จีเอ็มซีสำหรับกระบวนการที่มีค่าระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่ง
: กรณีศึกษาการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่อง
ที่มีปฏิกิริยาแบบคายความร้อนอันดับหนึ่ง

นายพิจักษณ์ มีทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0802-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I20045836

GMC FOR RELATIVE DEGREE HIGHER THAN ONE PROCESSES : A CASE STUDY OF A CONCENTRATION CONTROL OF CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR WITH FIRST-ORDER EXOTHERMIC REACTION

Mr. Pijak Meethong

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 2001

ISBN 974-03-0802-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	จีเอ็มซีสำหรับกระบวนการที่มีค่าระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่ง : กรณีศึกษาการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาแบบคายความร้อนอันดับหนึ่ง
โดย	นายพิจักษณ์ มีทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิรัตน์ วาณิชย์ศรีรัตนา)

พิจักษณ์ มีทอง : จีเอ็มซีสำหรับกระบวนการที่มีค่าระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่ง : กรณีศึกษาการควบคุมความเข้มข้นของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาแบบคายความร้อนอันดับหนึ่ง (GMC FOR RELATIVE DEGREE HIGHER THAN ONE PROCESSES : A CASE STUDY OF A CONCENTRATION CONTROL OF CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR WITH FIRST-ORDER EXOTHERMIC REACTION)
อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ไพศาล กิตติศุภกร, 166 หน้า. ISBN 974-03-0802-3

การควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล(จีเอ็มซี) เป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการ ข้อได้เปรียบของการควบคุมชนิดนี้คือสามารถใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นของกระบวนการในโครงสร้างการควบคุมได้โดยตรงซึ่งไม่จำเป็นต้องทำการประมาณให้เป็นเชิงเส้นก่อน อย่างไรก็ตามตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีเป็นเทคนิคที่ใช้ควบคุมกระบวนการที่มีค่าระดับสัมพัทธ์เป็นหนึ่งเท่านั้นไม่สามารถนำไปใช้กับกระบวนการที่มีค่าระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่งได้ จึงนับว่าเป็นงานที่น่าศึกษาอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีกับกระบวนการที่มีค่าระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่ง

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีกับกระบวนการที่มีค่าระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่งโดยอาศัยตัวแปรควบคุมภายใน โดยที่ตัวแปรควบคุมภายในนี้ก็คือตัวแปรออกที่มีผลกระทบซึ่งกันและกันกับตัวแปรที่ต้องการควบคุมและสามารถถูกควบคุมได้โดยตรงด้วยตัวแปรปรับ ซึ่งในการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีกับกระบวนการที่มีค่าระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่งนี้จะทำให้มีลูพในการควบคุมเพิ่มขึ้น โดยตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีในลูพนอกจะทำหน้าที่กำหนดค่าเป้าหมายที่เหมาะสมหรือลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายให้กับตัวแปรควบคุมภายใน ในขณะที่ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีที่ลูพในจะทำหน้าที่ควบคุมตัวแปรควบคุมภายในให้มีค่าตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายนั้น เพื่อเป็นการศึกษาถึงสมรรถนะในการควบคุมของตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีที่ใช้ตัวแปรควบคุมภายในนี้ จึงได้นำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมความเข้มข้นของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาแบบคายความร้อนอันดับหนึ่งซึ่งเป็นกระบวนการที่มีค่าระดับสัมพัทธ์เป็นสอง ซึ่งผลการจำลองการควบคุมแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีที่ใช้ตัวแปรควบคุมภายในนี้มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบจีแอลซีและตัวควบคุมแบบพีไอ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต.....พิจักษณ์ มีทอง.....
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ไพศาล กิตติศุภกร.....
ปีการศึกษา 2544

4270455721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD : GENERIC MODEL CONTROL / GMC / CONCENTRATION CONTROL / RELATIVE DEGREE / CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR

PIJAK MEETHONG : GMC FOR RELATIVE DEGREE HIGHER THAN ONE PROCESSES : A CASE STUDY OF A CONCENTRATION CONTROL OF CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR WITH FIRST-ORDER EXOTHERMIC REACTION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PAISAN KITTISUPAKORN, PhD., 166 pp. ISBN 974-03-0802-3

Generic Model Control (GMC) is a well known nonlinear model-based controller. The advantage of this control technique is that process models of a nonlinear system appears directly in the GMC control algorithm, and it does not need to be linearized. However, the limitation of the GMC is that it is able to implement to processes of relative degree one only. In other words, so it cannot be applied to processes that have relative degree higher than one. Therefore, there have been attempted in the development of the GMC applicability for processes of relative degree higher than one.

This research presents the applicability of GMC for processes of relative degree higher than one by introducing an internal controlled variable. The internal controlled variable is actually an output variable interacting with a desired controlled variable and can be controlled directly by a manipulate variable. To accomplish the control of relative degree higher than one processes by GMC, a single-loop control structure is replaced by a multi-loop control structure. An outer loop GMC is used to calculate proper set point or trajectory of the internal controlled variable, while an inner loop GMC is used to make the move of the internal controlled variable to follow the trajectory obtained from the outer loop. The performance of GMC with an internal controlled variable is compared with these of GLC and PI in the control case study: the concentration control of a continuous stirred tank reactor with first-order exothermic reactions. The simulation results have shown that the GMC with an internal controlled variable gives better control response than the GLC and PI do.

Department of Chemical Engineering Student's signature.....Pijak Meethong

Field of Chemical Engineering Advisor's signature....Paisan Kittisupakorn

Academic Year 2001

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยความช่วยเหลือและแนะนำจากท่าน ตลอดจนข้อเสนอแนะ และแนวความคิดต่างๆ ของงานวิจัยด้วยดีตลอดมาจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ประธานกรรมการ, อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิรัตน์ วาณิชย์ศรีรัตนา ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความสนใจและได้ให้ข้อคิดและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยฉบับนี้

ขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เป็นแหล่งความรู้ให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาค้นคว้าตลอดการทำงานวิจัย และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือในด้านการศึกษาและการทำงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จการศึกษา

ขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และน้องๆ ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ผู้ทำการวิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา, มารดา, พี่ชาย และผู้มีอุปการคุณที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญภาพ..... ญ
สารบัญตาราง..... ฒ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... ณ
บทที่
1.บทนำ..... 1
1.1 มูลเหตุจูงใจและที่มาของงานวิจัย..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 5
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย..... 5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 6
2.ผลงานวิจัยที่ผ่านมา..... 7
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับจีเอ็มซี..... 7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่อง..... 17
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับตัวกรองคาลมาน..... 18
3.การควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 22
3.1 การควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล(Generic Model Control)..... 22
3.2 การคำนวณค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล..... 24
3.3 ระดับสัมพัทธ์ (Relative Degree)..... 26
3.3.1 ระดับสัมพัทธ์ของระบบเชิงเส้น..... 27
3.3.2 ระดับสัมพัทธ์ของระบบไม่เชิงเส้น..... 30
3.4 การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีกับระบบที่มีระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่ง... 34
3.5 การควบคุมแบบโกลบอลลีลิเนียไรซิ่ง(Globally Linearzing Control)..... 43
3.6 การเพิ่มความทนทานให้กับการควบคุมแบบจีเอ็มซี..... 47
3.6.1 การควบคุมแบบโรบัสท์เจนเนริกโมเดล
(Robust Generic Model Control)..... 48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6.2 การควบคุมแบบจีเอ็มซีที่มีการปรับตัวของค่าพารามิเตอร์ (Adaptive Generic Model Control)..... 49
3.7 การใช้ตัวกรองคาลมานเป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์..... 50
3.7.1 ตัวกรองคาลมาน..... 51
3.7.2 ตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย (Extended Kalman Filter)..... 56
3.7.3 การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองคาลมาน..... 58
4.การควบคุมความเข้มข้นในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับไม่ได้..... 60
4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ..... 60
4.1.1 เสถียรภาพของระบบ (System Stability)..... 66
4.1.2 ความควบคุมได้ของระบบ (Controllability)..... 67
4.1.3 ความสังเกตได้ของระบบ (Observability)..... 68
4.2 ระดับสัมพัทธ์ของระบบ..... 68
4.3 การใช้จีเอ็มซีควบคุมความเข้มข้น..... 70
4.4 การใช้จีแอลซีควบคุมความเข้มข้น..... 74
4.5 การทดสอบสมรรถนะในการควบคุมความเข้มข้นของจีเอ็มซีที่ใช้วิธีควบคุมตัวแปรควบคุมภายในกับตัวควบคุมจีแอลซีและพีไอ..... 76
4.6 การทดสอบผลการควบคุมความเข้มข้นเมื่อมีความคลาดเคลื่อนระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลอง..... 84
4.6.1 การทดสอบผลการควบคุมความเข้มข้นของอาร์จีเอ็มซีและจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับกระบวนการจริง..... 96
5.การควบคุมความเข้มข้นในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับได้..... 104
5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ..... 104
5.1.1 เสถียรภาพของระบบ (System Stability)..... 110
5.1.2 ความควบคุมได้ของระบบ (Controllability)..... 111
5.1.3 ความสังเกตได้ของระบบ (Observability)..... 112

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ระดับสัมพัทธ์ของระบบ..... 112
5.3 การใช้จีเอ็มซีควบคุมความเข้มข้น..... 114
5.4 การใช้จีแอลซีควบคุมความเข้มข้น.....121
5.5 การทดสอบสมรรถนะในการควบคุมความเข้มข้นของจีเอ็มซีที่ใช้วิธีควบคุมตัวแปรควบคุมภายในกับตัวควบคุมจีแอลซีและพีไอ.....124
5.6 การทดสอบผลการควบคุมความเข้มข้นเมื่อมีความคลาดเคลื่อนระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลอง..... 131
5.6.1 การทดสอบผลการควบคุมความเข้มข้นของอาร์จีเอ็มซีและจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับกระบวนการจริง.....139
6.บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... 144
6.1 สรุปผล..... 144
6.2 ข้อเสนอแนะ.....146
รายการอ้างอิง..... 148
ภาคผนวก..... 154
ภาคผนวก ก เสถียรภาพ, ความควบคุมได้ และความสังเกตได้ของระบบ..... 155
ภาคผนวก ข การหาคำตอบของระบบสมการไม่เชิงเส้น..... 158
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 166

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 3.1 รูปแสดงลักษณะผลตอบสนองของตัวควบคุมจีเอ็มซีที่ค่า ξ ต่างๆกัน..... 25
รูปที่ 3.2 แผนรูปภาพสำหรับการใช้จีเอ็มซีควบคุมระบบตามตัวอย่างที่ 3.3..... 36
รูปที่ 3.3 การใช้จีเอ็มซีกับระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์หนึ่ง..... 39
รูปที่ 3.4 การใช้จีเอ็มซีกับระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์สอง..... 40
รูปที่ 3.5 การใช้จีเอ็มซีกับระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์สาม..... 41
รูปที่ 3.6 การใช้จีเอ็มซีกับระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์ n..... 42
รูปที่ 3.7 การใช้จีแอลซีกับระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์สอง..... 44
รูปที่ 3.8 รูปแสดงโครงสร้างการควบคุมแบบจีเอ็มซี..... 48
รูปที่ 3.9 รูปแสดงโครงสร้างการควบคุมแบบอาร์จีเอ็มซี..... 49
รูปที่ 3.10 รูปแสดงโครงสร้างการควบคุมแบบจีเอ็มซีที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์..... 50
รูปที่ 3.11 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมาน..... 55
รูปที่ 3.12 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย..... 58
รูปที่ 4.1 ภาพแสดงเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับไม่ได้..... 61
รูปที่ 4.2 ภาพแสดงการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีที่มีการใช้ตัวแปรควบคุมภายใน..... 73
รูปที่ 4.3 ภาพแสดงการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซี..... 76
รูปที่ 4.4 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของความเข้มข้น..... 78
รูปที่ 4.5 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายความเข้มข้น..... 78
รูปที่ 4.6 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของความเข้มข้น..... 79
รูปที่ 4.7 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ..... 79
รูปที่ 4.8 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อมี T_{in} เป็นตัวแปรรบกวน..... 81
รูปที่ 4.9 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อมี T_{in} เป็นตัวแปรรบกวน..... 81
รูปที่ 4.10 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อมี T_{in} เป็นตัวแปรรบกวน..... 82
รูปที่ 4.11 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อมี Q_{in} เป็นตัวแปรรบกวน..... 82
รูปที่ 4.12 แสดงผลการควบคุมด้วยจีแอลซีเมื่อมี Q_{in} เป็นตัวแปรรบกวน..... 83
รูปที่ 4.13 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อมี Q_{in} เป็นตัวแปรรบกวน..... 83

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.14 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 87
รูปที่ 4.15 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์.... 87
รูปที่ 4.16 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 88
รูปที่ 4.17 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 88
รูปที่ 4.18 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์.... 89
รูปที่ 4.19 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 89
รูปที่ 4.20 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 90
รูปที่ 4.21 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 90
รูปที่ 4.22 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 91
รูปที่ 4.23 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 91
รูปที่ 4.24 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 92
รูปที่ 4.25 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 92
รูปที่ 4.26 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 93
รูปที่ 4.27 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 93
รูปที่ 4.28 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 94
รูปที่ 4.29 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ k_0, ΔH และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 94
รูปที่ 4.30 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ k_0, ΔH และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 95

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.31 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ k_0, ΔH และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 95
รูปที่ 4.32 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยอาร์จีเอ็มซีเมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 98
รูปที่ 4.33 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 98
รูปที่ 4.34 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อ k_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 99
รูปที่ 4.35 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยอาร์จีเอ็มซีเมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 99
รูปที่ 4.36 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 100
รูปที่ 4.37 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อ k_0 และ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 100
รูปที่ 4.38 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยอาร์จีเอ็มซีเมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 101
รูปที่ 4.39 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 101
รูปที่ 4.40 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อ k_0 และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 102
รูปที่ 4.41 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยอาร์จีเอ็มซีเมื่อ k_0, ΔH และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 102
รูปที่ 4.42 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อ k_0, ΔH และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 103
รูปที่ 4.43 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อ k_0, ΔH และ UA มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 103
รูปที่ 5.1 ภาพแสดงเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้... 105
รูปที่ 5.2 ภาพแสดงการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีที่ใช้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์เป็นตัวแปรควบคุมภายใน..... 121

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.3 ภาพแสดงการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซี..... 124
รูปที่ 5.4 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของความเข้มข้น..... 126
รูปที่ 5.5 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของความเข้มข้น..... 126
รูปที่ 5.6 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของความเข้มข้น..... 127
รูปที่ 5.7 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของความเข้มข้น..... 127
รูปที่ 5.8 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อมี τ เป็นตัวแปรรบกวน..... 129
รูปที่ 5.9 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อมี τ เป็นตัวแปรรบกวน..... 129
รูปที่ 5.10 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อมี τ เป็นตัวแปรรบกวน..... 130
รูปที่ 5.11 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอเมื่อมี τ เป็นตัวแปรรบกวน..... 130
รูปที่ 5.12 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์.. 133
รูปที่ 5.13 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลเมื่อ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 133
รูปที่ 5.14 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 134
รูปที่ 5.15 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอเมื่อ ΔH มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 134
รูปที่ 5.16 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 135
รูปที่ 5.17 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 135
รูปที่ 5.18 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซีเมื่อ k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 136
รูปที่ 5.19 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอเมื่อ k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 136
รูปที่ 5.20 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีเมื่อ ΔH , k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 137

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.21 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีเมื่อ ΔH , k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 137
รูปที่ 5.22 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ/จีเอ็มซี เมื่อ ΔH , k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 138
รูปที่ 5.23 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยพีไอ เมื่อ ΔH , k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 138
รูปที่ 5.24 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยอาร์จีเอ็มซีเมื่อ k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 141
รูปที่ 5.25 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อ k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 141
รูปที่ 5.26 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อ k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 142
รูปที่ 5.27 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยอาร์จีเอ็มซีเมื่อ ΔH , k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 142
รูปที่ 5.28 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อ ΔH , k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 143
รูปที่ 5.29 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นด้วยจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อ ΔH , k_1 และ k_{-1} มีค่าเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์..... 143

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมจีเอ็มซี..... 20
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงสภาวะปฏิบัติงานของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มี
ปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับไม่ได้..... 62
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองเชิงพลวัตของสารหล่อเย็น..... 73
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจูนตัวควบคุม..... 77
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงสมรรถนะของตัวควบคุมเมื่อมีตัวแปรรบกวน..... 80
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นเมื่อมีความคลาดเคลื่อนของค่าพารามิเตอร์ใน
แบบจำลองกับกระบวนการจริง..... 85
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน..... 96
ตารางที่ 4.7 ผลการควบคุมความเข้มข้นขณะมีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเมื่อใช้อาร์จี-
เอ็มซี, จีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานและจีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน..... 97
ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงสภาวะปฏิบัติงานของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคาย
ความร้อนแบบผันกลับได้..... 106
ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจูนตัวควบคุม..... 125
ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงสมรรถนะของตัวควบคุมเมื่อมีตัวแปรรบกวน..... 128
ตารางที่ 5.4 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นเมื่อมีความคลาดเคลื่อนของค่าพารามิเตอร์ใน
แบบจำลองกับกระบวนการจริง..... 132
ตารางที่ 5.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวกรองคาลมาน..... 139
ตารางที่ 5.6 แสดงผลการควบคุมความเข้มข้นขณะมีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง
เมื่อใช้อาร์จีเอ็มซี, จีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานและ
จีแอลซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน..... 140

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรสเตท
B	=	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรปรับและค่าตัวแปรสเตท
C	=	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัดและค่าตัวแปรสเตท
C_A	=	ความเข้มข้นของสาร A (โมล/ลิตร)
C_{Ain}	=	ความเข้มข้นขาเข้าของสาร A (โมล/ลิตร)
C_B	=	ความเข้มข้นของสาร B (โมล/ลิตร)
C_{Bin}	=	ความเข้มข้นขาเข้าของสาร B (โมล/ลิตร)
C_p	=	ค่าความจุความร้อนของสารในถังกวน (จูล/กรัม/เคลวิน)
C_{pc}	=	ค่าความจุความร้อนของสารหล่อเย็น (จูล/กรัม/เคลวิน)
$\frac{E}{R}$	=	พลังงานกระตุ้นต่อค่าคงที่ของก๊าซ (เคลวิน)
$f(x)$	=	ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรสเตท
$g(x)$	=	ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรปรับและค่าตัวแปรสเตท
$h(x)$	=	ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรควบคุมและค่าตัวแปรสเตท
IAE	=	ผลรวมค่าสมบูรณ์ของความผิดพลาด
k_0	=	ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (นาที$^{-1}$)
k_c	=	ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพี, พีไอและพีไอดี
k_i	=	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจูนตัวควบคุมจีเอ็มซีเมื่อมี 1 ตัวแปรควบคุม
k_{ij}	=	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจูนตัวควบคุมจีเอ็มซีเมื่อมีมากกว่า 1 ตัวแปรควบคุม
K	=	เมตริกซ์เกนคาลมาน
L_f	=	ไลเดอริวาทีฟของฟังก์ชันที่เทียบกับฟังก์ชัน $f(x)$
L_g	=	ไลเดอริวาทีฟของฟังก์ชันที่เทียบกับฟังก์ชัน $g(x)$
P	=	เมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ
Q	=	เมตริกซ์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง
Q_c	=	อัตราการไหลของสารหล่อเย็น (ลิตร/นาที)
Q_{in}	=	อัตราการไหลของสายป้อน (ลิตร/นาที)
r	=	ค่าระดับสัมพัทธ์ของระบบ
$rate1$	=	ลักษณะผลตอบสนองของค่าความเข้มข้นของสาร A ที่ต้องการ
$rate2$	=	ลักษณะผลตอบสนองของอุณหภูมิที่ต้องการ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

r^* = ลักษณะอัตราผลตอบสนองของตัวแปรควบคุมที่ต้องการ

R = เมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าการวัด

T = อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ (เคลวิน)

T_{in} = อุณหภูมิของสายป้อน (เคลวิน)

T_C = อุณหภูมิสารหล่อเย็น (เคลวิน)

u = ตัวแปรปรับของระบบ

UA = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (จูล/นาที/เคลวิน)

v = ตัวแปรสุ่มสัญญาณรบกวนของค่าการวัด

V = ปริมาตรของเหลวในถังกวน (ลิตร)

V_C = ปริมาตรของแจ็กเก็ต (ลิตร)

w = ตัวแปรสุ่มสัญญาณรบกวนของระบบ

x = ตัวแปรสเตทของระบบ

$\tilde{x}$ = ค่าผลต่างของตัวแปรสเตทที่เทียบกับค่าที่ภาวะดำเนินการหรือที่ภาวะคงตัว

$\hat{x}$ = ค่าตัวแปรสเตทที่ได้จากการประมาณ

y = ตัวแปรควบคุมของระบบ

y' = ตัวแปรควบคุมภายในของระบบ

β_i = ค่าพารามิเตอร์ในการจูนตัวควบคุมจีแอลซี

λ = ค่าโพลของระบบขณะยังไม่มีการควบคุม

ρ = ความหนาแน่นของสารในถังกวน (กรัม/ลิตร)

ρ_c = ค่าความหนาแน่นของสารหล่อเย็น (กรัม/ลิตร)

τ = คงที่เวลา

τ_I = ค่าเวลาอินทิกรัล

ξ = สัมประสิทธิ์แดมปิง

$(-\Delta H)$ = ความร้อนจากปฏิกิริยาคายความร้อน (จูล/โมล)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

ตัวห้อย

c	=	สารหล่อเย็น
k	=	ค่าที่เวลา k
$k \mid j$	=	ค่าที่เวลา k ที่คำนวณมาจากค่าที่เวลา j
m	=	ค่าที่ได้จากแบบจำลอง
p	=	ค่าที่ได้จากกระบวนการ

ตัวยก

d	=	ค่าที่ต้องการ
sp	=	ค่าเป้าหมาย
spp	=	ค่าเป้าหมายในอดีต
ss	=	ค่าที่ภาวะดำเนินการหรือที่ภาวะคงตัว