จะทำให้เกิดโอเวอร์ชูทของอุณหภูมิที่ออกจากเครื่องให้ความร้อน ในขณะที่ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถให้ผลการควบคุมได้ดีทั้ง 3 กรณีโดยไม่เกิดโอเวอร์ชูท เมื่อพิจารณาถึงผลของการประมาณค่าพบว่าตัวกรองคาลมานสามารถให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้องทั้ง 3 กรณี

5.1.3 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบซอฟต์แวร์ KSTAPEN+ กับระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง โดยจะทำการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อให้อยู่ ณ ค่าเป้าหมายที่ต้องการ และเนื่องจากค่าความเข้มข้นของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่สามารถทำการวัดได้ ตัวกรองคาลมานจึงถูกนำมาใช้เพื่อประมาณค่าความเข้มข้นออนไลน์ควบคู่ไปกับการควบคุมด้วย

5.1.3.1 แบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 5.25 แผนภาพแสดงการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง

ในการศึกษานี้จะสมมติให้ความสูงของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่ แบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ที่จะนำมาศึกษาในที่นี้จะอ้างอิงจาก Kantor (1989) โดยเกิดปฏิกิริยาแบบอันดับหนึ่งของสารตั้งต้น ซึ่งสามารถเขียนสมการแบบจำลองได้ดังต่อไปนี้

สมการดุลมวลของสารผลิตภัณฑ์

$$\frac{dC}{dt} = -k_0 C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) + \frac{Q}{V}(C_f - C) \quad (5.40)$$

สมการดุลพลังงานรอบเครื่องปฏิกรณ์

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(-\Delta H)}{\rho C_p} k_0 C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) + \frac{Q}{V}(T_f - T) + \frac{UA}{\rho C_p V}(T_c - T) \quad (5.41)$$

และเมื่อทำการนิยามเทอมตัวไร้มิติ

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{(-\Delta H)C_f}{\rho C_p T_{f0}} \gamma & \delta &= \frac{UA}{\rho C_p Q_0} & \gamma &= \frac{E}{RT_{f0}} \\ \phi &= \frac{V}{Q_0} k_0 e^{-\gamma} & q &= \frac{Q}{Q_0} \\ \tau &= \frac{Q_0}{V} t & u &= \frac{\gamma}{T_{f0}} (q(T_f - T_{f0}) + \delta(T_c - T_{f0})) \\ \tilde{C} &= \frac{C}{C_f} & \tilde{T} &= \frac{T - T_{f0}}{T_{f0}} \gamma \end{aligned}$$

จะสามารถแสดงสมการแบบจำลองในรูปแบบไร้มิติได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{d\tilde{C}}{d\tau} = -\phi \tilde{C} \kappa(\tilde{T}) + q(1 - \tilde{C}) \quad (5.42)$$

$$\frac{d\tilde{T}}{d\tau} = \beta \phi \tilde{C} \kappa(\tilde{T}) - (q + \delta)\tilde{T} + u \quad (5.43)$$

เมื่อ

$$\kappa(\tilde{T}) = \exp\left(\frac{\tilde{T}}{1 + \tilde{T}/\gamma}\right) \quad (5.44)$$

ความหมายของสัญลักษณ์และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาจะถูกแสดงดังตารางที่

ตารางที่ 5.10 ความหมายของสัญลักษณ์และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าที่ใช้
\tilde{C}^0	ความเข้มข้นของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติที่เวลาเริ่มต้น	1
\tilde{T}^0	อุณหภูมิของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติที่เวลาเริ่มต้น	0
u^0	อัตราการไหลในรูปแบบไร้มิติที่เวลาเริ่มต้น	0
τ	ค่าเวลาในรูปแบบไร้มิติ	
ϕ	Damkohler number	0.11
β	ความร้อนของปฏิกิริยาในรูปแบบไร้มิติ	7
δ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบไร้มิติ	0.5
γ	พลังงานกระตุ้นในรูปแบบไร้มิติ	20
q	อัตราการไหลของสารในรูปแบบไร้มิติ	1

5.1.3.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

อัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = K_1(x^{sp} - x) + K_2 \int_0^t (x^{sp} - x) dt \quad (5.45)$$

เมื่อ K_1 , K_2 คือ ค่าคงที่ของการจูน

เมื่อทำการแทนสมการ 5.43 ลงในสมการ 5.45 โดยใช้ u เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ จะได้สมการอัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล ดังนี้

$$u = K_1(\tilde{T}^{sp} - \tilde{T}) + K_2 \int_0^t (\tilde{T}^{sp} - \tilde{T}) dt - \beta\phi\tilde{C}(\tilde{T}) + (q + \delta)\tilde{T} \quad (5.46)$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปดีสครีต จะได้

$$u^{(k)} = K_1(\tilde{T}^{sp} - \tilde{T}^{(k)}) + K_2 \sum_0^k (\tilde{T}^{sp} - \tilde{T}^{(k)}) dt - \beta\phi\tilde{C}^{(k)}(\tilde{T}^{(k)}) + (q + \delta)\tilde{T}^{(k)} \quad (5.47)$$

5.1.3.3 แบบจำลองการประมาณค่าที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน

สมการดุลมวลของสารผลิตภัณฑ์และสมการดุลพลังงานรอบเครื่องปฏิกรณ์จะถูกนำมาใช้ในตัวกรองคาลมาน ดังนี้

$$\frac{d\tilde{C}}{d\tau} = -\phi\tilde{C}\kappa(\tilde{T}) + q(1 - \tilde{C}) \quad (5.48)$$

$$\frac{d\tilde{T}}{d\tau} = \beta\phi\tilde{C}\kappa(\tilde{T}) - (q + \delta)\tilde{T} + u \quad (5.49)$$

เมื่อ

$$\kappa(\tilde{T}) = \exp\left(\frac{\tilde{T}}{1 + \tilde{T}/\gamma}\right) \quad (5.50)$$

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเป็นค่าที่ไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนได้ จึงจำเป็นต้องประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบไร้มิติ (δ) สมการแบบจำลองแสดงได้ดังนี้

$$\frac{d\delta}{d\tau} = 0 \quad (5.51)$$

ในงานวิจัยนี้จะสมมติให้ค่าอุณหภูมิในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{T}_2) สามารถวัดได้ ซึ่งจะเป็นค่าที่จะถูกนำไปใช้ในตัวกรองคาลมานเพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ (\tilde{C}_1) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (δ) ในรูปแบบไร้มิติ

5.1.3.4 ผลการจำลองกระบวนการ

ในการจำลองกระบวนการจะทำการควบคุมค่าอุณหภูมิในรูปแบบไร้มิติให้อยู่ที่ค่า 3.5 โดยจะเปรียบเทียบผลการควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอดี และตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลในกรณีต่างๆ คือ กรณีปกติ กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 0.2 กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบไร้มิติ (δ) ของระบบลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ และกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลในรูปแบบไร้มิติ (q) ที่ $\tau = 20$ ผลการจำลองกระบวนการจะถูกแสดงอยู่ในรูป 5.26-5.34

ตารางที่ 5.11 ค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

ตัวควบคุมแบบพีไอดี	$K_c = 0.2, \tau_i = 5, \tau_d = 3$
ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	$K_1 = 0.25, K_2 = 0.0001$

ตารางที่ 5.12 ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน

$\tilde{C}^0 = 1$	$\tilde{T}^0 = 0$
$\delta^0 = 0.5$	$P(1,1) = 1$
$P(2,2) = 1$	$P(3,3) = 10$
$Q(1,1) = 2$	$Q(2,2) = 1$
$Q(3,3) = 5$	$R(1,1) = 5$

กรณีปกติ

จากรูปที่ 5.26 และ 5.27 จะพบว่าทั้งตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลให้ผลการควบคุมได้ดีไม่แตกต่างกัน โดยกรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีจะได้ค่า IAE และค่า ISE เท่ากับ 11.57889 และ 24.86304 ขณะที่กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลจะได้ค่า IAE และค่า ISE เท่ากับ 8.37028 และ 14.718 เมื่อพิจารณาผลการประมาณค่า \tilde{C} จะพบว่าตัวกรองคาลมานให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง

กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 0.2

จากรูปที่ 5.28 และ 5.29 จะพบว่าตัวควบคุมทั้งสองให้ผลการควบคุมได้ใกล้เคียงกัน โดยจะมีการแกว่งของค่า \tilde{T} เกิดขึ้นเนื่องจากจากผลของสัญญาณรบกวนการวัด เมื่อพิจารณาผลการประมาณค่า \tilde{C} จะพบว่าตัวกรองคาลมานให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง

กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบไร้มิติของระบบลดลง 30 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 5.30 จะพบว่ากรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีจะเกิดโอเวอร์ชูทขึ้น และลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา $\tau = 25$ ขณะที่กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลจะเกิดโอเวอร์ชูทขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.31 ทั้งนี้เนื่องจากความผิดพลาดของค่าประมาณของ δ ที่ใช้ในแบบจำลองของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล อย่างไรก็ตาม เมื่อถึงที่เวลา $\tau = 8$ ค่าประมาณของ δ จะลู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 5.32 จึงทำให้ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถควบคุมค่า \tilde{T} ให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ที่เวลา $\tau = 10$ เท่านั้น เมื่อพิจารณาผลการประมาณค่า \tilde{C} จะพบว่าตัวกรองคาลมานให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง

กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราดอกเบี้ยในรูปแบบไร้มิติที่ $\tau = 20$

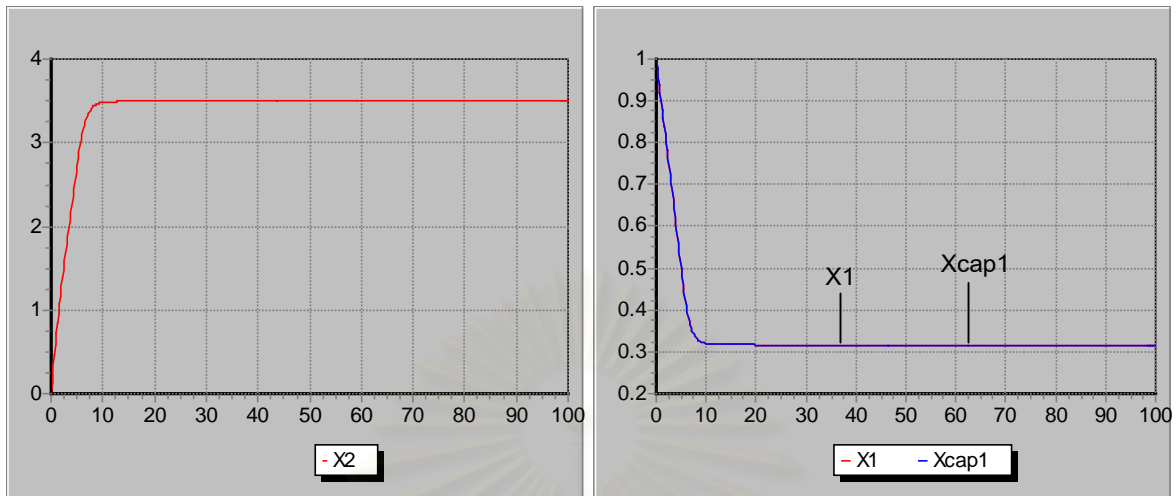
จากรูปที่ 5.33 จะพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่า q ที่เวลา $\tau = 20$ จะทำให้ค่า \tilde{T} มีความเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเป้าหมาย โดยตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมค่า \tilde{T} ให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อีกครั้งที่เวลา $\tau = 40$ ขณะที่ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถควบคุมค่า \tilde{T} ให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อีกครั้งที่เวลา $\tau = 30$ ดังแสดงในรูปที่ 5.34 เมื่อพิจารณาผลการประมาณค่า \tilde{C} จะพบว่าตัวกรองคาลมานให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบค่า IAE และ ISE ของการควบคุม \tilde{T}

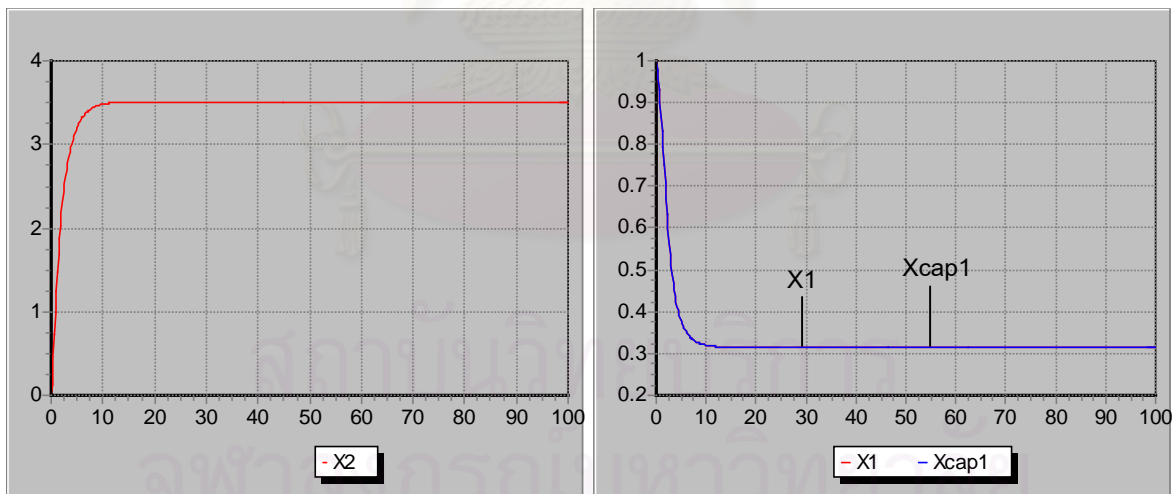
กรณีของความผิดพลาด	ตัวควบคุมแบบพีไอดี		ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	
	IAE	ISE	IAE	ISE
ปกติ	11.5789	24.863	8.3703	14.7178
สัญญาณรบกวนการวัด 0.2	15.6854	24.292	14.5385	15.456
δ มีค่าลดลง 30 %	33.0126	28.3188	26.8535	18.1405
q เพิ่มขึ้น 50 % ที่ $\tau = 20$	20.7512	31.118	9.729	15.1562

5.1.3.4 สรุปผลการจำลองกระบวนการ

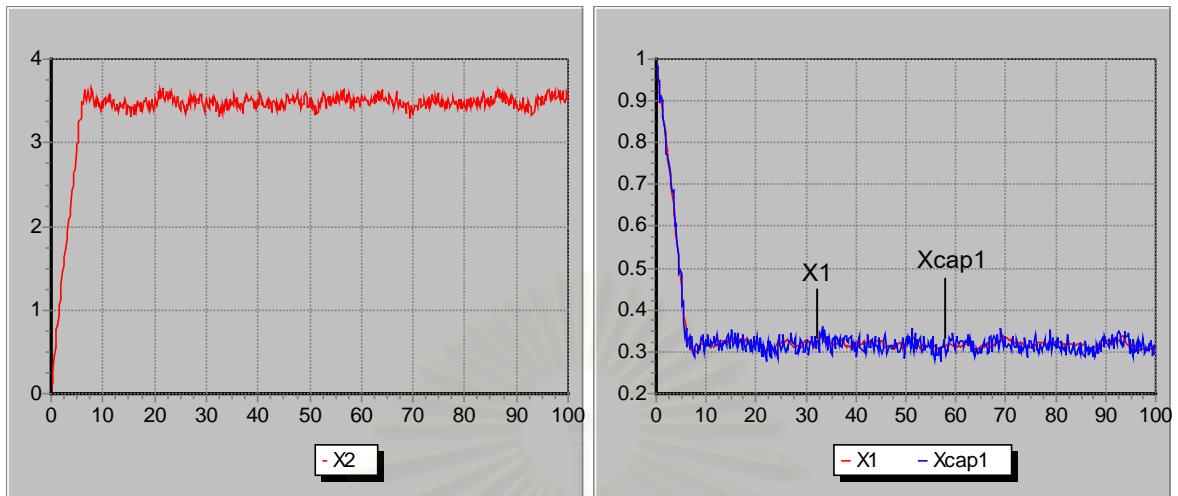
จากผลการจำลองกระบวนการจะพบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถให้ผลการควบคุมได้ดีในกรณีปกติ และกรณีที่สัญญาณรบกวนในการวัด 0.2 อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ค่า δ ของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เกิดโอเวอร์ชูทของค่า \tilde{T} อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลจะสามารถควบคุมค่า \tilde{T} ให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เกือบทันทีเมื่อค่าประมาณของค่า δ เข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง เมื่อพิจารณากรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า q ที่เวลา $\tau = 20$ จะพบว่าตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลยังสามารถให้ผลการควบคุมได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลที่มีการประมาณค่าโดยตัวกรองคาลมานมีความทนทานต่อความผิดพลาดของแพลนท์/แบบจำลองมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี



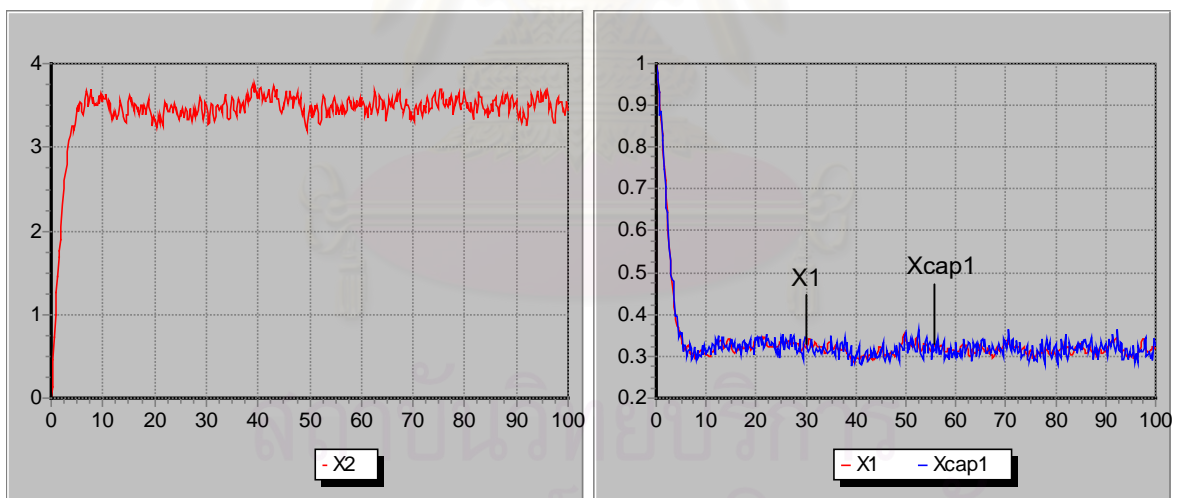
รูปที่ 5.26 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปซ้าย, $\tilde{T}-X2$) และผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปขวา, $\tilde{C}-X1, \tilde{C}(\text{est})-Xcap1$) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณีปกติ)



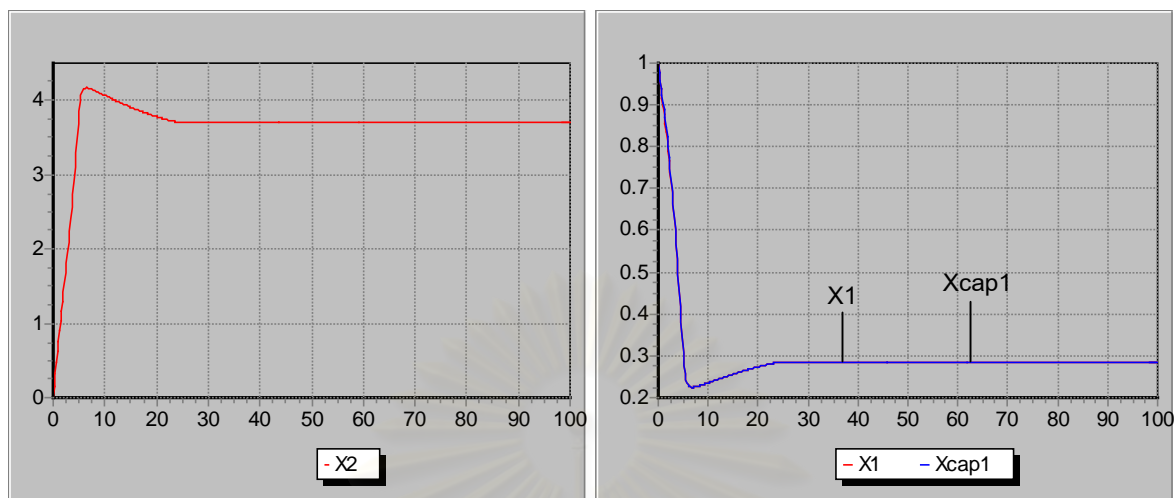
รูปที่ 5.27 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปซ้าย, $\tilde{T}-X2$) และผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปขวา, $\tilde{C}-X1, \tilde{C}(\text{est})-Xcap1$) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีปกติ)



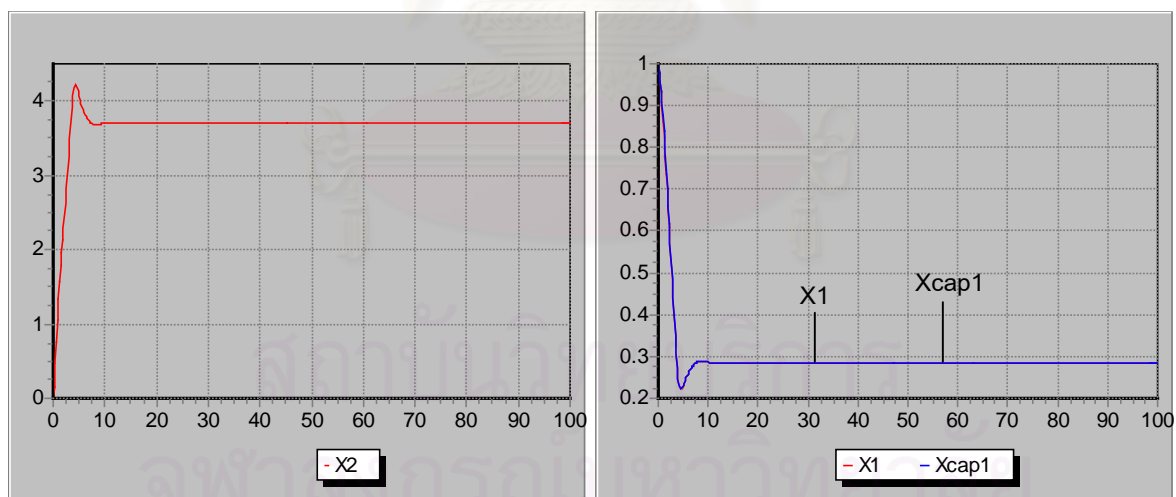
รูปที่ 5.28 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปซ้าย, $\tilde{T}-X2$) และผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปขวา, $\tilde{C}-X1, \tilde{C}(\text{est})-Xcap1$) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 0.2)



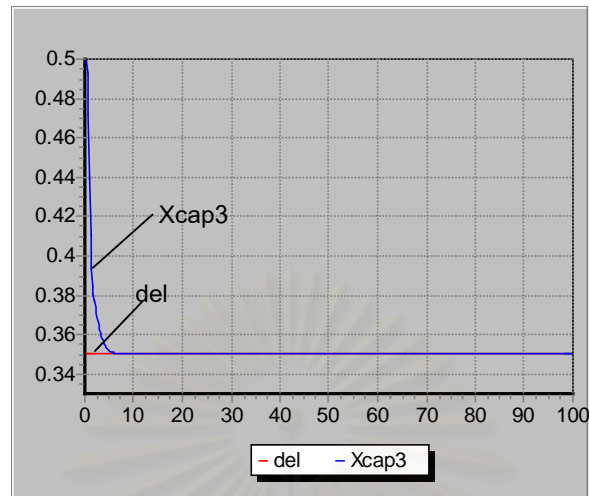
รูปที่ 5.29 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปซ้าย, $\tilde{T}-X2$) และผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปขวา, $\tilde{C}-X1, \tilde{C}(\text{est})-Xcap1$) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 0.2)



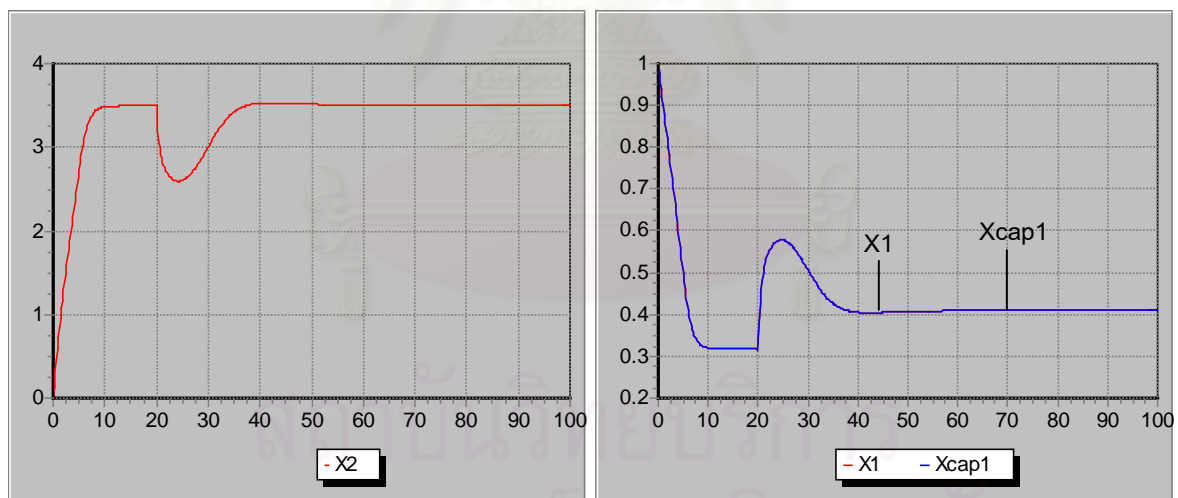
รูปที่ 5.30 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปซ้าย, $\tilde{T}-X2$) และผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปขวา, $\tilde{C}-X1, \tilde{C}(\text{est})-Xcap1$) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณี δ ของระบบลดลง 30 เปอร์เซ็นต์)



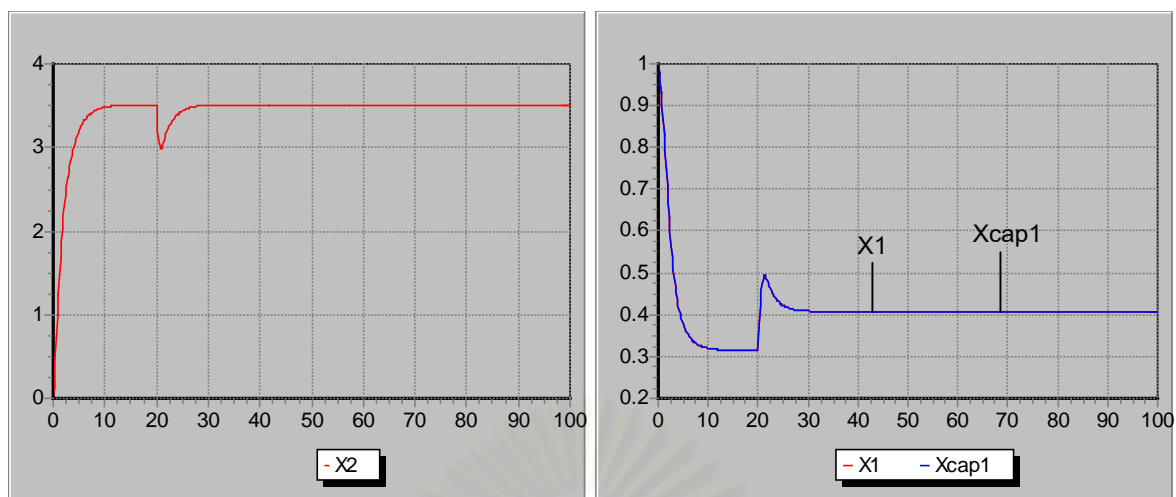
รูปที่ 5.31 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปซ้าย, $\tilde{T}-X2$) และผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปขวา, $\tilde{C}-X1, \tilde{C}(\text{est})-Xcap1$) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณี δ ของระบบลดลง 30 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 5.32 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบไร้มิติ (δ -del, δ (est)-Xcap3) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณี δ ของระบบลดลง 30 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 5.33 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปซ้าย, \tilde{T} -X2) และผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปขวา, \tilde{C} -X1, \tilde{C} (est)-Xcap1) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (กรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของ q 50 เปอร์เซ็นต์ที่ $\tau=20$)

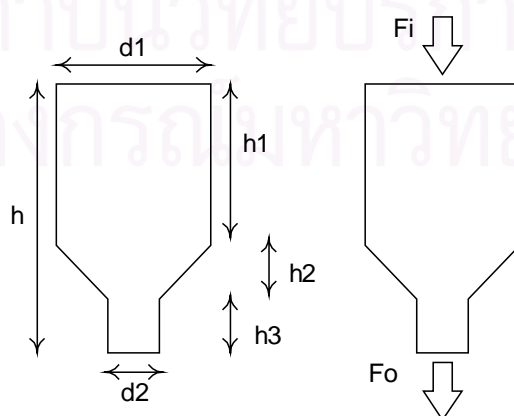


รูปที่ 5.34 ผลการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปซ้าย, $\tilde{T}-X2$) และผลการประมาณค่าความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ในรูปแบบไร้มิติ (รูปขวา, $\tilde{C}-X1, \tilde{C}(\text{est})-Xcap1$) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของ q 50 เปอร์เซ็นต์ที่ $\tau=20$)

5.1.4 เครื่องป้อนสารขนาดเล็ก (Micro Feeder)

ในหัวนี้จะเป็นการทดสอบซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ กับระบบเครื่องป้อนสารขนาดเล็ก เพื่อศึกษาถึงการควบคุมความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ (hopper) ของเครื่องป้อนสาร ซึ่งเป็นตัวแปรที่กำหนดอัตราการไหลออกของสารจากเครื่องป้อนโดยตรง

5.1.4.1 แบบจำลองรอบฮอปเปอร์ของเครื่องป้อนสารขนาดเล็ก



รูปที่ 5.35 ส่วนฮอปเปอร์ของเครื่องป้อนสารขนาดเล็ก

จากรูป 5.35 เมื่อทำการดูลมवलรอบฮอปเปอร์จะได้สมการดังนี้

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho q_i - \rho q_o \quad (5.52)$$

ถ้ากำหนดให้ค่าอัตราการไหลของสารที่ออกจากฮอปเปอร์ (q_o) มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าความสูง (h) ของสารภายในฮอปเปอร์ ดังนี้

$$q_o = \alpha h \quad (5.53)$$

เมื่อทำการแทนค่าสมการ 5.53 ลงในสมการ 5.52 จะได้

$$\frac{dV}{dt} = q_i - \alpha h \quad (5.54)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรและความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ สามารถหาได้จาก

$$V = \frac{\pi d_1^2 h_1}{4} + \frac{1}{3} \frac{\pi d_1^2 (h_2 + h_3)}{4} + \frac{\pi d_2^2 h_3}{4} - \frac{1}{3} \frac{\pi d_2^2 h_3}{4} \quad (5.55)$$

และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของส่วนต่างๆ กับค่าความสูงของฮอปเปอร์ ดังนี้

$$h_1 = 0.448h \quad (5.56)$$

$$h_2 = 0.363h \quad (5.57)$$

$$h_3 = 0.149h \quad (5.58)$$

จะได้

$$V = 20.73h \quad (5.59)$$

เมื่อแทนค่า V ของสมการ 5.59 ลงในสมการ 5.54 จะได้

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{20.73} (q_i - \alpha h) \quad (5.60)$$

การควบคุมค่าความสูงของสารภายในฮอปเปอร์นี้จะทำโดยใช้ค่าอัตราการไหลของสารขาเข้าเป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ความหมายของสัญลักษณ์และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ จะถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 ความหมายของสัญลักษณ์และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าที่ใช้
d1	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านบนของฮอปเปอร์	5 cm.
d2	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างของฮอปเปอร์	10 cm.
h^0	ความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ที่เวลาเริ่มต้น	10 cm.
q_i^0	อัตราการไหลของสารที่เข้าสู่ฮอปเปอร์ที่เวลาเริ่มต้น	$30 \text{ cm}^3/\text{s}$
q_o^0	อัตราการไหลของสารที่ออกจากฮอปเปอร์ที่เวลาเริ่มต้น	$30 \text{ cm}^3/\text{s}$
α	สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล	$3 \text{ cm}^2/\text{s}$

5.1.4.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

อัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = K_1(x^{sp} - x) + K_2 \int_0^t (x^{sp} - x) dt \quad (5.61)$$

เมื่อ K_1 , K_2 คือ ค่าคงที่ของการจูน

เมื่อทำการแทนสมการ 5.60 ลงในสมการ 5.61 โดยใช้ q_i เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ จะได้สมการอัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล ดังนี้

$$q_i = 20.73 \left(K_1(h^{sp} - h) + K_2 \int_0^t (h^{sp} - h) dt \right) + \alpha h \quad (5.62)$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปดีสครีต จะได้

$$q_i^{(k)} = 20.73 \left(K_1(h^{sp} - h^{(k)}) + K_2 \int_0^t (h^{sp} - h^{(k)}) dt \right) + \alpha h^{(k)} \quad (5.63)$$

5.1.4.3 แบบจำลองการประมาณค่าที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลของสารที่ออกจากฮอปเปอร์และค่าความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ จะเห็นว่าในความเป็นจริงนั้นอาจไม่สามารถทราบค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน

การไหลที่ถูกตัดได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลควบคู่ไปกับการควบคุมด้วย สมการแบบจำลองที่จะถูกใช้ในตัวกรองคาลมานสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{20.73} (q_i - \alpha h) \quad (5.64)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = 0 \quad (5.65)$$

ค่าการวัดของความสูงของสารภายในฮอปเปอร์จะถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการประมาณค่า

5.1.4.4 ผลการจำลองกระบวนการ

ในการศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบการควบคุมระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดี และตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลในกรณีต่างๆ คือ กรณีปกติ กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ โดยจะทำการควบคุมความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ที่ 25 ซม. ค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลจะถูกแสดงดังตารางที่ 5.15 ค่าเริ่มต้นและพารามิเตอร์การจูนที่ใช้ในตัวกรองคาลมานจะถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.15 ค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

ตัวควบคุมแบบพีไอดี	$K_c = 5, \tau_i = 10, \tau_d = 2$
ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	$K_1 = 0.25, K_2 = 0.0001$

ตารางที่ 5.16 ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์การจูนที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน

$h^0 = 10$	$\alpha^0 = 3$
$P(1,1) = 1$	$P(2,2) = 10$
$Q(1,1) = 1$	$Q(2,2) = 5$
$R(1,1) = 10$	

กรณีปกติ

จากรูปที่ 5.36 จะพบว่าในกรณีปกติทั้งตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถให้ผลการควบคุมอย่างมีประสิทธิภาพ โดยกรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีจะได้ค่า IAE และค่า ISE เท่ากับ 90.4068 และ 716.4607 ขณะที่กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลจะได้ค่า IAE และค่า ISE เท่ากับ 65.5798 และ 512.3351

กรณีมีสัญญาณรบกวนในการวัด 1 ซม.

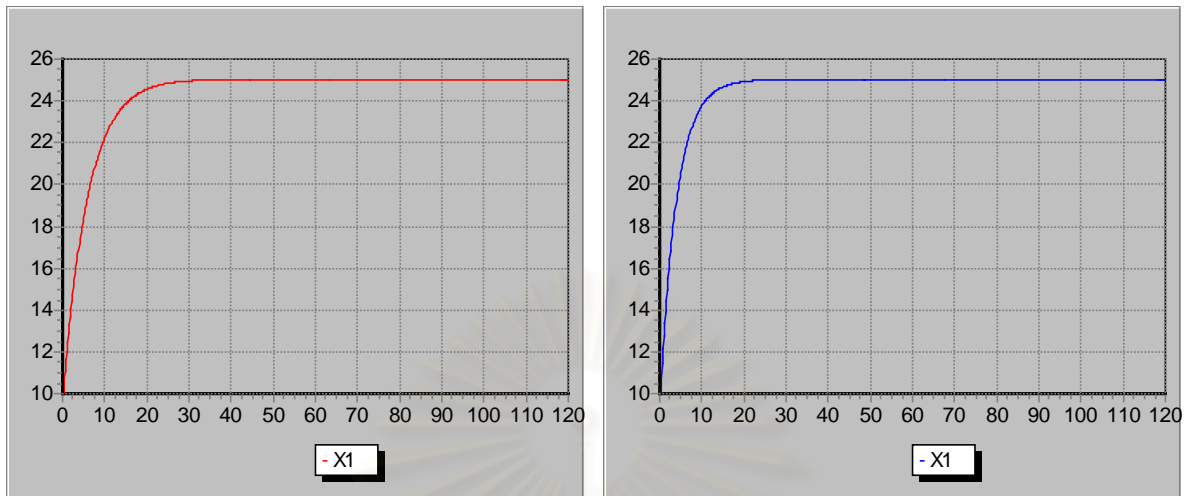
จากรูปที่ 5.37 จะพบว่าตัวควบคุมทั้งสองยังสามารถให้ผลการควบคุมได้ดี อย่างไรก็ตาม จะพบว่ากรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลจะมีการแกว่งของค่าความสูงน้อยกว่าทั้งนี้เนื่องจากตัวกรองคาลมานสามารถลดผลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนในการวัด ดังแสดงในรูปที่ 5.38 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าประมาณของความสูงที่ได้จะมีการแกว่งน้อยกว่าที่ได้จากการวัด

กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของระบบลดลง 30 เปอร์เซ็นต์

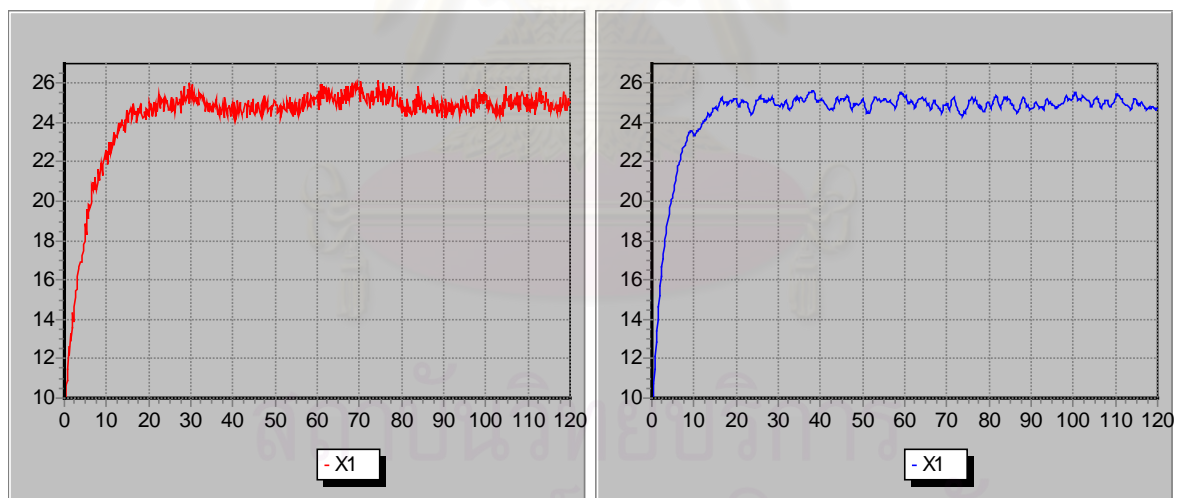
จากรูปที่ 5.39 จะพบว่ากรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีเกิดโอเวอร์ชูทขึ้น ในขณะที่กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลไม่เกิดโอเวอร์ชูท เนื่องจากค่าประมาณของ α สามารถเข้าสู่ค่าที่ถูกต้องได้อย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูป 5.40 อย่างไรก็ตาม ในกรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลที่มีได้มีการประมาณค่าจากตัวกรองคาลมานจะพบว่าผลการควบคุมความสูงที่ได้จะยังไม่เข้าสู่ค่าเป้าหมายแม้จะใช้เวลาลงถึง 120 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 5.41

ตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบค่า IAE และ ISE ของการควบคุมความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ (h)

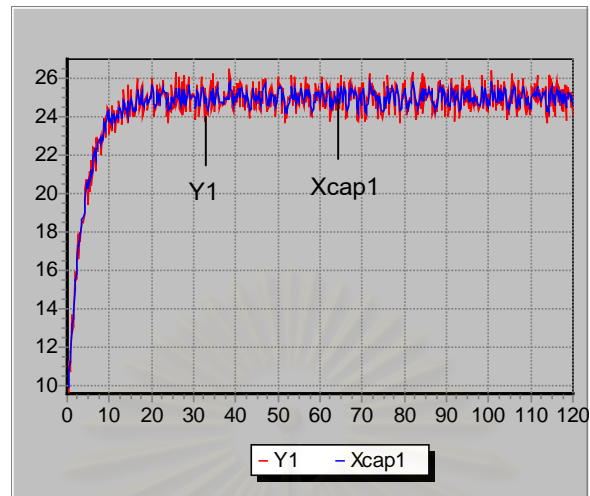
กรณีของความผิดพลาด	ตัวควบคุมแบบพีไอดี		ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล	
	IAE	ISE	IAE	ISE
ปกติ	90.4068	716.4607	65.5798	512.3351
สัญญาณรบกวนการวัด 1 ซม.	118.2006	723.1048	83.6387	513.6162
α มีค่าลดลง 30 %	84.7541	593.6209	62.1747	472.5553



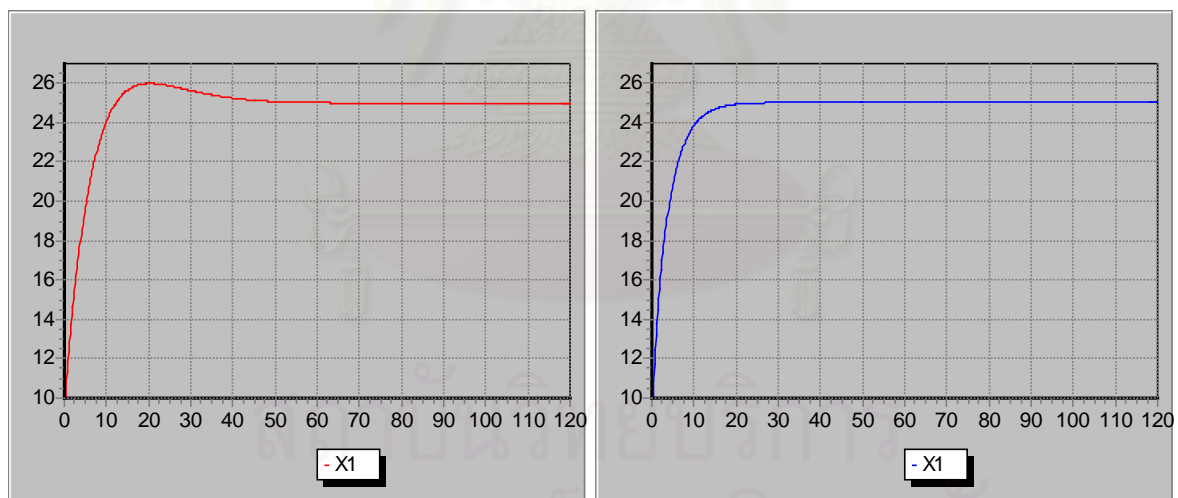
รูปที่ 5.36 ผลการควบคุมความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ ($h-X1$) รูปซ้าย-กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี และรูปขวา-กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีปกติ)



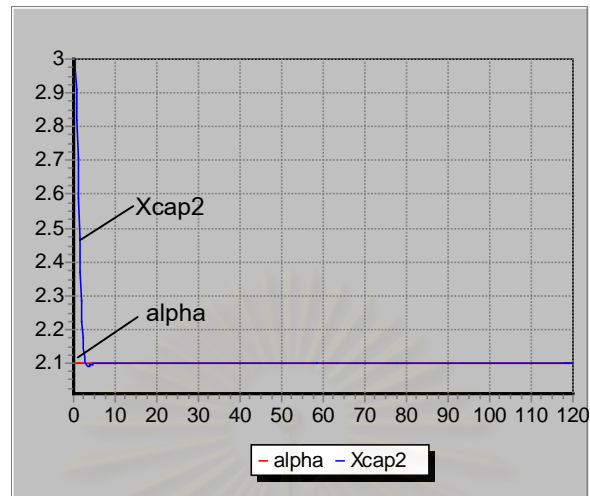
รูปที่ 5.37 ผลการควบคุมความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ ($h-X1$) รูปซ้าย-กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี และรูปขวา-กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 1 ซม.)



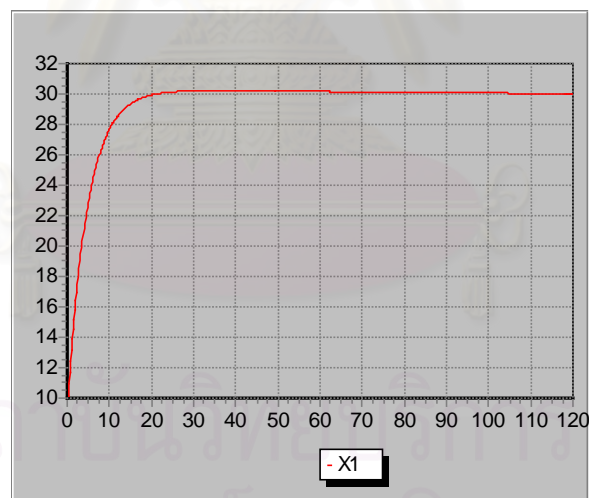
รูปที่ 5.38 ผลค่าการวัดความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ (h-Y1) เทียบกับค่าประมาณของค่าความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ (h-Xcap1) (กรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 1 cm.)



รูปที่ 5.39 ผลการควบคุมความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ (h-X1) รูปซ้าย-กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี และรูปขวา-กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (กรณีที่ค่า α ของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 5.40 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล (α -alpha, α (est)-Xcap2) (กรณีค่า α ของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 5.41 ผลการควบคุมความสูงของสารภายในฮอปเปอร์ (h -X1) กรณีควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลที่ไม่มีการประมาณค่าจากตัวกรองคาลมาน (กรณีค่า α ของระบบมีค่าลดลง 30 เปอร์เซ็นต์)

5.1.4.5 สรุปผล

จากผลการจำลองกระบวนการจะพบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีให้ผลการควบคุมได้ดีในกรณีปกติ และกรณีที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด 1 ซม. อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของระบบลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดโอเวอร์ชูทของค่าความสูงขึ้น ในขณะที่ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลที่ใช้งานร่วมกับตัวกรองคาลมานให้ผลการควบคุมได้ดีทั้ง 3 กรณีโดยไม่เกิดโอเวอร์ชูทแม้ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของระบบจะลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลที่ใช้งานร่วมกับตัวกรองคาลมานมีความทนทานต่อความผิดพลาดของแพลนท์/แบบจำลองมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี อย่างไรก็ตาม ในกรณีของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลที่มีได้มีการประมาณค่าจากตัวกรองคาลมาน ในกรณีทดสอบสัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลของระบบลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่าแม้จะใช้เวลาถึง 120 วินาที ก็ยังไม่สามารถควบคุมค่าความสูงให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อเสียของตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองที่มีได้มีการประมาณค่าเข้ามาช่วยในกรณีที่มีความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์อย่างรุนแรง

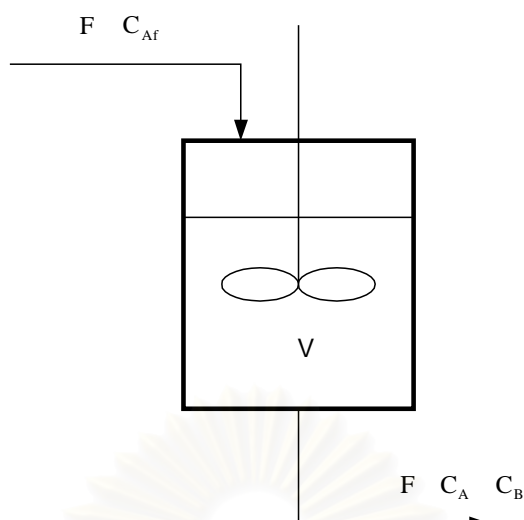
5.2 การทดสอบการใช้งานคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมาน

5.2.1 การทดสอบคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมานกับบอร์ดแลนดเดิลไฟ

5.2.1.1 แบบจำลองของระบบที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยจะทำการทดสอบการใช้งานคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมานกับภาษาบอร์ดแลนดเดิลไฟ โดยจะศึกษากับระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง ซึ่งอ้างอิงจาก J.Zhou และ R.H. Luecke (1995) ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.42 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษานี้จะสมมติให้ค่าอุณหภูมิและปริมาตรของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยจะเกิดปฏิกิริยาแบบไม่ผันกลับ ดังนี้



โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกแสดงโดย $r_1 = k_1 C_A$ และ $r_2 = k_2 C_B$

จากรูป 5.42 จะสามารถเขียนสมการแบบจำลองในรูปแบบไร้มิติได้ดังนี้

$$\frac{d\tilde{C}_1}{d\tau} = -(1 + a_2)\tilde{C}_1 + a_1\tilde{C}_2 \quad (5.66)$$

$$\frac{d\tilde{C}_2}{d\tau} = -(1 + a_1)\tilde{C}_2 \quad (5.67)$$

เมื่อ

$$\tilde{C}_1 = C_B / C_{Af} \quad (5.68)$$

$$\tilde{C}_2 = C_A / C_{Af} \quad (5.69)$$

$$a_1 = k_1 V / F \quad (5.70)$$

$$a_2 = k_2 V / F \quad (5.71)$$

$$\tau = tF / V \quad (5.72)$$

ตารางที่ 5.18 ความหมายของสัญลักษณ์และค่าต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าที่ใช้
C_{Af}	ค่าความเข้มข้นของสาร A ขาเข้า	
C_B	ค่าความเข้มข้นของสาร B	
t	เวลา	
F	อัตราการไหลของสารเข้า-ออกเครื่องปฏิกรณ์	$1.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
V	ปริมาตรของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์	2 m^3
k_1	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา	172.5 h^{-1}
k_2	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา	68.25 h^{-1}
\tilde{C}_1^0	ค่าความเข้มข้นของสาร B ในรูปแบบไร้มิติที่เวลาเริ่มต้น	0
\tilde{C}_2^0	ค่าความเข้มข้นของสาร A ในรูปแบบไร้มิติที่เวลาเริ่มต้น	1

ในการศึกษานี้จะสมมติให้ค่าความเข้มข้นของสาร A ไม่สามารถทำการวัดได้ มีเพียงความเข้มข้นของสาร B เท่านั้นที่สามารถวัดได้ ดังนั้นตัวกรองคาลมานจะถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการประมาณค่าความเข้มข้นของสาร A

5.2.1.2 แบบจำลองที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน

แบบจำลองที่จะถูกนำไปใช้ในตัวกรองคาลมาน สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{d\tilde{C}_1}{d\tau} = -(1 + a_2)\tilde{C}_1 + a_1\tilde{C}_2 \quad (5.73)$$

$$\frac{d\tilde{C}_2}{d\tau} = -(1 + a_1)\tilde{C}_2 \quad (5.74)$$

ค่าการวัดของค่า \tilde{C}_1 จะถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการประมาณค่า \tilde{C}_2

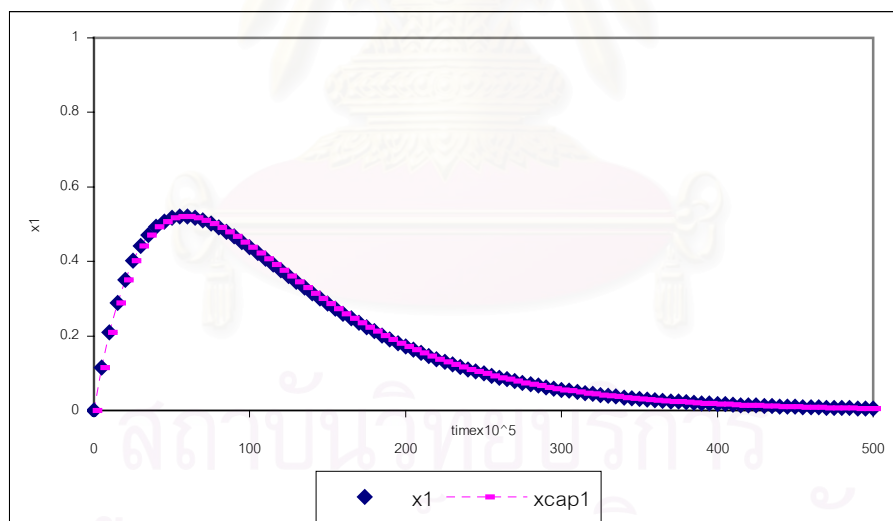
5.2.1.3 ผลการจำลองกระบวนการ

ผลการจำลองกระบวนการจะถูกแสดงดังรูปที่ 5.43-5.44 ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์การจูนในตัวกรองคาลมานแสดงดังตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.19 ค่าเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวกรองคาลมาน

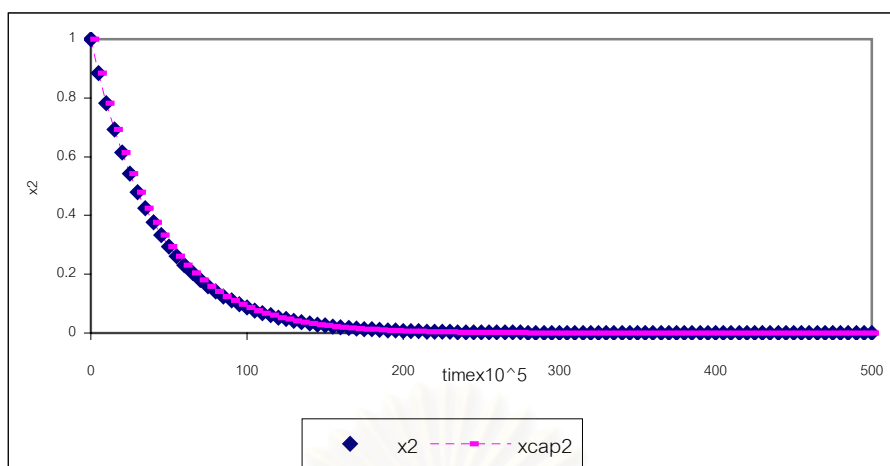
$\tilde{C}_1^0 = 0$	$\tilde{C}_2^0 = 1$
$P(1,1) = 1$	$P(2,2) = 2$
$Q(1,1) = 1$	$Q(2,2) = 5$
$R(1,1) = 10$	

จากรูปที่ 5.44 จะพบว่าตัวกรองคาลมานสามารถประมาณค่า \tilde{C}_2 ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งเป็นการพิสูจน์ได้ว่าคอมโพเนนต์ที่ตัวกรองคาลมานสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 5.43 ค่าความเข้มข้นของสาร B ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C}_1-x1 , $\tilde{C}_1(\text{est})-xcap1$)

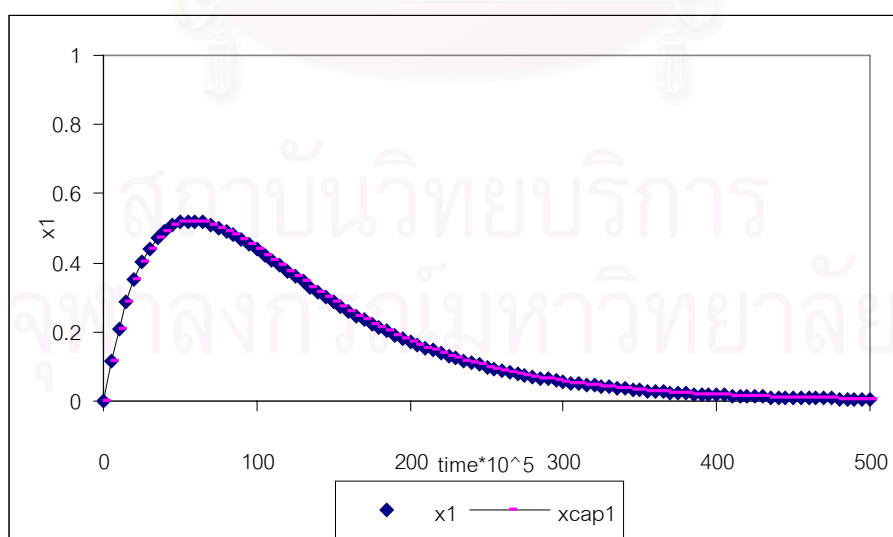
ผลจากบอร์แลนด์เดสไฟ



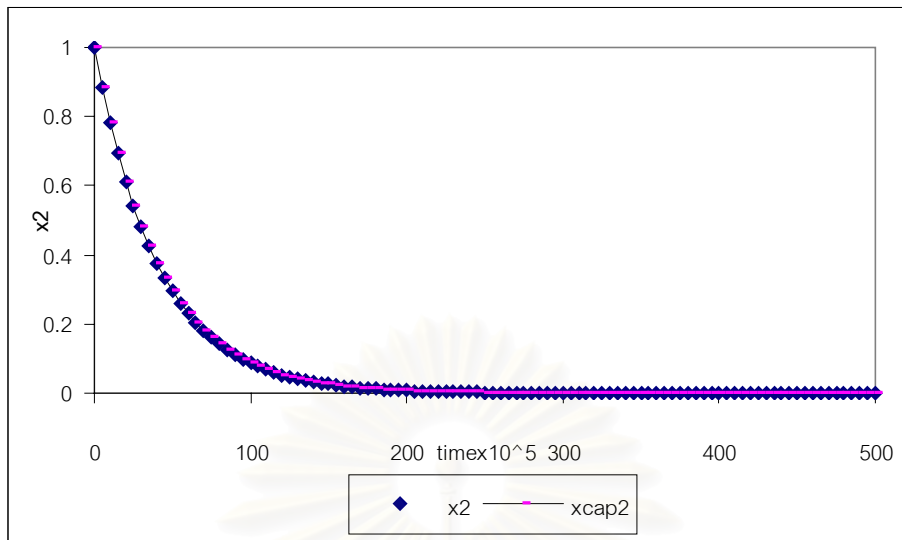
รูปที่ 5.44 ค่าความเข้มข้นของสาร A ในรูปแบบไร้มิติ ($\tilde{C}_2 - x_2$, \tilde{C}_2 (est)-xcap2)
ผลจากบอร์แลนดเดลไฟ

5.2.2 การทดสอบคอมพิวเตอร์ตัวกรองคาลมานกับวิซวลเบสิก

ในการทดสอบคอมพิวเตอร์ตัวกรองคาลมานกับคอมพิวเตอร์วิซวลเบสิก จะทำโดยใช้กรณีศึกษาเดียวกับที่ใช้ในหัวข้อ 5.2.1 ซึ่งจากการเขียนโปรแกรมด้วยคอมพิวเตอร์วิซวลเบสิกจะได้ผลการจำลองกระบวนการ ดังนี้

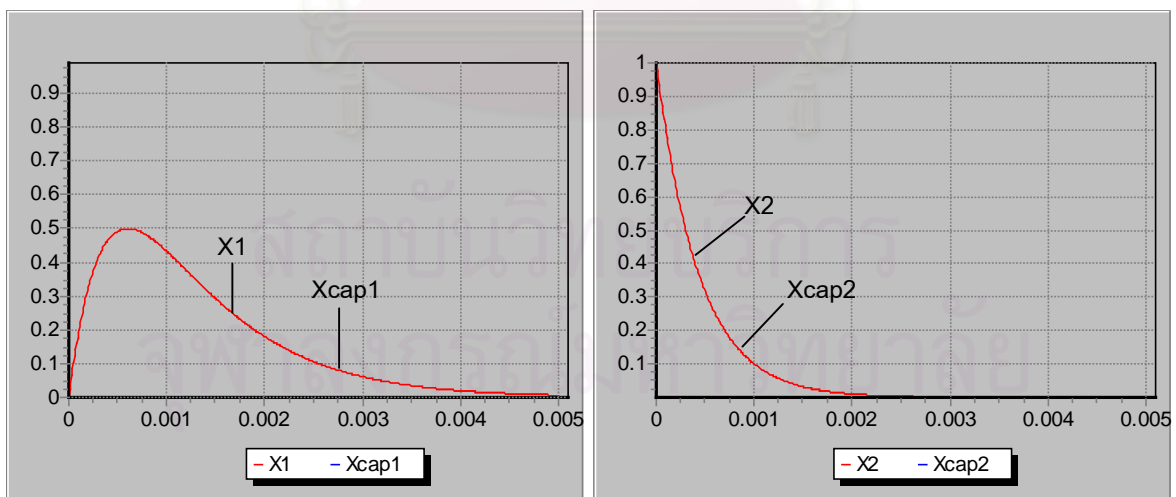


รูปที่ 5.45 ค่าความเข้มข้นของสาร B ในรูปแบบไร้มิติ ($\tilde{C}_1 - x_1$, \tilde{C}_1 (est)-xcap1)
ผลจากวิซวลเบสิก



รูปที่ 5.46 ค่าความเข้มข้นของสาร A ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C}_2 - x_2 , \tilde{C}_2 (est)- x_{cap2})
ผลจากวิธีลเวสิก

จากรูปที่ 5.45 และ 5.46 จะพบว่าตัวกรองกาลมานสามารถให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะให้ผลเช่นกับกรณีที่ใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับบอร์ดแลนดเดสไฟ และเพื่อทดสอบความถูกต้องในงานวิจัย จึงได้ทดสอบกรณีศึกษาขึ้นกับซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ซึ่งได้ผลการจำลองเช่นเดียวกันดังแสดงในรูป 5.47



รูปที่ 5.47 รูปถ่าย-แสดงค่าความเข้มข้นของสาร B ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C}_1 - x_1 , \tilde{C}_1 (est)- x_{cap1})

รูปขวา-แสดงค่าความเข้มข้นของสาร A ในรูปแบบไร้มิติ (\tilde{C}_2 - x_2 , \tilde{C}_2 (est)- x_{cap2})

ผลจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

บทที่ 6

สรุปผล วิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

การประยุกต์ใช้การควบคุมที่อาศัยแบบจำลองต้องการค่าของสเตทและพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตาม ค่าของสเตทและพารามิเตอร์โดยทั่วไปนั้นอาจไม่สามารถทราบได้ เทคนิคการประมาณค่าจึงเป็นสิ่งจำเป็น ตัวกรองคาลมานเป็นเทคนิคการประมาณค่าเทคนิคหนึ่งที่มีการประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นงานทางด้านสาขาวิชาการบิน การเดินเรือ วิศวกรรมไฟฟ้า รวมไปถึงงานทางด้านวิศวกรรมเคมี ด้วยขั้นตอนการคำนวณที่เป็นแบบเรียกซ้ำจึงสามารถให้ผลการคำนวณที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ตัวกรองคาลมานยังสามารถประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตาม ในการประยุกต์ใช้ตัวกรองคาลมานกับงานกระบวนการทางเคมียังทำได้ค่อนข้างลำบากเนื่องจากขั้นตอนการคำนวณที่ยุ่งยาก จึงทำให้มีความต้องการซอฟต์แวร์ตัวกรองคาลมาน

ในงานวิจัยจึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์สำเร็จรูป KSTAPEN+ และคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมาน KSTAPEN-C ขึ้นมาเพื่อช่วยในการศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวกรองคาลมานกับกระบวนการทางเคมี ภายในซอฟต์แวร์ KSTAPEN+ ผู้ใช้สามารถที่จะทำการกำหนดแบบจำลองของระบบที่ต้องการศึกษา ตัวควบคุมที่ต้องการใช้งาน ตลอดจนการกำหนดค่าต่างๆ ของตัวกรองคาลมานได้เองตามความต้องการ ดังในบทที่ 5 ได้มีการทดสอบซอฟต์แวร์ KSTAPEN+ กับเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบแบทช์ และเพื่อเป็นการทดสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์ จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วย Matlab ซึ่งพบว่าได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 5.2-5.8 และ 5.9-5.15 และยังได้ทำการเปรียบเทียบค่า IAE และค่า ISE ที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิ และค่า $\sum_0^k |Q_r^{(k)} - \hat{Q}_r^{(k)}| \Delta t$ และ $\sum_0^k (Q_r^{(k)} - \hat{Q}_r^{(k)})^2 \Delta t$ ของการประมาณค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 5.3 และ 5.5 ซึ่งพบว่าค่าที่ไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งเป็นการพิสูจน์ว่าซอฟต์แวร์ KSTAPEN+ สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ ในงานวิจัยยังได้ทำการทดสอบซอฟต์แวร์ KSTAPEN+ กับระบบอื่นๆ เพิ่มเติม คือ เครื่องให้ความร้อน เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง และเครื่องป้อนสารขนาดเล็ก ซึ่งพบว่าซอฟต์แวร์สามารถใช้งานกับระบบดังกล่าวได้ โดยตัวกรองคาลมานสามารถให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง ซึ่งเป็นผลให้ได้มาซึ่งการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ ดังผลการจำลองที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 5

ในส่วนของซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ kSTAPEN-C จะเป็นคอมพิวเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นในรูปแบบของคอมพิวเตอร์แบบฝัง จึงทำให้สามารถใช้งานคอมพิวเตอร์ร่วมกับคอมพิวเตอร์ชนิดต่างๆ ที่สนับสนุนการใช้งานคอมพิวเตอร์แบบฝังได้ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถนำคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นไปใช้งานร่วมกับการเขียนโปรแกรมโดยที่ผู้ใช้ไม่ต้องเสียเวลาในการพัฒนาส่วนของตัวกรองค่ามาขึ้นเอง ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบการใช้งานคอมพิวเตอร์กับบอร์ดแลนดเดิลไฟและวีซวลเบสิก ซึ่งพบว่าสามารถประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 5.40-5.43 และได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับผลการจำลองจากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ซึ่งพบว่าได้ผลการประมาณค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าคอมพิวเตอร์ kSTAPEN-C สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

6.2 วิจารณ์งานวิจัย

ซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ เป็นซอฟต์แวร์เพื่อใช้สำหรับศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวกรองกับงานกระบวนการทางเคมี จึงอาจใช้เป็นซอฟต์แวร์ประกอบการเรียนการสอนในวิชาการควบคุมกระบวนการได้ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ศึกษาเกิดความสนใจที่จะศึกษา และสามารถเข้าใจถึงการประยุกต์ใช้งานตัวกรองค่ามากับงานกระบวนการทางเคมีได้ ภายในซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ได้มีการสร้างส่วนช่วยเหลือต่างๆ เพื่อช่วยเหลือการทำงานให้แก่ผู้ใช้ ได้แก่ การเปิด-สำรองไฟล์ข้อมูล เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเก็บไฟล์และเรียกใช้งานได้ในครั้งต่อไป ส่วนช่วยบันทึกความจำ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกรณีที่ได้ทำการศึกษาอยู่ได้ ส่วนไฟล์ช่วยเหลือ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถใช้ในการอ้างอิงในกรณีที่มีปัญหาในการใช้ซอฟต์แวร์เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยฝึกการใช้งานซอฟต์แวร์ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจการใช้งานซอฟต์แวร์ได้รวดเร็วขึ้น และแม้ว่าซอฟต์แวร์จะถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับศึกษากับกระบวนการทางเคมีโดยเฉพาะ แต่ในการนำไปใช้จริงอาจสามารถนำซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ไปประยุกต์ใช้กับงานในด้านอื่นๆ ที่มีรูปแบบของสมการแบบจำลองที่คล้ายกับงานในกระบวนการทางเคมีได้

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ จะถูกออกแบบมาเพื่อให้ผู้ใช้สามารถทำการกำหนดแบบจำลองได้ด้วยตนเอง แต่ในกรณีของระบบที่มีแบบจำลองที่ซับซ้อนอาจไม่สามารถใช้งานกับซอฟต์แวร์ได้ และในซอฟต์แวร์ผู้ใช้สามารถที่จะกำหนดจำนวนสเตทและจำนวนตัวแปรที่ต้องการประมาณได้สูงสุดเพียง 10 ค่า

ในส่วนของซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ kSTAPEN-C เป็นคอมพิวเตอร์ที่ผู้ใช้สามารถที่จะนำไปใช้ร่วมกับการเขียนโปรแกรมในคอมพิวเตอร์ต่างๆ ที่สนับสนุนการใช้งานคอมพิวเตอร์แบบฝัง เช่น บอร์ดแลนดเดิลไฟ

วิซวลเบสิก เป็นต้น ได้ตามแต่ที่ผู้ใช้ต้องการ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้สามารถลดขั้นตอนการเขียนโปรแกรมในส่วน
ของตัวกรองคาลมานได้ อย่างไรก็ตาม คอมโพเนนท์ kSTAPEN-C จะสามารถใช้ได้กับระบบที่มีจำนวนตัว
แปรที่ต้องการประมาณได้สูงสุด 10 ค่าเท่านั้น

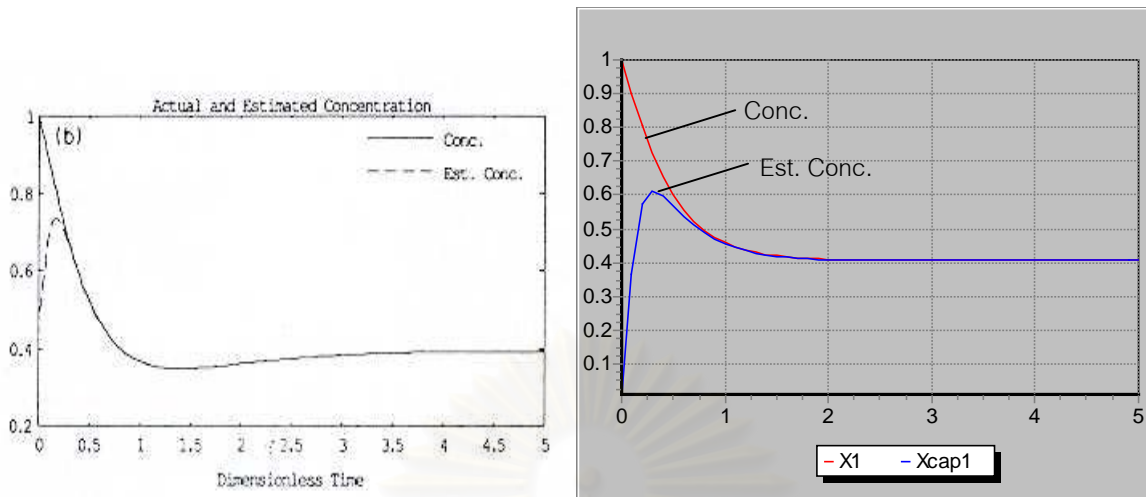
6.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย

ในการใช้งานซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ และคอมโพเนนท์ kSTAPEN-C ผู้ใช้ควรจะได้มีการศึกษาถึง
ความรู้พื้นฐานของการควบคุมกระบวนการ หรือเคยผ่านการเรียนการสอนในวิชาการควบคุมกระบวนการ
มาก่อน และควรศึกษาคู่มือการใช้ซอฟต์แวร์ก่อน เพื่อที่ผู้ใช้จะสามารถเข้าใจการใช้งานของซอฟต์แวร์ได้
อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ และในส่วนของผู้พัฒนาโปรแกรมรุ่นต่อไปอาจสามารถนำข้อดี-ข้อเสียของ
ซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ และ kSTAPEN-C ไปเป็นแบบอย่างในการพัฒนาโปรแกรมต่อไปได้

6.4 แนวทางในการทำวิจัยต่อเนื่อง

ในส่วนของแนวทางในการทำวิจัยต่อเนื่องนั้น ผู้ทำวิจัยในรุ่นต่อไปอาจพัฒนาซอฟต์แวร์ kSTAPEN+
เพิ่มเติมในส่วนต่างๆ คือ เพิ่มเติมเทคนิคการประมาณค่าอื่นๆ เช่น ตัวกรองแบบเอกซ์โปเนนเชียล
(exponential filter) ตัวสังเกตค่า เป็นต้น เพื่อใช้เปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของเทคนิคการประมาณค่า
แบบต่างๆ ได้ ซึ่งในงานวิจัยได้ลองประมาณค่าความเข้มข้นที่ได้จากการใช้ตัวกรองคาลมานกับระบบ
เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่กล่าวไว้ใน Kantor (1998) และเทียบผลที่ได้กับผลจากการใช้
ตัวสังเกตค่าซึ่งแสดงไว้ใน Kantor (1988) ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งจะเห็นว่าผลการประมาณค่าความ
เข้มข้นที่ได้จากตัวสังเกตค่าจะเข้าสู่ค่าที่ถูกต้องโดยใช้เวลาเพียง 0.3 เท่านั้น ขณะที่ตัวกรองคาลมานใช้
เวลา 0.8 ซึ่งในเรื่องของประสิทธิภาพและข้อดีข้อเสียของเทคนิคการประมาณค่าต่างๆ ยังคงต้องมีการ
ศึกษากันอีกต่อไป

นอกจากนี้ ผู้ทำวิจัยในรุ่นต่อไปอาจเพิ่มตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองอื่นๆ เช่น ตัวควบคุมแบบ
โมเดลพรีดิกทีฟ (model predictive controller) ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตท (state feedback
controller) เป็นต้น เพื่อใช้เปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของเทคนิคการควบคุมแบบต่างๆ ได้



รูปที่ 6.1 รูปซ้าย-ผลการประมาณค่าความเข้มข้นที่ได้จากการใช้ตัวสังเกตค่าซึ่งแสดงไว้ใน Kantor (1998)

รูปขวา-ผลการประมาณค่าความเข้มข้นที่ได้จากซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

นุศรา บุญประเสริฐ. การประยุกต์ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสำหรับเครื่องปฏิกรณ์การเกิดโพลีไวนิลคลอไรด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

ไพศาล กิตติศุภกร. เอกสารประกอบคำสอนวิชา 2105-619 การควบคุมกระบวนการอัตโนมัติขั้นสูง. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2541.

สงศ์ บำรุงวงศ์ดี. การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับขั้นตอนวิธีตัวกรองคาลมานด้วยโปรแกรม Borland C++, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

ภาษาอังกฤษ

Baratti, R.; Bertucco, A.; Da Rold, A. and Morbidelli, M. A composition estimator for multicomponent distillation columns development and experimental test on ternary mixtures, Chemical Engineering Science,: Vol.53, No.20, 1998: 3601-3612.

Brown, R.G., Introduction to random signal analysis and kalman filtering. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1983.

Cott, B.J. and Macchietto, S., Temperature control of exothermic batch reactors using generic model control, Ind. Eng. Chem. Res.,: Vol.28, 1989: 1177-1184.

George, N.Saridis, Stochastic processes, estimation, and control: The entropy approach. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.

Grewal, M.S. and Andrews, A.P., Kalman filtering: Theory and practice. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1993.

Gudi, R.D.; Shah, S.L.; and Gray, M.R., Adaptive Multirate State and Parameter Estimation Strategies with Application to a Bioreactor, AIChE J.,: Vol.41, No.1, 1995: 2451-2464.

- Hamilton, J.C.; Seborg, D.E. and Fisher, D.G., An Experimental Evaluation of Kalman Filtering, AIChE J., Vol.19, 1973: 901-909.
- Henson, M.A. and Seborg D.E., Nonlinear Process Control. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1997.
- Jutila, P.; Orava, P.J.; and Salmelin, B., A Physico-Chemical Model and Simulation of pH-Process in Continuous Stirred Tank Reactors, Mathematics and Computers in Simulation, Vol.23, 1981: 99-106.
- Kantor, J.C., A finite dimensional nonlinear observer for an exothermic stirred-tank reactor, Chemical Engineering Science, Vol.44, No.7, 1989: 1503-1510.
- Kershenbaum, L.S. and Kittisupakorn, P., The Use of A Partially Simulated Exothermic (PARSEX) Reactor for Experimental Testing of Control Algorithms, Trans IChemE, Vol.72, Part A, January 1994: 55-63.
- Lee, P.L. and Sullivan, G.R., General model control (GMC), Comput. Chem. Engng., Vol.12, No.6, 1988: 573-580.
- Lee, P.L. and Newell, R.B., Gencric model control-A case study, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.67, June 1989: 478-484.
- Middleton, R.H. and Goodwin, G.C., Digital control and estimation: A unified approach. International eds., Prentice Hall Inc., 1990.
- Mutha, R.K.; Cluett, W.R. and Penlidis, A., On-Line Nonlinear Model-based Estimation and Control of a Polymer Reactor, AIChE J., Vol.43, No.11, 1997: 3042-3058.
- Quintero-Marmol, Enrique; Luyben, W.L. and Georgakis, C., Application of an extended luenberger observer to the control of multicomponent batch distillation, Ind. Eng. Chem. Res., Vol.30, 1991: 1870-1880.
- Reisdorph, Kent, Teach Yourself: Borland Delphi 4 in 21 days, SAMS, 1998.
- RÉGnier, N.; Defaye, G.; Caralp, L. and Vidal, C., Software Sensor Based Control of Exothermic Batch Reactors, Chemical Engineering Science, Vol.51, No.23, 1996: 5125-5136.
- Valliere, P.De and Bonvin, D., Application of Estimation techniques to Batch Reactors-II. Experimental Studies in State and Parameter Estimation, Computers Chem. Eng., Vol.13, No.1/2, 1989: 11-20.

Weill, L.R. and Land, P.N. De, The Kalman filter: an introduction to the mathematics of linear least mean square recursive estimation, Int. J. Math. Educ. Sci. Technol., Vol.17, No.3, 1986: 347-366.

Woo, W.W.; Svoronos, S.A.; Jagmohan, Sankur, H.O.; Bajaj, J. and Irvine, Stuart J.C., In-Situ Estimation of MOCVD Growth Rate via a Modified Kalman Filter, AIChE J., Vol.42, No.5, 1996: 1319-1325.

Zhou, J. and Luecke, R.H., Estimation of The Covariances of The Process Noise and Measurement Noise for A Linear Discrete Dynamic System, Computers Chem. Eng., Vol.19 , No.2, 1995: 187-195.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

เพื่อให้ผู้ใช้จะสามารถใช้งานซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงคู่มือวิธีการใช้งานซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

ก.1 ความต้องการของระบบ (system requirement)

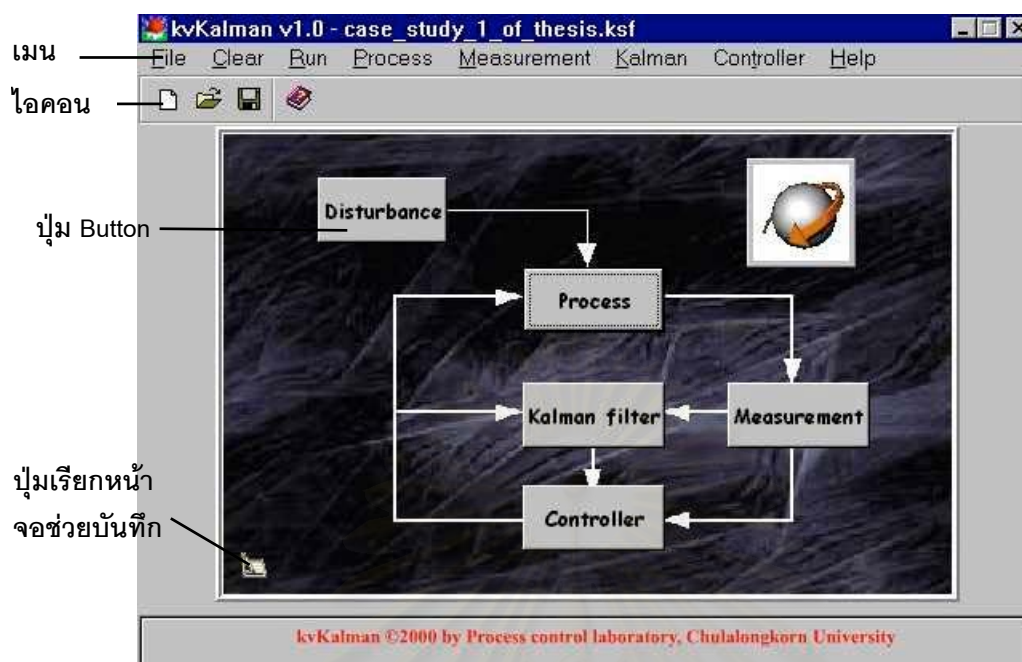
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความต้องการของระบบเพื่อให้ผู้ใช้จะสามารถใช้งานซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ได้อย่างเต็มที่และมีประสิทธิภาพ

- ซีพียูเพนเทียมที่มีความเร็วไม่ต่ำกว่า 100 เมกกะเฮิร์ต (แนะนำ 200 เมกกะเฮิร์ตขึ้นไป)
- หน่วยความจำสำรองไม่ต่ำกว่า 32 เมกกะไบต์
- การ์ดแสดงผลแบบซูปเปอร์วีจีเอที่มีหน่วยความจำไม่ต่ำกว่า 1 เมกกะไบต์
- พื้นที่ในการติดตั้งซอฟต์แวร์ประมาณ 3 เมกกะไบต์

ในการใช้งานซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ เนื่องจากซอฟต์แวร์ถูกออกแบบมาภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 98 ที่ความละเอียดหน้าจอ 800x600 โดยตั้งฟอนท์ (font) เป็นแบบขนาดใหญ่ (large) และการตั้ง Desktop Themes เป็นแบบ Window Default ดังนั้นซอฟต์แวร์จึงสามารถที่จะแสดงผลได้ดีที่สุดที่ระดับความละเอียดหน้าจอ ขนาดของฟอนท์ และ Desktop Themes ดังที่ได้กล่าวมา

ก.2 หน้าจอหลักของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

จากรูป ก.1 จะแสดงถึงหน้าจอหลักของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ นั้น ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนหลักต่างๆ ได้แก่ เมนู, ไอคอน, ปุ่ม Button ต่างๆ และปุ่มเรียกหน้าจอช่วยบันทึก



รูปที่ ก.1 หน้าจอหลักของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

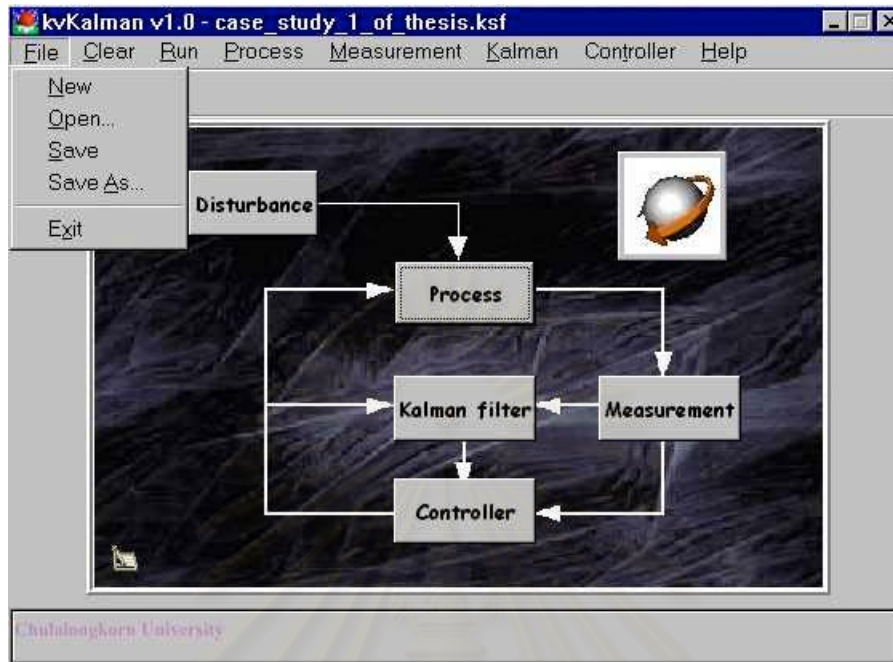
ก.3 การใช้งานเมนูของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

จากรูป ก.1 จะเห็นว่าซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ จะประกอบด้วยเมนูต่างๆ ได้แก่ File, Clear, Process, Measurement, Kalman, Controller และ Help ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

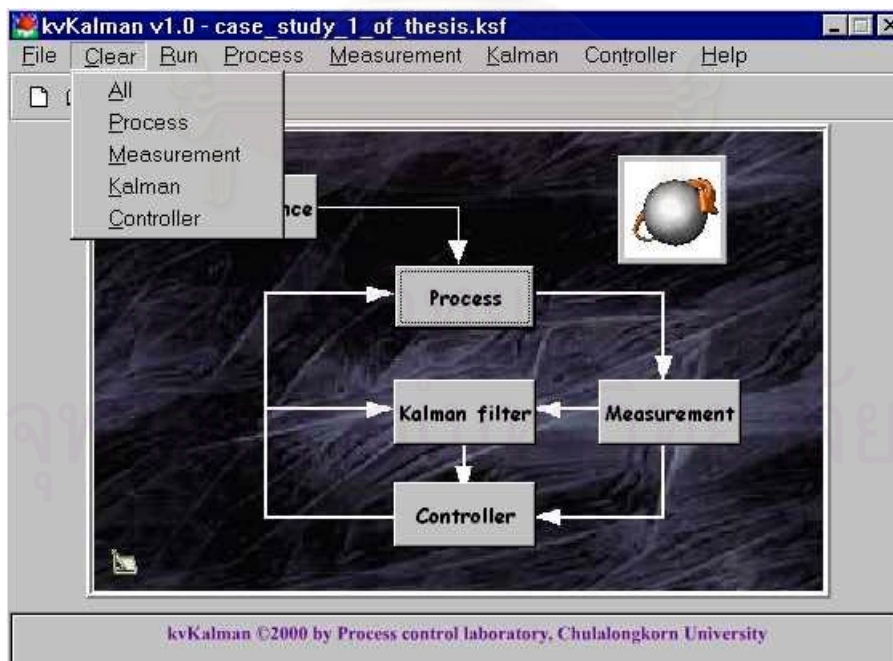
ก.3.1 เมนู File

จากรูป ก.2 สามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ได้ดังนี้

New	เริ่มต้นไฟล์ใหม่
Open	เปิดไฟล์ข้อมูล
Save	สำรองข้อมูลลงสู่ไฟล์
Save as	สำรองข้อมูลลงสู่ไฟล์ชื่อใหม่
Exit	ออกจากโปรแกรม



รูปที่ ก.2 เมนู File ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+



รูปที่ ก.3 เมนู Clear ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

ก.3.2 เมนู Clear

จากรูป ก.3 สามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ได้ดังนี้

All	ลบข้อมูลทั้งหมดภายในโปรแกรม
Process	ลบข้อมูลทั้งหมดในส่วนของ Process
Measurement	ลบข้อมูลทั้งหมดในส่วนของ Measurement
Kalman	ลบข้อมูลทั้งหมดในส่วนของ Kalman
Controller	ลบข้อมูลทั้งหมดในส่วนของ Controller

ก.3.3 เมนู Run

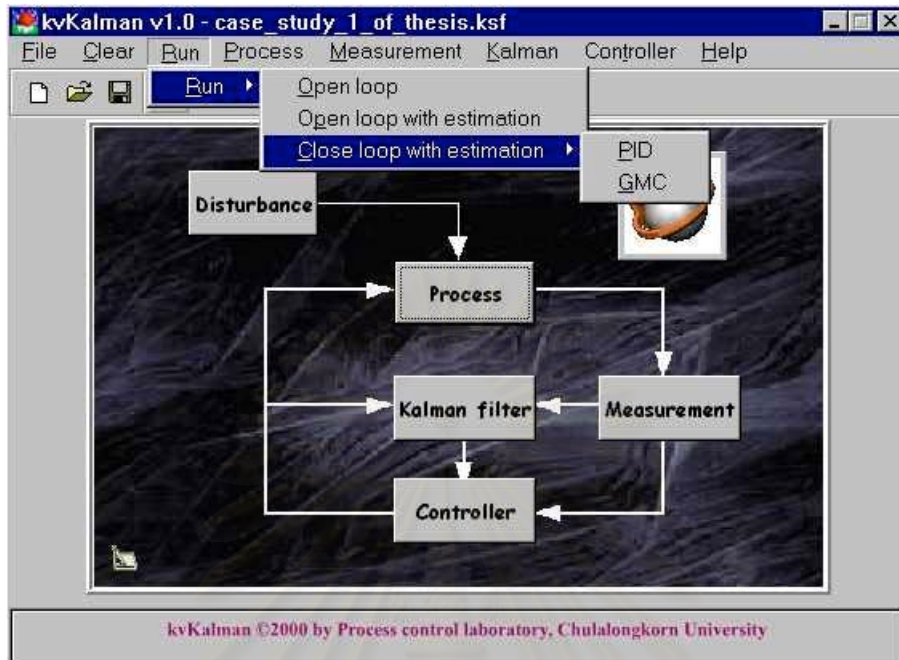
จากรูป ก.4 สามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ได้ดังนี้

Open loop	รันโปรแกรมในกรณีของลูปเปิด
Open loop with estimation	รันโปรแกรมในกรณีของลูปเปิดที่มีการประมาณค่าควบคุมไปด้วย
Close loop with estimation PID	รันโปรแกรมในกรณีของลูปปิดที่มีการประมาณค่าควบคุมไปด้วย โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี
Close loop with estimation GMC	รันโปรแกรมในกรณีของลูปปิดที่มีการประมาณค่าควบคุมไปด้วย โดยใช้ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

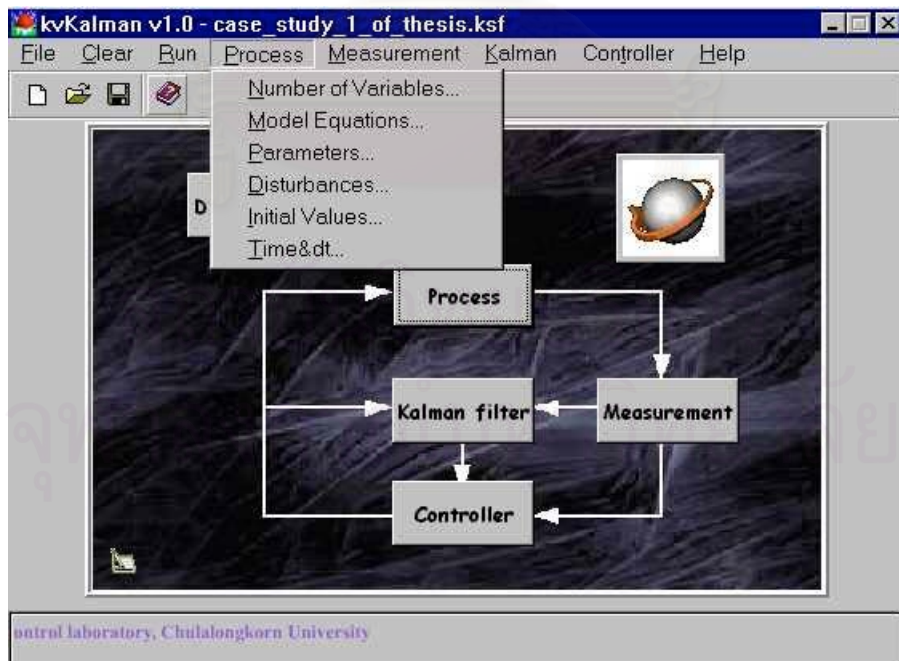
ก.3.4 Process

จากรูป ก.5 สามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ได้ดังนี้

Number of Variables	เป็นการเรียกหน้าต่างการรับค่าจำนวนตัวแปรสแตท และตัวแปรปรับกระบวนการ
Model Equations	เป็นการเรียกหน้าต่างการรับค่าแบบจำลองของกระบวนการ
Parameters	เป็นการเรียกหน้าต่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง
Disturbances	เป็นการเรียกหน้าต่างการกำหนดรูปแบบของตัวแปรรบกวน
Initial Values	เป็นการเรียกหน้าต่างกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรสแตท และตัวแปรปรับกระบวนการ
Time&dt	เป็นการเรียกหน้าต่างการรับค่าเวลาในการจำลอง และขนาดช่วงกว้างในการคำนวณของกระบวนการ



รูปที่ ก.4 เมนู Run ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+



รูปที่ ก.5 เมนู Process ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

ก.3.5 เมนู Measurement

จากรูป ก.6 สามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ได้ดังนี้

Measurement	เป็นการเรียกหน้าต่างเพื่อรับค่าสัญญาณรบกวนในการวัด และค่าช่วงเวลาของการวัด
-------------	--

ก.3.6 เมนู Kalman

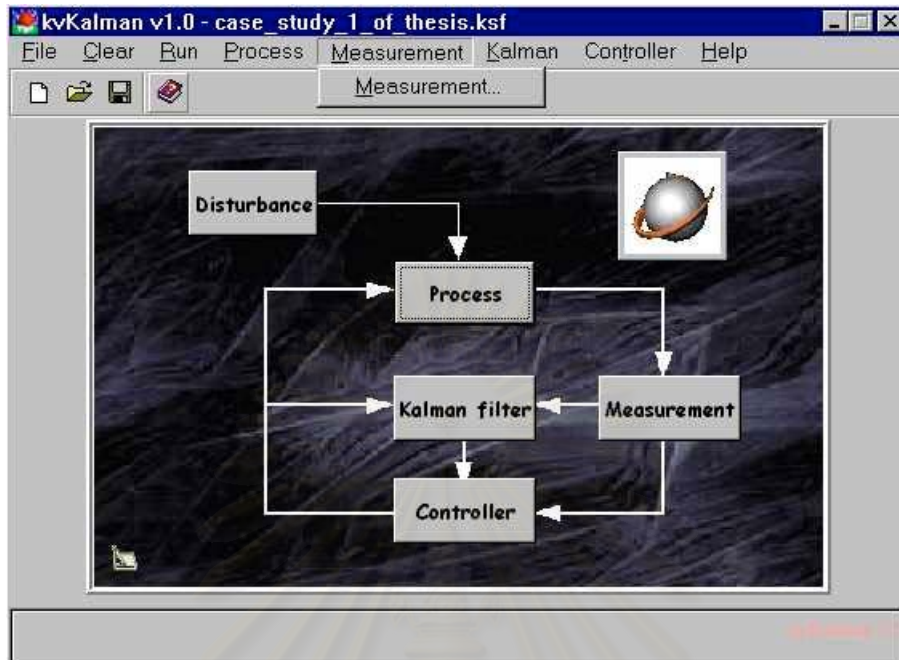
จากรูป ก.7 สามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ได้ดังนี้

Number of Estimated Values	เป็นการเรียกหน้าต่างการรับค่าจำนวนตัวแปรที่ต้องการประมาณ
Model Equations	เป็นการเรียกหน้าต่างการรับค่าแบบจำลองที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน
Parameters	เป็นการเรียกหน้าต่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เพิ่มเติมขึ้นในส่วน ของแบบจำลองที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน
Initial Estimated Values	เป็นการเรียกหน้าต่างการรับค่าเริ่มต้นของค่าประมาณ
Kalman Parameters	เป็นการเรียกหน้าต่างการรับค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองคาลมาน
Matrix C	เป็นการเรียกหน้าต่างการรับค่าเมตริกซ์ C เพื่อใช้ในสมการการ ปรับปรุงของตัวกรองคาลมาน
Estimate Time	เป็นการเรียกหน้าต่างการรับค่าช่วงเวลาในการทำงานของตัวกรอง คาลมาน

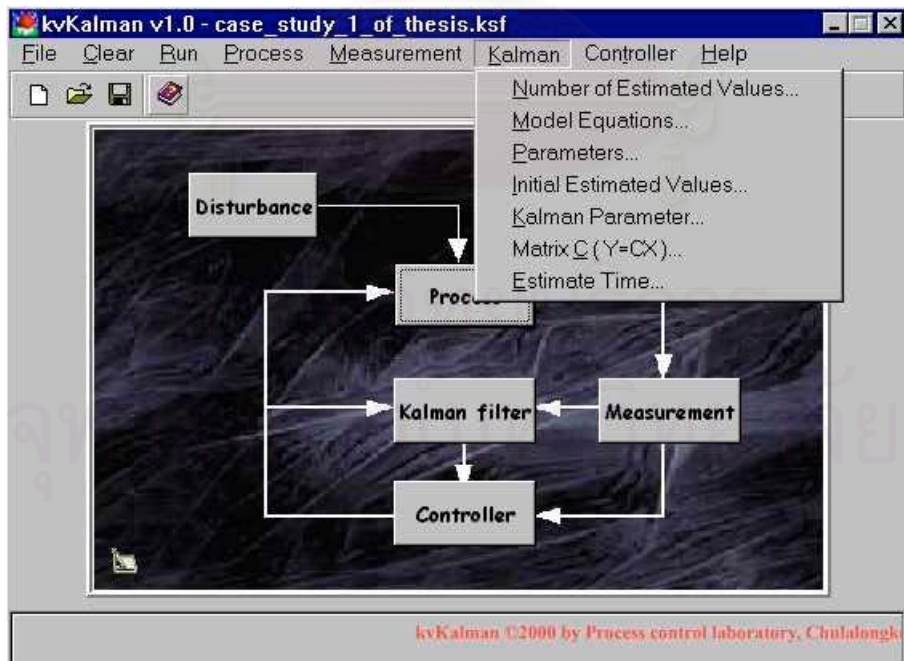
ก.3.7 เมนู Controller

จากรูป ก.8 สามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ได้ดังนี้

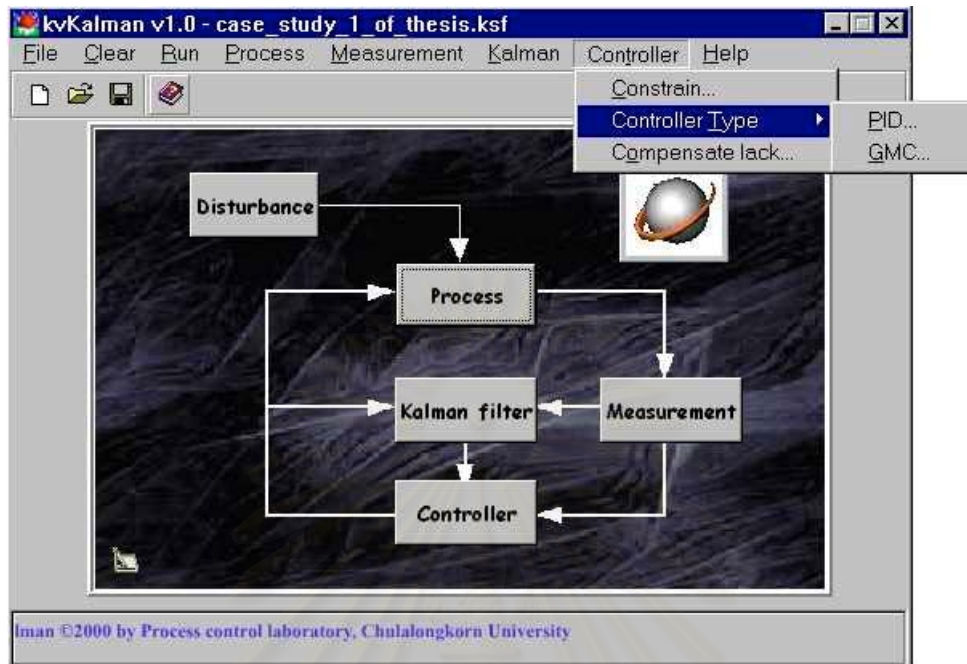
Constrains	เป็นการเรียกหน้าต่างเพื่อรับค่าขอบเขตของตัวแปรปรับกระบวนการ
Controller	
- PID	เป็นการเรียกหน้าต่างเพื่อรับค่าต่างๆ ของตัวควบคุมแบบพีไอดี
- GMC	เป็นการเรียกหน้าต่างเพื่อรับค่าต่างๆ ของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล
Compensate lack	เป็นการเรียกหน้าต่างเพื่อรับค่าสมการการชดเชยไดนามิกของกระบวนการ



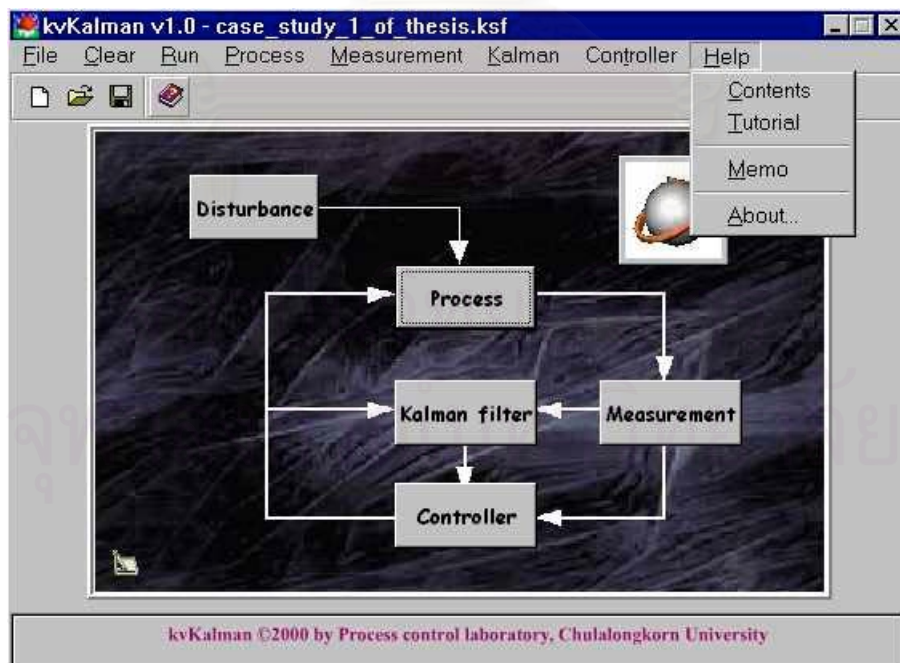
รูปที่ ก.6 เมนู Measurement ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+



รูปที่ ก.7 เมนู Kalman ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+



รูปที่ ก.8 เมนู Controller ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+



รูปที่ ก.9 เมนู Help ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

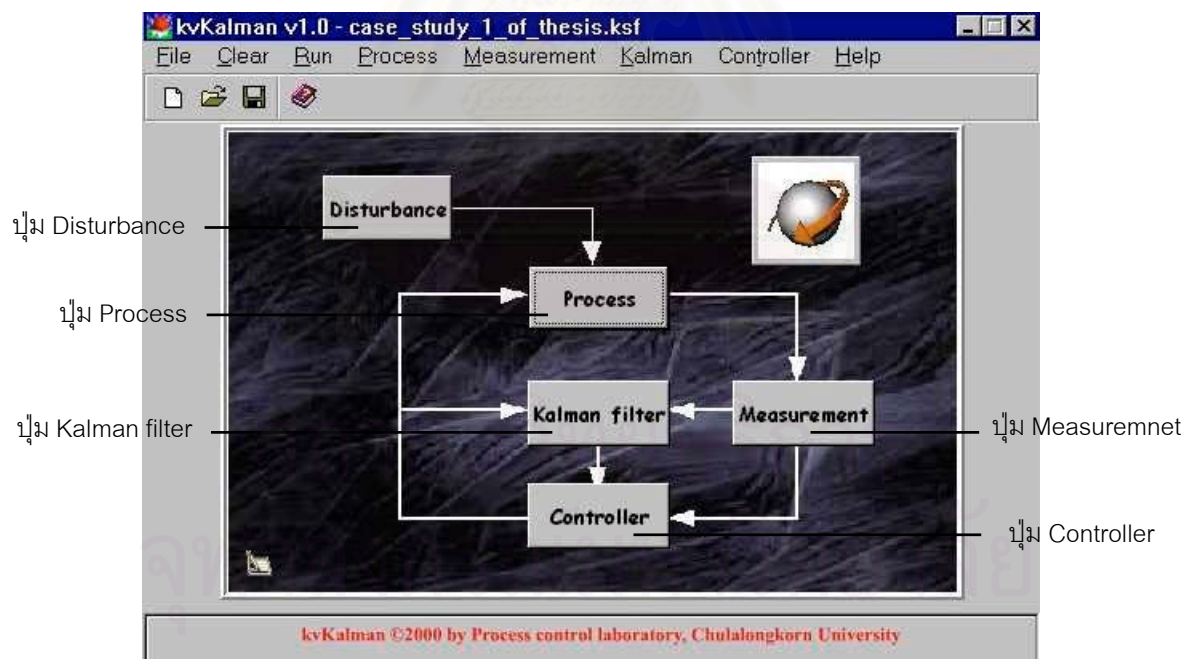
ก.3.8 เมนู Help

จากรูป ก.9 สามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ได้ดังนี้

Content	เป็นการเรียกใช้งานไฟล์ช่วยเหลือ
Tutorial	เป็นการเรียกดูเอกสารช่วยฝึกการใช้ซอฟต์แวร์
Memo	เป็นการเรียกหน้าต่างของการบันทึกเพื่อเตือนความจำ
About	เป็นการเรียกหน้าต่างแนะนำซอฟต์แวร์

ก.4 การใช้งานปุ่ม Button ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

นอกจากการกำหนดข้อมูลต่างๆ ผ่านจากทางเมนูแล้ว ซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ยังมีส่วนของปุ่ม Button เพื่อช่วยในการรับค่า ซึ่งได้แสดงเป็นรูปแบบของแผนผังการทำงานของตัวกรองคาลมานร่วมกับตัวควบคุม ดังแสดงในรูป ก.10



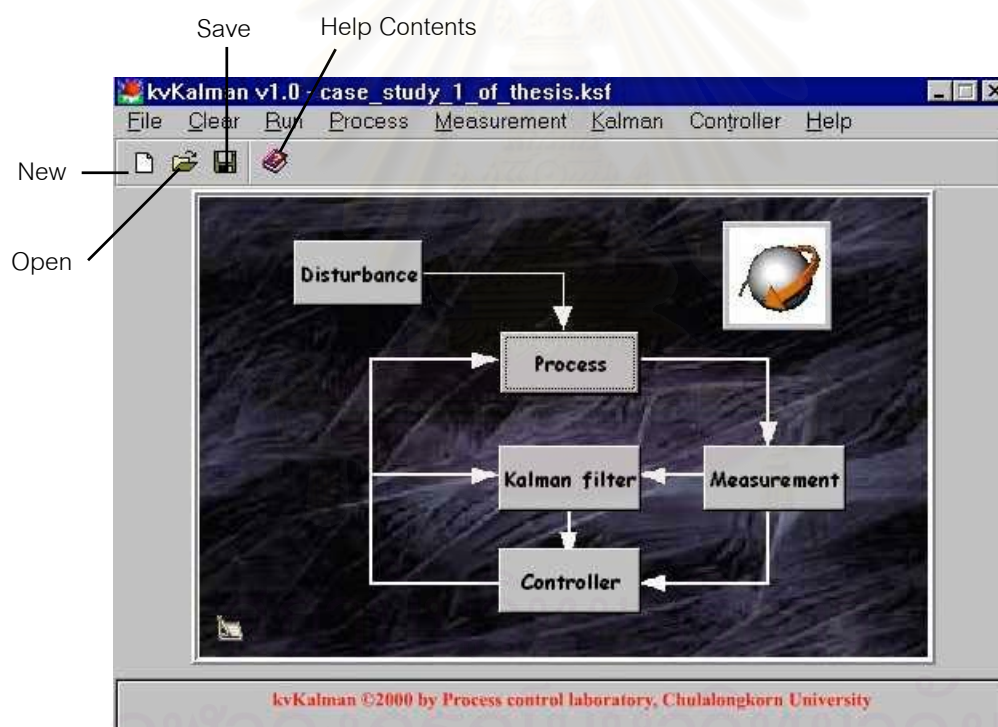
รูปที่ ก.10 ปุ่ม Button ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

จากรูป ก.10 จะเห็นว่าซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ จะประกอบด้วยปุ่ม Button ต่อไปนี้

Process	จะเปรียบเสมือนกับการเลือกเมนู Process (ไม่รวมส่วนของ Disturbance)
Disturbance	จะเปรียบเสมือนกับการเลือกเมนู Process > Disturbance
Measurement	จะเปรียบเสมือนกับการเลือกเมนู Measurement
Kalman	จะเปรียบเสมือนกับการเลือกเมนู Kalman
Controller	จะเปรียบเสมือนกับการเลือกเมนู Controller

ก.5 การใช้งานปุ่มไอคอนของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

ส่วนของไอคอนนี้จะเป็นส่วนช่วยให้ผู้ใช้สามารถเลือกการทำงานบางอย่างได้เร็วขึ้น ซึ่งจะประกอบด้วยไอคอนดังแสดงในรูป ก.11



รูปที่ ก.11 ปุ่มไอคอนของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

ก.6 การใช้สัญลักษณ์ในซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

เนื่องจากภายในซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ มีส่วนของการรับสมการแบบจำลองต่างๆ จึงทำให้ต้องมีการกำหนดความหมายของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ภายในซอฟต์แวร์ ซึ่งได้แก่ ตัวแปรสเตท ตัวแปรปรับกระบวนการ ตัวแปรกระบวนการ ตัวแปรค่าประมาณ ค่าข้อมูลการวัด และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดขึ้นภายในแบบจำลอง เพื่อความสะดวกและป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นภายในซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ จึงได้มีการกำหนดสัญลักษณ์เพื่อใช้แทนค่าตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ความหมายและสัญลักษณ์ที่กำหนดขึ้นโดยซอฟต์แวร์

ความหมาย	สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวแปร
ตัวแปรสเตท	$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ เมื่อ n คือ จำนวนของตัวแปรสเตท
ตัวแปรปรับกระบวนการ	$U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ เมื่อ n คือ จำนวนของตัวแปรปรับกระบวนการ
ตัวแปรปรับกระบวนการที่มีการชดเชยไดนามิก	$U_{1sp}, U_{2sp}, \dots, U_{nsp}$ เมื่อ n คือ จำนวนของตัวแปรปรับกระบวนการ
ตัวแปรกระบวนการ	$D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ เมื่อ n คือจำนวนของตัวแปรกระบวนการ
ตัวแปรค่าข้อมูลการวัด	$Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ เมื่อ n คือจำนวนของค่าข้อมูลที่ถูกรวบรวม
ตัวแปรค่าประมาณ	$X_{cap1}, X_{cap2}, X_{cap3}, \dots, X_{capn}$ เมื่อ n คือจำนวนของตัวแปรค่าประมาณ
ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง	ขึ้นกับผู้ใช้งานจะทำการกำหนดในส่วน Parameter ของเมนู Process และ Kalman

ในซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ จะมีส่วนที่เกี่ยวข้องกับการรับค่าสมการอยู่ด้วยกัน 4 ส่วน คือ ส่วนแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองของกระบวนการ ส่วนแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมที่ใช้ในแบบจำลองของตัวกรองคาลมาน ส่วนแบบจำลองที่ใช้ในตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลอง และส่วนการกำหนดสมการเพื่อชดเชยไดนามิกของกระบวนการ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความในเรื่องของความเป็นไปได้ของการใช้ค่าต่างๆ ในสมการแบบจำลองจะพบว่า

- ส่วนของการกำหนดแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองของกระบวนการ จะสามารถอ้างอิงสัญลักษณ์ได้คือ $X_1, X_2, \dots, X_n, U_1, U_2, \dots, U_n, U_{1sp}, U_{2sp}, \dots, U_{nsp}, D_1, D_2, \dots, D_n$ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ผู้ใช้งานกำหนดขึ้นในส่วนกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองของกระบวนการ

- ส่วนของการกำหนดแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมที่ใช้ในแบบจำลองของตัวกรองคาลมาน จะสามารถอ้างอิงสัญลักษณ์ได้คือ $X_1, X_2, \dots, X_n, U_1, U_2, \dots, U_n, U_{1sp}, U_{2sp}, \dots, U_{nsp}, D_1, D_2, \dots, D_n, X_{cap1}, X_{cap2}, \dots, X_{capn}$, ค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้กำหนดขึ้นในส่วนกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองของกระบวนการ และค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้กำหนดขึ้นในส่วนของการกำหนดพารามิเตอร์เพิ่มเติมที่ใช้ในแบบจำลองของตัวกรองคาลมาน

- ส่วนของการกำหนดแบบจำลองที่ใช้ในตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลอง จะสามารถอ้างอิงสัญลักษณ์ได้เหมือนกับที่ใช้ในส่วนของการกำหนดแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองของตัวกรองคาลมาน

- ส่วนของการกำหนดสมการเพื่อชดเชยไดนามิกของกระบวนการ ผู้ใช้จะสามารถอ้างอิงได้เพียง $X_1, X_2, \dots, X_n, U_1, U_2, \dots, U_n, U_{1sp}, U_{2sp}, \dots, U_{nsp}, D_1, D_2, \dots, D_n, X_{cap1}, X_{cap2}, \dots, X_{capn}$ โดยจะไม่สามารถอ้างอิงถึงพารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นในส่วนของการกระบวนการและตัวกรองคาลมานได้ และในส่วนนี้จะสามารถอ้างอิงถึงค่าข้อมูลในเวลา $k-1$ ได้ โดยใช้สัญลักษณ์เป็น X_{1-}, U_{1-} และ X_{cap1-} เป็นต้น ยกตัวอย่าง การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (T_r) โดยใช้การปรับอุณหภูมิภายในแจ็คเก็ตที่หุ้มล้อมรอบเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังนี้

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{Q_r + UA(T_j - T_r)}{M_r C_{p_r}}$$

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{F_j \rho_j C_{p_j} (T_j^{sp} - T_j) - Q_j}{V_j \rho_j C_{p_j}}$$

เมื่อ T_j^{sp} เป็นอุณหภูมิของสายเข้าสู่แจ็คเก็ต ซึ่งเป็นค่าที่จะทำให้อุณหภูมิภายในแจ็คเก็ตซึ่งเป็นตัวแปรปรับกระบวนการ (T_j) มีค่าเข้าสู่ค่าที่ต้องการ แต่เนื่องจากค่า T_j ที่คำนวณได้จากตัวควบคุมนี้อาจไม่สามารถเข้าสู่ค่าที่ต้องการได้ทันที เนื่องจากความประพัตติทางไดนามิกของอุณหภูมิภายในแจ็คเก็ตดังสมการ ดังนั้นเพื่อเป็นการชดเชยความล่าช้าที่เกิดจากไดนามิกของอุณหภูมิภายในแจ็คเก็ต อาจทำได้โดยใช้รูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งดังนี้

$$T_j^{sp(k)} = T_j^{(k-1)} + 5(T_j^{(k)} - T_j^{(k-1)})$$

เมื่อ

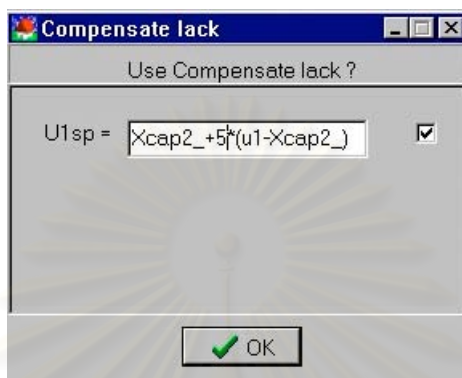
$T_j^{(k)}$ เป็นค่าตัวแปรปรับกระบวนการที่คำนวณได้จากตัวควบคุม

$T_j^{sp(k)}$ เป็นค่าตัวแปรปรับกระบวนการที่ได้จากการชดเชยไดนามิกของกระบวนการ ซึ่งเป็นค่าที่จะนำไปใช้ในการปรับอุณหภูมิของแจ็คเก็ตจริง

$T_j^{(k-1)}$ เป็นค่าของอุณหภูมิภายในแจ็คเก็ตจริง (ซึ่งอาจทราบค่าได้จากการวัดหรือการประมาณ)

ถ้าสมมติให้ในกรณีศึกษานี้แทนสัญลักษณ์ $T_j^{(k)}$ ด้วย $U1$, $T_j^{sp(k)}$ แทนด้วย $U1sp$ และ $T_j^{(k-1)}$ แทนด้วย $Xcap2_$ จะได้สมการชดเชยไดนามิกเพื่อจะนำมาใช้ในส่วนชดเชยไดนามิกของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ได้ดังนี้

$$U1sp = Xcap2_ + 5*(U1 - Xcap2_)$$



รูปที่ ก.12 การใส่ค่าสมการชดเชยไดนามิกของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

ก.7 ข้อกำหนดในการรับข้อมูลของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

การรับข้อมูลต่างๆ ในซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบของข้อมูลเลขจำนวนเต็ม (integer type) เลขจำนวนจริง (real type) และสมการแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม จะมีบางส่วนซึ่งต้องการการรับในรูปแบบที่เฉพาะเจาะจง ดังนี้

ก.7.1 การรับค่าข้อมูล Disturbance

ในซอฟต์แวร์ kSTAPEN+ ได้กำหนดให้ผู้ใช้สามารถเลือกรูปแบบความประพฤติของตัวแปรบกพร่องได้ 2 แบบ คือ

ตัวแปรบกพร่องที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น (step change)

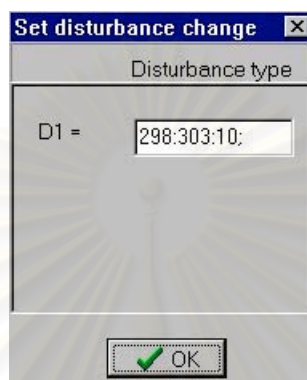
ค่าเริ่มต้น : ค่าที่เปลี่ยน : เวลาที่เปลี่ยน ;

ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการกำหนดให้ตัวแปรบกพร่องมีค่าเริ่มต้นที่ 20 และเปลี่ยนแปลงไปสู่ค่า 25 ที่เวลา 10 ก็จะได้ "20:25:10;"

ตัวแปรรบกวนที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไซน์ (sinusoidal)

ค่าเริ่มต้น : เวลาที่เกิด : ขนาดของแอมพลิจูด : ค่าความเร็วเชิงมุม ;

ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการกำหนดให้ตัวแปรรบกวนมีค่าเริ่มต้นที่ 10 และเปลี่ยนแปลงค่าเป็น $10 \sin 2t$ ที่เวลา 20 ก็จะได้ "10:20:10:2;"



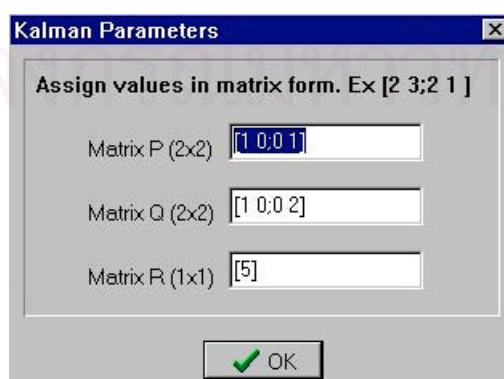
รูปที่ ก.13 การกำหนดตัวแปรรบกวนของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

ก.7.2 การรับข้อมูลในรูปแบบเมตริกซ์

เนื่องจากในบางส่วนของ Parameter และ MatrixC ของเมนู Kalman จำเป็นจะต้องมีการรับข้อมูลในรูปแบบของเมตริกซ์ ในซอฟต์แวร์จึงได้กำหนดรูปแบบของการใส่ค่าเมตริกซ์ คือ

- เริ่มต้นด้วย "[" และปิดท้ายด้วย "]"
- ใช้ช่องว่าง (space) ในการแบ่งระหว่างคอลัมน์ และใช้ ";" ในการแบ่งระหว่างแถว

เช่น ถ้าต้องการใส่เมตริกซ์ในรูปแบบ $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$ ก็ทำได้โดยใส่ค่าในรูปแบบ "[1 0;0 3]"



รูปที่ ก.14 การรับค่าเมตริกซ์ของซอฟต์แวร์ kSTAPEN+

ภาคผนวก ข

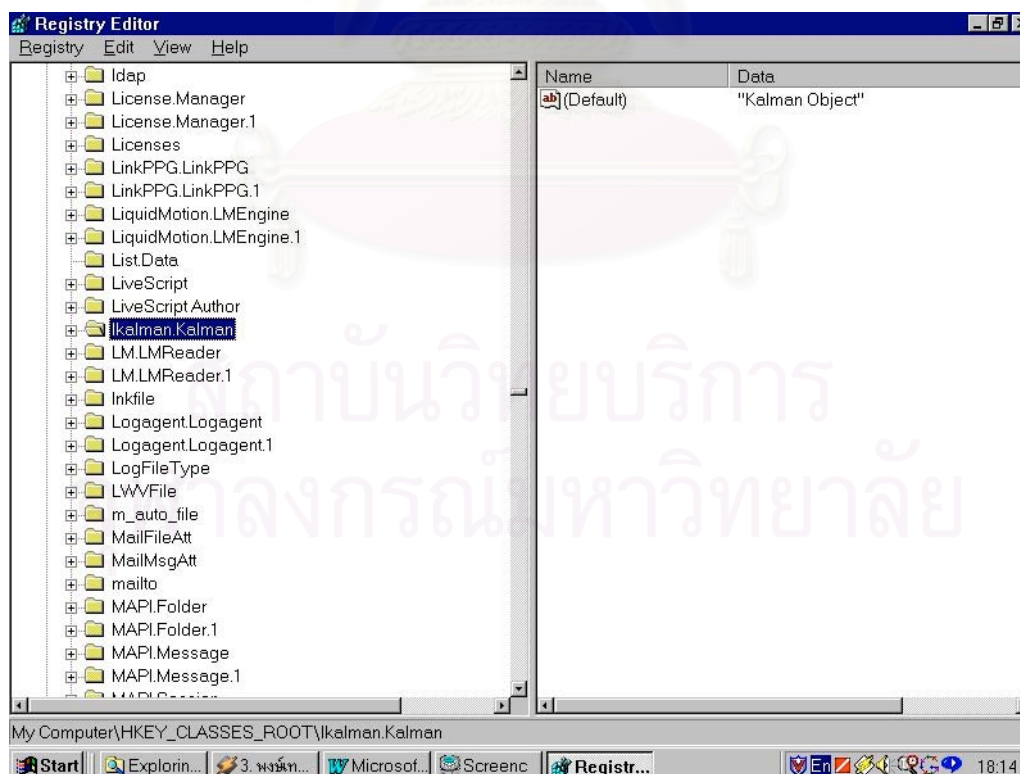
คู่มือการใช้งานคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมาน

ข.1 การรีจิสเตอร์คอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมาน

คอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมานจะประกอบไปด้วยไฟล์ Ikalman.dll และ Ikalman.tlb โดยก่อนที่จะทำการใช้งานคอมโพเนนต์จะต้องทำการรีจิสเตอร์ (register) คอมโพเนนต์กับวินโดวส์ก่อน ซึ่งอาจทำได้โดยใช้ไฟล์คำสั่ง regsvr32.exe ซึ่งอยู่ในไดเรกทอรี c:\windows\system ใน MS-Dos Prompt ดังนี้

regsvr32 Ikalman.dll	เพื่อทำการรีจิสเตอร์
regsvr32 /u Ikalman.dll	เพื่อทำการอันรีจิสเตอร์ (unregister)

ผู้ใช้อาจตรวจสอบการติดตั้งได้โดยใช้โปรแกรม regedit.exe ที่อยู่ใน c:\windows ซึ่งถ้าการติดตั้งสำเร็จจะสามารถพบ registry key "Ikalman.kalman" ใน HKEY_CLASSES_ROOT ดังรูป ข.1



รูปที่ ข.1 การตรวจสอบการติดตั้งคอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมานโดยใช้ regedit.exe

หลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคอมโพเนนท์แล้วผู้ใช้จะสามารถทำการเรียกใช้งานคอมโพเนนท์ภายในคอมไพเลอร์ที่สนับสนุนการเรียกใช้งานคอมโพเนนท์ได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตาม ในคู่มือนี้จะกล่าวถึงวิธีการใช้งานคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมานกับคอมไพเลอร์เพียง 2 แบบคือ บอร์แลนด์เดลไฟ และวิซวลเบสิก ขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานที่ใช้ในคอมโพเนนท์แสดงดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานที่ใช้ในคอมโพเนนท์

สมการการทำนาย

$$1. \hat{x}_{k+1|k} = A_k \hat{x}_{k|k} + B_k u_k$$

$$2. P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + Q_k$$

สมการการแก้ไข

$$3. K_{k+1} = P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1}$$

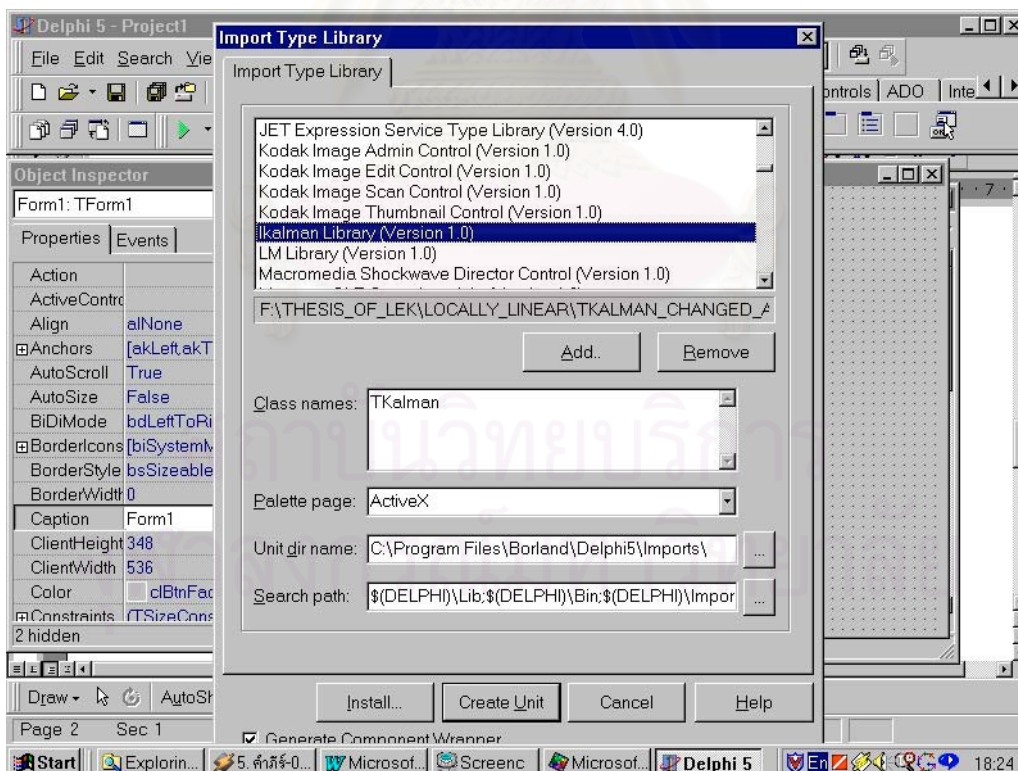
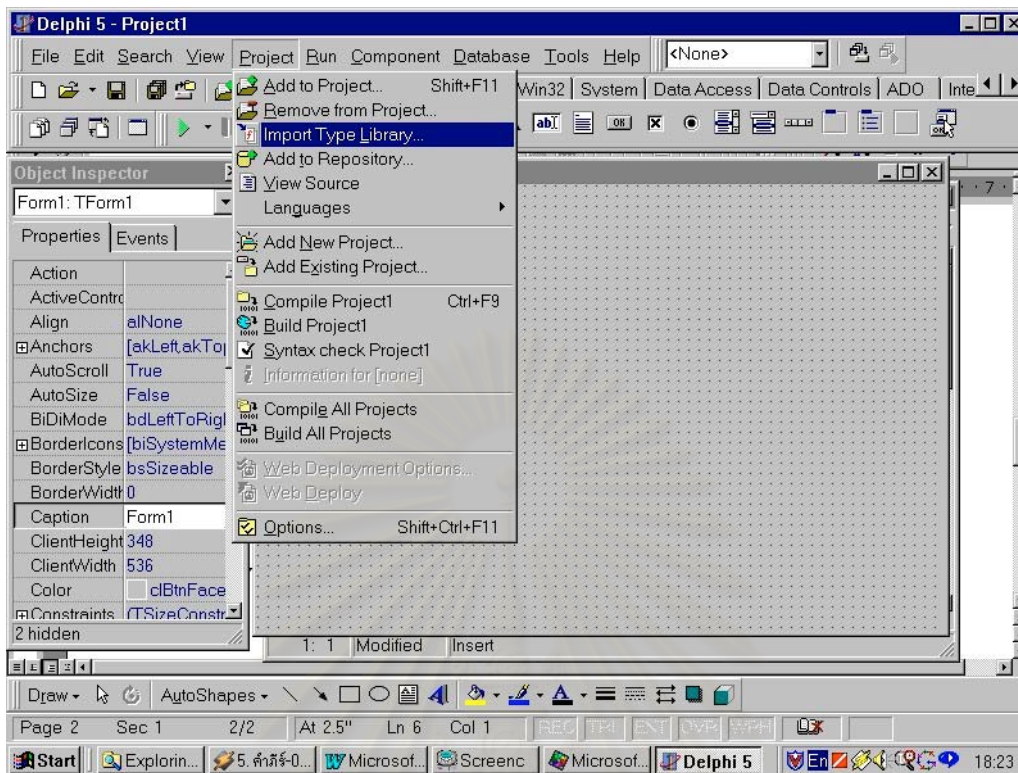
$$4. \hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1|k})$$

$$5. P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1|k}$$

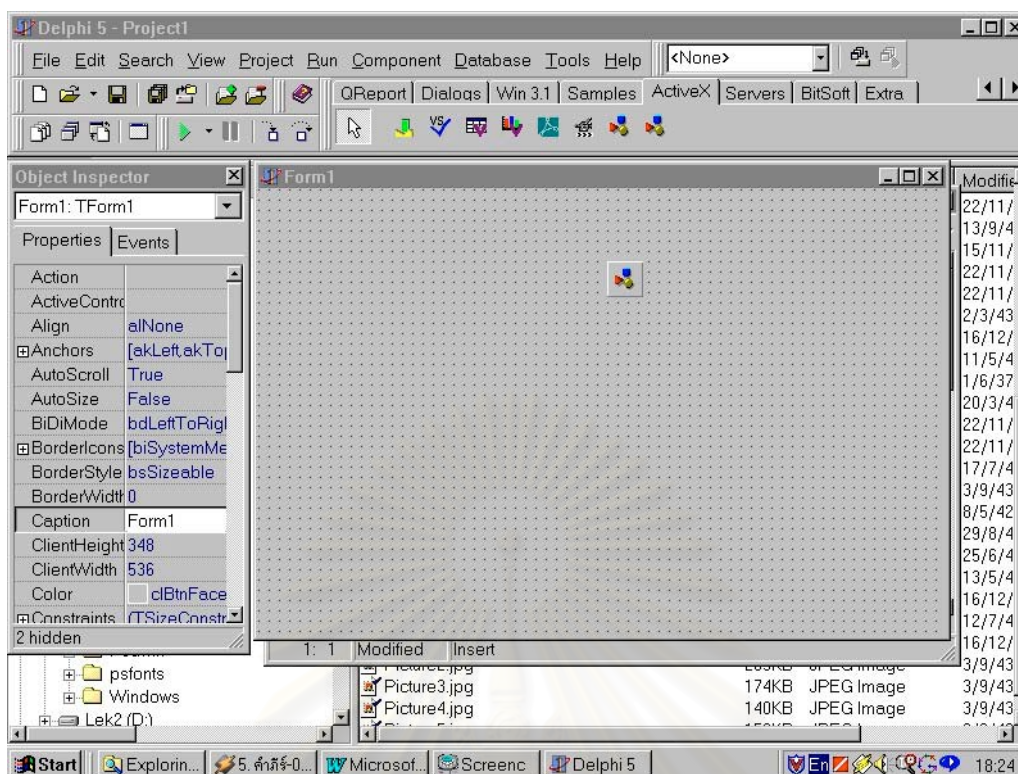
ข.2 การใช้งานคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมานภายในบอร์แลนด์เดลไฟ

ในการติดตั้งคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมานในบอร์แลนด์เดลไฟทำได้โดยการเลือกเมนู Project จากนั้นเลือก Import Type Library ซึ่งโปรแกรมจะขึ้นหน้าจอของ Import Type Library จากนั้นทำการเลือก IKalman.Kalman แล้วคลิกปุ่ม Install ดังแสดงในรูป ข.2

หลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมานแล้วผู้ใช้จะสามารถเรียกใช้คอมโพเนนท์ได้โดยการคลิกเลือกคอมโพเนนท์มาวางลงบนฟอร์ม ดังแสดงในรูป ข.3 คำสั่งต่างๆ ในการใช้งานแสดงดังตาราง ข.2



รูปที่ ข.2 การติดตั้งคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมานในบอร์ดเดลไฟ



รูปที่ ข.3 การใช้คอมโพเนนต์ตัวกรองคาลมานในบอร์ดแลนดเดิลไฟ

ตารางที่ ข.2 คำสั่งของคอมโพเนนต์ที่สามารถเรียกใช้ในบอร์ดแลนดเดิลไฟ

รูปแบบของคำสั่ง	ความหมาย
Set_Ak(Data: Matrix);	ให้ค่ากับเมตริกซ์ A
Set_Bk(Data: Matrix);	ให้ค่ากับเมตริกซ์ B
Set_Ck(Data: Matrix);	ให้ค่ากับเมตริกซ์ C
Set_Uk(Data: Matrix);	ให้ค่ากับเมตริกซ์ U
Set_Xk(Data: Matrix);	ให้ค่ากับเมตริกซ์ค่า $x_{k k}$ เริ่มต้น
Set_Pk(Data: Matrix);	ให้ค่ากับเมตริกซ์ $P_{k k}$ เริ่มต้น
Set_Qk(Data: Matrix);	ให้ค่ากับเมตริกซ์ Q
Set_Rk(Data: Matrix);	ให้ค่ากับเมตริกซ์ R
Set_yk(Data: Matrix);	ให้ค่ากับเมตริกซ์ค่าการวัด Y
Run;	ทำการคำนวณขั้นตอนของตัวกรองคาลมาน
Shift;	เป็นคำสั่งที่ต้องใช้หลังจาก run ทุกครั้ง
Get_X1, Get_X2, ..., Get_X10 : double;	เป็นการรับค่าประมาณ $x_{k+1 k+1}[j]$ จากคอมโพเนนต์เมื่อ $j = 1, 2, \dots, 10$

ข.3 การใช้งานคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมานภายในวิซวลเบสิก

ในการติดตั้งคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมานในวิซวลเบสิกทำได้โดยการเลือกเมนู Project จากนั้นเลือก References ซึ่งโปรแกรมจะขึ้นหน้าจอของ References จากนั้นทำการเลือก IKalman Library แล้วคลิกที่ปุ่ม OK ดังแสดงในรูป ข.4

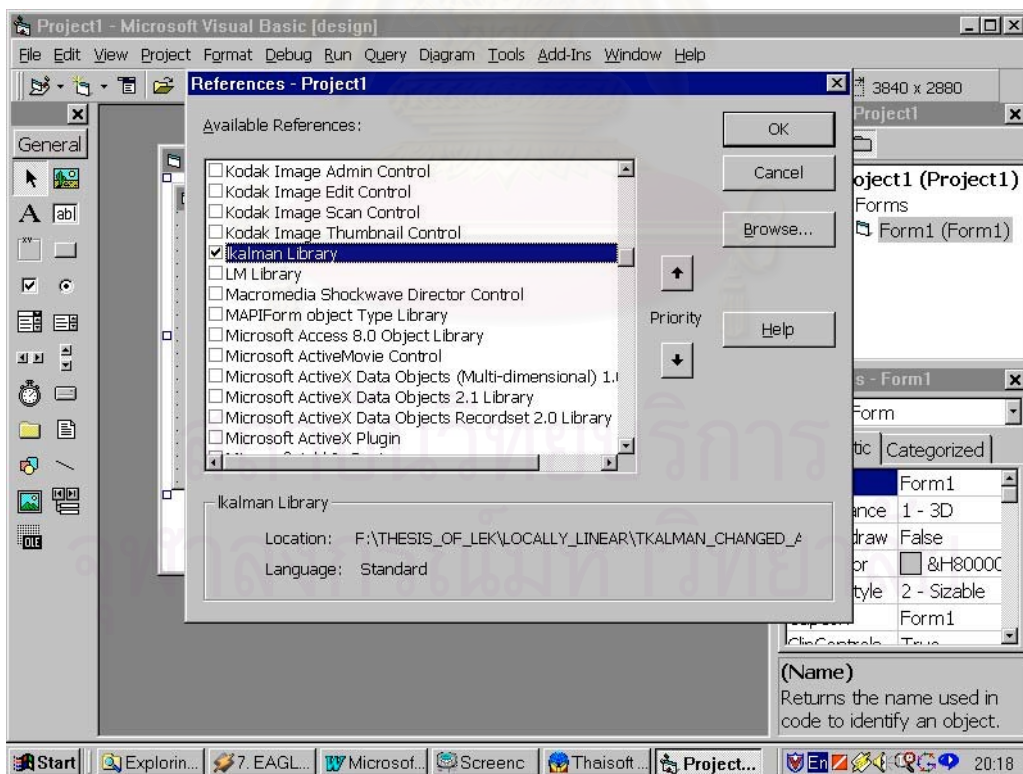
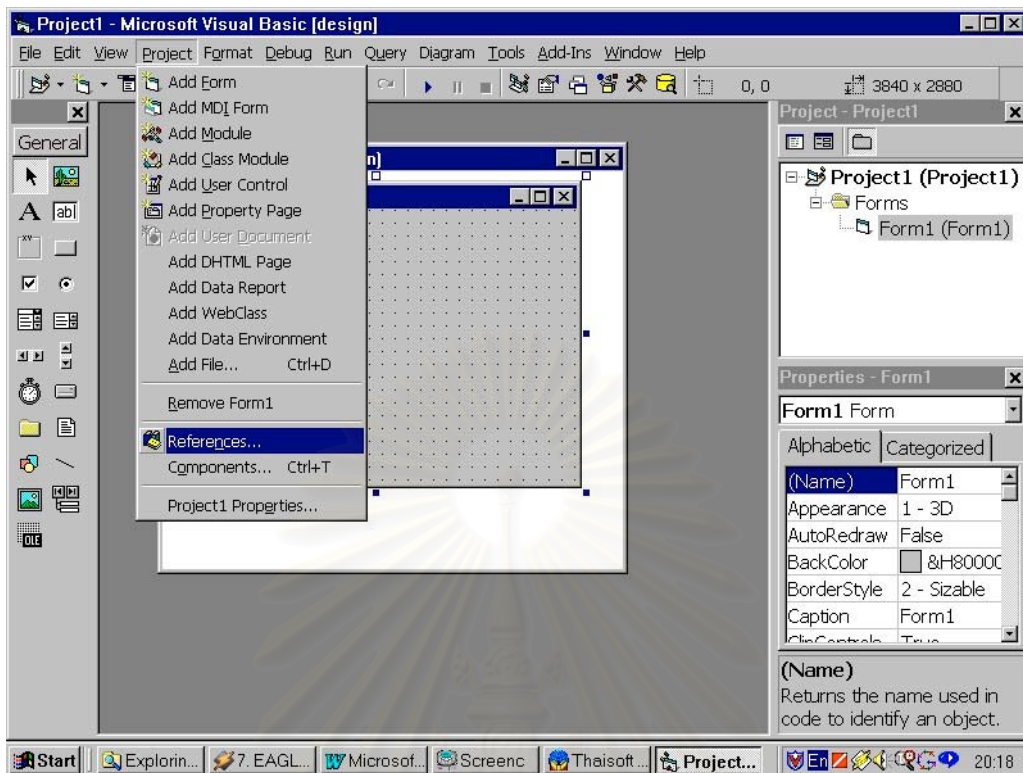
หลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมานแล้วผู้ใช้จะสามารถเรียกใช้คอมโพเนนท์ได้ โดยการใช้คำสั่ง

Dim ชื่อตัวแปรที่ต้องการ As IKalman.Kalman

คำสั่งต่างๆ ในการใช้งานแสดงดังตาราง ข.3

ตารางที่ ข.3 คำสั่งของคอมโพเนนท์ที่สามารถเรียกใช้ในวิซวลเบสิก

รูปแบบของคำสั่ง	ความหมาย
Ak = Data: Matrix	ให้ค่ากับเมตริกซ์ A
Bk = Data: Matrix	ให้ค่ากับเมตริกซ์ B
Ck = Data: Matrix	ให้ค่ากับเมตริกซ์ C
Uk = Data: Matrix	ให้ค่ากับเมตริกซ์ U
Xk = Data: Matrix	ให้ค่ากับเมตริกซ์ค่า $x_{k k}$ เริ่มต้น
Pk = Data: Matrix	ให้ค่ากับเมตริกซ์ $P_{k k}$ เริ่มต้น
Qk = Data: Matrix	ให้ค่ากับเมตริกซ์ Q
Rk = Data: Matrix	ให้ค่ากับเมตริกซ์ R
Yk = Data: Matrix	ให้ค่ากับเมตริกซ์ค่าการวัด Y
Run	ทำการคำนวณขั้นตอนของตัวกรองคาลมาน
Shift	เป็นคำสั่งที่ต้องใช้หลังจาก run ทุกครั้ง
X1, X2, ..., X10 : double;	เป็นการรับค่าประมาณ $x_{k+1 k+1}[j]$ จากคอมโพเนนท์ เมื่อ $j = 1, 2, \dots, 10$



รูปที่ ๓.๔ การติดตั้งคอมโพเนนท์ตัวกรองคาลมานในวิชวลเบสิก

ภาคผนวก ค
ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

ขั้นตอนการคำนวณของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลสามารถแสดงได้ดังนี้

พิจารณาสมการแบบจำลองต่อไปนี้

$$\frac{dx}{dt} = F(x, u, d, t) \quad (\text{ค.1})$$

$$y = h(x) \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ x คือ สเตทของระบบ
 u คือ ตัวแปรปรับกระบวนการ
 d คือ ตัวแปรรบกวน
 t คือ เวลา

จากสมการ ค.1 และ ค.2 จะได้

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (\text{ค.3})$$

สมการ ค.3 แทนความแนวโน้มของค่า y แต่เนื่องจากโดยทั่วไปจะต้องการให้ค่าของ y มีค่าเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ ดังนั้นจึงอาจเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{dy}{dt} = K_1 (y^{sp} - y) + K_2 \int_0^t (y^{sp} - y) dt \quad (\text{ค.4})$$

เมื่อ y^{sp} คือ ค่าเป้าหมายที่ต้องการ
 K_1, K_2 คือ ค่าคงที่

จากสมการ ค.3 และ ค.4 จะได้

$$\frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = K_1 (y^{sp} - y) + K_2 \int_0^t (y^{sp} - y) dt \quad (\text{ค.5})$$

จากสมการ ค.5 เนื่องจากโดยทั่วไป $\frac{\partial h}{\partial x} = 1$ ซึ่งจะได้

$$\frac{\partial x}{\partial t} = K_1(y^{sp} - y) + K_2 \int_0^t (y^{sp} - y) dt \quad (\text{ค.6})$$

และถ้าสามารถเขียน $F(x, u, d, t)$ ให้อยู่ในรูป $F(x, d, t) + G(x, d, t)u$ จะได้

$$F(x, d, t) + G(x, d, t)u = K_1(y^{sp} - y) + K_2 \int_0^t (y^{sp} - y) dt \quad (\text{ค.7})$$

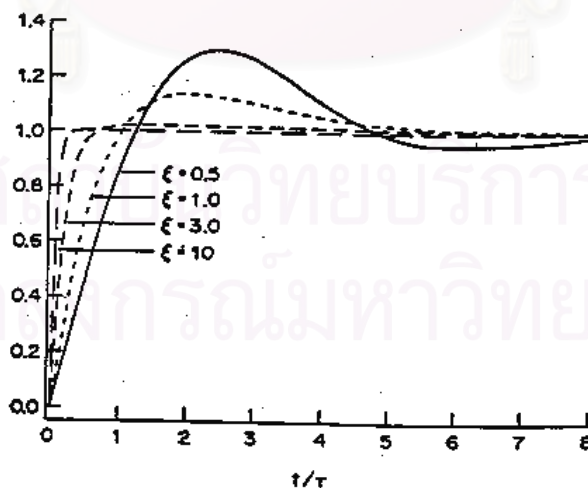
เมื่อจัดรูปให้อยู่ในรูปของ u จะได้สมการสำหรับการควบคุม ดังนี้

$$u = \frac{K_1(y^{sp} - y) + K_2 \int_0^t (y^{sp} - y) dt - F(x, d, t)}{G(x, d, t)} \quad (\text{ค.8})$$

โดยที่ค่า K_1 และ K_2 คือค่าพารามิเตอร์การจูนของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล ซึ่งจะสามารถหาค่าจากสมการดังนี้

$$K_1 = \frac{2\xi}{\tau} \quad (\text{ค.9})$$

$$K_2 = \frac{1}{\tau^2} \quad (\text{ค.10})$$



รูปที่ ค.1 แผนภาพการปรับจูนค่าของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

ค่าของ ξ และ τ สามารถหาได้จากรูป ค.1 โดยการเลือกค่า ξ ที่ผลตอบแทนที่ต้องการ และเลือกค่า τ จากรูปเพื่อให้ได้เวลาที่สอดคล้องกับความเร็วของผลตอบแทนของกระบวนการ เมื่อได้ค่า ξ และ τ ที่ต้องการ ก็สามารถหาค่า K_1 และ K_2 ได้จากสมการ ค.9 และ ค.10 ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการถ้าเลือกใช้ค่า $\xi = 10$ และต้องการให้ผลตอบแทนเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 20 นาที จะได้

$$\frac{t}{\tau} = 0.25 \rightarrow \frac{20}{\tau} = 0.25 \rightarrow \tau = 80 \text{ นาที}$$

$$\therefore K_1 = \frac{2 \times 10}{80} = \frac{1}{4}$$

$$K_2 = \frac{1}{80^2}$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้วิจัย

นายวีรยุทธ เลิศบำรุงสุข เกิดเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2520 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย