

การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ สำหรับการควบคุม
อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์



นางสาวสุพัตรา ทองมีสี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0504-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19917601

APPLICATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROL WITH THE KALMAN FILTER
FOR TEMPERATURE CONTROL OF A BATCH POLYMERIZATION REACTOR

Miss. Suputra Tongmeesee

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 974-13-0504-4


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับคาสมาน
ฟิลเตอร์ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์
แบบแบตช์

โดย นางสาวสุพัตรา ทองมีลี

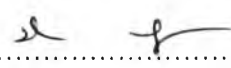
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

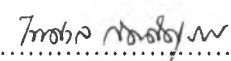
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติสุภกร


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

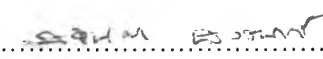

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติสุภกร)


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


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุจินดา นิลจันทร์)

สุพัตรา ทองมีสี : การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์
สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบเบตซ์

(Application of Model Predictive Control with the Kalman Filter for Temperature

Control of A Batch Polymerization Reactor) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ไพศาล กิตติศุภกร ;

129 หน้า, ISBN 974-13-0504-4

เป็นที่ทราบกันดีว่าปฏิกิริยาฟรี-แรดิคัลพอลิเมอร์เซชันในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบตซ์
เป็นปฏิกิริยาเกิดการคายความร้อนสูง การควบคุมอุณหภูมิระหว่างการผลิตพอลิเมอร์ในเครื่อง
ปฏิกรณ์แบบเบตซ์ต้องพิจารณาเรื่องคุณภาพของพอลิเมอร์ วัตถุประสงค์ในการควบคุมอื่นๆ เช่น
ใช้เวลาในการผลิตน้อยที่สุดและให้ได้ผลิตภัณฑ์มากที่สุด ปกติการควบคุมแบบป้อนกลับพีไอดี
สามารถควบคุมอุณหภูมิกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ แต่โอเวอร์ชูตทำให้สมบัติของ
พอลิเมอร์ ที่สังเคราะห์ได้ไม่ได้สมบัติตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องการตัวควบคุมแบบขั้นสูง

การควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ เป็นตัวควบคุมแบบขั้นสูงที่ถูกเสนอและพัฒนาให้สามารถทำ
การควบคุมกระบวนการแบบไม่เชิงเส้น รวมทั้งกระบวนการแบบเบตซ์และกระบวนการต่อเนื่อง
ในงานวิจัยนี้ได้เสนอการประยุกต์ใช้การควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของ
เครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบเบตซ์ ในการสร้างตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ ตัวประมาณค่า
ตัวกรองคาลมาน ได้ถูกนำมาพร้อมกับอัลกอริทึมโมเดลพรีดิกทีฟเพื่อประมาณค่าสเททและพารา
มิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า สมรรถนะในการควบคุมของการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับตัวกรอง
คาลมาน ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับตัวควบคุมไม่เชิงเส้นเจเนริกโมเดลร่วมกับตัวกรองคาลมาน
จากผลการจำลองพบว่าระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับตัวกรองคาลมานสามารถควบคุม
อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบเบตซ์ได้อย่างดีมีสมรรถนะ เหนือกว่าการ
ควบคุมเจเนริกโมเดลร่วมกับตัวกรองคาลมาน ทั้งในกรณีปกติและกรณีที่มีความผิดพลาดของ
พารามิเตอร์ของแบบจำลองและกระบวนการอันได้แก่ การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท
ความร้อน การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโมโนเมอร์ การลดลงของอัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยา
และการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนของปฏิกิริยา

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต.....สุพัตรา ทองมีสี.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ไพศาล กิตติศุภกร.....

4170596421 MAJOR: CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD :MODEL PREDICTIVE CONTROL / BATCH POLYMERIZATION REACTOR / FREE-RADICAL POLYMERIZATION REACTION / POLYMETHYL METHACRYLATE

SUPUTTRA TONGMEESEE : APPLICATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROL WITH THE KALMAN FILTER FOR TEMPERATURE CONTROL OF A BATCH POLYMERIZATION REACTOR. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. PAISAN KITTISUPAKORN, Ph.D. 129 pp. ISBN 974-13-0504-4

It is well known that free-radical polymerizations involve highly exothermic reactions. Such polymerizations are normally produced in the manner of batch process occurring in a batch reactor. Presently, temperature control is needed to define polymer specifications, the objectives of maximization of productivity and minimization of batch time. Conventionally, PID feedback control is applied to manage the temperature profile of the batch reactor. The PID controller although provides good controller performance, it normally gives control response with overshoot, this result in off-spec products. Therefore, an advanced process control is required.

Model Predictive Control (MPC), one of advanced process control has been proposed and developed to handle nonlinear system including batch and continuous processes. This thesis, therefore, presents the application of MPC for the temperature control of a batch polymerization reactor. Kalman filter, an estimation technique is included into the MPC algorithm to estimate unmeasurable states as well as unknown/ uncertain parameters used in the formulation of MPC. The performance of MPC with kalman filter is compared to that of a simple nonlinear control technique named Generic Model Control (GMC). Simulation results have shown that MPC with kalman filter give a better control performance than that of GMC with kalman filter in normal case and even in the presence of plant/ model mismatch in decrease in heat transfer coefficient and rate of termination reaction and in increase of the monomer concentration and heat of reactions.

Department of Chemical Engineering

Student's signature..... *Suputra Tongmeesee*

Field of study Chemical Engineering

Advisor's signature... *Paisan Kittisupakorn*

Academic year 2000

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงสำเร็จลุล่วงไม่ได้ ถ้าไม่ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ทั้งในด้านคำแนะนำ และกำลังใจตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ทางผู้วิจัยจึงกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ท่านศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี และอาจารย์ ดร. สุจินดา นิลจันทร์กรรมการการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์และสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ยิ่งในงานวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยกราบขอบคุณบิดา-มารดา และพี่ๆ สำหรับความรักที่อบอุ่น ความเข้าใจ และการสนับสนุนการศึกษามาโดยตลอด ขอขอบคุณสมาชิกห้องวิจัยระบบควบคุมทุกท่านที่ช่วยเหลือทำย่นี่ขอขอบคุณ เพื่อน พี่ และน้องทุกคนสำหรับกำลังใจและความห่วงใยที่มอบให้กันเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	7
2. งานวิจัยที่ผ่านมา	
2.1 ผลงานการประยุกต์ใช้ระบบการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟในอุตสาหกรรมเคมี โดยทั่วไป.....	9
2.2 งานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบการควบคุมสำหรับการควบคุม เครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์.....	12
2.3 งานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์	15
2.4 งานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบการประมาณค่าโดยทั่วไป.....	16
2.5 งานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบการควบคุมแบบสำหรับเครื่อง ปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์.....	17
3. การควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ.....	18
3.1 ทฤษฎี	18
3.2 โครงสร้างของการควบคุม โมเดลพรีดิกทีฟ.....	20
3.2.1 สมการแบบจำลองกระบวนการ.....	21

สารบัญ(ต่อ)

3.2.2	ขอบเขตของตัวแปรปรับและขอบเขตของตัวแปรสเตท.....	22
3.2.3	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	23
3.2.4	การออปติไมซ์กระบวนการเมื่อมีขอบเขตจำกัด.....	24
3.3	อัลกอริทึมของระบบควบคุม โมเดลพรีดิกทีฟ	33
4.	แบบจำลองกระบวนการและการออกแบบการควบคุม.....	34
4.1	กระบวนการฟรี-เรคัลพอลิเมอไรเซชัน.....	34
4.1.1	สมการจลนพลศาสตร์.....	34
4.1.2	ความยาวสายโซ่กับปฏิกิริยาการถ่ายโอนสายโซ่.....	39
4.1.3	การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล.....	40
4.1.4	ผลกระทบของสถานะการดำเนินการของเครื่องปฏิกรณ์กับสมบัติ ของพอลิเมอร์.....	40
4.2	แบบจำลองกระบวนการที่ใช้ในการศึกษา.....	40
4.3	พารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาฟรี-เรคัลพอลิเมอไรเซชัน....	45
4.4	ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟสำหรับกระบวนการเคมีพอลิเมอร์แบบเบตซ์...48	
4.5	การประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์.....	50
4.6	การประมาณค่าโดยใช้อัลกอริทึมคาลมาน.....	51
4.7	การประมาณค่าความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์เคมีโดยใช้อัลกอริทึมของคาลมาน..52	
4.8	การประยุกต์ใช้ตัวกรองคาลมานในงานวิจัย.....	55
5.	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลทดลอง.....	60
5.1	ผลการทดลองและวิเคราะห์ปฏิกิริยา.....	60
5.2	ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์.....	64
5.2.1	การควบคุมแบบลูเปิด.....	64
5.2.2	การควบคุมแบบลูปิด.....	66
5.3	การจำลองการประมาณค่าความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบตซ์.....	70
5.3.1	เปรียบเทียบการประมาณค่าแบบลูเปิด.....	71
5.3.2	การประมาณค่าแบบลูปิด.....	73
5.4	การทดสอบระบบการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้.....	76
5.5	กรณีทดสอบสมรรถนะและความทนทานในการควบคุมอุณหภูมิ.....	78
5.5.1	กรณีทดสอบสมรรถนะ.....	78

สารบัญ(ต่อ)

5.5.2	กรณีทดสอบความทนทาน.....	82
5.5.2.1	กรณีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิวดฟ้า.....	82
5.5.2.2	กรณีค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์ตั้งต้นผิวดฟ้า.....	86
5.5.2.3	กรณีค่าอัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยาผิวดฟ้า.....	89
5.5.2.4	กรณีค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาผิวดฟ้า.....	92
6.	บทสรุป	96
6.1	บทสรุป	98
6.2	ข้อเสนอแนะ	100
	รายการอ้างอิง	101
	ภาคผนวก	108
	ภาคผนวก ก แผนภาพการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบพีไอดี.....	109
	ภาคผนวก ข การจูนพารามิเตอร์การควบคุมแบบเจเนติก โมเดล.....	110
	ภาคผนวก ค ระบบการประมาณค่าเอกซ์โพเนนเชียล.....	115
	ภาคผนวก ง การโปรแกรมควอดราติกอย่างเป็นลำดับ.....	116
	ภาคผนวก จ ความรู้พื้นฐานเรื่องพอลิเมอร์.....	119
	ภาคผนวก ฉ การหาค่าสูงสุดต่ำสุด	123
	ภาคผนวก ช การประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์.....	128
	ประวัติผู้เขียน	129

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 ระบบการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ.....	19
รูปที่ 3.2 วิธีแกนการถดถอย (receding horizon strategy).....	19
รูปที่ 3.3 ออปเจ็คทีฟฟังก์ชันเมื่อมีเทอมการลงโทษ.....	30
(ก) เมตริกซ์ถ่วงน้ำหนักเฮวีไซด์.....	30
(ข) การเพิ่มค่าของออปเจ็คทีฟฟังก์ชันเมื่อมีเทอมการลงโทษ.....	30
รูปที่ 3.4 การหาคำตอบออปติไมซ์โดยวิธีวนซ้ำ.....	31
รูปที่ 3.5 ระบบการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟ.....	33
รูปที่ 4.1 การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบตซ์	41
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของของผสมในเครื่องปฏิกรณ์เป็นฟังก์ชันกับค่า คอนเวอร์ชันในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบตซ์	43
รูปที่ 4.3 การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟในงานวิจัยที่เวลา j.....	49
รูปที่ 4.4 แผนผังการควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟพร้อมกับประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์..50	50
รูปที่ 4.5 การควบคุมแบบ โมเดลพรีดิกทีฟพร้อมกับประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์.....	59
รูปที่ 5.1 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบเบตซ์ งานวิจัยของ Crowley และ Choi (1996) ในกรณี 1 (ไม่มีการควบคุม) : ผลจากการจำลอง.....	61
รูปที่ 5.1 (ข) ผลการจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบเบตซ์ งานวิจัยของ Crowley และ Choi (1996) ในกรณี 1 (ไม่มีการควบคุม): ผลที่เสนอในบทความ Crowley และ Choi (1996)	61
รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบเบตซ์ งานวิจัยของ Crowley และ Choi (1996) ในกรณี 2 (เมื่อควบคุมด้วยพีไอดี) : ผลจากการจำลอง...62	62
(ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์.....	62
(ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์.....	64
รูปที่ 5.3 ผลการจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบเบตซ์ งานวิจัยของ Crowley และ Choi (1996) ในกรณี 2 (เมื่อควบคุมด้วยพีไอดี): ผลการจำลองที่เสนอใน บทความ.....	64
(ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์.....	64
(ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์.....	64
รูปที่ 5.4 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบเบตซ์ กับเวลา.. สำหรับการควบคุมแบบลูปเปิด.....	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.4 (ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา สำหรับการควบคุมแบบลูปเปิด.....	65
รูปที่ 5.4 (ค) บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมอุณหภูมิภายในเครื่อง ปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ กับเวลา.....	65
รูปที่ 5.4 (ค) ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์ แบบแบตช์กับเวลา.....	65
รูปที่ 5.4 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบ แบตช์กับเวลา.....	65
รูปที่ 5.5 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ กับเวลา สำหรับการควบคุมแบบลูปปิดด้วยพีไอดี.....	67
รูปที่ 5.5 (ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา สำหรับการควบคุมแบบลูปปิดด้วยพีไอดี.....	67
รูปที่ 5.5 (ค) บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับเวลาสำหรับการควบ คุมแบบลูปปิดด้วยพีไอดี.....	67
รูปที่ 5.5 (ค) ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์ แบบแบตช์กับเวลาสำหรับการควบคุมแบบลูปปิดด้วยพีไอดี.....	67
รูปที่ 5.5 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบ แบตช์กับเวลาสำหรับการควบคุมแบบลูปปิดด้วยพีไอดี.....	67
รูปที่ 5.6 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ กับเวลา สำหรับการควบคุมแบบลูปปิดด้วยเจเนริก โมเดล.....	68
รูปที่ 5.6 (ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์กับเวลา สำหรับการควบคุมแบบลูปปิดด้วยเจเนริก โมเดล.....	68
รูปที่ 5.6 (ค) บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับเวลาสำหรับการควบ คุมแบบลูปปิดด้วยเจเนริก โมเดล.....	68
รูปที่ 5.6 (ค) ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์ แบบแบตช์กับเวลาสำหรับการควบคุมแบบลูปปิดด้วยเจเนริก โมเดล.....	68
รูปที่ 5.6 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบ แบตช์กับเวลาสำหรับการควบคุมแบบลูปปิดด้วยเจเนริก โมเดล.....	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.7 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลา เมื่อเปรียบเทียบการประมาณค่าตัวกรองแบบเอกซ์โพเนนเชียล กับตัวกรองคาลมานในการควบคุมแบบลูปเปิด.....	72
รูปที่ 5.7 (ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์เคมีกับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการประมาณค่าตัวกรองแบบเอกซ์โพเนนเชียล กับตัวกรองคาลมานในการควบคุมแบบลูปเปิด.....	72
รูปที่ 5.7 (ค) บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับเวลา เมื่อเปรียบเทียบการประมาณค่าตัวกรองเอกซ์โพเนนเชียลกับตัวกรองคาลมานในการควบคุมแบบลูปเปิด.....	72
รูปที่ 5.7 (ค) ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์กับเวลา เมื่อเปรียบเทียบการประมาณค่าตัวกรองเอกซ์โพเนนเชียลกับตัวกรองคาลมานในการควบคุมแบบลูปเปิด.....	72
รูปที่ 5.7 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการประมาณค่าตัวกรองเอกซ์โพเนนเชียลกับตัวกรองคาลมานในการควบคุมแบบลูปเปิด.....	72
รูปที่ 5.8 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ กับเวลาเปรียบเทียบตัวประมาณค่าแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับตัวกรองคาลมานที่มีการควบคุมเจเนริก โมเดล.....	74
รูปที่ 5.8 (ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดกับเวลาเปรียบเทียบตัวประมาณค่าแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับตัวกรองคาลมานที่มีการควบคุมเจเนริก โมเดล.....	74
รูปที่ 5.8 (ค) บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกับเวลาเปรียบเทียบตัวประมาณค่าแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับตัวกรองคาลมานที่มีการควบคุมเจเนริก โมเดล.....	75
รูปที่ 5.8 (ค) ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์กับเวลาเปรียบเทียบตัวประมาณค่าแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับตัวกรองคาลมานที่มีการควบคุมเจเนริก โมเดล.....	75
รูปที่ 5.8 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์กับเวลาเปรียบเทียบตัวประมาณค่าแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับตัวกรองคาลมานที่มีการควบคุมเจเนริก โมเดล.....	75
รูปที่ 5.9 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลา เมื่อควบคุมด้วยโมเดลพรีดิกทีฟกรณีมีขอบเขตของตัวแปรปรับภายนอกออปเจ็คทีฟฟังก์ชัน.....	77
รูปที่ 5.9 (ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาเมื่อควบคุมด้วยโมเดลพรีดิกทีฟกรณีมีขอบเขตของตัวแปรปรับภายนอกออปเจ็คทีฟฟังก์ชัน.....	77
รูปที่ 5.10 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาเมื่อควบคุมด้วยโมเดลพรีดิกทีฟกรณีมีขอบเขตของตัวแปรปรับภายนอกออปเจ็คทีฟฟังก์ชัน(ในงานวิจัยนี้).....	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.10 (ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาเมื่อควบคุมด้วยโมเดล พรีดิกทีฟกรณีมีขอบเขตของตัวแปรปรับภายนอกออปเจกทีฟฟังก์ชัน(ในงานวิจัยนี้)	77
รูปที่ 5.11 ผลการควบคุมด้วยเจเนริกโมเดลในงานวิจัยของ Cott และ Macchietto (1989).....	78
รูปที่ 5.12 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาเมื่อควบคุมด้วยโมเดลพรีดิกทีฟ และเจเนริกโมเดล ในสภาวะปกติ.....	80
รูปที่ 5.12 (ข) การประมาณค่าความร้อนที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลาเมื่อควบคุมด้วยโมเดล พรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล ในสภาวะปกติ.....	80
รูปที่ 5.12 (ค)บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับเวลาเมื่อควบคุมด้วย โมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล ในสภาวะปกติ.....	81
รูปที่ 5.12(ค)ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์เมอร์กับเวลาเมื่อควบคุมด้วยโมเดล พรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล ในสภาวะปกติ.....	81
รูปที่ 5.12 (ง) ผลตอบสนองคอนเวอร์ชันของโมโนเมอร์กับเวลาเมื่อควบคุมด้วย โมเดลพรีดิกทีฟ และเจเนริกโมเดล ในสภาวะปกติ.....	81
รูปที่ 5.13 (ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์กับเวลา เมื่อเปรียบเทียบการควบคุม โมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดล กรณีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาด ลดลง 20 %.....	84
รูปที่ 5.13 (ข) ผลตอบสนองความร้อนที่เกิดกับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุม โมเดลพรีดิก ทีฟและเจเนริกโมเดลกรณีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาดลดลง 20 %....	84
รูปที่ 5.13 (ค)บน ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมอุณหภูมิภายในเครื่อง ปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ และเจเนริกโมเดลกรณีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาดลดลง 20 %.....	85
รูปที่ 5.13 (ค)ล่าง ผลตอบสนองความเข้มข้นของโมโนเมอร์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุม โมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดลกรณีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาดลด ลง 20 %.....	85
รูปที่ 5.13 (ง) ผลตอบสนองค่าคอนเวอร์ชันของ โมโนเมอร์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุม โมเดลพรีดิกทีฟและเจเนริกโมเดลกรณีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาดลด ลง 20 %.....	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.16 (ค)บน	ผลตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมอุณหภูมิภายในเครื่อง ปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบแบตช์ กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุม โมเดลพรีดิกทีฟ และเจเนริก โมเดลกรณีค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 10 %.....	94
รูปที่ 5.16 (ค)ล่าง	ค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุม โมเดลพรี ดิกทีฟและเจเนริก โมเดลกรณีค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 10 %.....	94
รูปที่ 5.16 (ง)	ค่าคอนเวอร์ชันของ โมโนเมอร์กับเวลาเมื่อเปรียบเทียบการควบคุม โมเดลพรีดิกทีฟ และเจเนริก โมเดลกรณีค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 10 %.....	94
รูปที่ ก.1	แผนผังการประยุกต์ใช้ พีไอดีที่ใช้ในงานวิจัย	109
รูปที่ ข.1	แผนผังการประยุกต์ใช้ ร่วมกับตัวประมาณค่าความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย.....	111
รูปที่ ข.2	แผนภาพการตอบสนองระบบการควบคุมเจเนริกโมเดล	112
รูปที่ ข.3	แผนผังการประยุกต์ใช้ ร่วมกับตัวรอกาลมานที่ใช้ในงานวิจัย.....	114
รูปที่ ค.1	แผนผังการประยุกต์ใช้ ร่วมกับตัวรอกเอกซ์โพเนนเชียลที่ใช้ในงานวิจัย.....	116
รูปที่ จ.1	ตัวแปรระบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์.....	120
รูปที่ ฉ.1	ค่าต่ำสุดเฉพาะย่าน.....	123

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1	อัลกอริธึมการวนซ้ำ.....32
ตารางที่ 3.2	อัลกอริธึมระบบการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ.....33
ตารางที่ 4.1	พารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาฟรี-แรดิคัลพอลิเมอไรเซชันของพอลิเมธิลเมธาคริเลต (Crowley และ Choi, 1996).....45
ตารางที่ 4.2	ค่าทางกายภาพของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Crowley และ Choi, 1996)46
ตารางที่ 4.3	ค่าเริ่มต้นของสถานะดำเนินการที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Crowley และ Choi, 1996).....46
ตารางที่ 4.4	ค่าเริ่มต้นของสถานะดำเนินการที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ในงานวิจัย Kim (1991)47
ตารางที่ 4.5	อัลกอริธึมตัวกรองคาลมาน52
ตารางที่ 4.6	สมมุติฐานที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์.....53
ตารางที่ 4.7	แสดงค่าเริ่มต้นสำหรับการประมาณของตัวประมาณค่าคาลมานฟิลเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย57
ตารางที่ 4.8	อัลกอริธึมระบบการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟพร้อมกับตัวประมาณค่าสเททและพารามิเตอร์58
ตารางที่ 4.9	สรุบบระบบการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟพร้อมกับตัวประมาณค่า58
ตารางที่ 5.1	ตารางแสดงค่าคงที่ที่ใช้สำหรับการจูนระบบควบคุมแบบเชิงเส้นพีไอดี63
ตารางที่ 5.2	ค่าคงที่ที่ใช้สำหรับการจูนระบบควบคุมแบบเชิงเส้นพีไอดีและเจนเนริกโมเดล...66
ตารางที่ 5.3	ตารางแสดงค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีปกติ (พีไอดีและเจนเนริกโมเดล).....69
ตารางที่ 5.4	แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการประมาณค่าความร้อน โดยใช้ตัวกรองคาลมานฟิลเตอร์ในระบบลูปเปิด71
ตารางที่ 5.5	ดัชนีสมรรถนะของการประมาณค่าของตัวประมาณค่าในกรณีการควบคุมลูปเปิด71
ตารางที่ 5.6	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประมาณค่าความร้อน โดยใช้ตัวกรองคาลมานและเอกซ์โพเนนเชียล.....74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 5.7	ดัชนีสมรรถนะของการประมาณค่าของตัวประมาณค่าในกรณีการควบคุมวงปิด ด้วยระบบการควบคุม.....	75
ตารางที่ 5.8	ค่าคงที่ที่ใช้ในการจูนระบบควบคุมและระบบประมาณค่า.....	79
ตารางที่ 5.9	ค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิด พลาด.....	83
ตารางที่ 5.10	ค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมกรณีที่ค่าความเข้มข้นของโมโนเมอร์ผิดพลาด	89
ตารางที่ 5.11	ค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมกรณีที่ค่าอัตราการสิ้นสุดปฏิกิริยาผิดพลาด...92	
ตารางที่ 5.12	ค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมกรณีที่ค่าความร้อนของการปฏิกิริยาผิดพลาด95	
ตารางที่ 6.1	ตารางเปรียบเทียบอัลกอริธึมของระบบควบคุม โมเดลพรีดิกทีฟกับระบบควบคุม เจเนริก โมเดล.....	99
ตารางที่ จ.1	แสดงพอลิเมอร์ทางการค้าที่ได้จากกระบวนการฟรี-แรดิคัลพอลิเมอไรเซชัน...122	
ตารางที่ ฉ.1	ขั้นตอนในการหาค่าสเตทที่ไม่สามารถวัดได้และพารามิเตอร์ที่ไม่แน่นอน.....128	

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ความหมายของตัวแปร

A	สาร A
B	สาร B
C	สาร C
C_p	ค่าความจุความร้อนของสารผสมเริ่มทำปฏิกิริยา (กิโลแคลอรี/ กิโลกรัมเคลวิน)
C_{PC}	ค่าความจุความร้อนของแจ็กเก็ต (กิโลแคลอรี/ กิโลกรัมเคลวิน)
f_i	แฟคเตอร์สัมประสิทธิ์ของตัวริเริ่ม
g_i	แฟคเตอร์แก้ไขการเกิดเจลสำหรับปฏิกิริยาขั้นสิ้นสุด
g_p	แฟคเตอร์แก้ไขการเกิดเจลสำหรับปฏิกิริยาขั้นแผ่ขยาย
$(-\Delta H)$	ค่าความร้อนของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (กิโลแคลอรี/ กิโลโมล)
I	ความเข้มข้นของตัวริเริ่ม (กิโลโมล/ เมตร ³)
J, L	ดัชนีสมรรถนะของการอปติไมซ์
k	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (เมตร ³ / กิโล โมล.นาทึ)
K	ค่าเกนของตัวกรองคาถมาน, ค่าเกนของระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ
K_1, K_2	ค่าคงที่การจูนของตัวควบคุมเจเนริกโมเดล (Tuning Constant)
M	ความเข้มข้นของโมโนเมอร์ (กิโลโมล/ เมตร ³)
M_n	ความเข้มข้นของโมโนเมอร์ที่มี สายโซ่ยาว n
M_w	น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์
MW	น้ำหนักโมเลกุล (กิโลกรัม/กิโลโมล)
N_m	จำนวนครั้งล่องหน้าที่ทำาการควบคุมในระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ
N_p	จำนวนครั้งล่องหน้าที่ทำาการคำนวณในระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ
P	ความเข้มข้นของไลฟพอลิเมอร์
Q	ค่าความแปรปรวนของตัวแปรสเตท ในระบบประมาณค่า
q_c	อัตราการไหลของน้ำผ่านแจ็กเก็ต (เมตร ³ /นาทึ)
Q_c	ค่าความแปรปรวนของตัวแปรสเตท ในระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ
Q_g	ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลแคลอรี/นาทึ)
R	ค่าความแปรปรวนของตัวแปรวัด ในระบบประมาณค่า
R	อัตราการเกิดปฏิกิริยา (กิโลแคลอรี/ กิโล โมลเคลวิน)

อธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Rc	ค่าความแปรปรวนของตัวแปรวัด ในระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ
T	เวลา (นาทีก)
T	อุณหภูมิ (เคลวิน)
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (กิโลแคลอรี/นาทีกเคลวิน)
V	ปริมาตร (เมตร ³)
X	คอนเวอร์ชัน
Y	สัญญาณขาออก

อักษรกรีก

α	ค่าคงที่
α_m	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโมโนเมอร์
α_p	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของพอลิเมอร์
α_s	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของตัวทำละลาย
ϵ	ค่าคงที่การแก้ไขเนื่องมาจากการหดตัวของปริมาตร
ϵ_s	ค่าคงที่อัตราส่วนการนำความร้อนของผนังเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำจากเหล็กต่อน้ำ
ϕ_m	สัดส่วนโดยปริมาตรของโมโนเมอร์
ϕ_p	สัดส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์
ϕ_s	สัดส่วนโดยปริมาตรของตัวทำละลาย
λ	โมเมนต์ของพอลิเมอร์
λ_k	ความยาวของสายโซ่
ρ	ความหนาแน่น (โมล/ เมตร ³)
ξ	ค่าที่บอกถึงลักษณะของการตอบสนอง
τ	ค่าเวลาคงที่ (Time Constant – นาทีก)
σ	ค่าความแปรปรวนในสมการสัญญาณรบกวน
λ	ค่า Lagrange Multiplier

อธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

ความหมายของเวกเตอร์และเมตริกซ์

A	เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์สเตท
B	เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์สัญญาณขาเข้า
C	เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์สเตทสำหรับหาสัญญาณขาออก
G	เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์สเตทแบบดีสครีต

ความหมายของเวกเตอร์และเมตริกซ์ (ต่อ)

H	เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์สัญญาณขาเข้าแบบดีสครีต
P	เมตริกซ์น้ำหนักของตัวแปรสเตท
Q	เมตริกซ์ความแปรปรวนของตัวแปรสเตท
R	เมตริกซ์ความแปรปรวนของตัวแปรวัด
x	เวกเตอร์สเตทของกระบวนการ
\hat{x}	เวกเตอร์สเตทของการประมาณ
\tilde{x}	เวกเตอร์ผลต่างของตัวแปรสเตทในกระบวนการกับการประมาณ
Y	เวกเตอร์เอาต์พุต

ความหมายของอักษรห้อย

0	ค่าเริ่มต้น
c	แจ็กเก็ต
d	อัตราการสลายสำหรับตัวรีเริ่ม
f	ค่าของตัวกรอง
f	อิสระ
fm	อัตราสำหรับขั้นการถ่ายโอนสายโซ่ไปยังโมโนเมอร์
fs	อัตราสำหรับขั้นการถ่ายโอนสายโซ่ไปยังตัวทำละลาย
gm	สถานะแก้วของโมโนเมอร์

อธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

ความหมายของอักษรห้อย(ต่อ)

gp	สถานะแก้วของพอลิเมอร์
gs	สถานะแก้วของตัวทำละลาย
j	แจ็กเก็ต
j	บริเวณผนังเครื่องปฏิกรณ์
j, set	เป้าหมายภายในแจ็กเก็ต
j, in	ขาเข้าของแจ็กเก็ต
k	ที่เวลา $k\Delta t$
m	ค่าที่วัดได้
m	โมโนเมอร์
max	ค่ามากที่สุด
min	ค่าน้อยที่สุด
mo	ของโมโนเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น
p	อัตราการแผ่ขยาย
po	อัตราการแผ่ขยายที่เวลาเริ่มต้น
r	อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์
rp, set	ค่าเป้าหมายภายในเครื่องปฏิกรณ์
s	ตัวทำละลาย
sp	ค่าที่กำหนดไว้
t	อัตราการสิ้นสุด
to	อัตราการสิ้นสุดที่เวลาเริ่มต้น