การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟบน MATLAB สำหรับควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีปฏิกิริยาชนิดคายความร้อน

นาย ศราวุธ ภู่ไพจิตร์กุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-451-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19307032

APPLICATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROL ON THE MATLAB FOR CONTROL OF A BATCH REACTOR WITH EXOTHERMIC REACTIONS

Mr. Sarawut Phupaichitkun

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 1998

ISBN 974-332-451-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้การควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟบน MATLAB สำหรับควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีปฏิกิริยาชนิดคายความร้อน
โดย	นายศราวุธ ภู่ไพจิตร์กุล
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

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

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ศราวุธ ภู่ไพจิตร์กุล : การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟบน MATLAB สำหรับควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาชนิดคายความร้อน (Application of Model Predictive Control on the MATLAB for Control of a Batch Reactor with Exothermic Reactions) อ.ที่ปรึกษา: ผศ.ดร. ไพศาล กิตติศุภกร; 73 หน้า, ISBN 974-332-451-2

ตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการในการทำออพติเซชั่นหรือเรียกว่าระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ มีพื้นฐานมาจากคำนวณการควบคุมที่ทำให้ฟังก์ชั่นเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุดภายใต้แบบจำลองเชิงพลวัตและขอบเขตของกระบวนการ ซึ่งทำให้กระบวนการภายใต้การควบคุมของระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟมีความเสถียร ในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟสำหรับควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์แบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนทั้งในกรณีปกติ และในกรณีที่เกิดความผิดพลาดของค่าคงที่ในแบบจำลอง อันได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ค่ามวลรวมในถังปฏิกรณ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยา และค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมกับระบบควบคุมเจเนริกโมเดลที่เป็นอาศัยแบบจำลองช่วยในการควบคุมและต้องการทราบตัวแปรสเตททุกค่าเช่นเดียวกับระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ โดยมีตัวกรองคาลมานประมาณค่าความร้อนที่เกิดในถังปฏิกรณ์ให้กับระบบควบคุมทั้งสอง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าในการควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟสามารถควบคุมได้ดีเทียบเท่ากับระบบควบคุมเจเนริกโมเดลภายใต้การปรับจูนที่ดี

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เป็นบทคัดย่อที่ผ่านการอนุมัติ

C817215 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: MODEL PREDICTIVE CONTROL / BATCH REACTOR / EXOTHERMIC REACTION

SARAWUT PHUPAICHITKUN : APPLICATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROL ON THE MATLAB FOR CONTROL OF A BATCH REACTOR WITH EXOTHERMIC BATCH REACTIONS. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. PAISAN KITTISUPAKORN, Ph.D. 73 pp. ISBN 974-332-451-2

A model-based controller with optimization framework known as Model Predictive Control (MPC), has been widely studied. The main idea of the MPC is that it computes a control trajectory minimizing a cost function of a plant subject to process dynamics and constraints. It has been proven that process under MPC is stabilized. In this work, Model Predictive Control (MPC) is applied to control the temperature of a batch reactor with exothermic reactions and its performance is compared with GMC to that of individually/simutaneously plant/model mismatches in heat transfer coefficient, total mass in the reactor, rate of reaction and heat of reaction. In addition, since both MPC and GMC are the model based controllers; they need the measurement of all states as well as the value of process parameters, in this work, the heat released of chemical reactions is needed but cannot be measured. In this situations, it is estimated by Kalman Filter and the estimates of heat released is incorporated into the MPC/GMC. Simualtion studies show MPC to be as good as GMC for all cases for which both controllers are well tuned.

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงสำเร็จลุล่วงไม่ได้ ถ้าไม่ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ทั้งในด้านคำแนะนำและกำลังใจตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ทางผู้วิจัยจึงกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ท่านศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล และอาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี กรรมการการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์และสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ยิ่งในงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ผู้สอนวิชา Data Sampling Control ที่ทำให้ผู้เขียนเข้าใจหลักการควบคุมออพติมัล และตัวกรองคาลมาน

ขอขอบคุณสถาบัน Institute for Systems Research,University of Maryland ที่กรุณาส่งบทความระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟมาให้ ซึ่งมีประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยกราบขอบคุณบิดา-มารดา และพี่ๆ สำหรับความรักที่อบอุ่น ความเข้าใจ และการสนับสนุนการศึกษามาโดยตลอด ขอขอบคุณสมาชิกห้องวิจัยระบบควบคุมทุกท่านที่ช่วยเหลือ ท้ายนี้ขอขอบคุณ เพื่อน พี่ และน้องทุกคนสำหรับกำลังใจและความห่วงใยที่มอบให้กันเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญภาพ ..... ณ
สารบัญตาราง ..... ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฎ
บทที่
1. บทนำ 1
1.1 มูลเหตุจูงใจ 1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา 1
1.3 วัตถุประสงค์ 3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 4
1.5 เนื้อหาวิทยานิพนธ์ 5
2. ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ 6
2.1 โครงสร้างของกระบวนการที่ใช้ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ 8
2.2 ส่วนประกอบของระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ 10
2.2.1 สมการตัวแปรสเตทของกระบวนการ 10
2.2.2 ฟังก์ชั่นเป้าหมาย 14
2.2.3 ขอบเขตของตัวแปรปรับและขอบเขตของตัวแปรสเตท 16
2.3 อัลกอริธึมของระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ 18
2.4 ระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟสำหรับถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มี
ปฏิกิริยาคายความร้อน 18
3. การจำลองถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน 20
3.1 สมการจำลองปฏิกิริยาเคมีภายในถังปฏิกิริยา 21
3.2 สมการจำลองการถ่ายเทความร้อนในถังปฏิกิริยา 22
3.3 สมการจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในถังแจ็คเก็ต 24
4. การประมาณค่าความร้อนในถังปฏิกรณ์เคมีโดยใช้อัลกอริธึมของคาลมาน 26
4.1 การประมาณค่าโดยใช้อัลกอริธึมคาลมาน 26
4.2.1 การประมาณค่า 27
4.2.2 อัลกอริธึมคาลมาน 29

สารบัญ(ต่อ)

บทที่

4.2 การประมาณค่าความร้อนในถังปฏิกรณ์เคมีโดยใช้อัลกอริธึมคาลมาน 30

5. การจำลองการควบคุมอุณหภูมิภายถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนด้วยระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ 33

5.1 การจำลองถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน..... 33

5.1.1 การจำลองในระบบวงเปิด 33

5.1.2 การจำลองในระบบวงปิด 34

5.2 การจำลองการประมาณค่าความร้อนภายในถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน 36

5.2.1 การประมาณค่าในระบบวงเปิด 33

5.2.2 การประมาณค่าในระบบวงปิดโดยใช้ระบบควบคุมเจเนริกโมเดล 37

5.3 การทดสอบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับการประมาณค่าคาลมาน 38

5.4 การทดสอบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง 40

5.4.1 การทดสอบผลจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาด 40

5.4.2 การทดสอบผลจากค่ามวลรวมภายในถังปฏิกรณ์ผิดพลาด 42

5.4.3 การทดสอบผลจากค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาผิดพลาด 43

5.4.4 การทดสอบผลจากค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาผิดพลาด 45

6. บทสรุป 48

6.1 บทสรุป 50

6.2 ข้อเสนอแนะ 52

รายการอ้างอิง 53

ภาคผนวก 56

ภาคผนวก ก การแก้สมการควอแดรทิกสำหรับระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ 57

ภาคผนวก ข หลักการประมาณค่าของตัวกรองคาลมาน 61

ภาคผนวก ค ระบบควบคุมเจเนริกโมเดล 65

ภาคผนวก ง ระบบประมาณค่าเอ็กซ์โปเนนเชี่ยล 66

ภาคผนวก จ การเขียนโปรแกรมบน MATLAB 67

ประวัติผู้วิจัย 73

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ 9
รูปที่ 2.2 การหาค่าตัวแปรปรับที่เหมาสมจำนวน M ค่าภายในการคำนวณ P 9
รูปที่ 2.3 แผนภาพของการควบคุมโดยใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนเป็นแบบจำลอง 12
รูปที่ 2.4 แผนภาพของการควบคุมโดยใช้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนเป็นแบบจำลองพร้อมด้วย ตัวสังเกต 12
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบกะ 20
รูปที่ 5.1ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในถัง อุณหภูมิน้ำในถังแจ็คเก็ต และอุณหภูมิในแจ็คเก็ตที่ตั้งไว้ (C) กับเวลา(นาที) 34
รูปที่ 5.1ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีภายใน ถังปฏิกิริยา(kJ) กับเวลา(นาที) 34
รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลของสารในถังปฏิกรณ์ (kmole) กับเวลา(นาที) ในระบบวงปิด 35
รูปที่ 5.3ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลของสาร C (kmole) กับเวลา(นาที) ที่ ค่าจูนต่าง ๆ 35
รูปที่ 5.3ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ (C) กับเวลา(นาที) .. 35
รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบการประมาณค่าแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลกับ ตัวกรองคาลมาน 36
รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบตัวประมาณค่าในระบบวงปิดที่มีระบบควบคุม เจเนริกโมเดล 37
รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) และระบบ ควบคุมเจเนริกโมเดล (GMC) 39
รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) และระบบ ควบคุมเจเนริกโมเดล (GMC) เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนลดลง 25 % 41
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงการประมาณค่าความร้อนในกระบวนการที่มีค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนลดลง 25% ควบคุมด้วยระบบควบคุม โมเดลพรีดิกทีฟ 41
รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) และระบบควบคุม เจเนริกโมเดล (GMC) เมื่อค่ามวลรวมเพิ่มขึ้น 20% 43
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงการประมาณค่าความร้อนในกระบวนการที่มีค่ามวลรวม เพิ่มขึ้น 20% ควบคุมด้วยระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ 43

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) และระบบควบคุมเจเนริกโมเดล (GMC) เมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 20 % 45

รูปที่ 5.12 กราฟแสดงการประมาณค่าความร้อนในกระบวนการที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 20% ควบคุมด้วยระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ 46

รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) และระบบควบคุมเจเนริกโมเดล (GMC) เมื่อค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 40 % 46

รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการประมาณค่าความร้อนในกระบวนการที่ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 40% ควบคุมด้วยระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ 47

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ 7

ตารางที่ 4.1 ความแปรปรวนร่วมของการประมาณค่า 29

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงเงื่อนไขของตัวแปรในถังปฏิกิริยาแบบกะ 30

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการประมาณค่าความร้อนโดยใช้ตัวกรองคาลมาน 35

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าคงที่ที่ใช้ในการจูนระบบควบคุมและระบบประมาณค่า 37

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผิดพลาด 40

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่ามวลรวมผิดพลาด 42

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่าอัตราการเกิดปฏิกริยาผิดพลาด 44

ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงค่าดัชนีสมรรถนะของการควบคุมในกรณีที่ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกริยาผิดพลาด 46

ตารางที่ 6.1 ตารางเปรียบเทียบอัลกอริธึมของระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟกับระบบควบคุมเจเนริกโมเดล 51

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ความหมายของตัวแปร

ρ	ความหนาแน่นของสาร (kg/m^3)
τ	ค่าเวลาคงที่ (Time Constant – min)
σ	ค่าความแปรปรวนในสมการสัญญาณรบกวน
ε	ค่าผิดพลาดที่อนุญาตให้มีการควบคุม
λ	ค่า Lagrance Multiplier
ΔH_i	ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยา (kJ/(kmol-°C))
A	พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน (m^2)
C_{pi}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสาร i
F	อัตราการไหลของน้ำผ่านผนังถังปฏิกิริยา (kg/s)
J	ฟังก์ชั่นเป้าหมาย
J	ดัชนีสมรรถนะของการออพติไมซ์
K	ค่าเกนของตัวกรองคาลมาน, ค่าเกนของระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ
k^1	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา
k^2	พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา
Kn	ค่าจูนของระบบควบคุมเจเนริกโมเดล
M	จำนวนโมลของสาร
Mc	จำนวนครั้งล่วงหน้าที่ทำการควบคุมในระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ
MW	น้ำหนักโมเลกุล (kg/kmol)
N	ตัวแปรสถานะที่กำหนดในแบบจำลองของตัวกรองคาลมาน
Pc	จำนวนครั้งล่วงหน้าที่ทำการคำนวณในระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ
Q	ความร้อน (kJ/min)
Qcmn	ค่าความแปรปรวนของตัวแปรสเตท m กับตัวแปรสเตท n ในระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ
Qmn	ค่าความแปรปรวนของตัวแปรสเตท m กับตัวแปรสเตท n ในระบบประมาณค่า
R	อัตราการเกิดปฏิกิริยา

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

ความหมายของตัวแปร

Rcmn	ค่าความแปรปรวนของตัวแปรวัด m กับตัวแปรสเตท n ในระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ
Rmn	ค่าความแปรปรวนของตัวแปรวัด m กับตัวแปรสเตท n ในระบบประมาณค่า
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
t	เวลา (min)
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($kW/m^2.^{\circ}C$)
V	ปริมาตร (m^3)
W	น้ำหนักของสาร (kg)
Y	สัญญาณขาออก

ความหมายของเวคเตอร์และเมตริกซ์

Ψ	เวลเตอร์แปลงระบบต่อเนื่องเป็นระบบดีสครีต
A	เวคเตอร์สัมประสิทธิ์ของเวคเตอร์สเตท
B	เวคเตอร์สัมประสิทธิ์ของเวคเตอร์สัญญาณขาเข้า
C	เวคเตอร์สัมประสิทธิ์ของเวคเตอร์สเตทสำหรับหาสัญญาณขาออก
Dnn	เมตริกซ์ดีเทอร์มิเนนท์ของเมตริกซ์ที่มีแถวและหลักเท่ากับ n
G	เวคเตอร์สัมประสิทธิ์ของเวคเตอร์สเตทแบบดีสครีต
H	เวคเตอร์สัมประสิทธิ์ของเวคเตอร์สัญญาณขาเข้าแบบดีสครีต
P	เมตริกซ์น้ำหนักของตัวแปรสเตท
Q	เมตริกซ์ความแปรปรวนของตัวแปรสเตท
R	เมตริกซ์ความแปรปรวนของตัวแปรวัด
x	เวคเตอร์สเตทของกระบวนการ
$\hat{x}$	เวคเตอร์สเตทของการประมาณ
$\tilde{x}$	เวคเตอร์ผลต่างของตัวแปรสเตทในกระบวนการกับการประมาณ
Y	เวคเตอร์เอาท์พุท

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

ความหมายของอักษรห้อย

0	ค่าเริ่มต้น
A	สาร A
B	สาร B
C	สาร C
D	สาร D
e	ค่าที่ได้จากการประมาณของตัวกรองคาลมาน
f	ค่าของตัวกรอง
j	บริเวณผนังถังปฏิกิริยา
k	ที่เวลา $k\Delta t$
m	ค่าที่วัดได้
max	ค่ามากที่สุด
min	ค่าน้อยที่สุด
r	ค่าภายในถังปฏิกิริยา
sp	ค่าที่กำหนดไว้