

การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบต่อเนื่องภายใต้ความไม่แน่นอน



นางสาวธิดาพันธ์ ช่อสัตยวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-485-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3 0 015 2545

I 18952963

OPTIMIZATION OF A CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR
UNDER UNCERTAINTY

Miss Tidapan Sursattayawong

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

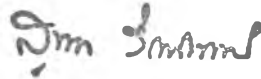
Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-332-485-2

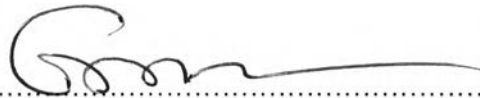
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องภายใต้ความไม่แน่นอน
โดย นางสาวธิดาพันธ์ ชื้อสัตยาวงศ์
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

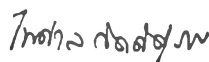


.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา กิรินันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



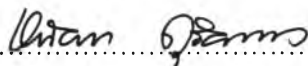
.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)



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



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



.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.หทัยชนก คุริยะบรรเลง)

ธิดาพันธ์ ชื่อสัตย์วงศ์: การออปติไมซ์เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องภายใต้
ความไม่แน่นอน (OPTIMIZATION OF A CONTINUOUS STIRRED TANK
REACTOR UNDER UNCERTAINTY) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผศ. ดร.ไพศาล กิตติสุขกร;
149 หน้า. ISBN 974-331-485-2

การออปติไมซ์เป็นวิธีการที่ช่วยในการออกแบบ และหาสภาวะปฏิบัติการของกระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่การออปติไมซ์โดยทั่วไปไม่ได้คำนึงถึงความไม่แน่นอน มักกำหนดให้ความไม่แน่นอนมีค่าคงที่ จึงไม่สามารถนำไปใช้ได้กับการปฏิบัติการจริง ซึ่งเกี่ยวข้องกับความไม่แน่นอนต่าง ๆ อาทิเช่น อุณหภูมิ, ความต้องการผลิตภัณฑ์, ค่าคงที่ของปฏิกิริยา, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, ความเข้มข้นของสาร, สภาวะแวดล้อมอื่น ๆ และค่าใช้จ่ายต่าง ๆ เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบกระบวนการ และหาสภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสม สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมจริง

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอน โดยออกแบบหาขนาดปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ และที่มีปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ซึ่งการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งได้ทั้งหมด 3 แบบด้วยกัน คือ การหาค่าแบบดีเทอร์มิเนติก, การหาค่าแบบสโตแคสติก และการหาค่าแบบผสมทั้งดีเทอร์มิเนติกและสโตแคสติก นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ความไวเพื่อดูผลของการเปลี่ยนแปลง ตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่มีผลต่อออปเจกทีฟฟังก์ชัน

จากผลการออปติไมซ์พบว่า การออปติไมซ์โดยคำนึงถึงผลของความไม่แน่นอนของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง จะได้ขนาดปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม ที่แตกต่างจากผลการออปติไมซ์กรณีปกติ หรือกรณีไม่มีความไม่แน่นอนขนาดปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้จากการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนสามารถใช้งานได้ภายในความไม่แน่นอนที่กำหนด

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต ธิดาพันธ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ไพศาล กิตติสุขกร
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

#3970698221 : MAJORCHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: OPTIMIZATION/ UNCERTAINTY/ CSTR/ STOCHASTIC/ DETERMINISTIC

TIDAPAN SURSATTAYAWONG: OPTIMIZATION OF A CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR UNDER UNCERTAINTY. THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. PAISAN KITTISUPAKORN, Ph.D. 149 p. ISBN 974-332-485-2.

Optimization is a method to help the designing and to find the operating conditions that give the best efficiency of a process. However, optimization generally does not consider process uncertainty. This uncertainty is usually assumed constant. It cannot be applied with the real plant. The optimal design of processes and the optimal operating conditions for real industries involve accounting for uncertainties such as temperature, product demand, rate constant of reaction, transfer coefficient, concentration, environmental condition and economic cost data.

Optimization under uncertainty in this research can be divided into three approaches: deterministic approach, stochastic and combined deterministic/ stochastic approach.

This research studies the optimization under uncertainty of a continuous stirred tank reactor (CSTR). Here, the volume of the CSTR with irreversible reaction and reversible reaction is designed to minimize the total cost. Moreover, this research studies the sensitivity analysis to show the result of variation of variables or parameters to the objective function.

The simulation results show that the optimal volume and optimal temperature range from the optimization under uncertainty differ from the results obtained by the optimization without uncertainty or normal case.

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

ปีการศึกษา..... 2542.....

ลายมือชื่อผู้ผลิต..... ธีตพันธ์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ไพศาล กิตติสุภกรณ์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติสุขภกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับความช่วยเหลือหลาย ๆ ด้าน และคำแนะนำในการพัฒนางานวิจัยด้วยดีตลอดมาจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ ประธานกรรมการ, อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี และ อาจารย์ ดร.หทัยชนก คุริยบรรเลง ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และได้ให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก

ขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่ และน้อง ๆ สำหรับกำลังใจที่ให้มา และความช่วยเหลือหลาย ๆ ด้าน
ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และพี่น้องในครอบครัวทุกคนที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฒ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ค
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	6
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 องค์ประกอบของปัญหาการอุปติไมซ์.....	8
2.2 การจำแนกวิธีอุปติไมซ์.....	10
2.3 ผลงานวิจัยที่ผ่านมาของการอุปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนในวิศวกรรมเคมี.....	22
2.3.1 ผลงานวิจัยการหาค่าแบบดีเทอร์มิเนติก.....	22
2.3.2 ผลงานวิจัยการหาค่าแบบสโตแคสติก.....	24
2.4 ผลงานวิจัยที่ผ่านมาของการอุปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนในวิศวกรรมด้านอื่น.....	26
2.5 บทสรุป.....	27
บทที่ 3 วิธีการอุปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอน	
3.1 ชนิดของความไม่แน่นอน.....	31
3.2 การอุปติไมซ์แบบ 2 ขั้นตอน.....	32

	หน้า
3.2.1 การหาค่าแบบดีเทอร์มิแนนต์.....	35
3.2.2 การหาค่าแบบสโตแคสติก.....	37
3.2.3 การหาค่าแบบผสมดีเทอร์มิแนนต์ และสโตแคสติก.....	43
3.3 การโปรแกรมควอดราติกอย่างเป็นลำดับ.....	46
3.4 บทสรุป.....	48
บทที่ 4 โปรแกรมออปติไมซ์ที่เขียนขึ้น	
4.1 การทดสอบโปรแกรมออปติไมซ์แบบดีเทอร์มิแนนต์กับกรณีศึกษา.....	50
4.2 การทดสอบโปรแกรมออปติไมซ์แบบสโตแคสติกกับกรณีศึกษา.....	56
4.3 บทสรุป.....	63
บทที่ 5 กรณีศึกษา 1: เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิริยาไม่ย้อนกลับ	
5.1 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิริยาไม่ย้อนกลับ.....	64
5.2 การออปติไมซ์ของ CSTR แบบมีปฏิริยาไม่ย้อนกลับ.....	67
5.2.1 การออปติไมซ์สภาวะปกติ.....	67
5.2.2 การออปติไมซ์ภายใต้พารามิเตอร์ไม่แน่นอน.....	68
5.2.3 การออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรไม่แน่นอน.....	70
5.2.4 การออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอน.....	72
5.3 ผลการออปติไมซ์ของ CSTR แบบมีปฏิริยาไม่ย้อนกลับ.....	74
5.3.1 วิเคราะห์ผลออปติไมซ์สภาวะปกติ.....	74
5.3.2 วิเคราะห์ผลออปติไมซ์ภายใต้พารามิเตอร์ไม่แน่นอน.....	76
5.3.3 วิเคราะห์ผลออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรไม่แน่นอน.....	76
5.3.4 วิเคราะห์ผลออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอน.....	77
5.4 การเปรียบเทียบวิธีออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอน.....	78
5.4.1 การออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอน แบบดีเทอร์มิแนนต์.....	78
5.4.2 การออปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอน แบบสโตแคสติก.....	79
5.4.3 ผลการเปรียบเทียบวิธีออปติไมซ์.....	81

	หน้า
5.5 ผลวิเคราะห์ความไว.....	82
5.6 บทสรุป.....	86
บทที่ 6 กรณีศึกษา 2: เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิริยาย้อนกลับได้	
6.1 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิริยาย้อนกลับได้.....	88
6.2 การออกแบบถังของ CSTR แบบมีปฏิริยาย้อนกลับได้.....	91
6.2.1 การออกแบบถังสภาวะปกติ.....	91
6.2.2 การออกแบบถังภายใต้พารามิเตอร์ไม่แน่นอน.....	92
6.2.3 การออกแบบถังภายใต้ตัวแปรไม่แน่นอน.....	94
6.2.4 การออกแบบถังภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอน.....	97
6.3 ผลการออกแบบถังของ CSTR แบบมีปฏิริยาย้อนกลับได้.....	99
6.3.1 วิเคราะห์ผลออกแบบถังสภาวะปกติ.....	100
6.3.2 วิเคราะห์ผลออกแบบถังภายใต้พารามิเตอร์ไม่แน่นอน.....	102
6.3.3 วิเคราะห์ผลออกแบบถังภายใต้ตัวแปรไม่แน่นอน.....	102
6.3.4 วิเคราะห์ผลออกแบบถังภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอน.....	103
6.4 การเปรียบเทียบวิธีออกแบบถังภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอน.....	103
6.4.1 การออกแบบถังภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอน แบบดีเทอร์มินิสติก.....	104
6.4.2 การออกแบบถังภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอน แบบสโตแคสติก.....	105
6.4.3 ผลการเปรียบเทียบวิธีออกแบบถัง.....	107
6.5 ผลวิเคราะห์ความไว.....	108
6.6 บทสรุป.....	112
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง.....	113
รายการอ้างอิง.....	115

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ความน่าจะเป็นที่เกี่ยวข้อง.....	122
ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่เขียนขึ้น.....	129
ประวัติผู้เขียน.....	149

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการแบ่งวิธีการออปติไมซ์ทางคณิตศาสตร์.....	12
รูปที่ 2.2 การจำแนกการโปรแกรมแบบจำนวนเต็ม.....	15
รูปที่ 3.1 อธิบายความหมายการออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอน.....	31
รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมวิธีแก้ปัญหกออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนแบบดีเทอร์มินิสติก.....	37
รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งของจุดควอดราเจอร์ในขอบเขตปฏิบัติการ.....	40
รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมวิธีแก้ปัญหกออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอนแบบสโตแคสติก.....	42
รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมวิธีแก้ปัญหกออปติไมซ์ภายใต้ความไม่แน่นอน แบบผสมดีเทอร์มินิสติกและสโตแคสติก.....	45
รูปที่ 4.1 ท่อพร้อมปั๊มเซนติฟิว (Pipeline with a centrifuge pump).....	51
รูปที่ 5.1 เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ $A \rightarrow B$	65
รูปที่ 5.2 ไดอะแกรมวิธีแก้ปัญหกออปติไมซ์ CSTR ที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ กรณีพารามิเตอร์มีความไม่แน่นอน.....	69
รูปที่ 5.3 ไดอะแกรมวิธีแก้ปัญหกออปติไมซ์ CSTR ที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ กรณีตัวแปรมีความไม่แน่นอน.....	71
รูปที่ 5.4 ไดอะแกรมแก้ปัญหกออปติไมซ์ CSTR ที่มีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ กรณีตัวแปรและพารามิเตอร์มีความไม่แน่นอน.....	73
รูปที่ 5.5 ภาพสามมิติฟังก์ชันค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบ CSTR ที่มีปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ กรณีปกติ.....	75
รูปที่ 5.6 แสดงผลการออปติไมซ์กรณีปกติของ CSTR ที่มีปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ.....	75
รูปที่ 5.7 การจำลองของกระบวนการ CSTR แบบปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ.....	76
รูปที่ 5.8 เส้นกราฟความไวของ CSTR แบบปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ เมื่อค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลง.....	83
รูปที่ 5.9 เส้นกราฟความไวของ CSTR แบบปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ เมื่อสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลง.....	84
รูปที่ 5.10 เส้นกราฟความไวของ CSTR แบบปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ เมื่ออัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลง.....	84

รูปที่ 5.11	เส้นกราฟความไวของ CSTR แบบปฏิริยาไม่ย้อนกลับ เมื่ออุณหภูมิของสายป้อนมีการเปลี่ยนแปลง.....	85
รูปที่ 6.1	เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องที่เกิดปฏิริยา $A \leftrightarrow B$	88
รูปที่ 6.2	ไดอะแกรมวิธีแก้ปัญหาค่าพารามิเตอร์ CSTR ที่มีปฏิริยาย้อนกลับได้ กรณีพารามิเตอร์มีความไม่แน่นอน.....	94
รูปที่ 6.3	ไดอะแกรมวิธีแก้ปัญหาค่าพารามิเตอร์ CSTR ที่มีปฏิริยาย้อนกลับได้ กรณีตัวแปรที่มีความไม่แน่นอน.....	96
รูปที่ 6.4	ไดอะแกรมวิธีแก้ปัญหาค่าพารามิเตอร์ CSTR ที่มีปฏิริยาย้อนกลับได้ กรณีตัวแปรและพารามิเตอร์มีความไม่แน่นอน.....	98
รูปที่ 6.5	ภาพสามมิติฟังก์ชันค่าใช้จ่ายทั้งหมดของ CSTR ที่มีปฏิริยาย้อนกลับได้ กรณีปกติ.....	100
รูปที่ 6.6	แสดงผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ปกติของ CSTR ที่มีปฏิริยาย้อนกลับได้.....	101
รูปที่ 6.7	จำลองกระบวนการ CSTR แบบปฏิริยาย้อนกลับได้.....	101
รูปที่ 6.8	เส้นกราฟความไวของ CSTR แบบปฏิริยาย้อนกลับได้ เมื่อสัมประสิทธิ์อัตราเกิดปฏิริยาไปข้างหน้ามีการเปลี่ยนแปลง.....	109
รูปที่ 6.9	เส้นกราฟความไวของ CSTR แบบปฏิริยาย้อนกลับได้ เมื่อสัมประสิทธิ์อัตราเกิดปฏิริยาย้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลง.....	110
รูปที่ 6.10	เส้นกราฟความไวของ CSTR แบบปฏิริยาย้อนกลับได้ เมื่อความต้องการของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลง.....	111
รูปที่ 6.11	เส้นกราฟความไวของ CSTR แบบปฏิริยาย้อนกลับได้ เมื่ออุณหภูมิของสายป้อนมีการเปลี่ยนแปลง.....	111
รูปที่ ก.1	การกระจายความน่าจะเป็นแบบปกติ.....	123

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	17
ตารางที่ 2.2	28
ตารางที่ 2.3	30
ตารางที่ 4.1	51
ตารางที่ 4.2	52
ตารางที่ 4.3	55
ตารางที่ 4.4	58
ตารางที่ 4.5	59
ตารางที่ 4.6	59
ตารางที่ 4.7	60
ตารางที่ 4.8	62
ตารางที่ 4.9	62
ตารางที่ 5.1	66
ตารางที่ 5.2	68
ตารางที่ 5.3	70
ตารางที่ 5.4	74
ตารางที่ 5.5	77
ตารางที่ 5.6	77
ตารางที่ 5.7	79
ตารางที่ 5.8	80

	หน้า
ตารางที่ 5.9 ผลการอปติไมซ์ภายใต้ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอน จากวิธีออปติไมซ์ต่าง ๆ.....	81
ตารางที่ 5.10 แสดงค่าวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ เมื่อความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลง.....	83
ตารางที่ 5.11 แสดงค่าวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ เมื่อสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลง.....	83
ตารางที่ 5.12 แสดงค่าวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ เมื่ออัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลง.....	84
ตารางที่ 5.13 แสดงค่าวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ เมื่ออุณหภูมิของสายป้อนมีการเปลี่ยนแปลง.....	85
ตารางที่ 5.14 ความชันของกราฟวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับ.....	86
ตารางที่ 6.1 ข้อมูลของเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวน ปฏิกิริยา $A \leftrightarrow B$	90
ตารางที่ 6.2 พารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอน.....	92
ตารางที่ 6.3 ตัวแปรที่มีความไม่แน่นอน.....	95
ตารางที่ 6.4 ผลออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาย้อนกลับได้.....	99
ตารางที่ 6.5 ขอบเขตของ T_i ที่ $Demand^{91}$ ของจุดเหมาะสม ของกรณีในตัวแปรที่มีความไม่แน่นอน.....	102
ตารางที่ 6.6 ขอบเขตของ T_i ที่ $Demand^{91}$ ของจุดเหมาะสม กรณีทั้งตัวแปรและพารามิเตอร์มีความไม่แน่นอน.....	103
ตารางที่ 6.7 สถานการณ์ของความไม่แน่นอน.....	104
ตารางที่ 6.8 ลักษณะความไม่แน่นอนวิธีสโตแคสติก.....	106
ตารางที่ 6.9 ผลการออปติไมซ์ตัวแปรและพารามิเตอร์ไม่แน่นอนจากวิธีออปติไมซ์ต่าง ๆ....	107
ตารางที่ 6.10 แสดงค่าวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาย้อนกลับได้ เมื่อสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีการเปลี่ยนแปลง.....	109
ตารางที่ 6.11 แสดงค่าวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาย้อนกลับได้ เมื่อสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลง.....	110
ตารางที่ 6.12 แสดงค่าวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิกิริยาย้อนกลับได้ เมื่อความต้องการของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลง.....	110

หน้า

ตารางที่ 6.13 แสดงค่าวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบมีปฏิริยาได้ย้อนกลับ เมื่ออุณหภูมิของสายป้อนมีการเปลี่ยนแปลง.....	111
ตารางที่ 6.14 ความชันของกราฟวิเคราะห์ความไวของ CSTR แบบปฏิริยาได้ย้อนกลับได้.....	112
ตารางที่ ก.1 แสดงคุณสมบัติที่สำคัญบางประการของการแจกแจงปกติ.....	124
ตารางที่ ก.2 ค่าวิกฤตของระดับความเชื่อมั่นต่าง ๆ.....	128

คำอธิบายสัญลักษณ์

a	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (the coefficient of friction factor)
A	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน
B	เฮซเซียนเมตริกซ์ของฟังก์ชันลากรังจ์ที่เกี่ยวข้อง (Hessian of the Lagrangian)
C	ฟังก์ชันค่าใช้จ่าย หรือออปเจกทีฟฟังก์ชัน
\bar{C}	ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายคาดหวัง หรือเฉลี่ย (the expected cost)
C_A	ความเข้มข้นของสาร A ในถัง และในสายออกจากเครื่องปฏิกรณ์
C_{Ai}	ความเข้มข้นของสาร A ในสายป้อน
C_B	ความเข้มข้นของสาร B ในถัง และในสายออกจากเครื่องปฏิกรณ์
C_{Bi}	ความเข้มข้นของสาร B ในสายป้อน
C_p	ค่าความจุความร้อนของสาร
d	เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ
D	ขนาดของท่อ
$E\{\cdot\}$	ค่าคาดหวัง หรือค่าเฉลี่ย (the expected value)
E_a	พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ
E_{a_1}	พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้าของปฏิกิริยาย้อนกลับได้
$E_{a_{-1}}$	พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาย้อนกลับได้
f	เวกเตอร์อสมการข้อจำกัดที่จัดตัวแปรสเตทแล้ว
f_1^U	เวกเตอร์ของอสมการข้อจำกัด f ที่แทนความไม่แน่นอนด้วย θ_1^U
f_1^L	เวกเตอร์ของอสมการข้อจำกัด f ที่แทนความไม่แน่นอนด้วย θ_1^L
$f_2^{U_{q_1}}$	เวกเตอร์ของอสมการข้อจำกัด f ที่แทนความไม่แน่นอนด้วย $\theta_1^{q_1}$ และ $\theta_2^{U_{q_1}}$
$f_2^{L_{q_1}}$	เวกเตอร์ของอสมการข้อจำกัด f ที่แทนความไม่แน่นอนด้วย $\theta_1^{q_1}$ และ $\theta_2^{L_{q_1}}$
g	เวกเตอร์ข้อจำกัดที่เป็นอสมการ (inequality constraint): $[g_1, g_2, \dots, g_m]^T$
h	เวกเตอร์ข้อจำกัดที่เป็นสมการ (equality constraint): $[h_1, h_2, \dots, h_l]^T$
$J(\theta)$	ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นของความไม่แน่นอน θ
$J(\theta_1^{q_1}, \theta_2^{q_2})$	ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นร่วมของความไม่แน่นอน $\theta_1^{q_1}$ และ $\theta_2^{q_2}$
k	สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยา
k_1	สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า

k_{-1}	สัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ
$N(\mu, \sigma^2)$	ฟังก์ชันการกระจายแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ย μ และความแปรปรวน σ^2
P	ความดันขาออกปั๊ม (outlet pressure)
\mathbf{P}	เวกเตอร์ผลต่างระหว่างตัวแปรตัดสินใจในแต่ละรอบการคำนวณซ้ำ
q	อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์
q_1	ตำแหน่งจุดควอดราเจอร์: $q_1 = 1, 2, 3, \dots, Q$
R	ค่าคงที่ของก๊าซ
T	อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์
T_i	อุณหภูมิของสายป้อน
T_c	อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด
V	ปริมาตรของถังกวน
w^i	แฟกเตอร์น้ำหนักของจุดควอดราเจอร์ที่ i มีค่าตามที่สูตรเกาส์เซียนกำหนด ($i = 1, 2, 3, \dots, Q$)
W	พลังงานของปั๊มที่ใช้ในขณะปฏิบัติการ
\hat{W}	พลังงานที่ติดตั้งของปั๊ม (the installed power of the pump)
\mathbf{x}	เวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจ (decision variable): $[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$
\mathbf{z}	เวกเตอร์ตัวแปรควบคุม
$\mathbf{z}^{q_1 q_2}$	เวกเตอร์ตัวแปรควบคุมของความไม่แน่นอน $\theta_1^{q_1}$ และ $\theta_2^{q_1 q_2}$
α	ระยะห่างของตัวแปรตัดสินใจ (step length)
γ	ผลต่างของ gradient of the Lagrangian
ΔH	ค่าความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา
ε	ค่าความผิดพลาด (error) ของการคำนวณซ้ำ (iteration)
η	ค่าประสิทธิภาพของปั๊ม
θ	เวกเตอร์ความไม่แน่นอน
θ	ตัวแปรความไม่แน่นอน
θ_s	เวกเตอร์ของตัวแปรความไม่แน่นอนแบบสโตแคสติก
θ_d	เวกเตอร์ของตัวแปรความไม่แน่นอนแบบดิเทอร์มินิสติก
θ_1^U	ขอบเขตบนของความไม่แน่นอนตัวที่ 1
θ_1^L	ขอบเขตล่างของความไม่แน่นอนตัวที่ 1

θ_2^U	ขอบเขตบนของความไม่แน่นอนตัวที่ 2
θ_2^L	ขอบเขตล่างของความไม่แน่นอนตัวที่ 2
$\theta_1^{q_1}$	ค่าความไม่แน่นอนตัวที่ 1 ณ จุดควอดราเจอร์ที่ q_1
$\theta_2^{q_1q_2}$	ค่าความไม่แน่นอนตัวที่ 2 ณ จุดความไม่แน่นอนตัวที่ 1 อยู่ที่ตำแหน่งควอดราเจอร์ q_1 ($q_1 = 1, 2, 3, \dots, Q_1$) และความไม่แน่นอนตัวที่ 2 อยู่ที่ตำแหน่งควอดราเจอร์ q_2 ($q_2 = 1, 2, 3, \dots, Q_2$)
σ^p	แฟกเตอร์น้ำหนัก (weighting factor) ของแต่ละสถานการณ์ θ^p ($p = 1, 2, \dots, P$)
θ	เวกเตอร์ของตัวแปร หรือพารามิเตอร์ที่มีความไม่แน่นอน
μ	ค่าเฉลี่ย (mean) หรือ ค่าปกติ
$v_1^{q_1}$	พารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งจุดควอดราเจอร์มีค่าอยู่ในช่วง $[-1, 1]$
ρ	ความหนาแน่นของสารในถังกวน
σ^2	ค่าความแปรปรวน (variance)
Ψ	ฟังก์ชันเมริท (Merit function)