การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับขั้นตอนวิธีตัวกรองคาลมานด้วยโปรแกรม Borland C++

นายสงค์ บำรุงวงศ์ดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของภาคการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-503-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I18520748X

SOFTWARE DESIGN AND DEVELOPMENT FOR THE KALMAN FILTER ALGORITHM WITH BORLAND C++ PROGRAM

Mr. Song Bamrungwongdi

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

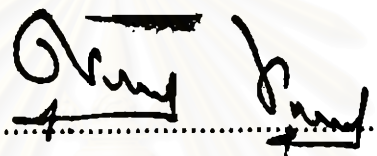
Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 974-332-503-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับขั้นตอนวิธีตัวกรองคาลมาน ด้วยโปรแกรม Borland C++
โดย	นายสงค์ บำรุงวงศ์ดี
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

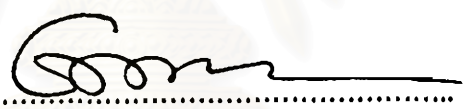
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ

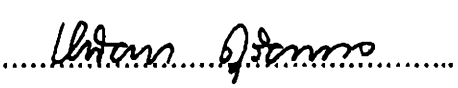
(รองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี)



..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ทศัยชนก ดุริยะบรรเลง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สงค์ บำรุงวงศ์ดี : การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับขั้นตอนวิธีตัวกรองคาลมานด้วยโปรแกรม Borland C++ (SOFTWARE DESIGN AND DEVELOPMENT FOR THE KALMAN FILTER ALGORITHM WITH BORLAND C++ PROGRAM) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ไพศาล กิตติศุภกร; 132 หน้า. ISBN 974-332-503-4.

เทคนิคตัวควบคุมไม่เชิงเส้นส่วนใหญ่สมมติว่าค่าของตัวแปรสเตตทั้งหมดในระบบที่สนใจสามารถหาค่าได้ แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปไม่ได้ที่จะทำการวัดตัวแปรสเตตได้ทั้งหมดและนอกจากนี้ค่าการวัดที่วัดได้มักจะมีสัญญาณรบกวนและ/หรือความผิดพลาดเชิงระบบปนมาด้วย ในสถานการณ์เช่นนี้ เทคนิคการประมาณค่าแบบลำดับ อย่างเช่น "ตัวกรองคาลมาน" ได้ถูกนำมาใช้เพื่อให้ค่าประมาณของค่ากระบวนการจริงจากค่าการวัดกระบวนการที่มีสัญญาณรบกวนและจากแบบจำลองกระบวนการที่เหมาะสม

ตัวกรองคาลมานได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในงานวิจัยต่าง ๆ มากกว่าเทคนิคการประมาณค่าสเตตอื่น ๆ เพราะว่าตัวกรองคาลมานเป็นตัวกรองแบบเหมาะสมที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วยชุดของสมการคณิตศาสตร์ซึ่งให้ผลการคำนวณ (แบบวนซ้ำ) ของวิธีกำลังสองน้อยสุดที่มีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าซอฟต์แวร์การประมาณค่าที่อาศัยตัวกรองคาลมานจะสามารถหาซื้อทางการค้าได้ แต่ไม่สะดวกต่อผู้ที่ใช้โปรแกรมหรือไม่น่าสนใจนัก

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือเพื่อออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีตัวกรองคาลมาน โปรแกรม kSTAPEN เป็นโปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้นด้วยภาษา Borland C++ ซึ่งช่วยทำให้ขั้นตอนวิธีง่ายขึ้นโดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนง่าย ๆ ในแต่ละขั้นตอนจะตรงกับหน้าต่างหรือไดอะล็อกทางด้านเข้า และได้ถูกนำมาทดสอบกับระบบควบคุมระดับของของเหลว, เครื่องปฏิกรณ์แบบกะชนิดคายความร้อนและเครื่องปฏิกรณ์ถังกวน ผลการเลียนแบบแสดงว่าโปรแกรม kSTAPEN สามารถประมาณค่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจสำหรับทุก ๆ กรณีที่ทดสอบ ซึ่งแสดงว่าสามารถนำมาใช้เป็นตัวอย่างในการประยุกต์ใช้การประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ได้

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต สงค์ บำรุงวงศ์ดี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ไพศาล กิตติศุภกร

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

3971914021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: KALMAN FILTER / STATE AND PARAMETER ESTIMATION

SONG BAMRUNGWONGDI : SOFTWARE DESIGN AND DEVELOPMENT FOR THE KALMAN FILTER ALGORITHM WITH BORLAND C++ PROGRAM. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. PAISAN KITTISUPAKORN, Ph.D. 132 pp. ISBN 974-332-503-4.

Most of the nonlinear controller techniques assume that values are available for all the state variables in the system of interest. However, in most practical, it is not feasible to measure all state variable and, furthermore, the measurements that are available often contain random noise signals and/or systematic errors. In these situations, sequential estimation techniques, as Kalman filter, are used to produce estimates of the true process value from noisy process measurement and a suitable process model.

The Kalman filter has received more attention in the recent literature than any other state estimation technique because it, an optimum filter, consists of a set of mathematical equations which provides an efficient computational (recursive) solution of the least-squares method. Although estimation software based on Kalman filter are commercially available, they are neither user-friendly nor attractive.

The purpose of this research is to design and develop a Kalman Filter State and Parameter Estimation (kSTAPEN) software. This program is written in Borland C++ Builder which simplifies the algorithm by dividing into simple steps with each step corresponding to an input window or dialog. And it is tested with a level control system, a batch exothermic reactor and a stirred-tank reactor. Simulation results show that the kSTAPEN can give satisfactorily good estimates for all cases. It can be used for the demonstration of both state and parameter estimation applications.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

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

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ ประธานกรรมการ, อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี และอาจารย์ ดร.หทัยชนก ดุริยะบรรเลง ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ขอขอบคุณพี่, เพื่อน และรุ่นน้องนิสิตร่วมสาขาวิชาการควบคุมกระบวนการที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และขอขอบคุณพี่สาวและพี่ชาย ซึ่งให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญภาพ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

คำอธิบายสัญลักษณ์ ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย 4

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย 4

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 บทนำและความมุ่งหมายในอดีต 6

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่า 9

2.2.1 การถดถอยเชิงเส้นแบบง่าย 9

2.2.2 การประมาณค่ากำลังสองน้อยสุด 10

2.2.3 ตัวประมาณค่าด้วยภาวะน่าจะเป็นสูงสุด 16

2.2.4 การประมาณค่าของเบส์ 20

2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองคาลมาน 21

3 ตัวกรองคาลมาน 27

3.1 ตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่อง 27

3.2 การแปลความหมายของตัวกรองคาลมาน 33

3.3 ตัวกรองคาลมานที่มีเวลาไม่ต่อเนื่อง 34
3.4 ความควบคุมได้และความสังเกตได้ 44
3.5 ตัวกรองคาลมานแบบขยืดขยาย 45

4 การออกแบบและสร้างโปรแกรม 51
4.1 การออกแบบขั้นต้น 51
4.2 ผังงานโปรแกรม 55
4.3 ผังโปรแกรมโครงสร้าง 63

5 ผลการทดสอบโปรแกรม kSTAPEN 68
5.1 ระบบถังพัก 68
5.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะชนิดคายความร้อน 77
5.3 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องชนิดคายความร้อน 90

6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 100
6.1 สรุปผลการวิจัย 100
6.2 วิจารณ์ผลการวิจัย 101
6.3 ข้อเสนอแนะ 102

รายการอ้างอิง 103
ภาคผนวก 106
ภาคผนวก ก ความรู้พื้นฐานของทฤษฎีระบบ 107
ภาคผนวก ข สัญญาณสุ่ม 115
ภาคผนวก ค ตัวควบคุมเจเนริกโมเดล 121
ภาคผนวก ง การใช้โปรแกรม kSTAPEN 125

ประวัติผู้วิจัย 132

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองสเตตที่แปรเปลี่ยนตามเวลาแบบเชิงเส้น 28
รูปที่ 3.2 แผนภาพบล็อกเมทริกซ์ของระบบตัวกรองคาลมานที่มีเวลาต่อเนื่องและ
ตัวประมาณ 31
รูปที่ 3.3 แผนภาพบล็อกของตัวประมาณค่าคาลมานที่มีเวลาไม่ต่อเนื่อง 41
รูปที่ 3.4 ผังงานของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย 50
รูปที่ 4.1 ผังงานแสดงการออกแบบโปรแกรมขั้นต้น 52
รูปที่ 4.2 ผังงานแสดงคลาสย่อยของคลาสเลือกตัวอย่างระบบ 53
รูปที่ 4.3 ผังงานลำดับชั้นของคลาสคำนวณทางคณิตศาสตร์ 56
รูปที่ 4.4 ผังงานโปรแกรมแสดงขั้นตอนการทำงาน 58
รูปที่ 4.5 ผังงานที่ได้จากการสังเคราะห์ 59
รูปที่ 4.6 ผังงานโปรแกรมแสดงโปรแกรมย่อยของการเลียนแบบระบบตัวอย่าง 60
รูปที่ 4.7 ผังงานโปรแกรมแสดงขั้นตอนการประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ 61
รูปที่ 4.8 ผังงานโปรแกรมย่อยของขั้นตอนการควบคุมระบบตัวอย่าง 62
รูปที่ 4.9 ผังงานโปรแกรมของโปรแกรม kSTAPEN 63
รูปที่ 4.10 ผังงานโปรแกรมย่อยของการประมาณค่าด้วยตัวกรองคาลมาน 65
รูปที่ 4.11 ผังงานโปรแกรมโครงสร้างที่ได้รับการดัดแปลงแล้ว 65
รูปที่ 5.1 ระบบถังพักของของเหลว 68
รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอที่สภาวะการทำงานปกติ—(ก) ผลการ
ควบคุมปริมาตร; (ข) ผลการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร q_2 71
รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลในกรณีปกติ—(ก) ผลการควบคุม
ปริมาตร; (ข) ผลการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร q_2 71
รูปที่ 5.4 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาล์วจากการวัดระดับของของเหลวในกรณีปกติ 72
รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลในกรณีแบบจำลองผิดพลาด—(ก) ผล
การควบคุมปริมาตร; (ข) ผลการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร q_2 73
รูปที่ 5.6 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาล์วในกรณีแบบจำลองผิดพลาด 74
รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองตัวควบคุมของระบบถังพักของเหลวในกรณีแพลนท์ผิดพลาด 74
รูปที่ 5.8 การปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร q_2 ในกรณีแพลนท์ผิดพลาด 75

รูปที่ 5.9 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาล์วในกรณีแพลนท์ผิดพลาด 75
รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอในกรณีมีสัญญาณรบกวน—(ก) ผลการควบคุมปริมาตร; (ข) ผลการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร q_2 76
รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลในกรณีมีสัญญาณรบกวน—(ก) ผลการควบคุมปริมาตร; (ข) ผลการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตร q_2 76
รูปที่ 5.12 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์วาล์วในกรณีมีสัญญาณรบกวน 77
รูปที่ 5.13 แผนภาพของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ 79
รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกรณีปกติ 84
รูปที่ 5.15 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกรณีปกติ ... 85
รูปที่ 5.16 การประมาณค่าความร้อนที่คายออกมาในกรณีปกติ 85
รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกรณีแบบจำลองผิดพลาด 86
รูปที่ 5.18 การประมาณค่าความร้อนที่คายออกมาในกรณีแบบจำลองผิดพลาด 87
รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองตัวควบคุมพีไอดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกรณีแพลนท์ผิดพลาด 87
รูปที่ 5.20 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกรณีแพลนท์ผิดพลาด 88
รูปที่ 5.21 การประมาณค่าความร้อนที่คายออกมาในกรณีแพลนท์ผิดพลาด 88
รูปที่ 5.22 ผลตอบสนองตัวควบคุมพีไอดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกรณีมีสัญญาณรบกวน 89
รูปที่ 5.23 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะกรณีมีสัญญาณรบกวน 89
รูปที่ 5.24 การประมาณค่าความร้อนที่คายออกมาในกรณีมีสัญญาณรบกวน 90
รูปที่ 5.25 ระบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง 90
รูปที่ 5.26 ผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอดีของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนในกรณีปกติ (ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ 93
รูปที่ 5.27 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนในกรณีปกติ—(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ 94
รูปที่ 5.28 การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกรณีปกติ—(ก) ความเข้มข้นของสารตั้งต้น; (ข) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติ 94

รูปที่ 5.29 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนกรณีแบบจำลองผิดพลาด—(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ 95
รูปที่ 5.30 การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกรณีแบบจำลองผิดพลาด (ก) ความเข้มข้นของสารตั้งต้น; (ข) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติ 96
รูปที่ 5.31 ผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอดีของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนในกรณีแพลนท์ผิดพลาด—(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ 96
รูปที่ 5.32 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนในกรณีแพลนท์ผิดพลาด—(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ 97
รูปที่ 5.33 การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกรณีแพลนท์ผิดพลาด (ก) ความเข้มข้นของสารตั้งต้น; (ข) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติ 97
รูปที่ 5.34 ผลตอบสนองตัวควบคุมแบบพีไอดีของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนในกรณีมีสัญญาณรบกวน—(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ 98
รูปที่ 5.35 ผลตอบสนองตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนในกรณีมีสัญญาณรบกวน—(ก) อุณหภูมิด้านขาออกเครื่องปฏิกรณ์; (ข) ตัวแปรปรับ 98
รูปที่ 5.36 การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกรณีมีสัญญาณรบกวน (ก) ความเข้มข้นของสารตั้งต้น; (ข) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติ 99
รูปที่ ข.1 สัญญาณแจกแจงปกติ 117
รูปที่ ข.2 ชุด (ทั้งชุด) ของสัญญาณสุ่ม 119
รูปที่ ข.2 ชุด (ทั้งชุด) ของสัญญาณสุ่ม 119
รูปที่ ค.1 ข้อกำหนดโพรไฟล์ของตัวควบคุมเจเนริกโมเดลโดยทั่วไป 124

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติทางกายภาพและข้อมูลกระบวนการ 80
ตารางที่ 5.2 สภาวะเริ่มต้นที่เวลา t = 0 80
ตารางที่ 5.3 ค่าคงที่ที่ใช้ในตัวควบคุมเจเนริกโมเดลของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ 85
ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์, สภาวะเริ่มต้นและสัญญาณรบกวน 94

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

1. ระบบถังพักของของเหลว

C = สัมประสิทธิ์วาล์ว

q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร

t = เวลา

V = ปริมาตร

สัญลักษณ์ตัวห้อยและตัวยก

1 = ด้านขาเข้า (หรือตัวแปรรบกวน)

2 = ตัวปรับ

3 = ด้านขาออก

สัญลักษณ์อักษรกรีก

ρ = ความหนาแน่นของสาร

2. เครื่องปฏิกรณ์แบบกะชนิดคายความร้อน

C_p = ความจุความร้อนมวลสารของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์

C_{pi} = ความจุความร้อนโมลสารของสารประกอบ i

H_i = ความร้อนของปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยา i

t = ความถี่ในการสุ่มของตัวควบคุมเจเนริกโมเดล

K_1 = ค่าคงที่ตัวที่ 1 ของตัวควบคุมเจเนริกโมเดล

K_2 = ค่าคงที่ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมเจเนริกโมเดล

k_i = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา i

k_i^1 = ค่าคงที่ตัวที่ 1 ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา i

k_i^2 = ค่าคงที่ตัวที่ 2 ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา i

M_i = จำนวนโมลของสารประกอบ i

MW_i = น้ำหนักมวลโมเลกุลของสารประกอบ i

Q = ความร้อนที่คายออกมาในเครื่องปฏิกรณ์

ρ = ความหนาแน่นของสารประกอบในเครื่องปฏิกรณ์

r = รัศมีของเครื่องปฏิกรณ์

R_i = อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยา i

T = อุณหภูมิ

t = เวลา

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์

V = ปริมาตร

W = น้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์

x = ตัวแปรควบคุม

สัญลักษณ์ตัวห้อยและตัวยก

1 = ปฏิกิริยาที่ 1

2 = ปฏิกิริยาที่ 2

A = สารประกอบ A

B = สารประกอบ B

C = สารประกอบ C

D = สารประกอบ D

j = แจ็คเก็ต

r = เครื่องปฏิกรณ์

(k) = ที่ช่วงเวลา k

sp = จุดปรับตั้ง

3. เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนชนิดคายความร้อน

A = พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

C = ความเข้มข้นของสารตั้งต้น

C_f = ความเข้มข้นของสารป้อน

C_p = ความจุความร้อนจำเพาะ

E = พลังงานกระตุ้น

H_i = ความร้อนของปฏิกิริยา

k(T) = กฎอัตราของอาร์เรเนียส

k_0 = ค่าคงที่ Arrhenius pre-exponential constant

q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร

R = ค่าคงที่แก๊ส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

t = เวลา

T = อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์

T_c = อุณหภูมิเครื่องหล่อเย็น

T_f = อุณหภูมิสายป้อน

u = อินพุตกระบวนการในรูปไร้มิติ

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

V = ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์

x_1 = ความเข้มข้นของสารตั้งต้นในรูปไร้มิต

x_2 = อุณหภูมิในรูปไร้มิติ

y = ตัวแปรวัด (อุณหภูมิในรูปไร้มิติ)

สัญลักษณ์ตัวห้อยและตัวยก

f = ภาวะสายป้อน

0 = ภาวะเริ่มต้น

สัญลักษณ์อักษรกรีก

β = ความร้อนของปฏิกิริยาในรูปไร้มิติ

δ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปไร้มิติ

γ = พลังงานกระตุ้นในรูปไร้มิติ

ϕ = จำนวน Damkohler

ρ = ความหนาแน่นของสารตั้งต้น

τ = เวลาในรูปไร้มิติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย