

การควบคุมคุณภาพของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะใน
กระบวนการผลิตเอทานอลโดยใช้การควบคุมแบบเจเนเนริกโมเดล



นาย ณรงค์ ดวงเกตุ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

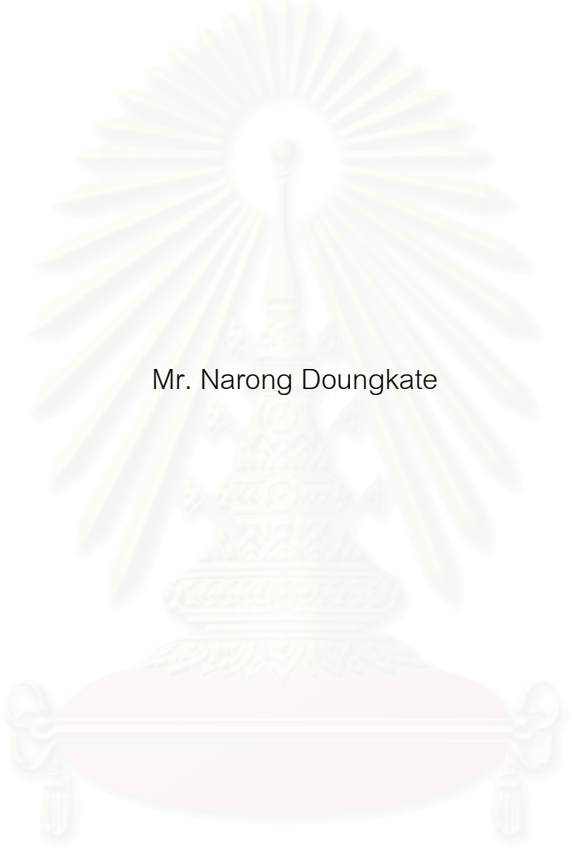
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2387-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TEMPERATURE CONTROL OF BATCH REACTOR
IN ETHANOL PRODUCTION BY GENERIC MODEL CONTROL



Mr. Narong Doungkate

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2002

ISBN 974-17-2387-3

ณรงค์ ดวงเกตุ : การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกระบวนการผลิตเอทานอล
 โดยใช้การควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล. (TEMPERATURE CONTROL OF BATCH
 REACTOR IN ETHANOL PRODUCTION BY GENERIC MODEL) อ. ที่ปรึกษา :
 รศ.ดร.ไพศาล กิตติศุภกร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : นิรัตน์ คุณสมบัติ, 93 หน้า.
 ISBN 974-17-2387-3.

การควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล เป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการ มีข้อได้
 เปรียบคือ สามารถนำแบบจำลองไม่เชิงเส้นของกระบวนการมาใช้ในโครงสร้างการควบคุมได้โดยตรง
 ส่งผลให้สมรรถนะในการควบคุมดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี ดังนั้นปัญหาที่สำคัญในการควบคุม
 อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการผลิตเอทานอลน่าจะได้รับ
 การศึกษาเป็นอย่างยิ่ง และเป็นการประยุกต์ใช้ความรู้การควบคุมขั้นสูงกับกระบวนการทางเทคโนโลยี
 ชีวภาพ

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลกับกระบวนการผลิตเอ
 ธานอล โดยเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดี ร่วมกับการใช้งานตัวประมาณค่าสเตทและพารา
 มิเตอร์ โดยอาศัยดัชนีชี้วัดคือ ค่าไอเอสอี เพื่อเป็นการศึกษาสมรรถนะของตัวควบคุมทั้งสองแบบ เมื่อ
 เกิดความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับกระบวนการจริง ที่สภาวะปกติผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า
 สมรรถนะในการควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลร่วมกับตัวประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ ให้สมรรถนะ
 ที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
 สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
 ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต.....
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4271423821 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: GENERIC MODEL CONTROLLER / ETHANOL / PID / BATCH REACTOR / KALMAN FILTER

NARONG DOUNGKATE : THESIS TITLE. TEMPERATURE CONTROL OF BATCH REACTOR IN ETHANOL PRODUCTION BY GENERIC MODEL THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.PAISAN KITTISUPAKORN, THESIS COADVISOR : NIRUT KHUNASOMBUT , 93 pp. ISBN 947-17-2387-3.

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 are used directly in the GMC control formulation. The performance of the GMC controller is higher than PID controller. Therefore, the problem of ethanol production is a varied temperature between reaction. There have been attempted in the development of the GMC applicability for a BIO process.

This research presents the applicability of the GMC controller with kalman filter for ethanol production and compared with a PID controller. The performance of both controller are evaluated by integral square of error .Simulation results have shown that, In normal case, the GMC and PID controllers can control the temperature of the reactor at desired set point. However, in the parameter of plant/model mismatch, the GMC controller with kalman Filter provides better control response than the PID controller does.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department of Chemical Engineering
Field of study Chemical Engineering
Academic year 2002

Student's signature.....
Advisor's signature.....
Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำต่าง ๆ จากท่าน ตลอดจนข้อเสนอแนะและแนวความคิดต่าง ๆ ของงานวิจัยด้วยดีตลอดมาจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ ประธานกรรมการสอบ, อาจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความสนใจและได้ให้ข้อคิดและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยฉบับนี้

ขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เป็นแหล่งความรู้ให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาค้นคว้าตลอดการทำงานวิจัย และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือในด้านการศึกษาและการทำงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จการศึกษา

ขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่ และน้อง ๆ ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ผู้ทำการวิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา, มารดา และผู้มีอุปการะคุณที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1. มूलเหตุจูงใจและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3. ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2. ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	5
2.1. งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับปฏิกิริยาการเกิดเอทานอล จากการสลายตัวของเซลลูโลสร่วมกับการหมัก.....	5
2.2. งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับปฏิกิริยาการสลายตัวของเซลลูโลส.....	7
2.3. งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของ เอนไซม์กับอุณหภูมิ.....	8
2.4. งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับปฏิกิริยาการคายความร้อนใน ระหว่างการหมัก.....	10
2.5. งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับตัวควบคุมจีเอ็มซี.....	11
2.6. งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับตัวกรองคาลมาน.....	17
3. การควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการผลิตเอทานอลจากเซลลูโลส และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	20
3.1. คุณสมบัติและแหล่งของสารจำพวกเซลลูโลส.....	20

3.2.กลไกการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตเอทานอลและ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	22
3.3.แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม ของเอนไซม์และเชื้อจุลินทรีย์กับอุณหภูมิ.....	28
3.4.แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการคายพลังงานความร้อน.....	32
3.5.ทฤษฎีการควบคุมแบบพีไอดี.....	33
3.6.ทฤษฎีการควบคุมแบบเงินเนริกโมเดล.....	38
3.7.ทฤษฎีตัวกรองคาลมาน.....	42
3.8.แผนผังการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแมทแล็บ.....	51
4.การควบคุมคุณภาพของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกระบวนการผลิตเอทานอล.....	53
4.1.แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ.....	53
4.2.การใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีควบคุมคุณภาพของถังปฏิกรณ์แบบกะ.....	61
4.3.การใช้ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีควบคุมคุณภาพของถังปฏิกรณ์แบบกะ.....	63
4.4.การใช้ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานควบคุมคุณภาพของถังปฏิกรณ์ แบบกะ.....	65
4.5.การทดสอบสมรรถนะตัวควบคุมพีไอดีเมื่อเกิดความคลาด เคลื่อนระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลอง.....	67
4.6.การทดสอบสมรรถนะตัวควบคุมจีเอ็มซีเมื่อเกิดความคลาด เคลื่อนระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลอง.....	73
4.7.การทดสอบสมรรถนะตัวควบคุมจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน เมื่อเกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลอง.....	79
4.8 วิเคราะห์ผลการจำลอง.....	85
5.บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1.สรุปผล.....	88
5.2.ข้อเสนอแนะ.....	89

สารบัญ (ต่อ)

ณ

หน้า

รายการอ้างอิง.....	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	93



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.1.กลไกการเปลี่ยนกลูโคสให้เป็นเอทานอลภายในเซลล์.....	23
รูปที่ 3.2.ลักษณะการเกิดปฏิกิริยา SSF.....	24
รูปที่ 3.3.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ State Variable กับเวลา hr.....	26
รูปที่ 3.4.เปรียบเทียบผลการคำนวณจากสมการ 2.4 กับข้อมูลจากตารางที่ 3.4.....	26
รูปที่ 3.5.เปรียบเทียบผลการคำนวณจากสมการ 2.4 กับข้อมูลจากตารางที่ 3.6.....	26
รูปที่ 3.6.รูปแสดงลักษณะผลตอบสนองของตัวควบคุมจีเอ็มซีที่ค่า ζ ต่างๆกัน.....	32
รูปที่ 3.7.แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมาน.....	32
รูปที่ 3.8.แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย.....	32
รูปที่ 3.9.แผนผังโครงสร้างการเขียนโปรแกรม.....	34
รูปที่ 4.1.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ.....	61
รูปที่ 4.2.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตท.....	62
รูปที่ 4.3.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ.....	61
รูปที่ 4.4.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตท.....	62
รูปที่ 4.5.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ.....	61
รูปที่ 4.6.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตท.....	62
รูปที่ 4.7.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ.....	61
รูปที่ 4.8.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตท.....	62
รูปที่ 4.9.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ.....	61
รูปที่ 4.10.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตท.....	62
รูปที่ 4.11.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ.....	61
รูปที่ 4.12.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตท.....	62
รูปที่ 4.13.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ.....	61
รูปที่ 4.14.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตท.....	62
รูปที่ 4.15.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ.....	61
รูปที่ 4.16.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตท.....	62
รูปที่ 4.17.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ.....	61
รูปที่ 4.18.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตท.....	62

รูปที่ 4.19.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ.....	61
รูปที่ 4.20.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตรท.....	62
รูปที่ 4.21.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ.....	61
รูปที่ 4.22.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตรท.....	62
รูปที่ 4.23.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับ.....	61
รูปที่ 4.24.กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตรท.....	62
รูปที่ 4.27.แผนผังการไหลของข้อมูลสำหรับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.....	59
รูปที่ 4.31.ผังระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	53



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1.1. ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
ตารางที่ 2.1. สรุปงานลักษณะงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาการเกิดเอธานอล จากการสลายตัวของเซลลูโลสร่วมกับการหมัก.....	6
ตารางที่ 2.2. สรุปงานลักษณะงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาการสลายตัวของ เซลลูโลส.....	8
ตารางที่ 2.3. พารามิเตอร์สำหรับสมการ(2.3)เป็นข้อมูล ของ Beta-Glucosidase.....	10
ตารางที่ 2.4. พารามิเตอร์สำหรับสมการ(2.4)เป็นข้อมูล ของ Beta-Glucosidase.....	10
ตารางที่ 2.5. สรุปงานลักษณะงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาการคายความร้อนในระหว่าง การหมัก.....	11
ตารางที่ 2.6. สรุปงานลักษณะงานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมจีเอ็มซี.....	17
ตารางที่ 2.7. สรุปงานลักษณะงานวิจัยเกี่ยวกับตัวกรองคาลมาน.....	19
ตารางที่ 3.1. ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรบางชนิด.....	21
ตารางที่ 3.2. สัดส่วนองค์ประกอบของขยะชุมชนประเทศไทย.....	21
ตารางที่ 3.3. แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง.....	27
ตารางที่ 3.4. แสดง Activity-Temperature Profiles ของเอนไซม์เซลลูเลส.....	28
ตารางที่ 3.5. ค่าพารามิเตอร์ของสมการ Melting Curves ของเอนไซม์เซลลูเลส.....	29
ตารางที่ 3.6. แสดง Activity-Temperature Profiles ของเชื้อ <i>S.carlbergensis</i> FT14.....	30
ตารางที่ 3.7. ค่าพารามิเตอร์ของสมการ Melting Curves ของเชื้อ <i>S.carlbergensis</i> FT14.....	31
ตารางที่ 4.1. แสดงค่าพารามิเตอร์ปรับจูนสำหรับตัวกรองคาลมาน.....	60
ตารางที่ 5.1. แสดงผลการทดสอบสมรรถนะของ Controller ทั้งสองแบบ.....	87

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

K_{rd}	=	ค่าคงที่การเข้าทำปฏิกิริยา
$[D]$	=	เอนไซม์ที่ไม่แอคทีฟ
$[N]$	=	เอนไซม์ที่แอคทีฟ
$[I]$	=	เอนไซม์ที่เสื่อมสภาพ
$V_o(T)$	=	ความเร็วในการเข้าทำปฏิกิริยา
K_{cat}	=	ค่าคงที่ปฏิกิริยา
E_o	=	ความเข้มข้นของเอนไซม์
E_a	=	ค่าพลังงานภายในของเอนไซม์
R	=	ค่าคงที่ก๊าซ
A	=	ค่าคงที่อาเรเนียสของเชื้อจุลินทรีย์ 7.679×10^{30}
ΔH_m^O	=	ค่าเอนทัลปีของการหลอมละลาย
ΔC_p^O	=	ค่าความจุความร้อน
T_m	=	ค่าอุณหภูมิการหลอมละลาย
C_p	=	ความจุความร้อน (kJ/kg·C°)
ΔH_{Fi}	=	ปริมาณความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา, (kJ/mol)
u	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, (kJ/h m ² ·C°)
T	=	อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (C°)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1. มุลเหตุจูงใจและที่มาของงานวิจัย

สถานการณ์ปัจจุบันราคาน้ำมันที่สูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย และเป็นปัญหาสำคัญทำให้ประเทศขาดดุลทางการค้า เนื่องจากประเทศไทยยังต้องอาศัยการนำเข้าน้ำมันดิบเป็นหลัก แนวความคิดในการลดการใช้น้ำมันเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหา และการเปลี่ยนสัดส่วนโดยนำสารเคมีจำพวกเอทานอลมาผสม เพื่อเพิ่มค่าออกเทนก็เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดการใช้สารช่วยเพิ่มค่าออกเทน และเป็นการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาเพิ่มมูลค่าของสินค้าให้สูงขึ้น โดยอาศัยความรู้ทางด้านวิศวกรรมเคมี

การผลิตเอทานอลโดยอาศัยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นกระบวนการที่เหมาะสมประการหนึ่ง เพราะในประเทศไทยมีวัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตรมากมาย ที่สามารถนำมาผลิตเป็นเอทานอลได้ แต่ปัญหาสำคัญที่พบคือต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง ดังนั้นในการวิจัยจึงมุ่งศึกษาวิจัย และพัฒนากระบวนการผลิตเอทานอล ด้วยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ เพื่อให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำลงจนสามารถแข่งขันได้ ซึ่งแนวทางหนึ่งคือ การรักษาอุณหภูมิของปฏิกิริยาให้คงที่ โดยอาศัยการควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์ให้เหมาะสมต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์และเอนไซม์

ช่วงเวลาที่ผ่านมามีงานวิจัยทางการควบคุมกระบวนการมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เทคนิค การควบคุมแบบใหม่ถูกคิดค้นและปรับปรุงขึ้นมาทดแทนการควบคุมแบบดั้งเดิม เพื่อผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ในขณะที่การศึกษากระบวนการทางคณิตศาสตร์ของระบบทางอุตสาหกรรมเคมีก็มีมาอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน ทำให้เกิดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบต่างๆ ขึ้นมากมาย ด้วยความพร้อมของแบบจำลองที่มีอยู่และความสามารถในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ในยุคปัจจุบัน ทำให้การควบคุมที่อาศัยแบบจำลองของระบบหรือที่เรียกว่า การควบคุมแบบฐานจำลอง (Model Based Control) นั้นมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ในช่วงสิบกว่าปีที่ผ่านมาการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองของระบบนี้นับว่า เป็นการควบคุมที่ให้ความสำคัญขั้นที่ถูกต้องที่สุดระหว่างตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม ทำให้ตัวควบคุมทราบแนวโน้มในการปรับเปลี่ยนตัวแปรปรับ เพื่อให้เหมาะสมที่จะควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการ

ในการผลิตเอทานอล ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญ ที่ยากต่อการควบคุมให้ได้ตามสภาวะที่ต้องการได้ตลอดเวลา เท่าที่ผ่านมามีการใช้

เทคนิคการควบคุมแบบเชิงเส้นเช่น เทคนิคการควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งค่อนข้างจำกัดสำหรับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ผลการควบคุมไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร ดังนั้นการควบคุมเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น มีความทนทานและสามารถประยุกต์ใช้งานได้จริงคือ การนำเทคนิคการควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (Generic Model Control, GMC) มาประยุกต์ใช้ เพื่อเป็นการแก้ไขข้อดีของการควบคุมแบบเดิม ซึ่งการควบคุมแบบใหม่นี้ต้องอาศัยหลักพื้นฐานของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เชื่อถือได้ มาใช้ในการควบคุมข้อดีของการควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลคือ การออกแบบค่อนข้างง่าย สามารถนำสมการไม่เป็นเชิงเส้นมาใช้ได้ทันที ทำให้ลดความยุ่งยากของสมการลงไป อีกทั้งมีความแม่นยำในการควบคุมสูง และมีเสถียรภาพที่ดีกว่าวิธีแบบเดิม

การผลิตเอทานอลจากปฏิกิริยาการเกิดเอทานอลจากการสลายตัวของเซลลูโลสร่วมกับ การหมัก (Simultaneous Saccharification and Fermentation, SSF) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส ณ.สภาวะนี้ ทำให้เกิดการคายความร้อนอย่างรุนแรงในช่วงแรกซึ่ง ยากต่อการควบคุม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลกระทบต่ออัตราการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์และ เอนไซม์ รวมทั้งส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของเชื้อจุลินทรีย์และเอนไซม์อย่างรวดเร็ว อีกทั้ง ในการควบคุมแบบอื่น ๆ อาจไม่เหมาะสมต่อระบบที่มีลักษณะไม่เชิงเส้น

แนวความคิดที่จะนำการควบคุมแบบอาศัยการจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ ซึ่ง พบได้น้อยในประเทศ ที่จะมีการนำเทคนิคการควบคุมขั้นสูงแบบนี้มาใช้ร่วมกับกระบวนการทาง เทคโนโลยีชีวภาพ ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้ได้เห็นข้อดีของการนำเทคนิคการควบคุมแบบเจนเนริก โมเดลร่วมกับเทคนิคการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์แบบคาลมาน มาใช้ในการควบคุม อุณหภูมิในระหว่างการผลิตเอทานอลชนิดเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยสร้างแบบ จำลองทั้งหมดบนโปรแกรมแมทแล็บ และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างการควบคุมแบบ เจนเนริกโมเดลกับการควบคุมแบบพีไอดี ภายใต้การทดสอบแบบจำลองที่เกิดความคลาดเคลื่อน ระหว่างแบบจำลองกับกระบวนการจริง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สร้างตัวควบคุมแบบพีไอดีบนโปรแกรมแมทแลป เพื่อควบคุมอุณหภูมิของระบบการผลิตเอธานอลจากปฏิกิริยา SSF
2. สร้างตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลบนโปรแกรมแมทแลป เพื่อควบคุมอุณหภูมิของระบบการผลิตเอธานอลจากปฏิกิริยา SSF
3. ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลร่วมกับการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ สำหรับการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่เกิดระหว่างการทำปฏิกิริยาและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
4. ทำการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้งสอง ภายใต้ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับกระบวนการจริง

1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

1. แบบจำลองที่ใช้เป็นตัวแทนของระบบการผลิตเอธานอลจากปฏิกิริยา SSF เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาของ J.A.ASENJO, 1990
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบนโปรแกรมแมทแลป และสร้างตัวควบคุมทั้งพีไอดีและเจนเนริกโมเดล ร่วมกับตัวประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์บนโปรแกรมแมทแลป
3. ทำการทดสอบสมรรถนะระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล ร่วมกับตัวประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ โดยอาศัยดัชนีชี้วัดค่า ไอเอสอี และค่าออฟเซต

1.4. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลและการศึกษาการใช้งานโปรแกรมแมทแลป
2. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ
3. สร้างแบบจำลองของระบบการผลิตเอธานอลบนโปรแกรมแมทแลป
4. สร้างตัวควบคุมแบบพีไอดีบนโปรแกรมแมทแลป

5. สร้างตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดลบนโปรแกรมแมทแลป และสร้างการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ร่วมกับการควบคุมบนโปรแกรมแมทแลป
6. ทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้งสอง บนเงื่อนไขความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง
7. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอน	2545												2546						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4			
1	●	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						
2		●	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						
3					●	—	—	—	—	—	—	—	—						
4							●	—	—	—	—	—	—	—					
5									●	—	—	—	—	—	—				
6													●	—	—	—			
7																	●	—	—

1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ เพื่อรักษาอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์ ได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ
2. สามารถสร้างตัวควบคุมแบบพีไอดี เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ เพื่อผลิตเอทานอลจากปฏิกิริยา SSF ได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ
3. สามารถสร้างตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพื่อผลิตเอทานอลจากปฏิกิริยา SSF ได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ
4. สามารถทำการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเอทานอลจากปฏิกิริยา SSF ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะได้
5. สร้างความมั่นใจได้ว่าการนำระบบควบคุมแบบฐานจำลองสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพได้

บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1. งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับปฏิกิริยาการเกิดเอธานอลจากการสลายตัวของเซลลูโลสร่วมกับการหมัก

Hiroshi และคณะ (1984) ได้ทำการศึกษาเพื่อยืนยันว่า อัตราเร็วของการเข้าทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับ ปฏิกิริยาการเกิดเอธานอลจากการสลายตัวของเซลลูโลสและการหมัก พบว่าที่ความเข้มข้นของเอธานอลน้อยกว่า 4 mole ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลสทั้ง *Beta-glucosidase* และ *Endoglucosidase* โดยมีการใช้เอนไซม์ *Trichoderma viride cellulase* ที่ความเข้มข้น 10 % (w/v) ร่วมกับเชื้อ *S.cerevisiae* ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นตัวทดลอง

J.Szczodrak (1987) ได้ทำการศึกษาหาเชื้อยีสต์ ที่สามารถผลิตเอธานอลจากน้ำตาลกลูโคสที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ที่อุณหภูมิ 43 และ 46 องศาเซลเซียส โดยมีน้ำตาลกลูโคสที่ 140 กรัมต่อลิตรเป็นสารตั้งต้น สามารถผลิตเอธานอลได้ 56 และ 35 กรัมต่อลิตรใช้เวลาน้อยกว่า 48 ชั่วโมง และยังพบว่าเอนไซม์เซลลูเลสไม่ได้รับผลกระทบจากความเข้มข้นของเอธานอลและน้ำตาลกลูโคส แต่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยที่สภาวะ 50 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณของการเกิดน้ำตาลกลูโคสมากที่สุด ดังนั้นจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่จะรักษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาการเกิดเอธานอลจากการสลายตัวของเซลลูโลสและการหมัก

D.diane และ คณะ(1988) ได้ทำการศึกษาหาเชื้อยีสต์ ที่มีประสิทธิภาพในการผลิตเอธานอลจากเซลลูโลสให้มากที่สุด ณ. อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 37 ,41 และ 43 องศาเซลเซียส ด้วยการเปรียบเทียบเชื้อยีสต์ทั้งสามชนิด คือ *Scacharomyces uvarum*, *Candida brassicae* และ *C.lusitaniae* และทำการผสมเชื้อเป็นมิกซ์คัลเจอร์ 1 ระหว่าง *Brettanomyces clausenii* และกับ *S.cerevisiae* กับมิกซ์คัลเจอร์ 2 ระหว่าง *C.lusitaniae* และ *S.uvarum* พบว่าที่อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส ให้อัตราการผลิตเอธานอลสูงที่สุด และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอนไซม์ อยู่ในช่วง 45 - 50 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมของการหมักให้เกิดเป็นเอธานอลที่เหมาะสมคือ 30 – 37 องศาเซลเซียส

S.Kerstin และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาผลกระทบจากความเข้มข้นของ สับสเตรทและเอนไซม์เซลลูเลส ต่อปฏิกิริยาการเกิดเอทานอลจากการสลายตัวของเซลลูโลสร่วมกับการหมัก เมื่อสารตั้งต้นเป็นพวกไม้เนื้ออ่อน โดยอาศัยเอนไซม์ทางการค้าระดับ 5 – 32 FPU/g cellulose ต่อสารตั้งต้นที่ความเข้มข้น 2 – 10 % (w/w) และเชื้อ *S.cerevisiae* จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลเทียบกับทางทฤษฎี ขึ้นกับอัตราการใช้เอนไซม์ และประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลมีค่าเท่ากับ 68 % เทียบกับทางทฤษฎี เมื่อใช้สารตั้งต้นจากไม้เนื้ออ่อน ในขณะที่สารตั้งต้นเป็นพวกเซลลูโลสและน้ำตาลกลูโคสจะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 86 % เทียบกับทางทฤษฎี ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้น 5 % และยังพบว่าประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวิธีการนี้ให้ค่าประสิทธิภาพเป็นสองเท่า เมื่อทำการแยกผลผลิตในแต่ละขั้นของปฏิกิริยา

อำนาจ ขวัญเมือง (2538) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตเอทานอล จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในระดับห้องปฏิบัติการ และศึกษาวิธีการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสโดยใช้เชื้อราประเภทเส้นใยคือ *Trichoderma reesei* QM 9414, *Trichoderma reesei* QM 6a และ *Aspergillus* Sp. No.3335 พบว่า เอนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อ *Trichoderma reesei* QM 6a เมื่อมีการหมักร่วมกับเชื้อ *S.cerevisiae* ให้ผลผลิตดังนี้ เมื่อฟางข้าว, ชังข้าวโพด และชานอ้อยเป็นสารตั้งต้น คือ 0.133 ,0.145 และ 0.173 กรัมเอทานอลต่อกรัมสารตั้งต้นตามลำดับ แต่ถ้าใช้เอนไซม์ทางการค้าพบว่า ให้ผลผลิตดังนี้ คือ เมื่อฟางข้าวเป็นสารตั้งต้น , ชังข้าวโพด และ ชานอ้อย ตามลำดับ คือ 0.145 ,0.251 และ 0.156 กรัมเอทานอลต่อกรัมสารตั้งต้น

ตารางที่ 2.1 สรุปงานลักษณะงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาการเกิดเอทานอลจากการสลายตัวของเซลลูโลสร่วมกับการหมัก

ลักษณะงานวิจัย	ผู้วิจัย/ปี
การใช้เอนไซม์ย่อยเซลลูโลส	Hiroshi และคณะ (1984)
หาคุณสมบัติที่เหมาะสม	J.Szczodrak (1987)
หาสภาวะในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์	D.diane และ คณะ(1988)
หาความเข้มข้นของสับสเตรท	S.Kerstin และคณะ (1999)
ผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	อำนาจ ขวัญเมือง (2538)

2.2. งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับปฏิกิริยาการสลายตัวของเซลลูโลส

Reese และคณะ (1950) ได้ทำการศึกษาการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลส พบว่ามีกลไกการทำงานดังนี้ ชั้นแรกจะมีเอนไซม์ตัวแรกเข้าย่อยสลาย โดยทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายเซลลูโลสทำให้ได้สายของ *D-anhydroglucose* ที่สั้นลง ซึ่งเหมาะต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ตัวต่อไป ชั้นสองจะมีเอนไซม์เข้าย่อยสลายพันธะ *Beta-1,4 glucosidic* อย่างนุ่ม ทำให้ได้สารประกอบพวก เซลลูไบโอส และน้ำตาลกลูโคส ส่วนเซลลูไบโอสจะถูกย่อยสลายต่อโดยเอนไซม์ไบเอส ทำให้ได้น้ำตาลกลูโคส

Ryu และMandel (1980) ได้ทำการศึกษาถึงโครงสร้างของเอนไซม์เซลลูเลส พบว่าเอนไซม์เซลลูเลสเป็น glycoprotein ประกอบด้วยโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต ในอัตราส่วนหนึ่งต่อหนึ่ง มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 30,000 – 60,000 ดาลตัน มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี ไม่ต้องการ Cofactor หรือโลหะอื่น ๆ ในการเข้าทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปเอนไซม์เซลลูเลสที่ได้จากจุลินทรีย์จะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยา ที่ประมาณ 50 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นยังมีความทนต่อสภาวะที่อุณหภูมิสูง และทนต่อ pH ได้กว้าง รวมทั้งทนต่อสารเคมีได้ดี การเก็บรักษาสามารถเก็บไว้ได้นานหลายปี ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส โดยไม่มีการสูญเสียคุณสมบัติ

Lee และคณะ (1983) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการย่อยสลายสารประกอบเซลลูโลส ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 วิธี

1.การย่อยสลายโดยใช้กรด (Acid Hydrolysis)

การย่อยสลายสารประกอบเซลลูโลสด้วยกรดเช่น การใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ หรือ การใช้กรดไฮโดรคลอริก 40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เครื่องมือที่ใช้ต้องทนทานต่อการกัดกร่อนจากสภาพความเป็นกรดรุนแรง อีกทั้งเครื่องมือประเภทนี้ราคาค่อนข้างแพง การผลิตเพื่อให้ได้ปริมาณของน้ำตาลกลูโคสปริมาณมาก จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาที่ค่อนข้างสูง และระยะเวลาในช่วง 15-20 นาที มักจะเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง เช่น furfural และกรดยังทำปฏิกิริยากับสารประกอบอื่นที่ติดมากับเซลลูโลส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการอีกด้วย

2.การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ (Enzyme Hydrolysis)

การย่อยสลายสารประกอบเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส พบได้ในสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น หอยทาก และจุลินทรีย์ต่าง ๆ เช่น โปรโตซัว แบคทีเรีย แอคติโนมัยซีต และเชื้อรา เป็นต้น ลักษณะการย่อยสลายโดยเอนไซม์มีความจำเพาะเจาะจงระหว่างเอนไซม์กับสารตั้งต้น มักจะไม่

ทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่ปะปนมา ฉะนั้นการใช้เอนไซม์ในการย่อยสลายเซลลูโลสจึงได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นน้ำตาลที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ และไม่มีผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการปะปนออกมา

Lee (1983) ได้ทำการศึกษาพบว่าเอนไซม์เซลลูเลส เกิดจากการทำงานร่วมกันของเอนไซม์หลายตัวสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. Endo-Beta-1,4 glucan glucanohydrolase

การทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้จะทำหน้าที่ตัดพันธะ Beta-1,4 glucosidic ภายในสายเซลลูโลสบริเวณที่เป็นผลึก ซึ่งจะตัดพันธะอย่างสุ่มทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ผสมหลายชนิด คือ กลูโคสและเซลโลไบโอส โดยจะได้เซลโลไบโอสเป็นหลัก

2. Exo-Beta-1,4 glucan cellobiohydrolase

เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ตัดพันธะ Beta-1,4 glucosidic จากปลายด้านที่เป็น non – reducing ทำให้ได้น้ำตาลกลูโคสและเซลโลไบโอส

3. Beta-1,4 glucosidase or Cellobiase

เป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลายเซลโลไบโอสให้เป็นน้ำตาลกลูโคส

ตารางที่ 2.2 สรุปลักษณะงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาการสลายตัวของเซลลูโลส

ลักษณะงานวิจัย	ผู้วิจัย/ปี
กลไกการทำงานของเซลลูเลส	Reese และคณะ (1950)
หาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม	Ryu และMandel (1980)
กลไกการย่อยสลายโดยเซลลูเลส	Lee และคณะ (1983)

2.3.งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์กับอุณหภูมิ

J.derek และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาหาผลกระทบบของอุณหภูมิต่อสภาพความทนทานของโปรตีน โดยอาศัยเทคนิคการตรวจวัดต่าง ๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ กิจกรรมของเอนไซม์ (Melting Curves Profiles, MCP) โดยได้ทำการศึกษาเอนไซม์สองชนิด คือ *Beta- galactosidase* และ *Hydrogenases* พบว่า ข้อมูลให้ผลสอดคล้องกับสมการอาร์เรเนียส ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามทฤษฎี โดยอาศัยการประมาณข้อมูลเพื่อหาค่าคงที่สำหรับสมการ MCP โดยปกติเอนไซม์ที่แอคทีฟ [N] สามารถเปลี่ยนรูปไปอยู่ในสภาวะไม่มีแอคทีฟได้ [D] และสูญเสียสภาพได้ [I] ดังนั้นสามารถหาค่าคงที่ทางปฏิกิริยา คือ

$$K_{rd} = \frac{[D]}{[N]} \quad (2.1)$$

เมื่อ

K_{rd} = ค่าคงที่การเข้าทำปฏิกิริยา

$[D]$ = เอนไซม์ที่ไม่แอคทีฟ

$[N]$ = เอนไซม์ที่แอคทีฟ

$[I]$ = เอนไซม์ที่เสื่อมสภาพ

กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ตัวเดียวสามารถแสดงได้ในรูปของสมการ Michaelis-Menten Equation

$$V_o(T) = k_{cat}(T)N = \frac{k_{cat}(T)E_o}{1 + K_{rd}(T)} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$V_o(T)$ = ความเร็วในการเข้าทำปฏิกิริยา

K_{cat} = ค่าคงที่ปฏิกิริยา

E_o = ความเข้มข้นของเอนไซม์

ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อ k_{cat} สามารถอธิบายโดยอาศัยสมการอาร์เรเนียส

$$k_{cat}(T) = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (2.3)$$

$$k_{rd}(T) = \exp\left[\frac{\Delta H_m^o}{RT} - \frac{\Delta C_p^o}{RT} [1 + \ln(T_m)]\right] + \left(\frac{\Delta C_p^o T_m}{R} - \frac{\Delta H_m^o}{R}\right) \frac{1}{T} + \frac{\Delta C_p^o}{R} \ln(T) \quad (2.4)$$

เมื่อ

E_o = ความเข้มข้นของเอนไซม์

E_a = ค่าพลังงานภายในของเอนไซม์

R = ค่าคงที่ก๊าซ

A = ค่าคงที่อาร์เรเนียสของเชื้อจุลินทรีย์ 7.679×10^{30}

ΔH_m^o = ค่าเอนทาลปีของการหลอมละลาย

ΔC_p^o = ค่าความจุความร้อน

T_m = ค่าอุณหภูมิการหลอมละลาย

ขั้นตอนในการหาค่าคงที่สำหรับสมการ (2.3) และ (2.4) ต้องสมมุติให้ $\Delta C_p^O = 0$ จากนั้นจะหาค่า T_m และ ΔH_m^O ได้ จากนั้นจะทำการฟิตสมการเพื่อหาค่า ΔC_p^O สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 2.3. และตารางที่ 2.4.

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์สำหรับสมการ (2.3) เป็นข้อมูลของ *Beta-Glucosidase*

(ที่มา : J.derek และคณะ (1993))

Assay Solution	A	E_a (kj/mol)
1 mM MgCl ₂	9.99E+07	43.3
1 mM EDTA	1.69E+10	61.7

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์สำหรับสมการ (2.4) เป็นข้อมูลของ *Beta-Glucosidase*

(ที่มา : J.derek และคณะ (1993))

Assay Solution	T_m K (C)	ΔH_m^O (kj/mol)	ΔC_p^O (kj/mol K)
1 mM MgCl ₂	331.2 ,(58)	568	21.8
1 mM EDTA	321,(47.8)	300	14.1

จากผลการศึกษาพบว่าเอนไซม์ทุกตัว อาจไม่สามารถแสดงพฤติกรรมได้ตามที่กล่าวมา เช่น เอนไซม์ที่มีการทำงานพร้อมกันหลายปฏิกิริยา ดังนั้นในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ เชื่อว่าพฤติกรรมของเอนไซม์ที่ใช้ ค่อนข้างให้ผลตามสมการที่กล่าวมา และจะนำไปสร้างเป็นแบบจำลอง เพื่อเป็นตัวแทนของระบบที่จะศึกษา

2.4. งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับปฏิกิริยาการคายความร้อนในระหว่างการหมัก

A.G.Douglas และคณะ (1987) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำทฤษฎีการควบคุมแบบเหมาะสมไปใช้ควบคุมการหมักแอลกอฮอล์ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Engasser ซึ่งตัวแปรควบคุมคือ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ โดยอาศัยการตั้งสมการสมดุลพลังงานดังนี้

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho C_p} \left[(\Delta H_{F_G} \frac{dG}{dt}) + (\Delta H_{F_M} \frac{dM}{dt}) + (\Delta H_{F_N} \frac{dN}{dt}) - u(T - T_c) \right]$$

เมื่อ

C_p = ความจุความร้อน (kJ/kg·C°)

ΔH_{Fi} = ปริมาณความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา, (kJ/mol)

u = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, (kJ/h m² °C°)

T = อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (C°)

โดยพบว่าค่าความร้อนจากปฏิกิริยาของน้ำตาลกลูโคส [G], น้ำตาลมอลโตส [M] และ น้ำตาลมอลโตไตรออส [MT] มีค่าเท่ากับ -91.2, -226.3 และ -361.3 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งจะนำรูปแบบการสมดุลพลังงาน มาใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยนี้

U.von และคณะ (1988) ได้ทำการศึกษาการคายความร้อนของขบวนการหมักด้วยเชื้อยีสต์ *K.fragilis* โดยอาศัยการวัดด้วยเครื่องคาร์ลอร์มิเตอร์ ทั้งในสภาวะแบบกะและต่อเนื่อง โดยทำการศึกษาในสภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจนพบว่า ในสภาวะที่มีออกซิเจนจะทำให้เชื้อเกิดการเจริญเติบโต (Respiration) และคายพลังงานความร้อนมากกว่า ในสภาวะที่ขาดออกซิเจน อีกทั้ง การเพิ่มขึ้นของปริมาณเอทานอลจะส่งผลให้เกิดการคายพลังงานความร้อนที่น้อยลง กว่าช่วงแรกของการเจริญเติบโต

ตารางที่ 2.5 สรุปลักษณะงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาการคายความร้อนในระหว่างการหมัก

ลักษณะงานวิจัย	ผู้วิจัย/ปี
การควบคุมอุณหภูมิผลิต เบียร์	A.G.Douglas และคณะ (1987)
แบบจำลองการคายความร้อนจากการหมัก	U.von และคณะ (1988)

2.5. งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับตัวควบคุมจีเอ็มซี

Lee และ Sullivan (1988) ได้นำเสนอการควบคุมแบบจีเอ็มซี (Generic Model Control, จีเอ็มซี) ซึ่งเป็นการควบคุมที่นำแบบจำลองของกระบวนการมาใช้ในโครงสร้างของการควบคุมโดยตรง ด้วยวิธีการนี้ แม้ว่าแบบจำลองดังกล่าวจะเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นแต่สามารถมาประยุกต์ใช้ได้ทันที ไม่ต้องจัดให้อยู่ในรูปของแบบจำลองเชิงเส้นก่อน นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดลักษณะผลตอบสนองจากการควบคุมได้โดยการปรับจูนพารามิเตอร์สองตัว ในโครงสร้างของการควบคุม ข้อได้เปรียบสำคัญของการควบคุมแบบจีเอ็มซีนี้คือ เป็นการควบคุมแบบไม่เชิงเส้น จึงเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการทางเคมีต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่มักจะมีลักษณะ

ไม่เชิงเส้นอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามในกรณีที่แบบจำลองที่ใช้ มีความคลาดเคลื่อนไปจากกระบวนการจริงก็จะมีผลทำให้สมรรถนะในการควบคุมลดลง

Lee , Newell และ Sullivan (1988) แสดงผลการศึกษาศึกษาการควบคุมที่ได้จากการนำตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีมาใช้กับระบบของเครื่องทำให้กลายเป็นไอ ซึ่งเป็นระบบที่มีอินเตอร์แอคชั่นและความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่สูง ซึ่งผลการควบคุมเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมอื่น คือตัวควบคุมพีไอและดีเอ็มซี นับว่าตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่า นอกจากนี้มีการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมแบบจีเอ็มซี ภายใต้ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ใช้ภายในโครงสร้างของตัวควบคุม กับกระบวนการจริง โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง และความผิดพลาดของลักษณะโครงสร้างที่ใช้ในแบบจำลอง จากผลการศึกษาพบว่ายังสามารถทำให้ตัวแปรควบคุมอยู่ในค่าเป้าหมายที่ต้องการได้ทั้ง 2 กรณี เนื่องมาจากพจน์อินทิกรัลที่ปรากฏอยู่ในโครงสร้างการควบคุมเป็นตัวชดเชยความผิดพลาดดังกล่าวไว้ สุดท้ายในงานวิจัยได้สรุปว่าความถูกต้องของลักษณะโครงสร้างของแบบจำลองมีความสำคัญกว่าความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

Cott และ Macchietto (1989) ได้ทำการศึกษาศึกษาการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีปฏิกิริยาแบบคายความร้อน โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลการควบคุมที่ได้จากการใช้ตัวควบคุมแบบคู่ (Dual mode controller) และตัวควบคุมแบบจีเอ็มซี ตัวควบคุมแบบคู่เป็นเทคนิคการควบคุมที่ใช้วิธีการควบคุมแบบออน-ออฟ ในช่วงการให้ความร้อนเริ่มต้น โดยการให้ความร้อนสูงในช่วงต้น เมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มมาถึงจุดหนึ่งก็จะหยุดการให้ความร้อนและเปลี่ยนเป็นสารหล่อเย็นแทน เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงมีค่าเท่ากับศูนย์จะทำการเปลี่ยนโหมดของการควบคุมไปใช้แบบพีไอดีแทน และใช้การควบคุมแบบพีไอดีควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายต่อไป เนื่องจากการควบคุมแบบคู่มีความยุ่งยากในการนำไปใช้งาน ผู้ทำงานวิจัยจึงได้นำเสนอการใช้ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับ การประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา ของ Jutan และ Uppal (1984) ซึ่งใช้ตัวกรองเอกซ์โปเนนเชียลในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบกะ ซึ่งพบว่าสามารถใช้งานได้ง่ายกว่าการใช้งานตัวควบคุมแบบคู่ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมทั้งสองในกรณีต่าง ๆ ซึ่งพบว่าตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีสามารถให้ผลการควบคุมได้ดีกว่าในทุกกรณีที่ทำการทดสอบ

Cott และคณะ (1989) นำการควบคุมแบบจีเอ็มซีมาใช้ในการควบคุมองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์กั้นห่อและผลิตภัณฑ์ยอดห่อในกระบวนการกลั่นแบบ 2 องค์ประกอบ โดยนำการควบคุม

คุมแบบจีเอ็มซีที่ต้องการแบบจำลองที่มีลักษณะเชิงพลวัต แต่เนื่องจากแบบจำลองโดยส่วนใหญ่ของหอกันมักเป็นแบบจำลองที่สภาวะคงตัว อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองไม่เชิงเส้นที่สภาวะคงตัวมาประมาณให้มีลักษณะเป็นแบบจำลองเชิงพลวัตในรูปค่าคงตัวของเวลา เมื่อเป็นดังนี้แล้วจึงสามารถนำการควบคุมแบบจีเอ็มซีมาประยุกต์ใช้ได้ โดยการควบคุมแบบจีเอ็มซีที่อาศัยแบบจำลองเชิงพลวัตและไม่เป็นเชิงเส้น ได้ถูกนำไปทดสอบสมรรถนะกับตัวควบคุมเชิงเส้นที่ใช้แบบจำลองเชิงพลวัต ซึ่งผลจากการทดสอบสมรรถนะพบว่าตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีมีสมรรถนะที่ดีกว่าในทุกกรณี

Benzanson และคณะ (1989) ได้แสดงให้เห็นว่าถึงแม้พจน์อินทิกรัลที่ปรากฏในสมการของการควบคุมแบบจีเอ็มซีจะเป็นตัวรับประกันความทนทานของตัวควบคุม ในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองก็ตาม แต่ความทนทานนั้นจะลดลง เมื่อกำหนดให้ผลการตอบสนองของตัวแปรควบคุมเข้าสู่ค่าเป้าหมายด้วยความรวดเร็ว สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะในกรณีดังกล่าวการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมจะได้ค่า k_2 มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่า k_1 โดยที่ k_2 จะเป็นพารามิเตอร์ที่คูณอยู่กับพจน์อินทิกรัลที่เป็นตัวชดเชยความผิดพลาด ในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง จึงทำให้ผลจากการชดเชยมีค่าน้อยมากไม่สามารถชดเชยความผิดพลาดได้เพียงพอ เป็นผลให้ไม่สามารถที่จะทำให้ตัวแปรควบคุมเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้

Lundberg และBenzansan (1990) นำเสนอการควบคุมแบบอาร์จีเอ็มซี (Robust Generic Model Control ,RGMC) เพื่อเป็นการเพิ่มความทนทานให้กับการควบคุมแบบอาร์จีเอ็มซี เมื่อต้องการให้ตัวแปรควบคุมมีผลการตอบสนองที่เร็ว โดยลักษณะโครงสร้างของการควบคุมแบบอาร์จีเอ็มซีจะมีการป้อนกลับของค่าอนุพันธ์ของตัวแปรที่วัดค่าได้เพื่อเปรียบเทียบกับค่าอนุพันธ์ของตัวแปรนั้นที่ได้จากแบบจำลองซึ่งผลต่างที่ได้ระหว่างข้อมูล 2 ชุดนั้น จะเป็นตัวชดเชยความผิดพลาดระหว่างแบบจำลองกับกระบวนการจริงแทนพจน์อินทิกรัลในโครงสร้างของการควบคุมแบบเดิม จากตัวอย่างในงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า การควบคุมแบบอาร์จีเอ็มซีสามารถทำให้ตัวแปรควบคุมเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้แม้จะมีความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

Riggs และRhinehart (1990) ทำการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองไม่เชิงเส้น (Nonlinear Process Model Based Control , PMBC) สองชนิดคือตัวควบคุมไอเอ็มซีแบบไม่เชิงเส้นและตัวควบคุมจีเอ็มซี โดยในการศึกษานำกระบวนการของเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนต่อเนื่องอุดมคติที่มีหนึ่งตัวแปรเข้าและหนึ่งตัวแปรออก และกระบวนการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีหนึ่งตัวแปรเข้าและมีหนึ่งตัวแปรออกมาศึกษา โดยในกรณีของเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนต่อ

เนื่องนั้นเป็นลักษณะของระบบที่ไม่เสถียรแต่ไม่มีโพลีโพลี ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเป็นลักษณะของระบบที่เสถียรแต่มีโพลีโพลี ซึ่งลักษณะของความไม่เสถียร, การมีโพลีโพลี และ ความไม่เป็นเชิงเส้นนี้ล้วนเป็นสาเหตุให้การควบคุมทำได้ยาก โดยตัวควบคุมทั้งสองให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีเหมือนกันและต่างก็มีความทนทานในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับกระบวนการจริง

Rani และGangiah (1991) นำเสนอการควบคุมแบบจีเอ็มซีที่มีการปรับตัวได้หรือที่เรียกว่าเอจีเอ็มซี (Adaptive Generic Model Control , AGMC) เพื่อเปรียบเทียบผลการควบคุมกับการควบคุมแบบจีเอ็มซีและการควบคุมแบบอาร์จีเอ็มซี ในกรณีที่ต้องการให้ตัวแปรปรับมีผลการตอบสนองที่รวดเร็ว ซึ่งผลการควบคุมจากตัวอย่างในงานวิจัยพบว่าอาร์จีเอ็มซีนั้นสามารถรับประกันความทนทานให้การควบคุมได้ ในกรณีที่มีความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองเท่านั้น แต่ในกรณีที่มีความผิดพลาดของโครงสร้างของแบบจำลองจะให้ความทนทานลดลง ในขณะที่การควบคุมแบบเอจีเอ็มซีนั้นสามารถรับประกันความทนทานเมื่อมีความผิดพลาดของระบบทั้ง 2 กรณี โดยที่การควบคุมแบบนี้จะมีการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในแบบจำลอง โดยอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรสเตตและพารามิเตอร์นั้นกับตัวแปรที่วัดค่าได้นอกจากนี้แล้วยังได้นำการควบคุมแบบเอจีเอ็มซีไปใช้ในการควบคุมกระบวนการกลั่นแบบ 2 องค์ประกอบ และให้ชื่อตัวควบคุมนั้นว่า ดีเอจีเอ็มซี (Distillation Adaptive Generic Model Control) โดยแบบจำลองที่นำมาทดสอบเป็นแบบจำลองกระบวนการกลั่นแยกน้ำและเมทานอลของ Wood Berry (1973) และแบบจำลองการกลั่นแยกบิวเทนของ Gani และคณะ (1986) กับ Ruiz และคณะ(1988) ซึ่งพบว่าการใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นกับตัวควบคุมดีเอจีเอ็มซีนีให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าแบบจำลองเชิงเส้น

เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Signal และLee (1992) และ Xie และคณะ (1999) ที่ทำการศึกษาเทคนิคในการปรับตัวของค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองที่ใช้ในโครงสร้างการควบคุมแบบจีเอ็มซี เพื่อให้สามารถใช้ตัวควบคุมจีเอ็มซีควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง และในกรณีที่ไม่สามารถวัดค่าตัวแปรบางตัวได้

Flathouse และ Riggs (1996) ประยุกต์วิธีการจูนแบบอัตโนมัติ (Auto Turn Variation, ATV) กับตัวควบคุมแบบจีเอ็มซี โดยวิธีการจูนแบบเอทีวีนี้ Astrom และHagglund (1988) นำมาใช้ในการจูนตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบอัตโนมัติ ซึ่งการจูนที่เป็นที่รู้จักกันดีคือ Cohen Coon และ Ziegler Nichols โดยวิธีแรกนั้นใช้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรออกขณะที่ยังไม่มี การ

ควบคุมมากำหนดค่าพารามิเตอร์ ซึ่งวิธีการนี้ทำได้ยากเมื่อระบบมีการตอบสนองที่ช้ามาก และในกรณีที่ระบบมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวแปรรบกวน ส่วนวิธีที่สองนั้นจูนตัวควบคุมในลูปิดโดยการหาค่าเกนสุดท้าย (Ultimate Gain) และคาบเวลาสุดท้าย (Time Period) ซึ่งคิดจากเกนที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับแล้วจะทำให้ตัวแปรควบคุมแกว่งในสภาวะคงที่ แต่ในวิธีแบบเอทีวีนั้นจะเริ่มพิจารณาระบบจากที่สภาวะคงตัว จากนั้นทำการเพิ่มค่าตัวแปรปรับแบบสตีป แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรควบคุมจนมากพอก็ทำการปรับค่าตัวแปรปรับลงต่ำกว่าที่สภาวะคงตัว สังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าขอตัวแปรควบคุมว่ามากพอก็ทำการเพิ่มค่าตัวแปรปรับจากที่สภาวะคงตัวใหม่ทำกลับไปกลับมาไปเรื่อย ๆ จะได้ลักษณะของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมที่สามารถนำไปคำนวณหาค่าเกนสุดท้ายและคาบของเวลาสุดท้ายได้

Flathouse และ Riggs เสนอว่าการใช้วิธีปรับจูนตัวควบคุมจีเอ็มซีตามวิธีของ Lee และ Sullivan ซึ่งเป็นวิธีการอ็อปติไมซ์ผลต่างของผลการตอบสนองของตัวแปรควบคุมที่ต้องการ กับลักษณะการเปลี่ยนแปลงตัวแปรควบคุมที่ได้จริงนั้นอาจให้ผลที่ไม่ดีได้ 3 กรณี คือกรณีเมื่อเกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองกับกระบวนการจริง โดยเฉพาะกรณีที่ระบบหลายตัวแปรคือ มีตัวแปรควบคุมมากกว่าหนึ่งตัว และ ตัวแปรปรับมากกว่าหนึ่งตัว กรณีที่สองคือเมื่อระบบที่ต้องการควบคุมมีความล่าช้าเชิงเวลา (Dead Time) โดยในการจูนตัวควบคุมนั้นจำเป็นต้องลดความรุนแรงของตัวควบคุมลงเพื่อรักษาความเสถียรของระบบ กรณีสุดท้ายเกี่ยวข้องกับพลวัตของระบบเช่นระบบที่มีอินเวอร์สแอคชั่นหรือระบบที่มีอันดับสูง (High Order) ซึ่งจำเป็นที่จะต้องลดความรุนแรงของตัวแปรควบคุมลงไป Flathouse และ Riggs จึงได้ใช้วิธีการจูนตัวควบคุมจีเอ็มซีด้วยวิธีเอทีวี โดยทำการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่ได้จากการจูนด้วยวิธีเอทีวีกับวิธีการแบบเดิม กับระบบตัวอย่างทั้งสองระบบ คือระบบของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาแบบคายความร้อน กับระบบการกลั่นซึ่งต่างก็เป็นระบบที่มีตัวแปรควบคุม 2 ตัว และตัวแปรปรับ 2 ตัว ซึ่งผลการควบคุมพบว่าในกรณีปกติที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองนั้น วิธีการเดิมให้ผลการควบคุมในรูปของค่าไอเอชทีที่น้อยกว่าเล็กน้อย ส่วนในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองนั้นจีเอ็มซีที่ทำการจูนด้วยวิธีการเดิมก็ยังให้ค่าไอเอชทีที่น้อยกว่าแต่จะมีการแกว่งและโอเวอร์ชูตมากกว่า

ธนากร (2541) ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมจีเอ็มซีเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์โพลีเมอร์แบบกึ่งกะกับกระบวนการของ Teymour เนื่องจากปฏิกิริยาอิมัลชันโพลีเมอร์ไรเซชัน (Emulsion Polymerization) ของการเกิดโพลีเมอร์ไรเซชันมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ทำให้การควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ได้ผลไม่ได้ตามความต้องการ เป็นเหตุให้เกิดผลผลิตภัณฑโพลีเมอร์ที่ไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งการประยุกต์ใช้จีเอ็มซีร่วมกับตัวประมาณค่าออนไลน์เพื่อประมาณค่าความ

ร้อนของปฏิกิริยาให้ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งในกรณีปกติและกรณีที่มีความผิดพลาดของพารามิเตอร์กับแบบจำลอง เช่นเดียวกันกับ นุศรา (2542) ซึ่งประยุกต์ใช้ตัวควบคุมเพื่อควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องปฏิกรณ์การเกิดโพลีไวนิลคลอไรด์ร่วมกับตัวประมาณค่าออนไลน์ซึ่งก็ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี

สุพัตรา (2543) ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model Predictive Control, MPC) ร่วมกับตัวกรองคาลมานเพื่อเพิ่มสมรรถนะ ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีโพลีเมอร์แบบกะ เนื่องจากปฏิกิริยาฟรี-เรดิคัลโพลีเมอร์ไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบกะนั้นมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งการควบคุมเชิงเส้นแบบพีไอดีสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ แต่เกิดการโอเวอร์ชูตทำให้สมบัติของโพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นไม่เป็นไปตามต้องการ โดยในการทดสอบตัวควบคุมเอ็มพีซีนั้น ได้นำตัวควบคุมจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานมาเปรียบเทียบผลการควบคุมด้วย ซึ่งผลการจำลองการควบคุมพบว่าเอ็มพีซีให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า แต่ก็ใช้เวลาในการคำนวณตัวแปรปรับที่มากกว่า เนื่องจากจีเอ็มซีสามารถคำนวณตัวแปรปรับจากสมการของแบบจำลองได้โดยตรง แต่ในกรณีของเอ็มพีซีนั้นคำนวณตัวแปรปรับจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการทำออฟติไมซ์เพื่อหาค่าที่เหมาะสม

อนุพัฒน์ (2544) ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาแบบคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับได้ ซึ่งแสดงพฤติกรรมที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงใน 3 กรณี กรณีแรกระบบแสดงพฤติกรรมที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์อย่างมาก กรณีสองระบบแสดงพฤติกรรมที่มีหลายสภาวะคงตัวและสภาวะคงตัวที่ไม่มีเสถียรภาพ กรณีสามระบบแสดงพฤติกรรมที่มีการแกว่งเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก ซึ่งจากผลการจำลองการควบคุมพบว่า จีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานให้สมรรถนะและความทนทานที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการและกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในการควบคุม นอกจากนี้แล้ว จีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานยังให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีในกรณีที่มีความผิดพลาดของระบบและแบบจำลองด้วย

ตารางที่ 2.6 สรุปลักษณะงานวิจัยที่เกี่ยวกับตัวควบคุมจีเอ็มซี

ลักษณะงานวิจัย	ผู้วิจัย/ปี
ได้เสนอการควบคุมแบบ จีเอ็มซี	Lee และ Sullivan (1988)
ควบคุม เครื่องระเหยด้วย จีเอ็มซี	Lee , Newell และSullivan (1988)
ควบคุมปฏิกิริยาคายความร้อนแบบแบตช์	Cott และ Macchietto (1989)
ควบคุมหอกลับ 2 องศาประกอบ	Cott และคณะ (1989)
การปรับจูนค่าที่สำหรับ จีเอ็มซี	Benzanson และคณะ (1989)
เสนอการเพิ่มความทนทานสำหรับ จีเอ็มซี	Lundberg และBenzansan (1990)
เทียบสมรรถนะระหว่าง จีเอ็มซี กับ IMC	Riggs และRhinehart (1990)
การปรับจูนได้อัตโนมัติ	Rani และGangiah (1991)
ประยุกต์ใช้การจูนอัตโนมัติ	Flathouse และ Riggs (1996)
ควบคุมอุณหภูมิผลิตโพลีเมอร์	ธนากร (2541)
ควบคุมอุณหภูมิผลิตโพลีเมอร์แบบกะ	สุพัตรา (2543)
ควบคุมอุณหภูมิจากการคายความร้อนแบบต่อเนื่อง	อนุพัฒน์ (2544)

2.6. งานวิจัยที่เกี่ยวกับตัวกรองคาลมาน

R.E. kalman (1960) ได้อธิบายถึงขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบเรียกซ้ำ (Recursive Solution) เพื่อใช้เป็นตัวกรองสำหรับระบบเชิงเส้น ซึ่งในช่วงนั้นถือว่าการค้นพบที่เป็นประโยชน์อย่างมากในด้านการคำนวณทางด้านดิจิทัล ข้อดีของขั้นตอนการคำนวณแบบเรียกซ้ำ ซึ่งประหยัดเวลาและหน่วยความจำในการคำนวณ นอกจากนี้วิธีการของตัวกรองคาลมานยังสามารถใช้เป็นตัวประมาณค่าสเตตและพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้อง ทำให้การศึกษาค้นคว้าและการประยุกต์ใช้งานของตัวกรองคาลมานได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง

Well (1971) ได้เสนออัลกอริทึมของตัวกรองคาลมานแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น (Linear Kalman Filter and Extended Kalman Filter) ซึ่งประยุกต์ใช้ได้ถึงกว่าที่มีความไม่เชิงเส้นสูง โดยการคำนวณค่าสเตตของกระบวนการหรือพารามิเตอร์ของระบบที่ไม่สามารถวัดค่าได้ ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในการควบคุม

Hamilton และคณะ (1973) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองคาร์บอน โดยได้ศึกษาการใช้งานตัวกรองคาร์บอนกับเครื่องระเหย (Evaporator) ขนาดจำลอง โดยใช้ตัวกรองคาร์บอนเพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของสารภายในเครื่องระเหย ซึ่งพบว่าตัวกรองคาร์บอนสามารถให้ผลการประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง ในกรณีที่ไม่มีคามผิดพลาดของแบบจำลองและสัญญาณรบกวนอย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ตัวกรองคาร์บอนไม่รู้ถึงผลการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวน ผลการประมาณที่ได้จะมีความผิดพลาดอยู่

Valier และBonvin (1989) ได้ทำการศึกษาถึงเทคนิคการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์กับระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยได้แสดงถึงเทคนิคการนำตัวกรองคาร์บอนแบบยืดขยายมาช่วยในการประมาณค่าพารามิเตอร์ ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนได้คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ค่าความจุความร้อนของสารและค่าคงที่ทางจลนศาสตร์

Kershenbaun และKitisupakorn (1994) ได้ศึกษาถึงการควบคุมอุณหภูมิของระบบเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบกะ โดยกล่าวว่า ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยานั้นเป็นค่าที่ไม่สามารถวัดได้ อย่างไรก็ตาม ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยานั้นเป็นค่าที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณ ของตัวควบคุมฐานแบบจำลอง จึงได้นำตัวกรองคาร์บอนแบบยืดขยายมาช่วยในการประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา โดยในแบบจำลองของตัวกรองคาร์บอนนั้นกำหนดให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผันกับมวลรวมของสารทั้งหมดและอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ในลักษณะที่เป็นไบลิเนียร์ (Bilinear) ซึ่งจากการจำลองกระบวนการพบว่า สามารถประมาณค่าความร้อนได้ดีในกรณีที่ไม่มีคามผิดพลาดของแบบจำลอง อย่างไรก็ตามกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองเกิดขึ้น ค่าความร้อนที่ประมาณได้ยังคงมีความผิดพลาดไปจากค่าจริงอยู่

วีระยุทธ (2543) นำเสนอแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา 4 แบบ เพื่อใช้งานร่วมกับตัวควบคุมพีอีเอ็มซี ในการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนแบบกะ โดยใช้ตัวกรองคาร์บอนแบบยืดขยายเป็นตัวประมาณค่า เนื่องจากแบบจำลองเชิงเส้นคู่ (Bilinear) ที่นำเสนอโดย Kershenbaun และ Kittisupakorn (1994) ยังให้ผลที่ไม่ดีมาก ในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองและในกรณีที่สัญญาณรบกวนการวัด โดยแบบจำลองที่หนึ่งใช้แบบจำลองเชิงเส้นคู่ ซึ่งค่าความร้อนที่เกิดขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิในลักษณะเชิงเส้น ส่วนแบบจำลองที่สองและสามนั้นค่าความร้อนขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิในรูปแบบเอกซ์โปเนนเชียล ส่วนแบบจำลองสุดท้ายนั้น ให้ค่าความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในลักษณะเชิงเส้นและในลักษณะกำลัง

สองของอุณหภูมิ ซึ่งผลการจำลองผลการควบคุมพบว่าจำลองที่ 1,2 และ 3 ให้ผลในลักษณะเดียวกันและดีกว่าแบบจำลองที่ 4

ตารางที่ 2.7 สรุปลักษณะงานวิจัยที่เกี่ยวกับตัวกรองกาลมาน

ลักษณะงานวิจัย	ผู้วิจัย/ปี
เสนอการคำนวณแบบเรียกซ้ำ	R.E. kalman (1960)
เสนออัลกอริทึมของตัวกรองกาลมาน	Well (1971)
ศึกษาประสิทธิภาพตัวกรองกาลมาน	Hamilton และคณะ (1973)
การนำตัวกรองแบบยืดขยายมาใช้งาน	Valier และBonvin (1989)
ประมาณค่าความร้อนจากปฏิกิริยาคายความร้อนแบบกะ	Kershenbaun และKitisupakorn (1994)
นำเสนอแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าความร้อนจากปฏิกิริยา	วีระยุทธ (2543)

บทที่ 3.

การผลิตเอทานอลจากเซลลูโลสและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1. คุณสมบัติและแหล่งของสารจำพวกเซลลูโลส

อำนาจ ขวัญเมือง (2538) ได้อธิบายลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลสว่า เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดโพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วย Polymermolecule ของหน่วยย่อยของ D-anhydroglucopyranose มาเชื่อมเป็นสายยาวด้วยพันธะ Beta -1,4 glucosidic อย่างเป็นระเบียบ เป็นสายตรงที่ไม่มีแขนง สูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นองค์ประกอบที่ให้ความแข็งแรงแก่พืช โดยทั่วไปในธรรมชาติ จะพบเซลลูโลสอยู่ร่วมกับสารอื่น เช่น ลิกนิน, เฮมิเซลลูโลส จำนวนหน่วยของเซลลูโลสไม่ทราบจำนวนที่แท้จริง ประมาณได้ว่าต้องมีมากตั้งแต่ 1,000 – 10,000 หน่วย กลูโคส ซึ่งจะแตกต่างกันตามชนิดของพืช ถ้าพิจารณาถึงรูปแบบ (Conformation) ของการจัดเรียงตัวของหน่วยย่อยที่เชื่อมต่อกัน มักจะอยู่ในลักษณะ Chair form ซึ่งแต่ละโมเลกุลในสายเซลลูโลสจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะสายไฮโดรเจน ระหว่าง Hydroxyl group ที่ตำแหน่ง C-atom ที่สาม กับ Ring oxygen ของโมเลกุลถัดไป และเชื่อมต่อบetween สายเซลลูโลสที่ขนานกันด้วย (Intermolecular H-bond) ระหว่าง Hydroxyl group ที่ตำแหน่ง C-atom ที่หก กับ O-atom ที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของ (D-anhydroglucopyranose) ในอีกสายหนึ่ง ซึ่งทำให้เซลลูโลสมีโครงสร้างที่ซับซ้อน มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ยากต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์และสารเคมี

โดยทั่วไปธรรมชาติของเซลลูโลส จะอยู่ในรูปของลิกนินเซลลูโลส เซลลูโลสจะเชื่อมอยู่กับโพลีแซคคาไรด์อื่น ๆ เช่น เพคติน เฮมิเซลลูโลส แป้ง และ โพลีเมอร์ของลิกนิน จากการศึกษาพบว่าในส่วนของ Secondary cell wall จะเป็นส่วนที่พบเซลลูโลสอยู่มากที่สุด และจะพบปริมาณลดลงในส่วนของ Middle lamella ส่วนเฮมิเซลลูโลสและลิกนินจะพบมากในส่วน Middle lamella และจะมีปริมาณลดลงในส่วนของ Secondary cell wall ในส่วนนี้เซลลูโลส และส่วนประกอบอื่น ๆ ของผนังเซลล์ของพืช จะเรียงตัวเป็นกลุ่มสายยาว เรียกว่า Microfibrils และจะเชื่อมต่อกันแบบขนาน ทำให้เกิดความซับซ้อนมากขึ้น เรียกว่า Crystalline จะมีประมาณ 50-60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือจะเป็น Amorphous แต่ละบริเวณจะแสดงคุณสมบัติการยอมรับ ต่อกลไกการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ได้ต่างกัน โดยที่บริเวณ Amorphous ยอมให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาการย่อยสลายได้ง่ายกว่าบริเวณ Crystalline ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเร็วที่บริเวณ Amorphous

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรบางชนิด

ชนิดวัสดุ	ส่วนประกอบทางเคมี %				เอกสารอ้างอิง
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	
ฟางข้าว	32.1	24	12.5	17.5	ปิ่น จวี เวชชานูเคราะห์ (2526)
ชานอ้อย	33.4	30	18.9	2.4	ปิ่น จวี เวชชานูเคราะห์ (2526)
ต้นมันสำปะหลัง	33.4	30	18.9	2.4	Sawaminathan (1982)
ขี้ข้าวโพด	33.4	30	18.9	2.4	Parisi (1989)

จากข้อมูลพบว่าภายในประเทศไทยมีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจำพวกเซลลูโลสมากมาย ตัวอย่างเช่น ฟางข้าวประมาณ 23.373 หน่วยล้านตันต่อปี, เปลือกและเศษมันสำปะหลัง 15.40 หน่วยล้านตันต่อปี, ชานอ้อยชนิดต่าง ๆ 46.90 หน่วยล้านตันต่อปี และพวงข้าวโพด 3.840 หน่วยล้านตันต่อปี

นอกจากนี้แล้วยังพบว่าขยะชุมชน (Municipal Solid Waste Composition) เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล โดยสามารถแบ่งสัดส่วนของขยะออกไปได้หลายกลุ่มดังตารางที่ 3.2 สัดส่วนองค์ประกอบของขยะชุมชนของประเทศไทย

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนองค์ประกอบของขยะชุมชนของประเทศไทย

องค์ประกอบ	สัดส่วน %
จำพวกกระดาษ	15.9-17.0
เศษอาหาร	10.9-16.3
ผ้า	3.1-6.1
ไม้	3.9-8.0
พลาสติก	10.1-13.5
ยาง	0.2-5.0
โลหะ	3.6-5.7
แก้ว	5.6-7.4
อื่น ๆ	29.6-38.1

3.2. กลไกการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตเอทานอลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.2.1. กลไกการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตเอทานอล

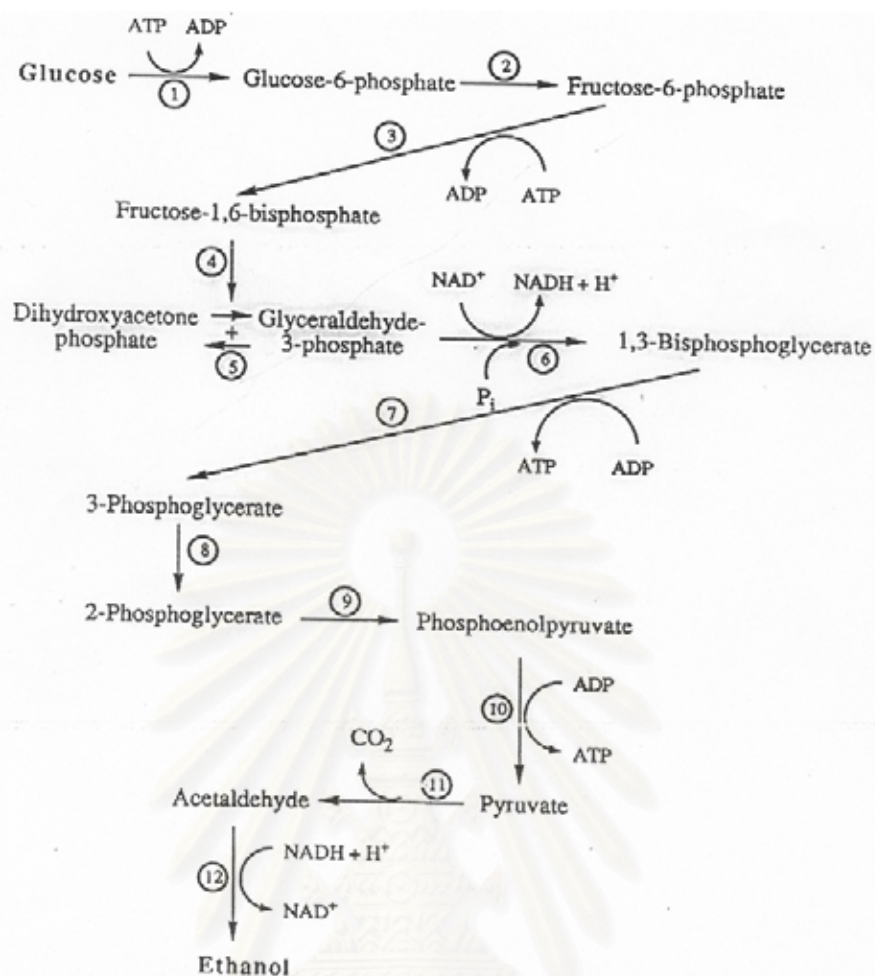
การผลิตเอทานอลโดยอาศัยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายวิธี

วิธีการแบบแรก (Separate Hydrolysis and Fermentation ,SHF) คือ การอาศัยการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์เซลลูเลส ซึ่งจะทำให้ได้น้ำตาลกลูโคส จากข้อมูลอุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นจะนำมาหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์จำพวกยีสต์ จะได้เอทานอลเป็นผลิตภัณฑ์ ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 45-50 องศาเซลเซียส ปัญหาที่สำคัญของวิธีการนี้ มักจะเกิดการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เนื่องจากความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์

วิธีการแบบที่สอง (Direct Microbial Conversion ,DMC) คือ อาศัยการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ ประเภทที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลส ได้ ในระหว่างการเจริญเติบโต จากนั้นเอนไซม์จะทำปฏิกิริยาเปลี่ยนสารตั้งต้นให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคส จากนั้นเซลล์จึงจะนำ น้ำตาลไปใช้เพื่อผลิตเป็นเอทานอล โดยขั้นตอนที่กล่าวมา จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปกลุ่มของเชื้อ มักเป็นพวก แบคทีเรียเทอร์โมไฟล์ ที่ต้องการสภาวะในการทำงานที่อุณหภูมิสูง มากกว่า 50 องศาเซลเซียส ปัญหาที่พบคือความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอล จะไปยับยั้งการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าว

วิธีการแบบที่สาม (Simultaneous Saccharification and Fermentation ,SSF) คือ การอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่าง เอนไซม์เซลลูเลส กับเชื้อยีสต์ประเภททนความร้อนได้สูง ทำให้การเสื่อมสภาพไม่เกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ จากข้อมูลพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 37-43 องศาเซลเซียส ข้อดีคือ ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ในถังปฏิกรณ์เดียว ทำให้ลดต้นทุนในการผลิตลงไป แต่ปัญหาที่สำคัญ คือ การเสื่อมสภาพของโปรตีน เมื่อมีพลังงานความร้อนจะทำให้การทำปฏิกิริยาของเชื้อ มีอัตราที่ช้าลง

กลไกการเกิดปฏิกิริยาการหมักน้ำตาลกลูโคสให้กลายเป็นเอทานอลในสภาวะไร้ออกซิเจนด้วยเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ขบวนการหมักเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสให้กลายเป็นเอทานอล มักจะถูกยับยั้ง เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงขึ้นของเอทานอล จากการศึกษาพบว่า ณ.สภาวะไร้ออกซิเจน กลไกเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์จะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทานอลดังรูปที่ 3.1.



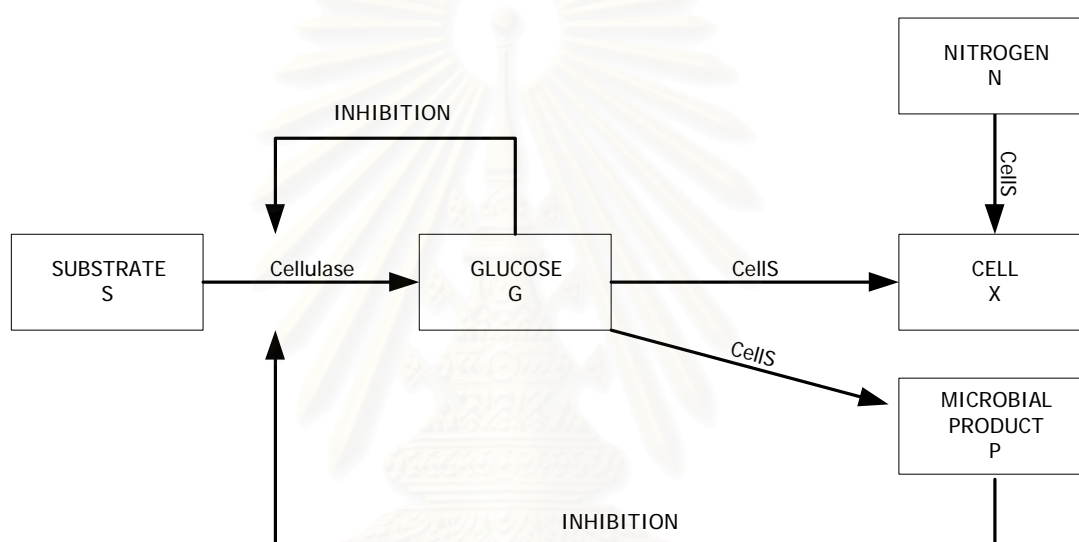
รูปที่ 3.1. กลไกการเปลี่ยนกลูโคสให้เป็นเอทานอล ภายในเซลล์

เมื่อน้ำตาลกลูโคส 1 โมเลกุล ถูกเปลี่ยนตามขั้นตอนต่าง ๆ ภายในเซลล์ ตามที่กล่าวมาแล้ว จะได้ผลิตผลเป็นเอทานอล และคายพลังงานออกมาประมาณ 23 kcal ดังนั้น ในระบบผลิตขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีระบบหล่อเย็น เพื่อรักษาอุณหภูมิให้เหมาะสมต่อสภาวะการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อคงไว้ซึ่งอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาและความต่อเนื่องในกระบวนการผลิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตเอทานอล

J.A. Asenjo และคณะ (1990) ได้ทำการศึกษาเพื่อเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการทำนายระบบ การเกิดเอทานอลจากปฏิกิริยา SSF ซึ่งนำข้อมูลจากการศึกษาของ Tagaki (1977) มาเป็นข้อมูลในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยระบบที่นำข้อมูลมานั้นมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส และใช้สับสเตรทเป็นผงเซลลูโลส และทำปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ที่ได้จาก *Trichoderma viride cellulase* และเชื้อที่ผ่านการตัดต่อทางพันธุกรรม *Saccharomyces carlbergensis* และทำการแก๊สมการด้วยวิธีระเหยเบียงตัวเลข ลักษณะของการเกิดปฏิกิริยา Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2. ลักษณะของการเกิดปฏิกิริยา SSF (ที่มา J.A. Asenjo (1990))

ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาจะเริ่มจาก เอนไซม์เซลลูเลสเข้าทำปฏิกิริยากับสับสเตรท ซึ่งในที่นี้คือ ผงเซลลูโลส เพื่อทำการสลายพันธะไฮโดรเจน จนได้เป็นหน่วยย่อยเล็กที่สุด คือน้ำตาลกลูโคส จากนั้นเชื้อจุลินทรีย์จะนำน้ำตาลกลูโคสไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน ทำให้เกิดผลผลิต คือ เอทานอล ซึ่งในระหว่างการเกิดเอทานอล พบว่า ความเข้มข้นของเอทานอลจะเข้าไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ และความเข้มข้นของกลูโคสด้วยเช่นกัน จากนั้นได้ทำการสร้างสมการสมดุลมวลสารเพื่อสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

การสร้างสมดุลมวลสารของตัวแปรสเททกรณี่ถึงปฏิกรณ์เป็นแบบกะ

(ที่มา J.A. Asenjo (1990))

1. การสร้างสมดุลมวลสารของสับสเตรท

$$\frac{dS}{dt} = -rate\ 1 \quad 3.1$$

2. การสร้างสมดุลมวลสารของเซลล์

$$\frac{dx}{dt} = rate\ 2 \quad 3.2$$

3. การสร้างสมดุลมวลสารของไนโตรเจนในระบบ

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{1}{b_1} rate\ 2 \quad 3.3$$

4. การสร้างสมดุลมวลสารของเอธานอล

$$\frac{dP}{dt} = rate\ 3 \quad 3.4$$

5. การสร้างสมดุลมวลสารของน้ำตาลกลูโคส

$$\frac{dG}{dt} = (rate\ 1) - \left(\frac{1}{b_2} rate\ 2\right) - \left(\frac{1}{b_3} rate\ 3\right) \quad 3.5$$

เมื่อ

S = Substrate (g/L)

X = Cell concentration (g/L)

N = Nitrogen concentration (g/L)

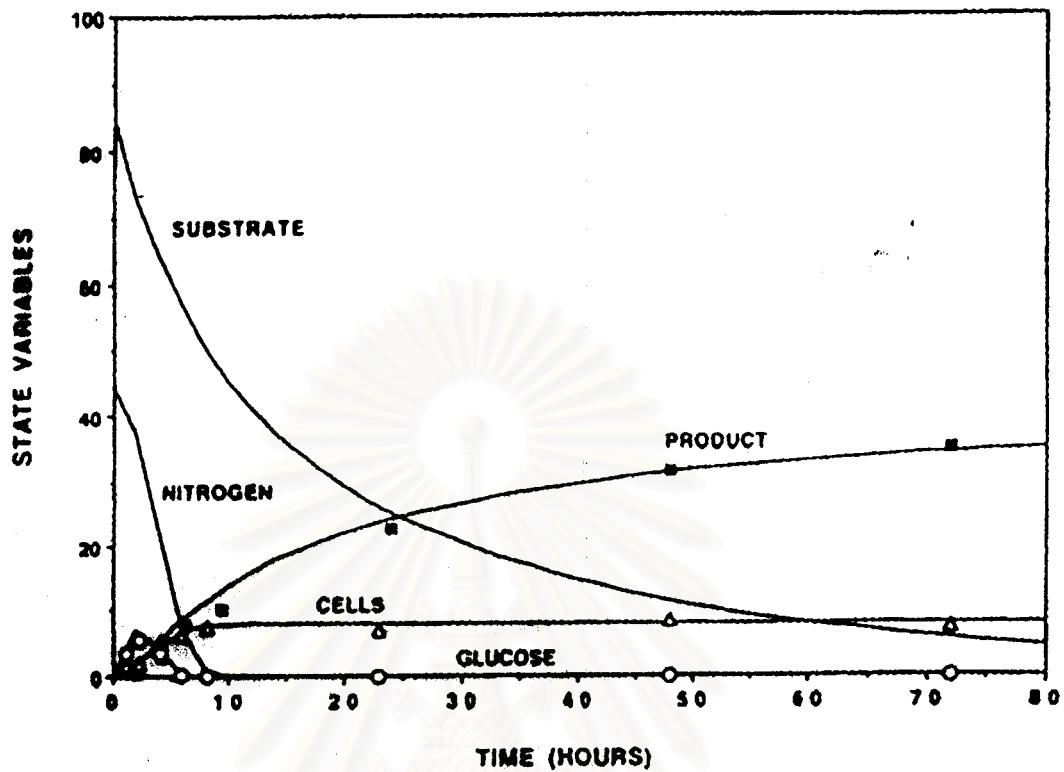
P = Microbial Product (g/L)

G = Glucose concentration (g/L)

$$rate\ 1 = \frac{b_5 S}{[b_6(1 + \frac{G}{b_7} + \frac{P}{b_8}) + S]} \quad \text{Substrate Hydrolysis} \quad 3.6$$

$$rate\ 2 = \frac{b_9 XGN}{[(b_{10} + G)(b_{11} + N)]} \quad \text{Cell Growth} \quad 3.7$$

$$rate\ 3 = \frac{b_{12} XG}{[(b_{13} + G)]} \quad \text{Product formation} \quad 3.8$$



รูปที่ 3.3. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ State variable กับเวลา (hr)

จากการศึกษาสามารถแสดงให้เห็นว่า การคำนวณจากสมการนั้นให้ผลที่ค่อนข้างตรงกับการทดลองของงานวิจัยอื่น ๆ ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จะนำชุดสมการและพารามิเตอร์ที่กล่าวมา ไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับควบคุมอุณหภูมิ โดยมีค่า Initial Condition ดังนี้

Initial Condition

$$S(0) = 85 \text{ g/L}$$

$$X(0) = 0.8 \text{ g/L}$$

$$N(0) = 0.444 \text{ g/L}$$

$$P(0) = 0 \text{ g/L}$$

$$G(0) = 0 \text{ g/L}$$

$$Tr(0) = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Tj(0) = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง

Parameter	Parameter of Kn	Value	Unit
stoichiometric constant	b1	0.064	Dim
	Parameter of Kg	Value	
biomass yield/substrate	b2	0.51	Dim
product yield/substrate	b3	0.52	Dim
maintenance term	b4	0	h ⁻¹
	Parameter of Ks	Value	
pseudo monod constant	b6	43	g/L
glucose inhibition constant	b7	6	g/L
product inhibition constant	b8	4	g/L
	Parameter of Kx	Value	
Monod constant for glucose	b10	0.025	g/L
Monod constant for nitrogen	b11	0.15	g/L
	Parameter of Kp	Value	
Monod constant for glucose	b13	0.1	g/L
	Parameter of Kt	Value	
Density	den	1.2	kg/m ³
Heat capacity for liquid	cp	1.5	kcal/kg C
Volume reactor	v	10000	Liter
Heat of glucos reaction	Hs	3.73	kcal/g/L
Heat of ethnol reaction	Hp	11.15	kcal/g/L
Heat of cell reaction	Ha	4.2	kcal/g/L
Heat tranfer coefficient	Ur	1000	kcal/m ² °C
	Parameter of Kt	Value	
Maximum reaction rate	b5	12	g/L h
Maximum growth rate	b9	0.6	h ⁻¹
Specific product rate	b12	0.6	h ⁻¹
	Parameter of Jacket	Value	
Flow In	Fc	8	m ³ /hr
Volume of Jacket	Vc	2500	Liter
Density	Denc	1.2	kg/m ³
Cpc	Cpc	0.25	kcal/kg°C
Area of jactket	Ar	21.575	m ²

3.3.แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์และเชื้อจุลินทรีย์

ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา SSF จากข้อมูลพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมนั้น มักจะขึ้นกับชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้งาน แต่โดยทั่วไป ประมาณ 37-38 องศาเซลเซียส โดยพบว่าปฏิกิริยาขั้นแรก (Hydrolysis) มีอุณหภูมิที่เหมาะสม ประมาณ 45-50 องศาเซลเซียส ส่วนปฏิกิริยาขั้นสอง (Fermentation) มีอุณหภูมิที่เหมาะสม ประมาณ 30-45 องศาเซลเซียส ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาขึ้นกับสายพันธ์ของเชื้อเป็นสำคัญ บางครั้งการตัดต่อทางพันธุกรรม จะช่วยทำให้เชื้อสามารถทนทานต่อสภาวะที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้

ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงจะดีต่อการเกิดปฏิกิริยาขั้นแรก แต่จะไม่ส่งผลดีต่อปฏิกิริยาขั้นสอง มักเป็นปัญหาของระบบนี้ ดังนั้นถ้าเลือกใช้เชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการตัดต่อทางพันธุกรรมให้ทนต่ออุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ในหลายงานวิจัยได้เลือกสภาวะที่เหมาะสมคือ ประมาณ 37 องศาเซลเซียส เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุม

จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญของอัตราการเกิดปฏิกิริยา SSF ดังนั้นการศึกษาถึงวิธีการที่จะควบคุมให้อุณหภูมิอยู่ในช่วงที่เหมาะสม เป็นเรื่องที่สำคัญอย่างยิ่ง

3.3.1. สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์กับอุณหภูมิ

ได้ทำการรวบรวมข้อมูลของเอนไซม์เซลลูเลสจากงานวิจัยต่าง ๆ สามารถแสดงข้อมูลได้ในตารางที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสกับอุณหภูมิ

ตารางที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์กับอุณหภูมิของเอนไซม์เซลลูเลส (ที่มา D.diane และ คณะ(1988))

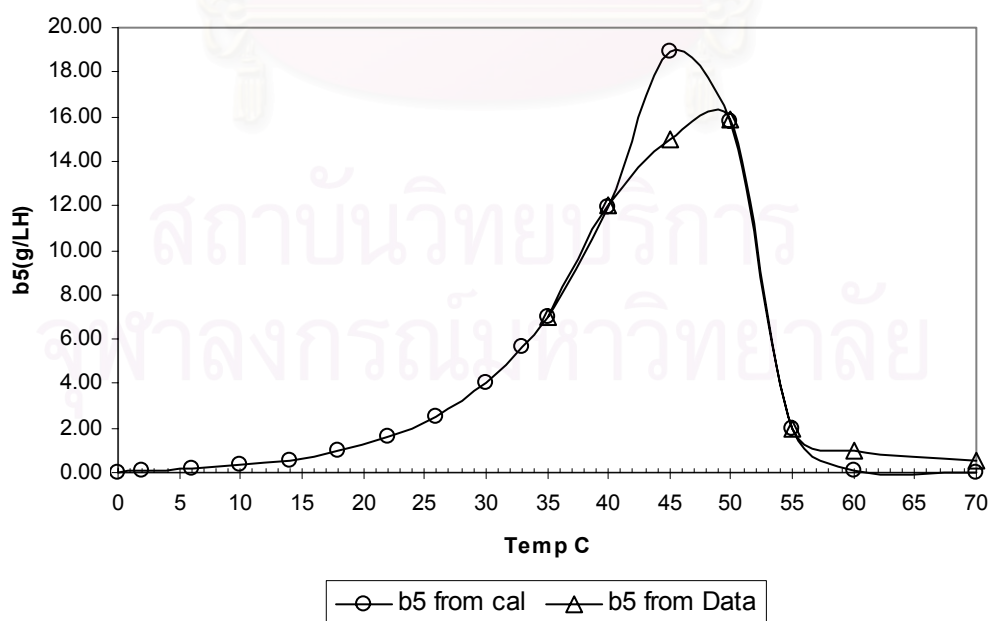
Temp C ^o	Vmax (g/l h)
35	7
40	12
45	15
50	15.9
55	2

จากนั้นได้นำข้อมูลไปฟิตสมการตามวิธีการของ J.Derek และคณะ(1993) เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ 2.4 สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ได้ในตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ของสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์กับอุณหภูมิ

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ของสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์กับอุณหภูมิ

Variable	Value	
Ea =	186.4	kJ/mol
R =	0.008314	kJ/mol K
A =	3.15E+15	
T _m =	322.8	K
<>H _m =	510	kJ/mol
<>C _p =	17	kJ/mol K

จากนั้นได้นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์กับอุณหภูมิ โดยแกน Y แสดงค่าเป็นอัตราเร็วของการเข้าทำปฏิกิริยาและแกน X เป็นอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราเร็วปฏิกิริยากับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากสมการ 2.4 กับข้อมูลจากตารางที่ 3.4

จากตารางที่ 3.5 สามารถนำค่าคงที่ไปใช้ในสมการที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 ได้ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์กับอุณหภูมิ

3.3.2. สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเชื้อ *S.carlsbergensis* กับอุณหภูมิ

J.Szczodrak และคณะ (1987) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลของเชื้อ *S.carlsbergensis FT14* จากงานวิจัยต่าง ๆ สามารถแสดงข้อมูลได้ในตารางที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเชื้อ *S.carlsbergensis FT14* กับอุณหภูมิ

ตารางที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเชื้อ *S.carlsbergensis FT14* กับอุณหภูมิ (ที่มา J.Szczodrak และคณะ (1987))

Temp C ^o	Vmax (h-1)
37	0.3
40	0.6
43	0.3
46	0.14
49	0.07

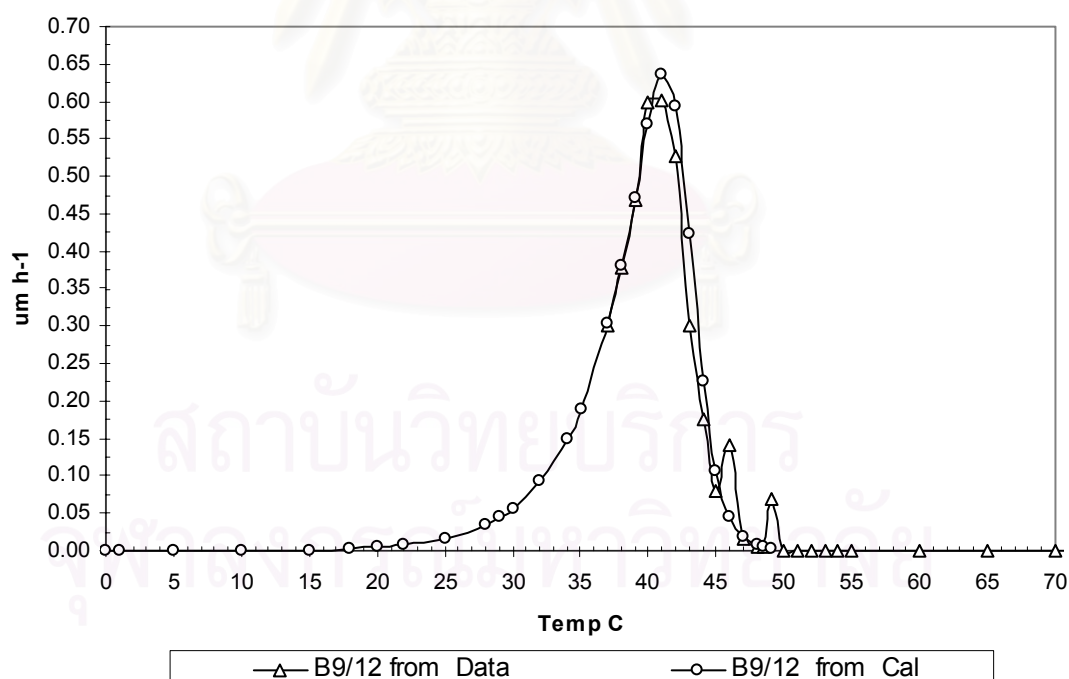
จากนั้นได้นำข้อมูลไปฟิตสมการตามวิธีการของ J.Derek และคณะ(1993) เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ 2.4 สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ได้ในตารางที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ของสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเชื้อ *S.carlsbergensis FT14* กับอุณหภูมิ

ตารางที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ของสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเชื้อ

S.carlsbergensis FT14 กับอุณหภูมิ

Variable	value	
Ea =	186.39156	kJ/mol
R =	0.008314	kJ/mol K
A=	7.68E+30	
T _m =	315.183381	K
<>H _m =	914.531	kJ/mol
<>C _p =	1.1	kJ/mol K

จากนั้นได้นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเชื้อ *S.carlsbergensis* FT14 กับอุณหภูมิ โดยแกน Y แสดงค่าเป็นอัตราเร็วของการเข้าทำปฏิกิริยา และแกน X เป็นอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการเข้าทำปฏิกิริยากับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากสมการ 2.4 กับข้อมูลจากตารางที่ 3.6

จากตารางที่ 3.7 สามารถนำค่าคงที่ไปใช้ในสมการที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 ได้ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการเข้าทำปฏิกิริยาของเชื้อ *S.carlsbergensis* FT14 กับอุณหภูมิ

3.4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการคายพลังงานจากการเกิดปฏิกิริยา

กระบวนการต่าง ๆ เกิดขึ้นมากมายระหว่างการเติบโตของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเพาะเลี้ยงมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการหมัก ดังนั้นจำเป็นต้องมีระบบหล่อเย็นเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิของการหมักคงที่ตามความต้องการ ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับระบบทำความเย็นจึงเข้ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ การวัดค่าความร้อนที่เกิดขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบทำความเย็น เพื่อให้ระบบมีความเหมาะสมและประหยัดค่าใช้จ่าย การวัดความร้อนโดยตรงทำได้ค่อนข้างยากและไม่สะดวก จึงได้มีการศึกษาการประมาณค่าความร้อน โดยทางอ้อมจากพารามิเตอร์ของระบบ เพื่อที่จะคำนวณปริมาณพลังงานออกมา

การประมาณค่าความร้อนระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของเชื้อจุลินทรีย์ อาศัยการดุลพลังงานตามสมการสารสัมพันธ์ โดยปริมาณความร้อนดังกล่าวเป็นผลต่างระหว่าง ความร้อนสันดาปของสับสเตรท กับความร้อนสันดาปของผลิตภัณฑ์และเซลล์ ดังนี้

$$\Delta H_p = \Delta H_s \Delta S - \sum \Delta H_p - \Delta H_a \Delta X \quad 3.9$$

เมื่อ

$$\Delta H_p = \text{ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเพาะเลี้ยง kcal/L}$$

$\Delta H_s, \Delta H_p, \Delta H_a$ = ปริมาณความร้อนสันดาปของสับสเตรท , ผลิตภัณฑ์ และ เซลล์ ตามลำดับ kcal/mol

3.4.1. สามารถสร้างสมการดุลความร้อนของปฏิกิริยาของระบบได้ดังนี้

เมื่อนำแนวคิดการสร้างสมการความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาการผลิตเอทานอลมารวมกับสมการดุลพลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทช์ สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$V_r \rho C_p \frac{dT_r}{dt} = [-(\Delta H_g \frac{dG}{dt}) + (\Delta H_p \frac{dP}{dt}) + (\Delta H_x \frac{dX}{dt})] - [u_r A_r (T_r - T_j)] \quad 3.10$$

3.4.2. สามารถสร้างสมการดุลความร้อนของ Jacket รอบ Reactor ได้ดังนี้

การสร้างสมดุลพลังงานส่วนระบายความร้อน รอบถังปฏิกรณ์ สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_j \rho_j C_{pj} \frac{dT_j}{dt} = [F_j \rho_j C_{pj} (T_j - T_{sp})] - [u_r A_r (T_r - T_j)] \quad 3.11$$

3.5. ทฤษฎีการควบคุมแบบพีไอดี

3.5.1. การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control)

วัตถุประสงค์ของการควบคุมแบบป้อนกลับคือเพื่อลดค่าความผิดพลาด (Error, $e(t)$) ให้เป็นศูนย์ โดยที่

$$e(t) = R(t) - B(t) \quad 3.12$$

เมื่อ $R(t)$ = ค่าเซ็ตพอยท์ (Set Point)

$B(t)$ = ค่าของตัวแปรควบคุม (Controlled Variable) ที่วัดได้

วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับประกอบด้วย 3 โหมดคือ Proportional (P), Integral (I) และ Derivative (D)

Proportional Control (P Control)

การควบคุมแบบ Proportional ค่าเอาท์พุทของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความผิดพลาดตามสมการต่อไปนี้

$$p(t) = p + K_c e(t) \quad 3.13$$

เมื่อ	$p(t)$	=	Controller Output
	P	=	Bias value คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมที่ Steady state
	K_c	=	Controller Gain

ค่าของ Controller Gain (K_c) สามารถปรับให้ Controller Output เปลี่ยนแปลงตามต้องการ โดยจะนำไปคูณกับผลต่างระหว่างค่าเซตพอยท์กับตัวแปรควบคุม ทั้งนี้ค่า K_c อาจเป็นบวกหรือลบก็ได้ขึ้นกับว่าต้องการให้ค่า Controller Output เพิ่มขึ้นหรือลดลงในขณะที่ค่าผลต่างเพิ่มขึ้น โดยทั่วไป K_c จะไม่มีหน่วย

ในบางกรณี จะพบ คำว่า Proportional Band แทน คำว่า Controller Gain ซึ่ง Proportional Band (PB) เป็นอัตราส่วนระหว่างอินพุตที่เปลี่ยนแปลงต่อเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง Proportional Band กับ Controller Gain เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$PB = \frac{100\%}{K_c} \quad 3.14$$

สมการข้างบนนี้ใช้ได้เฉพาะกรณี K_c ไม่มีหน่วย

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) สำหรับตัวควบคุมแบบ Proportional หาได้โดย

กำหนดให้ $p'(t) = p(t) - p$ 3.15

ดังนั้นจะได้

$$p'(t) = K_c e(t) \quad 3.16$$

ใช้ลาปลาซทรานส์ฟอร์มสมการ (1.5) จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุมแบบ P

$$\frac{P'(S)}{E(S)} = K_c \quad 3.17$$

ข้อดีของ proportional control

- สามารถปรับ K_c ค่าเท่าไรก็ได้ ตราบใดที่ระบบยังมีเสถียรภาพเพื่อให้ผลการตอบสนองเข้าสู่เซตพอยท์โดยเร็วที่สุด
- เหมาะกับการนำไปใช้ควบคุมระบบที่ยอมให้มีค่าความผิดพลาดได้ (ไม่สามารถควบคุมให้อยู่ที่เซตพอยท์ หรือเกิด Offset) เนื่องจากความง่าย ไม่ซับซ้อน เช่น การควบคุมระดับ (Level Control)

ข้อเสียของ proportional control

- ข้อเสียของการใช้ระบบควบคุมแบบ Proportional คือจะไม่สามารถกำจัดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัว (Steady-State Errors) หรือที่เรียกว่า Offset ได้เมื่อมีการเปลี่ยนค่าเซตพอยท์หรือมีการรบกวนจากโหลด (Load) อย่างต่อเนื่อง เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนค่า เซตพอยท์ใหม่ เอาท์พุทก็จะพยายามเข้าสู่ค่าเซตพอยท์นั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบเข้าสู่ Steady State ค่าเอาท์พุทก็จะไม่เท่ากับค่าเซตพอยท์ใหม่ นั่นคือเกิด Offset

การกำจัด Offset สามารถทำได้โดยการปรับค่าเซตพอยท์ (R) หรือค่า Bias (p) เมื่อมี Offset เกิดขึ้น แต่วิธีนี้เป็นทางเลือกที่ไม่สะดวกอย่างมาก เนื่องจากการหาค่า R (หรือ p) ใหม่ต้องอาศัยการลองผิดลองถูก ในทางปฏิบัติวิธีที่สะดวกกว่าจะใช้ตัวควบคุมที่มีการควบคุมแบบ Integral ซึ่งจะมีการปรับค่าอัตโนมัติเพื่อกำจัด Offset

Reverse or Direct Action

ค่า Controller Gain (K_c) มีค่าได้ทั้งบวกและลบ ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะของตัวควบคุม

- $K_c > 0$ Controller Output จะเพิ่มขึ้นแต่อินพุทลดลง เรียกว่า Reverse-Acting
- $K_c < 0$ Controller Output จะเพิ่มขึ้นแต่อินพุทเพิ่มขึ้น เรียกว่า Direct-Acting

ตัวควบคุมทั้งชนิด Direct และ Reverse-acting มีความจำเป็นในการใช้ขึ้นกรณี เช่น ใน Flow Control Loop ทหรานสมิตเตอร์ส่วนมากจะมีลักษณะการทำงานแบบ Direct Action คือ เมื่ออัตราการไหลที่เข้ามากขึ้น สัญญาณเอาท์พุทที่ออกก็จะมากขึ้น สำหรับ Control Valve สมมติว่าใช้วาล์วแบบ Air-to-open (A-O) คือเมื่อมีสัญญาณเข้ามากขึ้น ก็จะมีอัตราการไหลผ่านวาล์วมากขึ้น กรณีนี้ตัวควบคุมควรจะเป็นลักษณะ Reverse-Acting เนื่องจากเมื่อ อัตราการไหลที่วัดได้มีค่าสูงกว่าเซตพอยท์ที่ตั้งไว้ เราต้องการลดอัตราการไหลโดยการปิดวาล์วควบคุมลงเล็กน้อย ในทางกลับกัน ถ้าใช้วาล์วแบบ Air-to-close (A-C) เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น สัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมควรจะเป็น Direct-Acting เพื่อไปปิดวาล์ว เพราะฉะนั้นกรณีนี้ตัวควบคุมที่ใช้ควรเป็น Direct-Acting Controller

Integral Control

Controller Output จะขึ้นกับค่าอินทิกรัลของค่าความผิดพลาดของตัวแปรควบคุมตลอดช่วงเวลา ดังสมการ

$$p(t) = p + \frac{1}{\tau_1} \int e(t) dt \quad 3.18$$

เมื่อ τ_1 คือ Integral Time หรือ Reset Time

โดยปกติ การควบคุมแบบ Integral จะให้ผลตอบสนองของคอนข้างช้า ไม่สามารถนำเอาที่พุดของกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งในทางปฏิบัติ การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ Integral อย่างเดียวจึงไม่เป็นที่นิยม แต่จะเป็นการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ Integral ร่วมกับการควบคุมแบบ Proportional ซึ่งจะเรียกว่า Proportional Integral Control (PI Control)

การควบคุมแบบ Proportional Integral จะให้ Controller Output เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$p(t) = p + K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_1} \int e(t) dt \right] \quad 3.19$$

ซึ่งจะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการควบคุมแบบ PI คือ

$$\frac{P'(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_1 s} \right) = K_c \left(\frac{\tau_1 s + 1}{\tau_1 s} \right) \quad 3.20$$

ข้อดีของ integral control action

กำจัด Offset ได้เนื่องจาก Controller Output $p(t)$ จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาจนกระทั่ง

$$e(t^*) = 0$$

ข้อเสียของ integral control action

- ผลการตอบสนองของตัวควบคุมจะช้าลง
- ผลการตอบสนองจะมีการแกว่งทำให้เสถียรภาพลดลง

- เกิด Reset Windup

Reset Windup

จากการที่เทอม Integral มีผลทำให้ Controller Output เปลี่ยนแปลงตามเวลาตามใดที่ $e(t) \neq 0$ เมื่อมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาหลายๆ เทอม Integral จะสะสมมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดที่ Controller Output อิ่มตัว เช่น วาล์วควบคุมได้เปิดเต็มที่แล้ว การสะสมของเทอม Integral หลังจากเลยจุดที่ตัวควบคุมอิ่มตัวแล้วจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Reset Windup คือเมื่อมีค่าความผิดพลาดยังคงมีอยู่ ตัวควบคุมก็จะส่งสัญญาณให้วาล์วเปิดมากขึ้นซึ่งจะมากกว่าค่าที่จุดอิ่มตัว แต่วาล์วไม่สามารถเปิดได้มากกว่านี้อีกแล้ว หรือแม้จนกระทั่งเมื่อค่าความผิดพลาดลดลงจนกลายเป็นศูนย์ แต่วาล์วควบคุมก็ยังเปิดเต็มที่อยู่ ดังนั้นผลการตอบสนองที่ออกมาจึงไม่เหมาะสม ทำให้ไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้ การแก้ไขข้อบกพร่องนี้ทำได้โดยการใส่ตัวควบคุมที่มี Antireset Windup ซึ่งจะหยุด Integral Action ลงทันทีเมื่อ Controller Output ถึงจุดอิ่มตัวแล้ว และ Integral Action จะกลับมาทำงานอีกหลังจากสัญญาณเอาต์พุตต่ำกว่าจุดอิ่มตัว โดยจะทำการอินทิเกรตค่าความผิดพลาดใหม่โดยเริ่มจากเวลาที่กลับมาทำงานอีกครั้ง

Derivation Control

Controller Output เป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของตัวแปรควบคุมดังสมการ

$$p(t) = p + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad 3.21$$

เมื่อ τ_D คือ Derivative Time

Controller Output จะเท่ากับค่าที่ Steady State (p) ตามใดที่ค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่ (นั่นคือ $\frac{de(t)}{dt} = 0$) โดยปกติ การควบคุมแบบ Derivative จะให้ผลตอบสนองรวดเร็วมาก ทำให้ตัวแปรปรับมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างรุนแรง และยังส่งผลให้ตัวแปรควบคุมเกิดการแกว่ง ดังนั้น ในทางปฏิบัติ การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ Derivative อย่างเดียวจึงไม่เป็นที่นิยม แต่จะเป็นการประยุกต์ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบ Proportional และ Integral ซึ่งจะเรียกว่า Proportional Integral Derivation Control (พีไอดี Control)

การควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative จะให้ Controller Output เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$p(t) = p + K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad 3.22$$

ซึ่งจะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการควบคุมแบบ พีไอดี คือ

$$\frac{P'(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad 3.23$$

ข้อดีของ Derivative Control Action

- เร่งให้ผลการตอบสนองเข้าสู่เซตพอยท์ได้เร็วขึ้น
- ลดแนวโน้มที่ระบบจะมีเสถียรภาพลดลงอันเนื่องจากผลของเทอม Integral

ข้อเสียของ Derivative Control Action

-ในกรณีระบบมีสัญญาณรบกวน (Noise) มาก เช่น การควบคุมอัตราการไหล จะไม่เหมาะที่จะใช้การควบคุมแบบ Derivative เพราะจะทำให้ผลการตอบสนองมีการแกว่งมากเนื่องมาจากผลการสัญญาณรบกวนทำให้ค่าความผิดพลาดมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางบวกและลบ สลับกันส่งผลให้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับแบบ Derivative ไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้

3.6. ทฤษฎีการควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

3.6.1. การควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (Generic Model Control)

จีเอ็มซีถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Lee และ Sullivan (1988) เป็นการควบคุมที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการในการคำนวณค่าตัวแปรปรับโดยตรง ซึ่งแบบจำลองที่ใช้จะเป็นแบบจำลองเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ ในกรณีที่แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นก็สามารถนำมาใช้ได้ โดยมีต้องผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นเสียก่อน นอกจากนี้แล้วจีเอ็มซีสามารถกำหนดลักษณะผลตอบสนองของตัวแปรควบคุมได้ตามต้องการโดยการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมเพียงสองตัวด้วยวิธีการที่ง่ายไม่ซับซ้อน ดังนั้นจีเอ็มซีจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางเคมีมากมาย เช่นประยุกต์ใช้สำหรับการควบคุมเครื่องทำให้กลายเป็นไอ โดย Newell และคณะ (1989), การควบคุมหอกลั่นโดย Rani และ Gangiah (1991) และการควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ โดย Cott และ Macchietto (1989)

พิจารณาถ้าให้แบบจำลองของกระบวนการโดยทั่วไปอยู่ในรูปต่อไปนี้

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + g(x)u \quad 3.24$$

$$y = h(x) \quad 3.25$$

โดยที่ x คือตัวแปรสแตต

u คือตัวแปรปรับ

y คือตัวแปรควบคุม

กำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมที่ต้องการผ่านสมการต่อไปนี้

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)^d = k_1(y^{sp} - y) + k_2 \int (y^{sp} - y) dt \quad 3.26$$

โดย $\left(\frac{dy}{dt}\right)^d$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมที่ต้องการ

k_1 และ k_2 คือค่าคงที่ของ จีเอ็มซี

y^{sp} คือค่าเป้าหมายของตัวแปรควบคุม

ค่าตัวแปรปรับจะสามารถคำนวณได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

จาก 3.25 ได้
$$\frac{dy}{dt} = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad 3.27$$

โดยทั่วไปแล้ว $h(x) = x$

ทำให้
$$\frac{\partial h(x)}{\partial x} = 1 \quad 3.28$$

ดังนั้นสมการที่ 3.27 จะลดรูปลงเป็นสมการต่อไปนี้

$$\frac{dy}{dt} = f(x) + g(x)u \quad 3.29$$

เมื่อต้องการให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมเป็นไปตามที่กำหนด สิ่งที่ต้องการคือ

ให้
$$\frac{dy}{dt} = \left(\frac{dy}{dt}\right)^d \quad 3.30$$

จะได้

$$k_1(y^{sp} - y) + k_2 \int (y^{sp} - y) dt = f(x) + g(x)u \quad 3.31$$

ในที่สุดจะได้สมการสำหรับคำนวณค่าตัวแปรปรับคือ

$$u = \frac{\left[k_1(y^{sp} - y) + k_2 \int (y^{sp} - y) dt - f(x) \right]}{g(x)} \quad 3.32$$

โดยปกติแล้วในการที่จะนำจีเอ็มซีไปประยุกต์ใช้กับระบบใดก็ตาม ไซทาล (2542) อ้างว่ามีสิ่งที่จะต้องตรวจสอบอยู่ดังนี้

- ตรวจสอบว่าระบบดังกล่าวมีค่าระดับสัมพัทธ์เป็นหนึ่งหรือไม่ : ดังที่ได้กล่าวถึงในตอนต้นแล้วว่าจีเอ็มซีเป็นการควบคุมสำหรับระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์เป็นหนึ่งเท่านั้น ถ้ามีระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่งแล้วจะไม่สามารถประยุกต์ใช้จีเอ็มซีได้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นในหัวข้อต่อไปว่าจะมีวิธีการอย่างไรในการทำให้สามารถประยุกต์ใช้จีเอ็มซีกับระบบที่มีค่าระดับสัมพัทธ์มากกว่าหนึ่งได้

- ตรวจสอบซีโรไดนามิกส์ (Zeros Dynamics) : ซีโรไดนามิกส์หมายถึง อินเทอร์นัลไดนามิกส์ (Internal Dynamics) หรือไดนามิกส์ของตัวแปรสเตตอื่นที่นอกเหนือจากตัวแปรควบคุม ในสถานะที่ตัวแปรควบคุมถูกควบคุมให้อยู่ในเป้าหมายที่ต้องการ นั่นคือตัวแปรควบคุมจะมีค่าเท่ากับศูนย์ (ในรูปของค่าเบี่ยงเบน) ซึ่งจะเป็นการบอกได้ว่ากระบวนการที่ถูกควบคุมนั้นมีเสถียรภาพหรือไม่เมื่อตัวแปรควบคุมถูกควบคุมให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่ต้องการ

การคำนวณค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล

การคำนวณค่าคงที่ของจีเอ็มซีนั้นสามารถทำได้ง่ายโดยการคำนวณค่าคงที่เพียงสองตัว k_1 และ k_2 เพื่อให้ได้ลักษณะผลตอบสนองของตัวแปรควบคุมตามต้องการ ซึ่งจากสมการที่ 3.26 ซึ่งเป็นสมการที่กำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมที่ต้องการ ดังนี้

$$\left(\frac{dy}{dt} \right)^d = k_1(y^{sp} - y) + k_2 \int (y^{sp} - y) dt \quad 3.33$$

แปลงสมการ 3.26 ให้อยู่ในรูปลาปลาซโดเมนได้

$$sy = k_1(y^{sp}(s) - y(s)) + k_2 \frac{1}{s}(y^{sp}(s) - y(s)) \quad 3.34$$

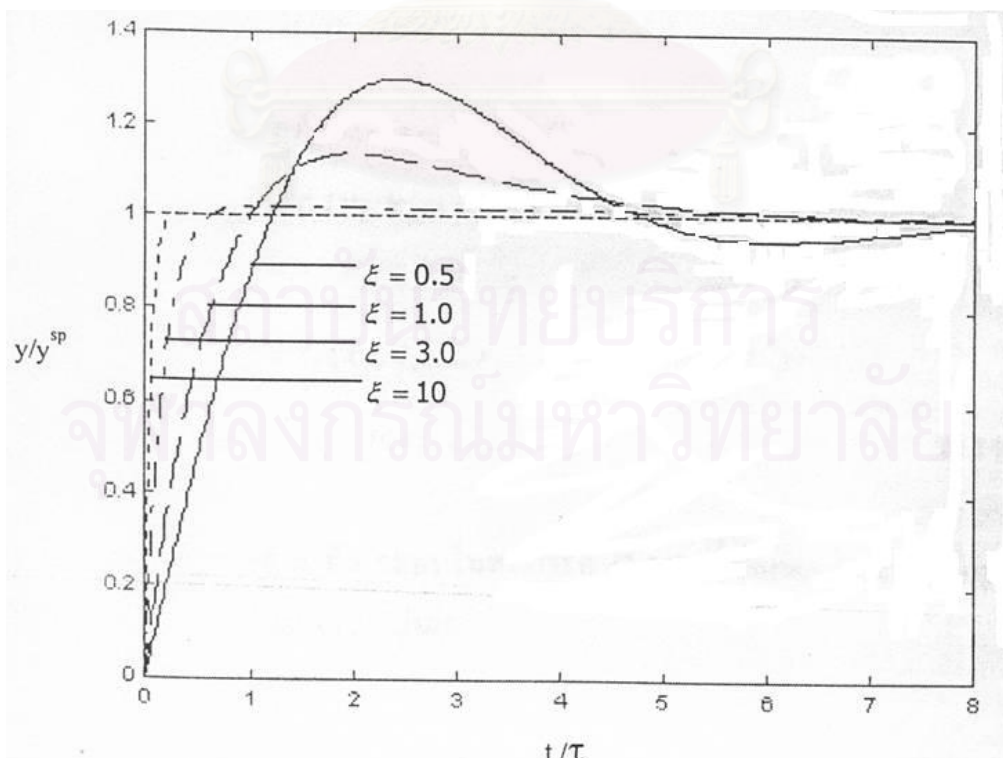
$$(s + k_1 + k_2 \frac{1}{s})y(s) = (k_1 + k_2 \frac{1}{s})y^{sp}(s) \quad 3.35$$

$$\frac{y(s)}{y^{sp}(s)} = \frac{k_1 s + k_2}{s^2 + k_1 s + k_2} \quad 3.36$$

กำหนดให้ $k_1 = \frac{2\zeta}{\tau}$ และ $k_2 = \frac{1}{\tau^2}$ จากนั้นแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ 3.36 ได้

$$\frac{y(s)}{y^{sp}(s)} = \frac{2\zeta\tau s + 1}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1} \quad 3.37$$

สมการที่ 3.37 มีลักษณะคล้ายกับระบบอันดับที่ 2 ที่กล่าวถึงโดย Stephanopoulos (1984) ที่มี τ แสดงถึงช่วงเวลาการแกว่งตามธรรมชาติของระบบ (Natural Period of Oscillation of the System) และ ζ แสดงถึงสัมประสิทธิ์หน่วง (Damping Factor) ซึ่ง Lee และ Sullivan (1988) ได้ให้ลักษณะของผลตอบสนองของระบบซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{y}{y^{sp}}$ และ $\frac{t}{\tau}$ ตามสมการที่ 3.37 ไว้ในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 รูปแสดงลักษณะผลตอบสนองของตัวควบคุมจีเอ็มซีที่ค่า ζ ต่างๆกัน

ขั้นตอนในการคำนวณค่าคงที่เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ต้องการมีดังนี้

3. เลือก ζ จากรูปข้างบนเพื่อให้ได้ลักษณะผลตอบสนองที่ต้องการ
2. กำหนด τ เพื่อให้ได้จังหวะเวลาที่เหมาะสมที่สุดคล้อยกับความเร็วของผลตอบสนองของกระบวนการ
3. คำนวณค่า k_1 และ k_2 จากสมการต่อไปนี้

$$k_1 = \frac{2\zeta}{\tau}$$

$$k_2 = \frac{1}{\tau^2}$$

3.38 และ 3.39 ตามลำดับ

3.7. ทฤษฎีตัวกรองคาลมาน

3.7.1. การใช้ตัวกรองคาลมานเป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์

ตัวกรองคาลมานเป็นเทคนิคในการประมาณค่าที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุดในรูปแบบของสเตทสเปซ ด้วยข้อดีที่สำคัญคือแบบจำลองของตัวแปรที่ต้องการทราบค่าจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณด้วย และขั้นตอนการคำนวณเป็นแบบวิธีเรียกซ้ำจึงทำให้ประหยัดหน่วยความจำและเวลาในการคำนวณ

ตัวกรองคาลมาน

ปัญหาโดยทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองคาลมานนั้นจะเป็นการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์ของระบบ โดยสมการแบบจำลองในรูปแบบเชิงเส้นของระบบสามารถเขียนได้ดังนี้

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad 3.40$$

และสมการค่าการวัดคือ

$$y_k = C_k x_k + v_k \quad 3.41$$

เมื่อ

x_k	คือ	ค่าของสเตท ณ เวลา k ซึ่งกำหนดให้มีจำนวนเท่ากับ n
u_k	คือ	ค่าตัวแปรปรับ ณ เวลา k ซึ่งกำหนดให้มีจำนวนเท่ากับ r
y_k	คือ	ค่าการวัด ณ เวลา k ซึ่งกำหนดให้มีจำนวนเท่ากับ m
A_k	คือ	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเตท ณ เวลา k กับสเตท ณ เวลา $k+1$ มีมิติ $n \times n$
B_k	คือ	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรปรับและค่าสเตทมีมิติ $n \times r$
C_k	คือ	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัดและค่าสเตทมีมิติ $m \times n$

โดยที่ w_k และ v_k เป็นตัวแปรสุ่มสัญญาณรบกวนของระบบและค่าการวัด โดยสมมติให้ทั้ง w_k และ v_k เป็นอิสระซึ่งกันและกันและมีการกระจายแบบปกติซึ่งคือ

$$Prob(w_k) \approx N(0, Q) \quad 3.42$$

$$Prob(v_k) \approx N(0, R) \quad 3.43$$

เมื่อ $E(w_k \cdot w_k^T) = Q_k$ คือความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนของแบบจำลอง
 $E(v_k \cdot v_k^T) = R_k$ คือความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนของการวัด

ถ้ากำหนดให้ $\hat{x}_{k+1|k}$ เป็นค่าประมาณของ x ณ เวลา $k+1$ ที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยค่าของข้อมูลในอดีต ณ เวลา k และกำหนดให้ $\hat{x}_{k+1|k+1}$ เป็นค่าประมาณ ณ เวลา $k+1$ ที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยค่าของข้อมูลของ $\hat{x}_{k+1|k}$ และค่าการวัด y_{k+1} จะสามารถนิยามความคลาดเคลื่อนของค่าประมาณได้ดังนี้

$$e_{k+1|k} = x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k} \quad 3.44$$

และ

$$e_{k+1|k+1} = x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k+1} \quad 3.45$$

จะได้เมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนดังนี้

$$P_{k+1|k} = E \left[e_{k+1|k} \cdot e_{k+1|k}^T \right] \quad 3.46$$

และ

$$P_{k+1|k+1} = E \left[e_{k+1|k+1} \cdot e_{k+1|k+1}^T \right] \quad 3.47$$

ค่าของ $\hat{x}_{k+1|k}$ จะได้จากการคำนวณโดยอาศัยสมการแบบจำลองดังนี้

$$\hat{x}_{k+1|k} = A_k \hat{x}_{k|k} + B_k u_k \quad 3.48$$

ค่าของ $\hat{x}_{k+1|k}$ จะได้จากการคำนวณโดยการรวมพจน์ของ $\hat{x}_{k+1|k}$ กับค่าถ่วงน้ำหนักคูณกับผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าการวัดที่ได้จากการทำนาย ซึ่งเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1|k}) \quad 3.49$$

พจน์ของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าการวัดที่ได้จากการทำนายนี้จะเป็นส่วนที่ใช้ในการปรับความถูกต้องให้กับค่า $\hat{x}_{k+1|k}$ ที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งจะเรียกว่า “Residual”

เมตริกซ์ K_{k+1} ซึ่งมีมิติ $n \times m$ ในสมการ (3.78) จะเรียกว่า “เมตริกซ์เกนคาลมาน (Kalman gain matrix)”

จากการแทนสมการที่ (3.78) ลงในสมการที่ (3.76) จะได้

$$P_{k+1|k+1} = E \left\{ \left[\left(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k} \right) - K_{k+1} \left(C_{k+1} x_{k+1} + v_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1|k} \right) \right] \left[\left(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k} \right) - K_{k+1} \left(C_{k+1} x_{k+1} + v_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1|k} \right) \right]^T \right\} \quad 3.50$$

ทำการแทน $x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k}$ ด้วย $e_{k+1|k}$ จะได้

$$P_{k+1|k+1} = E \left\{ \left[\left(e_{k+1|k} - K_{k+1} (C_{k+1} e_{k+1} + v_{k+1}) \right) \left(e_{k+1|k} - K_{k+1} (C_{k+1} e_{k+1} + v_{k+1}) \right)^T \right] \right\} \quad 3.51$$

เมื่อทำการกระจายพจน์ของสมการ 3.51 และกำหนดให้ $e_{k+1|k}$ ไม่มีความสัมพันธ์ (uncorrelated) กับ v_{k+1} จะได้

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1}C_{k+1})P_{k+1|k}(I - K_{k+1}C_{k+1})^T + K_{k+1}R_{k+1}K_{k+1}^T \quad 3.52$$

จากสมการที่ 3.52 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณมีค่าขึ้นอยู่กับค่าเมตริกซ์ เกนคาลมาน ดังนั้นค่าของเมตริกซ์เกนคาลมานที่เลือกมาควรจะทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณที่น้อยที่สุด นั่นก็คือทำให้สมการคือ 3.52 มีค่าน้อยที่สุดนั่นเอง โดยค่าของเมตริกซ์ เกนคาลมานที่จะทำให้ได้ค่าคลาดเคลื่อนในการประมาณน้อยที่สุดสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไป

$$K_{k+1} = P_{k+1|k}C_{k+1}^T(C_{k+1}P_{k+1|k}C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} \quad 3.53$$

ในส่วนของการพิสูจน์ว่าค่าเมตริกซ์เกนคาลมานที่ได้มาสามารถทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณน้อยที่สุดนั้นมีการกล่าวไว้โดย วีรยุทธ(2543)

จากสมการที่ 3.46 ค่าของ $e_{k+1|k}$ สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} e_{k+1|k} &= x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k} \\ &= (A_k x_k + B_k u_k + w_k) - (A_k x_k + B_k u_k) \\ &= A_k (x_k - \hat{x}_{k|k}) + w_k \\ &= A_k e_{k|k} + w_k \end{aligned} \quad 3.54$$

แทนค่าจากสมการที่ 3.54 ลงในสมการที่ 3.46 ได้

$$P_{k+1|k} = E \left[(A_k e_{k|k} + w_k) \cdot (A_k e_{k|k} + w_k)^T \right] \quad 3.55$$

เมื่อทำการกระจายพจน์ของสมการ (3.84) และกำหนดให้ $e_{k|k}$ ไม่มีความสัมพันธ์กับ w_k จะได้

$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + Q_k \quad 3.56$$

จากสมการที่ได้แสดงมาทั้งหมด สมการ 3.48,3.49,3.52,3.53 และ 3.56 จะถูกนำมา รวมเป็นขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมาน ซึ่งจะวนเป็นรอบการคำนวณซ้ำไปจนถึงเวลาที่ ต้องการ ดังจะกล่าวต่อไปดังนี้

ขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมาน

จากสมการด้านบนที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าตัวกรองคาลมานจะทำการประมาณค่าของส เตทหรือพารามิเตอร์จากแบบจำลองก่อน จากนั้นจึงทำการปรับปรุงแก้ไขค่าเพื่อให้มีความถูกต้อง มากขึ้น ดังนั้น กลุ่มของสมการของตัวกรองคาลมานจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือสมการ การทำนาย (Predictor equations หรือ Time update equations) และสมการการแก้ไข (Corrector equations หรือ Measurement update equations) ซึ่งสามารถนำมาสรุปเป็นขั้น ตอนการคำนวณ และแผนภาพดังนี้

สมการการทำนาย

คำนวณค่าประมาณโดยอาศัยค่าของข้อมูลในอดีต

$$\hat{x}_{k+1|k} = A_k \hat{x}_{k|k} + B_k u_k \quad 3.57$$

คำนวณเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนที่ได้จากค่าของข้อมูลในอดีต

$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + Q_k \quad 3.58$$

สมการการแก้ไข

คำนวณค่าเมตริกซ์เกนคาลมาน

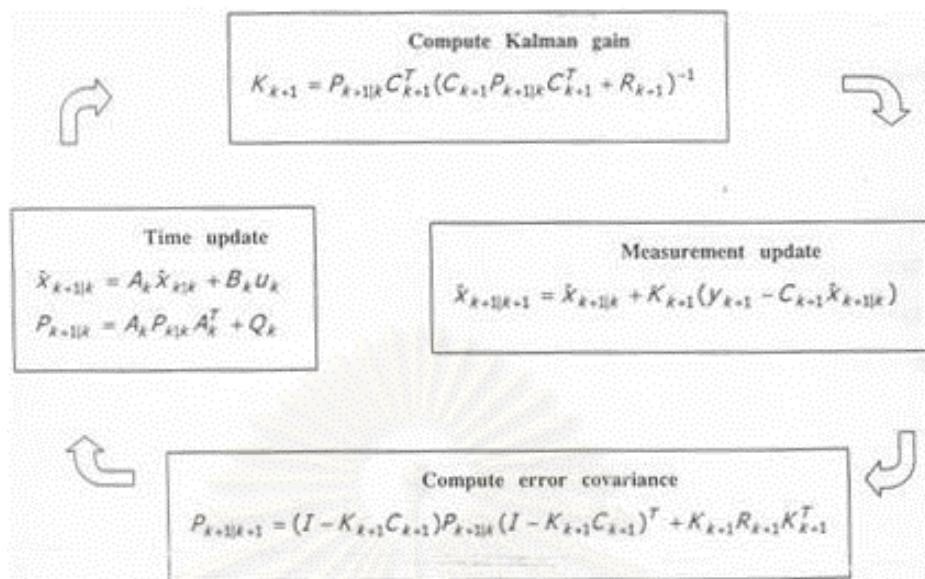
$$K_{k+1} = P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} \quad 3.59$$

คำนวณค่าประมาณค่าใหม่

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - C_{k+1} \hat{x}_{k+1|k}) \quad 3.60$$

คำนวณค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนค่าใหม่

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1|k} (I - K_{k+1} C_{k+1})^T + K_{k+1} R_{k+1} K_{k+1}^T \quad 3.61$$



รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมาน

3.7.2. ตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย (Extended Kalman Filter)

ตัวกรองคาลมานที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.7.1 นั้นจะเกี่ยวข้องกับการประมาณของระบบเชิงเส้น แต่ระบบจริงในอุตสาหกรรมนั้นมักจะเป็นระบบไม่เชิงเส้นและความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรสแตทกับการวัดนั้นอาจไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงแก้ไขขั้นตอนการคำนวณบางขั้นตอนเพื่อให้สามารถนำตัวกรองคาลมานไปประยุกต์ใช้งานกับระบบไม่เชิงเส้นได้ด้วย จึงเป็นที่มาของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย

พิจารณาแบบจำลองของระบบไม่เชิงเส้นดังนี้

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k) \tag{3.62}$$

และสมการค่าการวัดคือ

$$y_k = h(x_k, v_k) \tag{3.63}$$

เมื่อ ฟังก์ชัน f คือ สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสแตท ณ เวลา k และค่าสแตท ณ เวลา $k+1$
ฟังก์ชัน h คือ สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัด ณ เวลา k และค่าสแตท ณ เวลา k

W_k และ v_k เป็นตัวแปรสุ่มสัญญาณรบกวนของระบบและค่าการวัดที่เป็นอิสระซึ่งกันและกันและมีการกระจายแบบปกติ

ในส่วนของขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายนี้จะคล้ายกับขั้นตอนการคำนวณที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.7.1 แต่เนื่องจากลักษณะของแบบจำลองที่เป็นแบบไม่เชิงเส้นนี้ทำให้มีความต่างกันที่การคำนวณค่า $\hat{x}_{k+1|k}$ และค่าประมาณของการวัด \hat{y}_{k+1} ในสมการของการแก้ไข ซึ่งจะทำให้การคำนวณจากสมการในรูปแบบไม่เชิงเส้นเลย ในขณะที่ขั้นตอนการคำนวณอื่นยังคงเป็นรูปแบบเดิม

โดยในส่วนของสมการที่ 3.48 จะเปลี่ยนเป็น

$$\hat{x}_{k+1|k} = f(\hat{x}_{k|k}, u_k) \quad 3.64$$

และในส่วนของสมการที่ (3.78) จะเปลี่ยนเป็น

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - h(\hat{x}_{k+1|k})) \quad 3.65$$

จากที่กล่าวมาจะสามารถนำมาสรุปเป็นขั้นตอนการคำนวณและแผนภาพของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยายได้ ดังนี้

สมการการทำนาย

คำนวณค่าประมาณโดยอาศัยค่าของข้อมูลในอดีต

$$\hat{x}_{k+1|k} = f(\hat{x}_{k|k}, u_k) \quad 3.66$$

คำนวณเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนที่ได้จากค่าของข้อมูลในอดีต

$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + Q_k \quad 3.67$$

สมการการแก้ไข

คำนวณค่าเมตริกซ์เกนคาลมาน

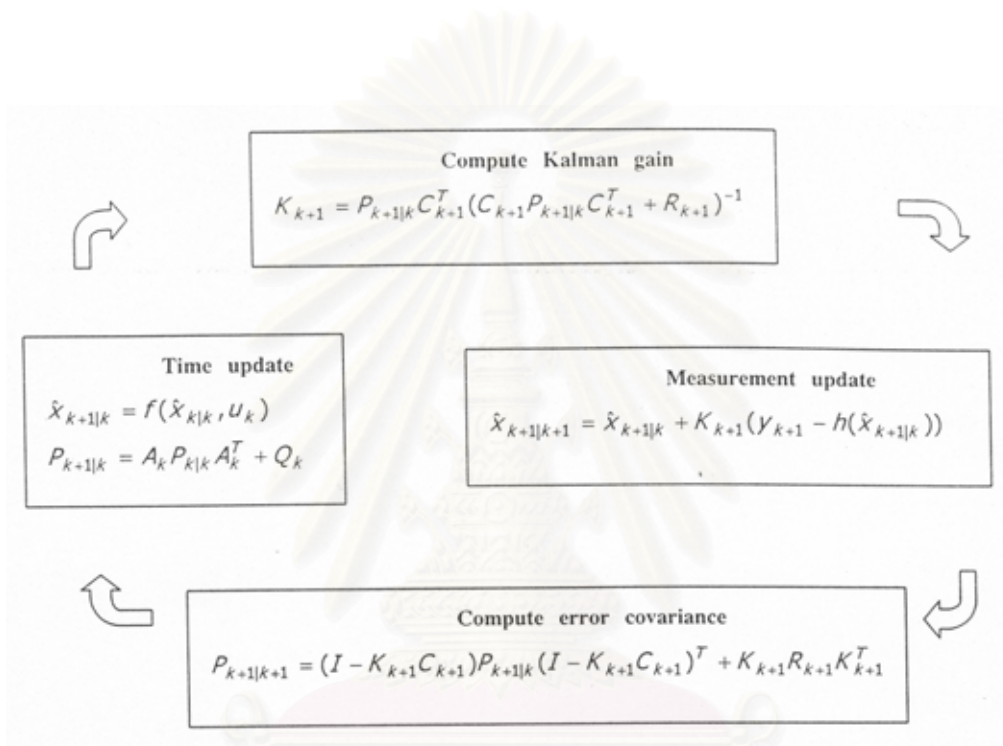
$$K_{k+1} = P_{k+1|k} C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1|k} C_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} \quad 3.68$$

คำนวณค่าประมาณค่าใหม่

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1}(y_{k+1} - h(\hat{x}_{k+1|k})) \quad 3.69$$

คำนวณค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนค่าใหม่

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1}C_{k+1})P_{k+1|k}(I - K_{k+1}C_{k+1})^T + K_{k+1}R_{k+1}K_{k+1}^T \quad 3.70$$



รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานแบบยืดขยาย

3.7.3. การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองคาลมาน

จากขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานพบว่า ต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ค่าประมาณ $x_{k|k}$ และเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ $P_{k|k}$ นอกจากนี้ยังต้องกำหนดค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง Q_k และเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของการวัด R_k ซึ่งหลักในการกำหนดค่าดังกล่าวอาจพอสรุปได้ดังนี้

การกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ค่าประมาณ ($x_{k|k}$) และเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ ($P_{k|k}$)

การกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ค่าประมาณ $x_{k|k}$ นั้นจะขึ้นอยู่กับการสมมติค่าของผู้ใช้ ซึ่งอาจจะมาจากประสบการณ์หรืออาศัยค่าการวัดในอดีต ส่วนการกำหนดค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าประมาณ $P_{k|k}$ จะขึ้นอยู่กับความเชื่อมั่นในค่าที่สมมติขึ้น ซึ่งถ้าไม่แน่ใจในค่าที่สมมติก็อาจกำหนดค่าเมตริกซ์ $P_{k|k}$ ให้มีค่ามากๆ โดยค่าที่ตำแหน่งทแยงมุมของเมตริกซ์ $P_{k|k} [i,i]$ จะแทนความไม่แน่นอนของค่าประมาณ $x_{k|k} [i]$ เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$ ส่วนค่าที่ไม่อยู่ในตำแหน่งทแยงมุม $P_{k|k} [i,j]$ เมื่อ $i \neq j$ จะเป็นค่าความไม่แน่นอนร่วมของค่าประมาณ $x_{k|k} [i]$ และ $x_{k|k} [j]$ โดยทั่วไปจะสมมติให้ค่าประมาณ $x_{k|k} [i]$ และ $x_{k|k} [j]$ ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน นั่นคือ ค่าที่ไม่อยู่ในแนวทแยงมุมของเมตริกซ์ $P_{k|k}$ จะถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์นั่นเอง

การกำหนดค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Q_k)

โดยทั่วไปเพื่อความง่าย เมตริกซ์ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง Q_k จำถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ โดยการกำหนดค่าเมตริกซ์ Q_k จะขึ้นอยู่กับว่าแบบจำลองที่หามาได้นั้นมีความถูกต้องมากน้อยเพียงไร โดยถ้าเชื่อว่าแบบจำลองที่หามาได้มีความถูกต้อง ก็อาจกำหนดค่าของเมตริกซ์ Q_k ให้มีค่าน้อยๆ ในการตรวจสอบว่าแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องหรือไม่ อาจทำได้โดยการตรวจสอบค่าที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริง (ทั้งนี้เครื่องมือวัดที่ใช้ั้นควรจะมีความน่าเชื่อถือ) อย่างไรก็ตามในการกำหนดค่าเมตริกซ์ Q_k นั้นอาจถูกกำหนดให้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับพลวัตของระบบ เช่น อาจกำหนดให้ Q_k มีค่าน้อยๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางพลวัตอย่างช้าๆ และกำหนดให้ Q_k มีค่ามากๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางพลวัตอย่างรวดเร็ว

การกำหนดค่าเมตริกซ์ความไม่แน่นอนของค่าการวัด (R_k)

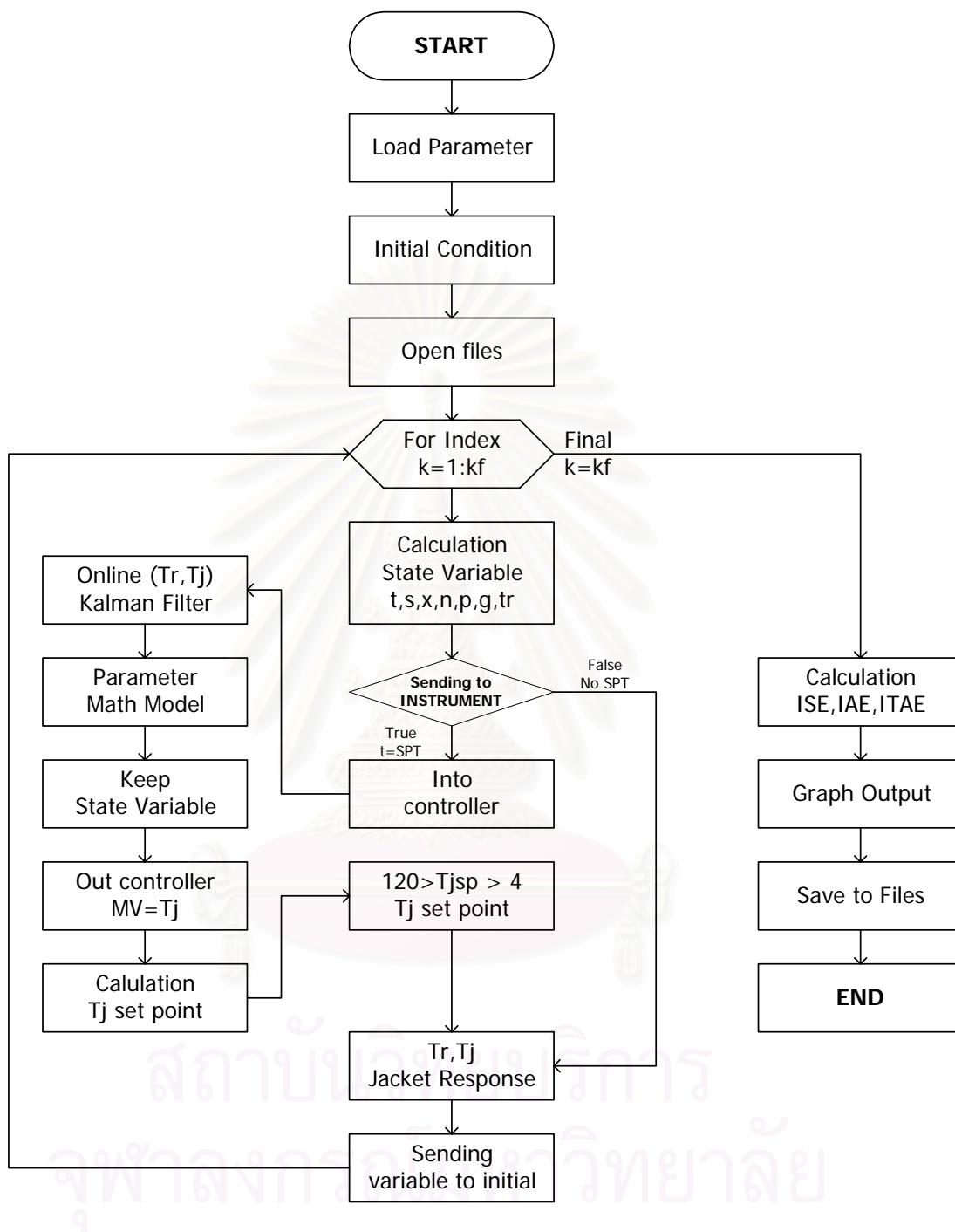
การกำหนดค่าเมตริกซ์ R_k โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยหลักในการกำหนดค่าจะขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวัด ซึ่งถ้าเครื่องมือวัดมีความน่าเชื่อถือน้อยก็อาจกำหนดค่าของเมตริกซ์ R_k ให้มีค่ามากๆ อย่างไรก็ตามค่าของเมตริกซ์ R_k นั้นอาจจะหาได้จากการสอบเทียบกับเครื่องมือวัด และเช่นเดียวกับการกำหนดค่าเมตริกซ์ Q_k ค่าของเมตริกซ์ R_k อาจถูกกำหนดให้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ เช่น ในกรณีที่เครื่องมือวัดได้รับผลกระทบจากแหล่งกำเนิดสัญญาณเคลื่อนที่

3.8. แผนผังการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแมทแล็บ

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

1. โปรแกรมจะทำการอ่านค่าเพื่อเก็บค่าคงที่เข้าตัวแปรต่าง ๆ และค่าสภาวะเริ่มต้น
2. โปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าของตัวแปรสแตท โดยใช้หลักการคำนวณแบบรูดงักัดตามลำดับ 4
3. ฟังก์ชันการทำงานของคอนโทรลเลอร์จะทำการดึงข้อมูลเมื่อครบเวลา สุ่มตัวอย่าง
4. จากนั้นคอนโทรลเลอร์จะทำการคำนวณหาค่าตัวแปรปรับ จากสมการแบบพีไอดีและสมการแบบจีเอ็มซี ซึ่งคือค่าเป้าหมายของอุณหภูมิในเครื่องระบายความร้อน
5. โปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ Jacket
6. แสดงค่าต่าง ๆ เป็นกราฟ และเก็บข้อมูลไว้ที่ไฟล์

ขั้นตอนทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



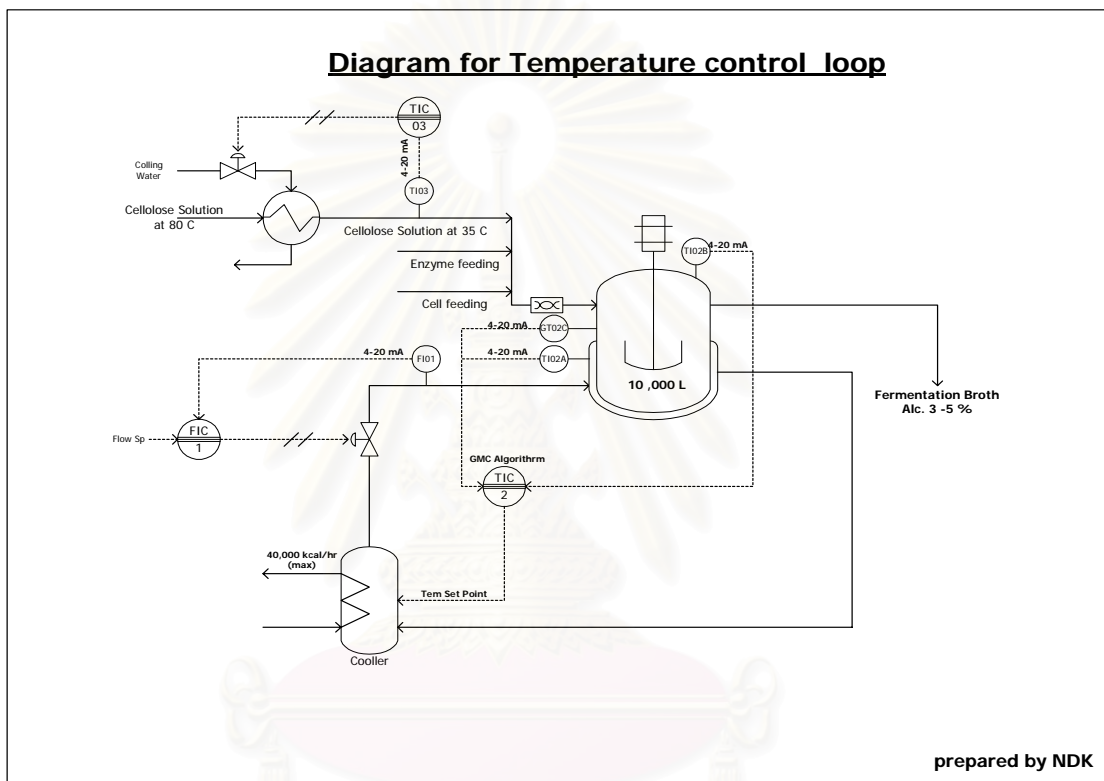
รูปที่ 3.9 แผนผังโครงสร้างการเขียนโปรแกรม

บทที่ 4.

การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกระบวนการผลิตเอทานอล

4.1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

4.4.1. การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะสำหรับการผลิตเอทานอล



รูปที่ 4.31. ผังระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะสำหรับการผลิตเอทานอล

ลักษณะการทำงาน หลังจากเซลล์ูโลสได้ถูกแยกออกจากเศษฟางข้าว โดยวิธีไฮโดรไลซิสด้วยกรด HCL 5 % ความเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงเหลือประมาณ 35- 40 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะมีการเติม เชื้อจุลินทรีย์และเอนไซม์ จากนั้นจะนำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร จึงจะเริ่มการทำปฏิกิริยา จากนั้นระบบควบคุมอุณหภูมิจะเริ่มทำงานเพื่อรักษาอุณหภูมิให้ได้ตามเป้าหมาย จนครบ 80 ชั่วโมง ทำการสูบน้ำเชื่อมออกจากถังปฏิกรณ์ เพื่อเข้าสู่ระบบการแยกให้บริสุทธิ์ต่อไป

การควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องปฏิกรณ์

1. ค่าสภาวะเริ่มต้นและค่าอุณหภูมิเป้าหมาย
 - 1.1. สภาวะการควบคุมจะเริ่มจาก การทำให้อุณหภูมิของถังปฏิกรณ์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 35 องศาเซลเซียส ไปอยู่ที่สภาวะเป้าหมาย ที่ 40 องศาเซลเซียส
 - 1.2. ปรับสภาวะเป้าหมายให้อยู่ที่ 43 องศาเซลเซียส ณ. ชั่วโมงที่ 5 จนปฏิริยาสมบูรณ์ที่ 80 ชั่วโมง

2. สมมุติฐานของแบบจำลอง
 - 2.1. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ส่งผลกระทบต่ออัตราการเข้าทำปฏิริยาของเอนไซม์ เซลลูเลส และ เชื้อ *S. calbergensis* ให้เป็นไปตามสมการแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์กับอุณหภูมิ
 - 2.2. ค่าความจุความร้อนของระบบถือว่าคงที่
 - 2.3. ค่าความร้อนจากปฏิริยาสามารถคำนวณได้ โดยการประมาณค่าระหว่างปฏิริยา การผลิตเอทานอล โดยอาศัยการดุลพลังงานตามสมการสารสัมพันธ์ โดยปริมาณ ความร้อนดังกล่าวเป็นผลต่างระหว่าง ความร้อนสันดาปของสับสเตรทกับความร้อน สันดาปของผลิตภัณฑ์และเซลล์
 - 2.4. แบบจำลองที่ใช้ในตัวกรอง Kalman filter ถือว่าการคายความร้อนของปฏิริยาการผลิตเอทานอลเปลี่ยนแปลงตามการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์
 - 2.5. การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตทถือว่าเปลี่ยนแปลงไปตามสมการของ (J.A.Asenjo ,1990)

- 4.1.2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพื่อใช้สำหรับจำลองการควบคุมแบบพีไอดีและ จีเอ็มซี (ที่มา : J.A.Asenjo ,1990)
 1. สมดุลมวลสารของสับสเตรท Substrate (S) ,(g/L)

$$\frac{dS}{dt} = - \frac{b_5 S}{[b_6 (1 + \frac{G}{b_7} + \frac{P}{b_8}) + S]}$$

2. สมดุลมวลสารของเซลล์ Cell (X), (g/L)

$$\frac{dx}{dt} = \frac{b_9 XGN}{[(b_{10} + G)(b_{11} + N)]}$$

3. สมดุลมวลสารของไนโตรเจน Nitrogen (N), (g/L)

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{1}{b_1} \frac{b_9 XGN}{[(b_{10} + G)(b_{11} + N)]}$$

4. สมดุลมวลสารของเอทานอล Ethanol (P), (g/L)

$$\frac{dP}{dt} = \frac{b_{12} XG}{[(b_{13} + G)]}$$

5. สมดุลมวลสารของน้ำตาลกลูโคส Glucose (G), (g/L)

$$\frac{dG}{dt} = \left(\frac{b_5 S}{[b_6 (1 + \frac{G}{b_7} + \frac{P}{b_8}) + S]} \right) - \left(\frac{1}{b_2} \frac{b_9 XGN}{[(b_{10} + G)(b_{11} + N)]} \right) - \left(\frac{1}{b_3} \frac{b_{12} XG}{[(b_{13} + G)]} \right)$$

6. สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสกับอุณหภูมิ

$$b_5(T) = \frac{k_{cat}(T) \bar{A}}{1 + K_{rd}(T)}$$

$$k_{cat}(T) = \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$$

$$k_{rd}(T) = \exp\left[\frac{\Delta H_m}{RT} - \frac{\Delta C_p^O}{RT}(1 + \ln(T_m))\right] + \left(\frac{\Delta C_p^O T_m}{R} - \frac{\Delta H_m^O}{R}\right) \frac{1}{T} + \frac{\Delta C_p^O}{R} \ln(T)$$

7. สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเชื้อ *S.carlsbergensis* กับอุณหภูมิ

$$b_9(T) = b_{12}(T) = \frac{k_{cat}(T) \bar{A}}{1 + K_{rd}(T)}$$

$$k_{cat}(T) = \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$$

$$k_{rd}(T) = \exp\left\{\frac{\Delta H_m}{RT} - \frac{\Delta C_p^O}{RT}(1 + \ln(T_m)) + \left(\frac{\Delta C_p^O T_m}{R} - \frac{\Delta H_m^O}{R}\right) \frac{1}{T} + \frac{\Delta C_p^O}{R} \ln(T)\right\}$$

8. สมการสมดุลพลังงานของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผลิตเอทานอล Temperature Reactor (Tr), (°C)

$$V_r \rho C_p \frac{dT_r}{dt} = [-(\Delta H_g) \frac{dG}{dt} + (\Delta H_p) \frac{dP}{dt} + (\Delta H_x) \frac{dX}{dt}] - [u_r A_r (T_r - T_j)]$$

9. สมการสมดุลพลังงานของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผลิตเอทานอล Temperature Jacket (Tj), (°C)

$$V_j \rho_j C_{pj} \frac{dT_j}{dt} = [F_j \rho_j C_{pj} (T_j - T_{sp})] - [u_r A_r (T_r - T_j)]$$

$$T_j^{sp}(k) = T_j(k-1) + \frac{Talc_j}{\Delta t} (T_j(k) - T_j(k-1))$$

10. สมการในการคำนวณหาค่าตัวแปรปรับ เมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอดี

$$T_j^{sp}(k) = kcc (err_k - err_{k-1}) + (\Delta t \frac{err_k}{tii}) - [(T_r(k) - 2T_r(k-1) + T_r(k-2))] \frac{tdd}{\Delta t}$$

11. สมการในการคำนวณหาค่าตัวแปรปรับ เมื่อใช้ตัวควบคุมพีแอมพี

$$T_j^{sp}(k) = T_r(K) + \left(\frac{w_r C_p}{A_r U_r} (K - 1) err_k\right) + \left(\frac{w_r C_p}{A_r U_r} k - 2(\Delta T err_k + sum [err])\right) - \left(\frac{Rate Q}{A_r U_r}\right)$$

จากการสร้างสมการสมดุลสารและสมดุลพลังงาน สามารถแสดงค่าตัวแปรสแตทเริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

เมื่อ

$$S(0) = \text{ความเข้มข้นของเซลลูโลส } 85 \text{ g/L}$$

$$X(0) = \text{ความเข้มข้นของเซลเริ่มต้น } 0.8 \text{ g/L}$$

$$N(0) = \text{ความเข้มข้นของไนโตรเจน } 0.444 \text{ g/L}$$

$$P(0) = \text{ความเข้มข้นของเอทานอล } 0 \text{ g/L}$$

$$G(0) = \text{ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส } 0 \text{ g/L}$$

$$Tr(0) = \text{อุณหภูมิเริ่มต้นของถังปฏิกรณ์ } 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Tr(0) = \text{อุณหภูมิเริ่มต้นของ jacket } 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$b1 = \text{ค่าคงที่ทางสมดุลเคมี } 0.064$$

$$b2 = \text{ค่าคงที่สัดส่วนเซลล์ต่อสารตั้งต้น } 0.51$$

$$b3 = \text{ค่าคงที่สัดส่วนผลิตภัณฑ์ต่อสารตั้งต้น } 0.52$$

$$b5(T) = \text{อัตราเร็วการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ณ ที่ อุณหภูมิ } 40 \text{ องศาเซลเซียส } 12 \text{ h}^{-1}$$

$$b6 = \text{ค่าคงที่ monod } 43 \text{ g/L}$$

$$b7 = \text{ค่าคงที่การยับยั้งจากน้ำตาลกลูโคส } 6 \text{ g/L}$$

$$b8 = \text{ค่าคงที่การยับยั้งจากผลิตภัณฑ์ } 4 \text{ g/L}$$

$$b9(T) = \text{อัตราเร็วการทำปฏิกิริยาของเชื้อจุลินทรีย์ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ณ ที่ อุณหภูมิ } 40 \text{ องศาเซลเซียส } 0.6 \text{ g/L}\cdot\text{h}$$

$$b12(T) = \text{อัตราของการเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ณ ที่ อุณหภูมิ } 40 \text{ องศาเซลเซียส } 0.6 \text{ h}^{-1}$$

$$b10 = \text{ค่าคงที่ monod ของน้ำตาลกลูโคส } 0.025 \text{ g/L}$$

$$b11 = \text{ค่าคงที่ monod ของไนโตรเจน } 0.15 \text{ g/L}$$

$$b13 = \text{ค่าคงที่ monod ของผลิตภัณฑ์ } 0.1 \text{ g/L}$$

$$Ea = \text{ค่าคงที่พลังงานภายในของเอนไซม์}$$

$$R = \text{ค่าคงที่ของก๊าซ } 8314.34 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2\cdot\text{kgmol}\cdot\text{K}$$

$$\Delta H_m^O = \text{ค่าเอนทาลปีของการหลอมละลาย}$$

$$\Delta C_p^O = \text{ค่าความจุความร้อน}$$

$$T_m = \text{ค่าอุณหภูมิการหลอมละลาย}$$

$$A = \text{ค่าคงที่อาเรเน็สของเอนไซม์ } 3.15 \times 10^{15}$$

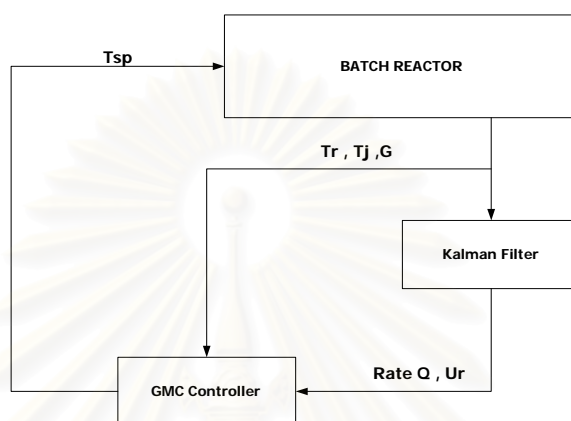
$$Ea = \text{ค่าพลังงานภายในของเชื้อจุลินทรีย์}$$

- A = ค่าคงที่อาเรเนิสของเชื้อจุลินทรีย์ 7.679×10^{30}
 V_r = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ 10000 L
 ρ = ความหนาแน่นของสารละลาย 1.2 kg/m³
 C_p = ค่าความจุความร้อนของสารละลาย 1.5 kcal/kg.°C
 H_g = ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการหายไปของน้ำตาลกลูโคส 3.73 kcal/kg.°C
 H_p = ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการการผลิตเอทานอล 11.15 kcal/kg.°C
 H_x = ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเซด 4.2 kcal/kg.°C
 U_r = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 1000 kcal/kg.°C
 A_r = พื้นที่ผิวรอบถังปฏิกรณ์ 21.575 m²
 V_j = ปริมาตรของ jacket 2500 L
 F_j = อัตราการไหลของสารหล่อเย็น 8 m³/hr
 ρ_j = ความหนาแน่นของสารหล่อเย็น 1.2 kg/m³
 err = ค่าความผิดพลาดระหว่าง T_r กับ T_{rsp}
 kcc = ค่า proportional gain
 t_{ii} = ค่า Integral time
 t_{dd} = ค่า Derivative
 Δt = เวลาในการสุ่ม 0.01 hr

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพื่อใช้สำหรับตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน

การไหลของข้อมูลเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน



รูปที่ 4.27. แผนผังการไหลของข้อมูลสำหรับการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

จากแผนผังที่แสดงในรูปที่ 4.27. จะเห็นได้ว่าค่าเอาต์พุตจากกระบวนการคือ ค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่วัดได้ (T_r) และค่าอุณหภูมิของ jacket ที่วัดได้ (T_j) และค่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส จะส่งให้กับตัวประมวลผลค่าความร้อน ซึ่งในที่นี้จะใช้ตัวกรอง Kalman Filter เพื่อประมวลผลค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา ($\text{Rate } Q$) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U_r) ในขณะเดียวกันค่าเอาต์พุตเหล่านั้นจะป้อนให้กับตัวควบคุม จีเอ็มซี ด้วย ซึ่งตัวควบคุม จีเอ็มซี จะใช้ค่าเหล่านั้น เพื่อทำการคำนวณหาอุณหภูมิเป้าหมายของ jacket เพื่อให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์อยู่ที่เป้าหมาย

1. สมการสมดุลพลังงานของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผลิตเอทานอล Temperature Reactor (T_r), ($^{\circ}\text{C}$)

$$V_r \rho C_p \frac{dT_r}{dt} = [-(\Delta H_g \frac{dG}{dt}) + (\Delta H_p \frac{b_{12} XG}{[(b_{13} + G)]})] - [u_r A_r (T_r - T_j)]$$

2. สมดุลมวลสารของน้ำตาลกลูโคส Glucose (G), (g/L)

$$\frac{dG}{dt} = 0$$

3. สมการสมดุลพลังงานของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผลิตเอทานอล Temperature Jacket (Tj), (°C)

$$V_j \rho_j C_{pj} \frac{dT_j}{dt} = [F_j \rho_j C_{pj} (T_j - T_{sp})] - [u_r A_r (T_r - T_j)]$$

4. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$\frac{du_r}{dt} = 0$$

จากนั้นได้ทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวกรองคาลมาน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้ ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ปรับจูนสำหรับตัวกรองคาลมาน

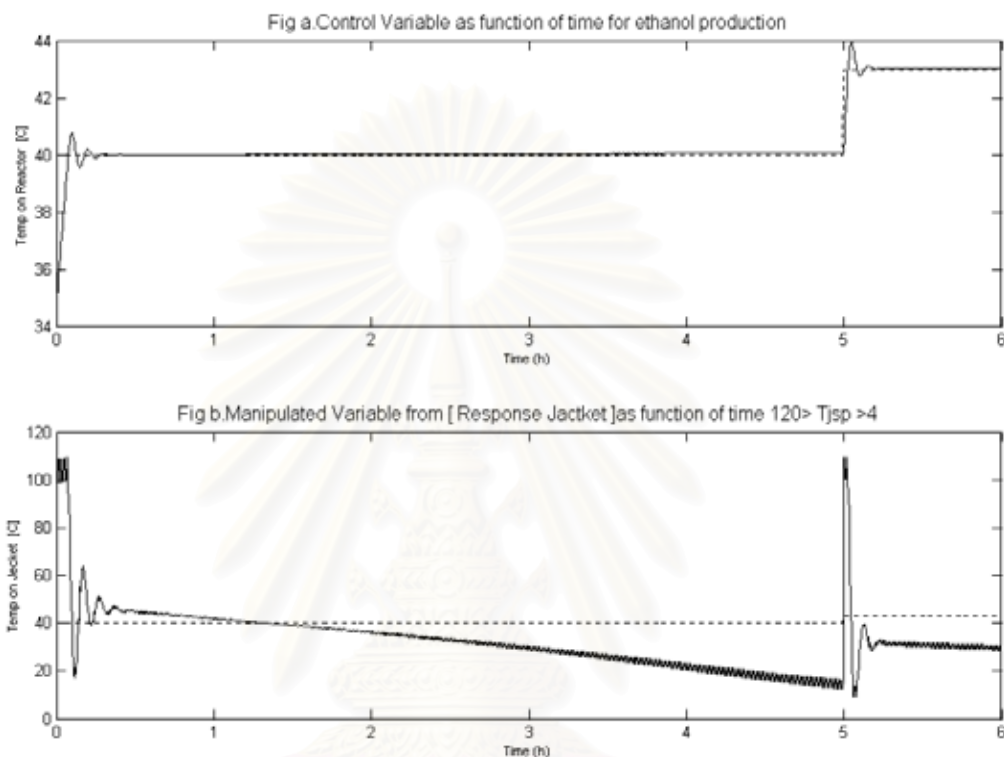
Po	Q	R
1.00E-06	100	1

และได้นำตัวกรองคาลมาน ไปใช้ร่วมกับตัวควบคุมจีเอ็มซี เพื่อทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Ur) และความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (G)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

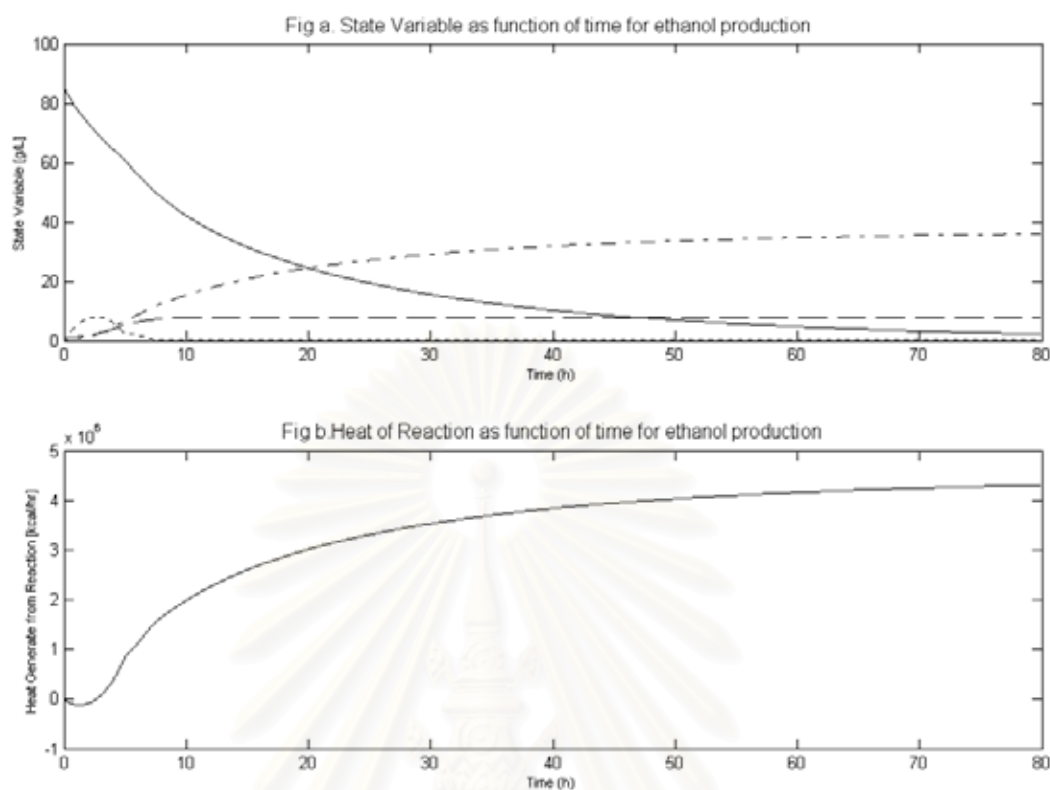
4.2. ผลการจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์

4.2.1. กรณีที่กำหนดให้อุณหภูมิเป้าหมายมีค่าเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนเป็น 43 องศาเซลเซียส ณ .ชั่วโมงที่ 5



รูปที่ 4.1. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมตัวแปรปรับเทียบกับเวลาในช่วง 6 ชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



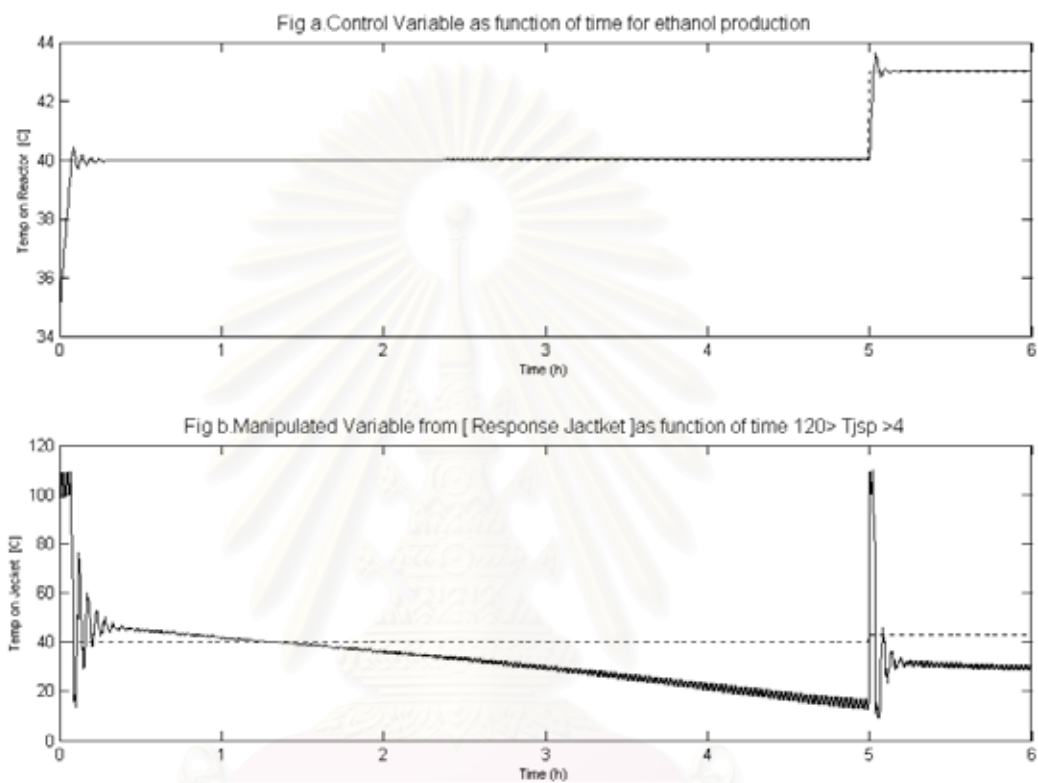
รูปที่ 4.2. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเทียบกับเวลาในช่วง 80 ชั่วโมง เมื่อ (S = 'เส้นทึบ'), (X = 'เส้นประ'), (G = 'เส้นจุด'), (P = 'เส้นประผสมจุด')

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบดังกล่าว ให้ผลการทดสอบโดยแสดงออกเป็นค่า ISE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 159.16 โดยมีการปรับจูนค่า $K_{cc} = 75\% Co / \% To$, $T_{ii} = 0.014$ hr และ $T_{dd} = 0.002$ hr

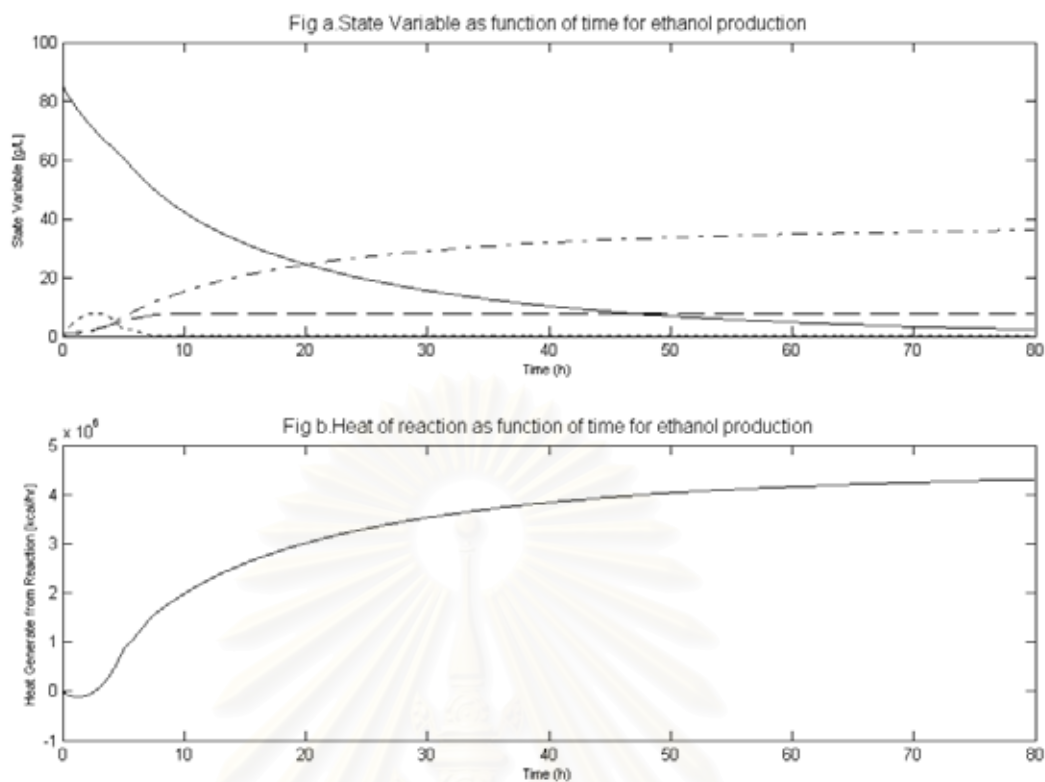
4.3. ผลการจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีอีเอ็มซีควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์

4.3.1. กรณีที่กำหนดให้อุณหภูมิเป้าหมายมีค่าเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนเป็น 43 องศาเซลเซียส ณ .ชั่วโมงที่ 5



รูปที่ 4.3. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมตัวแปรปรับเทียบกับเวลาในช่วง 6 ชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



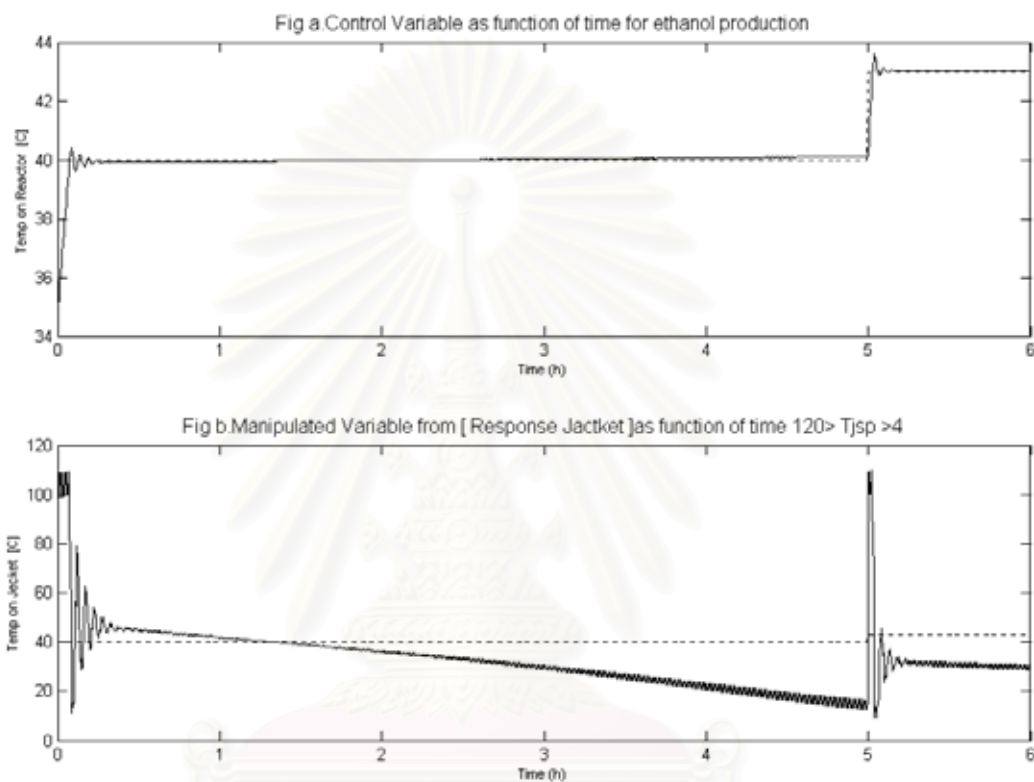
รูปที่ 4.4. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเทียบกับเวลาในช่วง 80 ชั่วโมง เมื่อ (S = 'เส้นทึบ'), (X = 'เส้นประ'), (G = 'เส้นจุด'), (P = 'เส้นประผสมจุด')

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบดังกล่าว ให้ผลการทดสอบโดยแสดงออกเป็นค่า ISE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 153.34 โดยมีการปรับจูนค่า $K1 = 140$ และ $K2 = 0.3322$

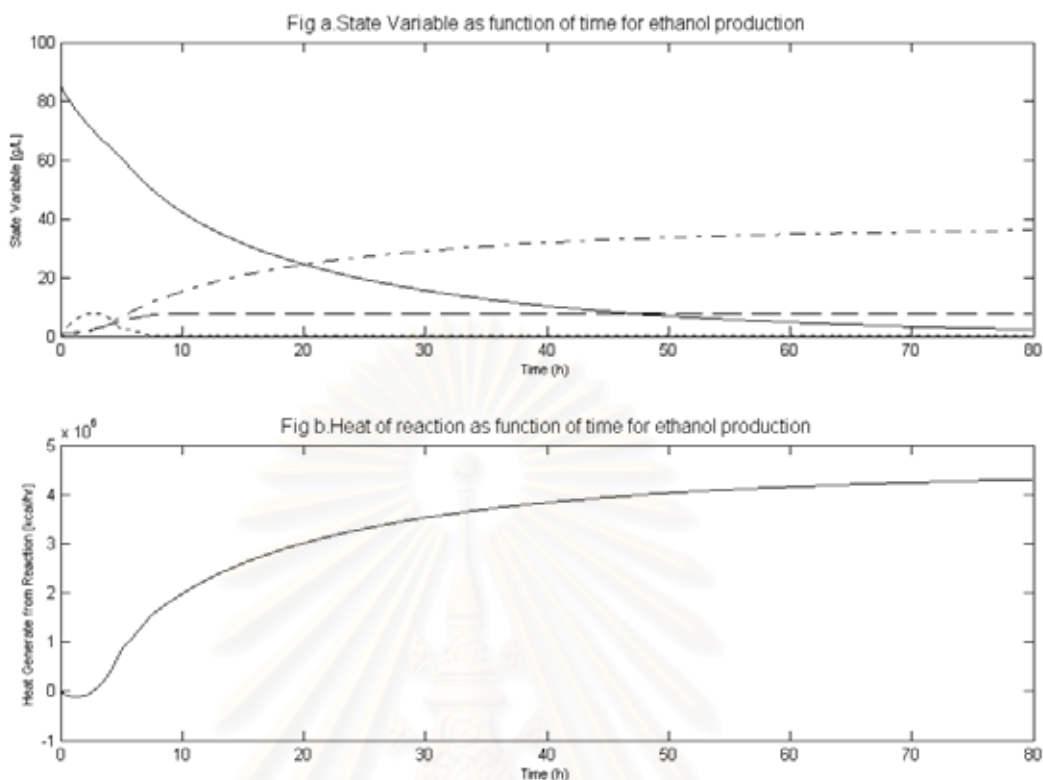
4.4. ผลการจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุมจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตทและค่าพารามิเตอร์

4.4.1. กรณีที่กำหนดให้อุณหภูมิเป้าหมายมีค่าเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนเป็น 43 องศาเซลเซียส ณ .ชั่วโมงที่ 5



รูปที่ 4.5. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมตัวแปรปรับเทียบกับเวลาในช่วง 6 ชั่วโมง

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสเตต (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเทียบกับเวลาในช่วง 80 ชั่วโมง เมื่อ (S = 'เส้นทึบ'), (X = 'เส้นประ'), (G = 'เส้นจุด'), (P = 'เส้นประผสมจุด')

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบดังกล่าว ให้ผลการทดสอบโดยแสดงออกเป็นค่า ISE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 153.45 โดยมีการปรับจูนค่า $K1 = 144$ และ $K2 = 1.81$

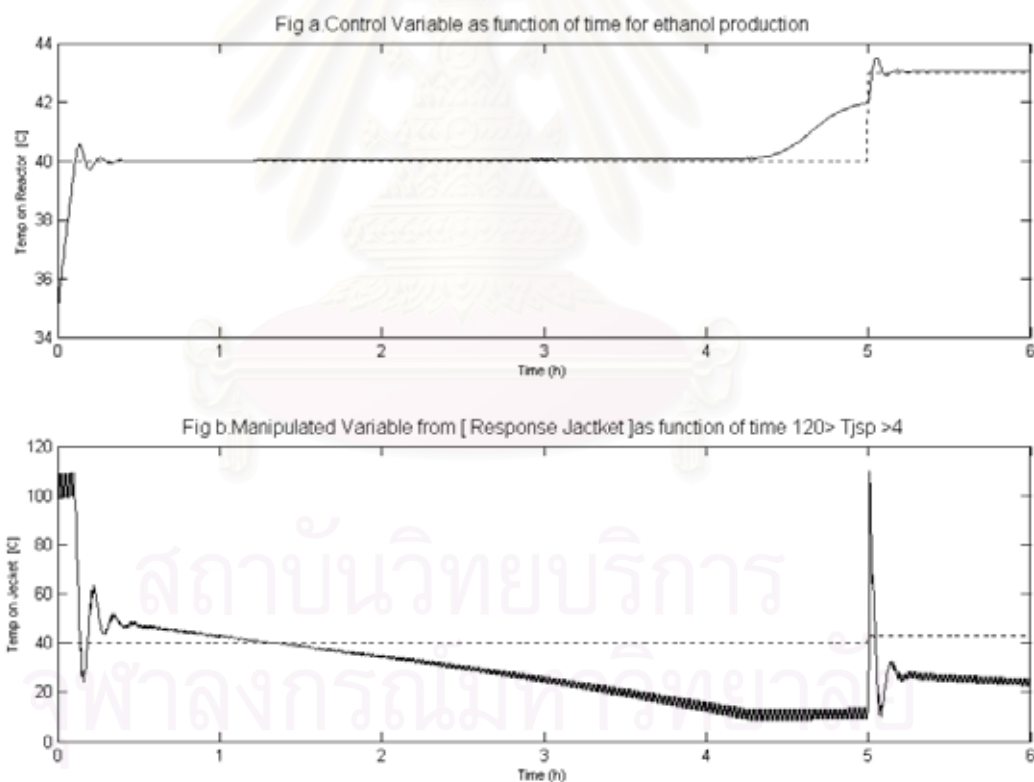
4.5. การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอดีเมื่อมีความคลาดเคลื่อนระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลอง

ได้ทำการทดสอบตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยจะทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว โดยเปลี่ยนแปลงค่าดังนี้

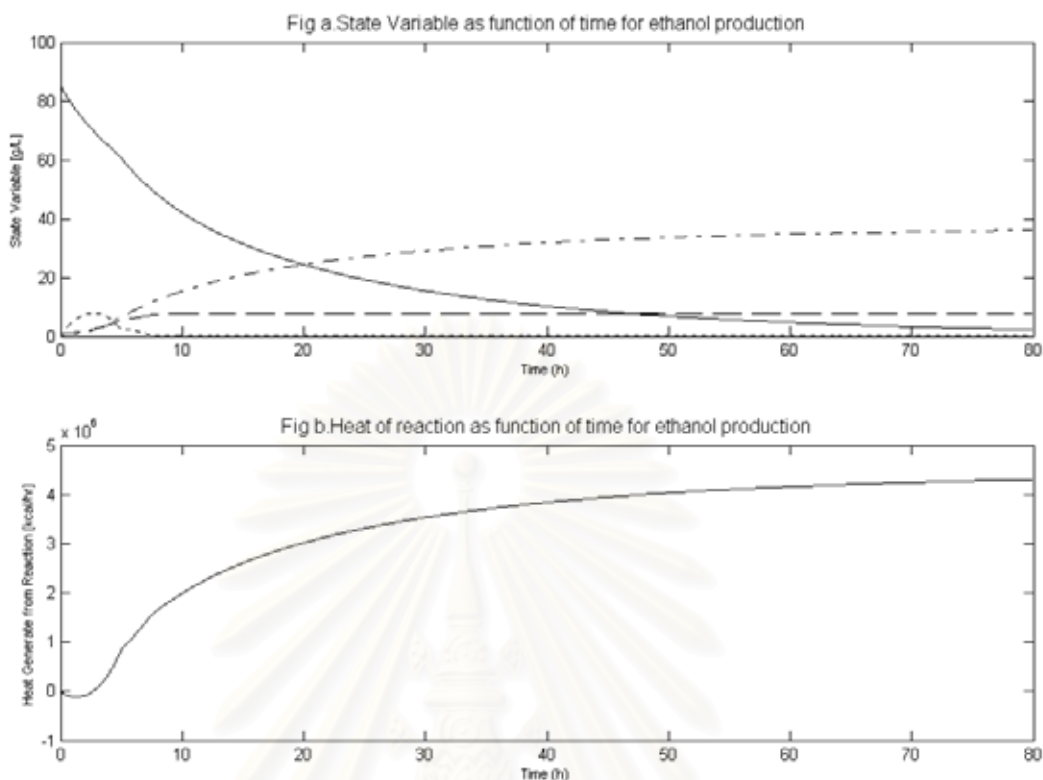
1. กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U_r) ลดลงประมาณ -30 %
2. กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเอทานอล (ΔH_p) เพิ่มขึ้นประมาณ +30 %
3. กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเซล (ΔH_a) เพิ่มขึ้นประมาณ +30 %

โดยใช้สภาวะที่ได้จากผลการจำลองในหัวข้อที่ 4.2. สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

4.5.1. กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U_r) ผิดพลาดประมาณ -30 %



รูปที่ 4.7. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมตัวแปรปรับเทียบกับเวลาในช่วง 6 ชั่วโมง

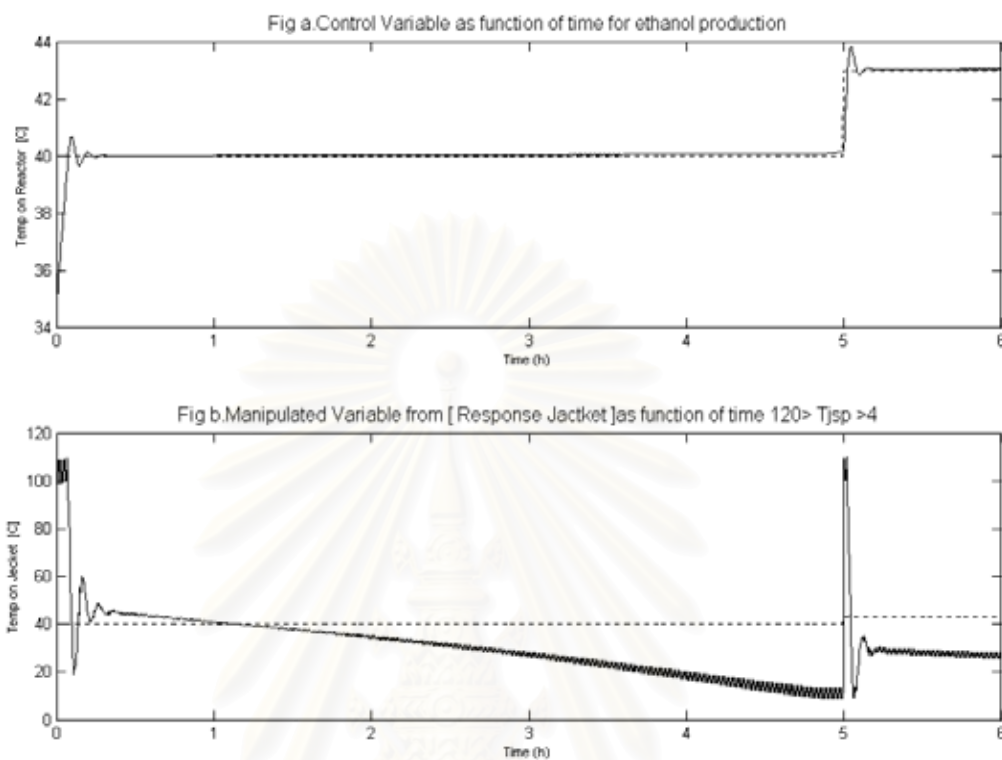


รูปที่ 4.8. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเทียบกับเวลาในช่วง 80 ชั่วโมง เมื่อ (S = 'เส้นทึบ'), (X = 'เส้นประ'), (G = 'เส้นจุด'), (P = 'เส้นประผสมจุด')

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

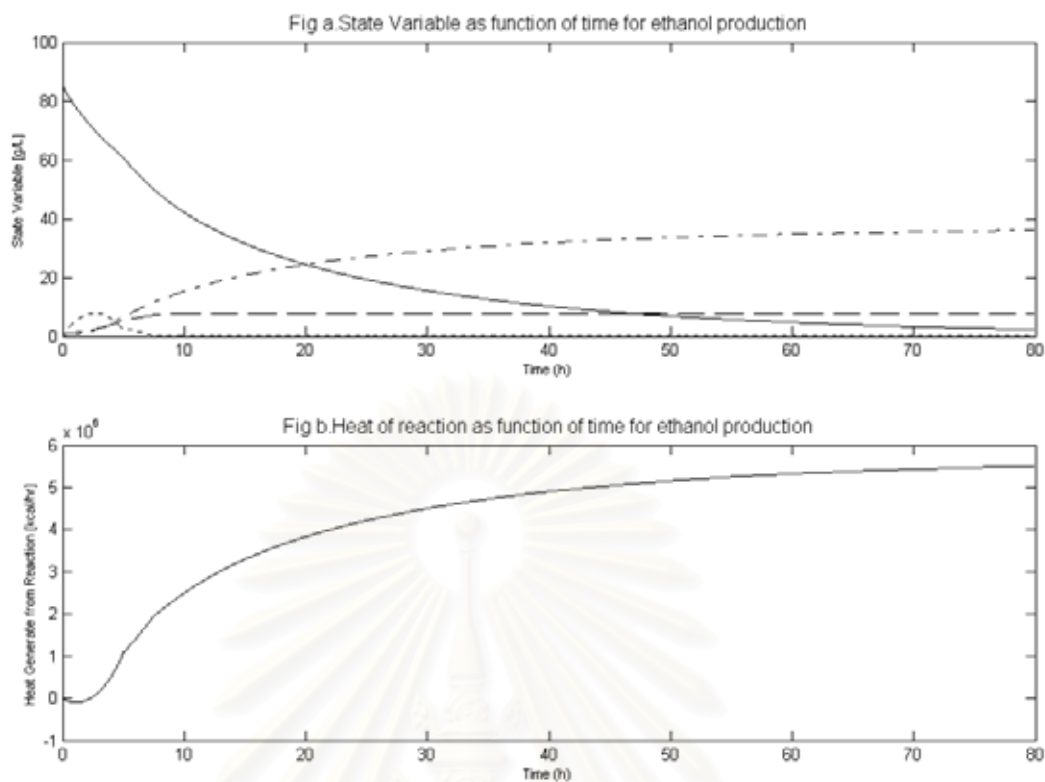
จากผลการทดสอบดังกล่าว ให้ผลการทดสอบโดยแสดงออกเป็นค่า ISE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 386.81 โดยมีการปรับจูนค่า $K_{cc} = 75\% C_o / \% T_o$, $T_{ii} = 0.014$ hr และ $T_{dd} = 0.002$ hr

4.5.2. กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเอทานอล (ΔH_p) ผิดพลาด
ประมาณ +30 %



รูปที่ 4.9. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมตัวแปรปรับเทียบกับเวลาในช่วง 6 ชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

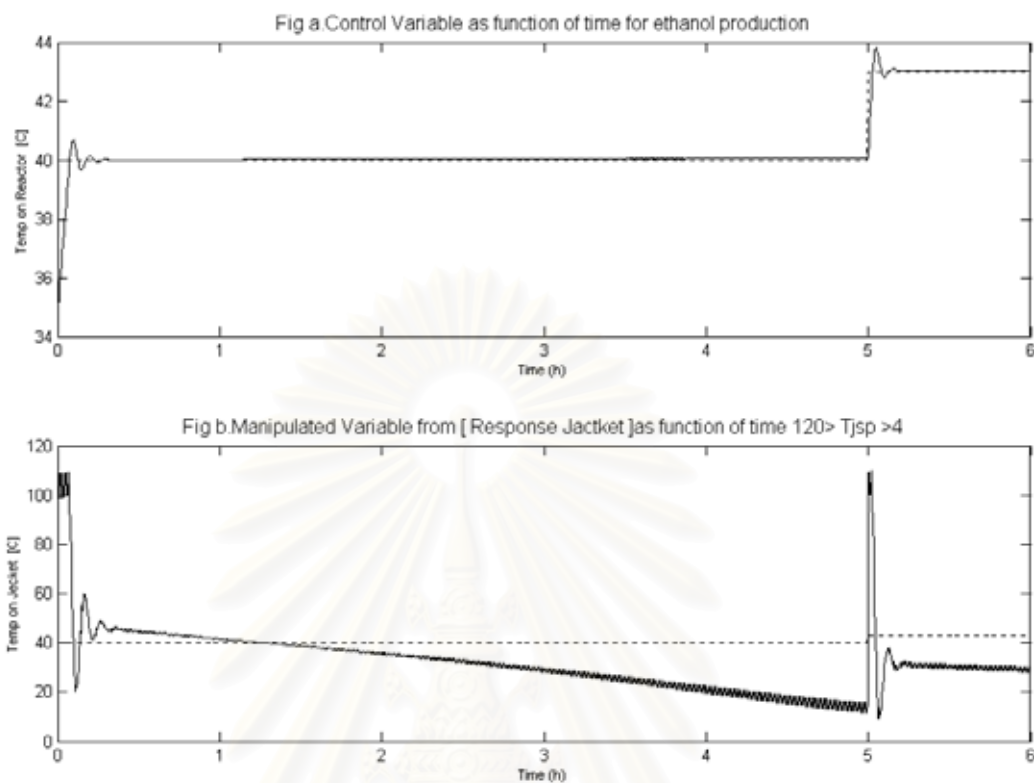


รูปที่ 4.10. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเทียบกับเวลาในช่วง 80 ชั่วโมง เมื่อ (S = 'เส้นทึบ'), (X = 'เส้นประ'), (G = 'เส้นจุด'), (P = 'เส้นประผสมจุด')

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

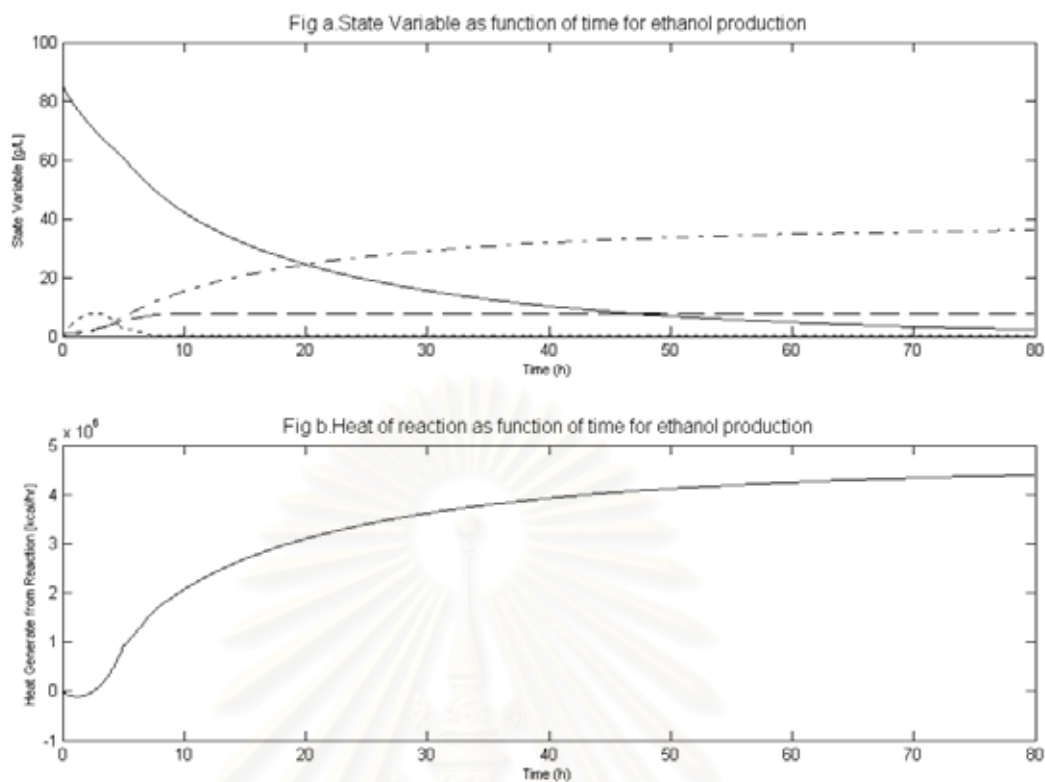
จากผลการทดสอบดังกล่าว ให้ผลการทดสอบโดยแสดงออกเป็นค่า ISE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 155.02 โดยมีการปรับจูนค่า $K_{cc} = 75\% C_o / \% T_o$, $T_{ii} = 0.014$ hr และ $T_{dd} = 0.002$ hr

4.5.3. กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเซล (ΔH_a) ผิดผลาดประมาณ +30 %



รูปที่ 4.11. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมตัวแปรปรับเทียบกับเวลาในช่วง 6 ชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเทียบกับเวลาในช่วง 80 ชั่วโมง เมื่อ (S = 'เส้นทึบ'), (X = 'เส้นประ'), (G = 'เส้นจุด'), (P = 'เส้นประผสมจุด')

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบดังกล่าว ให้ผลการทดสอบโดยแสดงออกเป็นค่า ISE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 156.73 โดยมีการปรับจูนค่า $K_{cc} = 75$ %Co/%To, $T_{ii} = 0.014$ hr และ $T_{dd} = 0.002$ hr

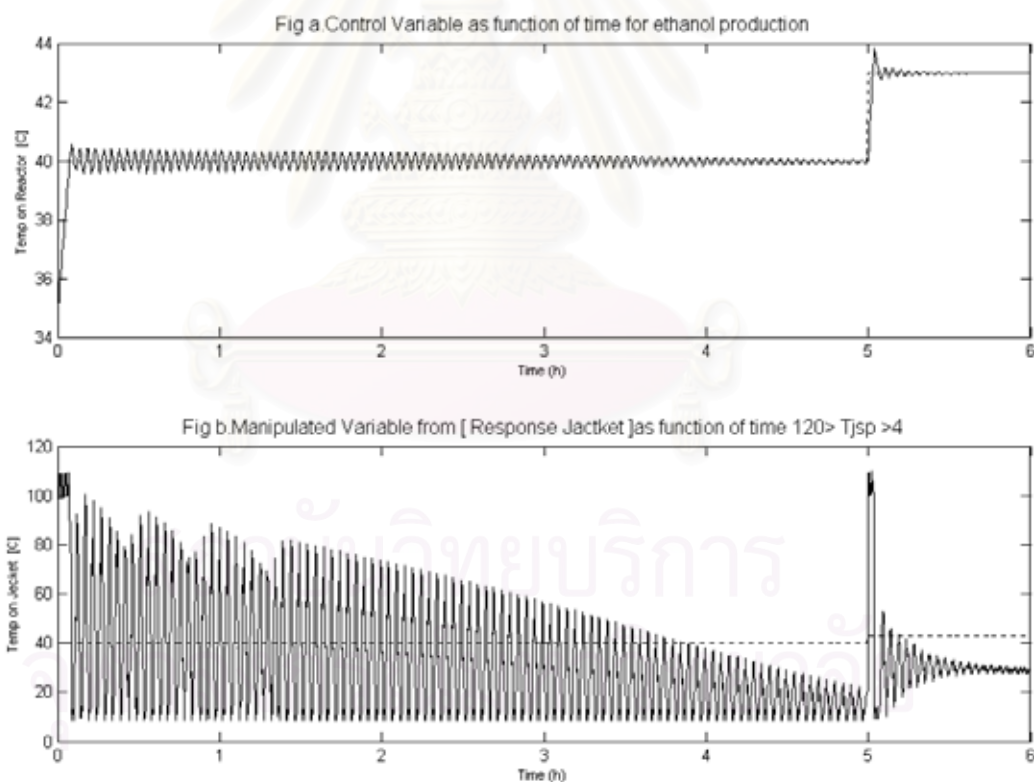
4.6. การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีเอ็มซีเมื่อมีความคลาดเคลื่อนระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลอง

ได้ทำการทดสอบตัวควบคุมแบบพีเอ็มซี โดยจะทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว โดยเปลี่ยนแปลงค่าดังนี้

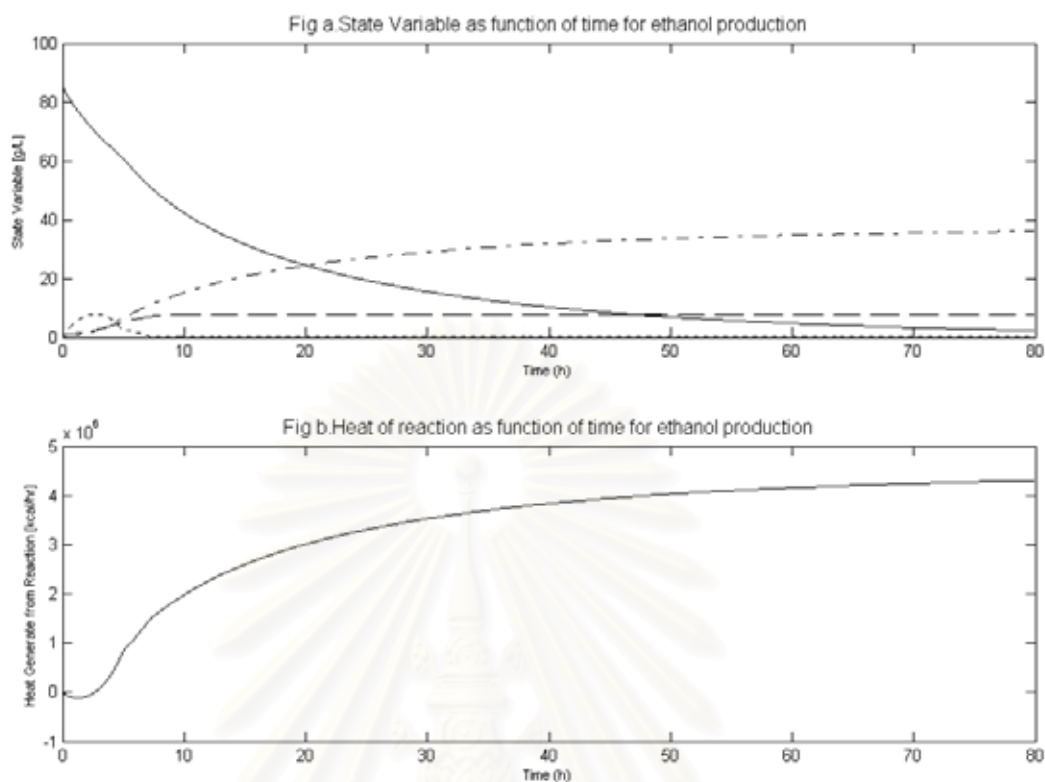
1. กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U_r) ลดลงประมาณ -30 %
2. กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเอทานอล (ΔH_p) เพิ่มขึ้นประมาณ +30 %
3. กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเซล (ΔH_a) เพิ่มขึ้นประมาณ +30 %

โดยใช้สภาวะที่ได้จากผลการจำลองในหัวข้อที่ 4.3. สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

4.6.1. กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U_r) ผิดพลาดประมาณ -30 %



รูปที่ 4.13. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมตัวแปรปรับเทียบกับเวลาในช่วง 6 ชั่วโมง

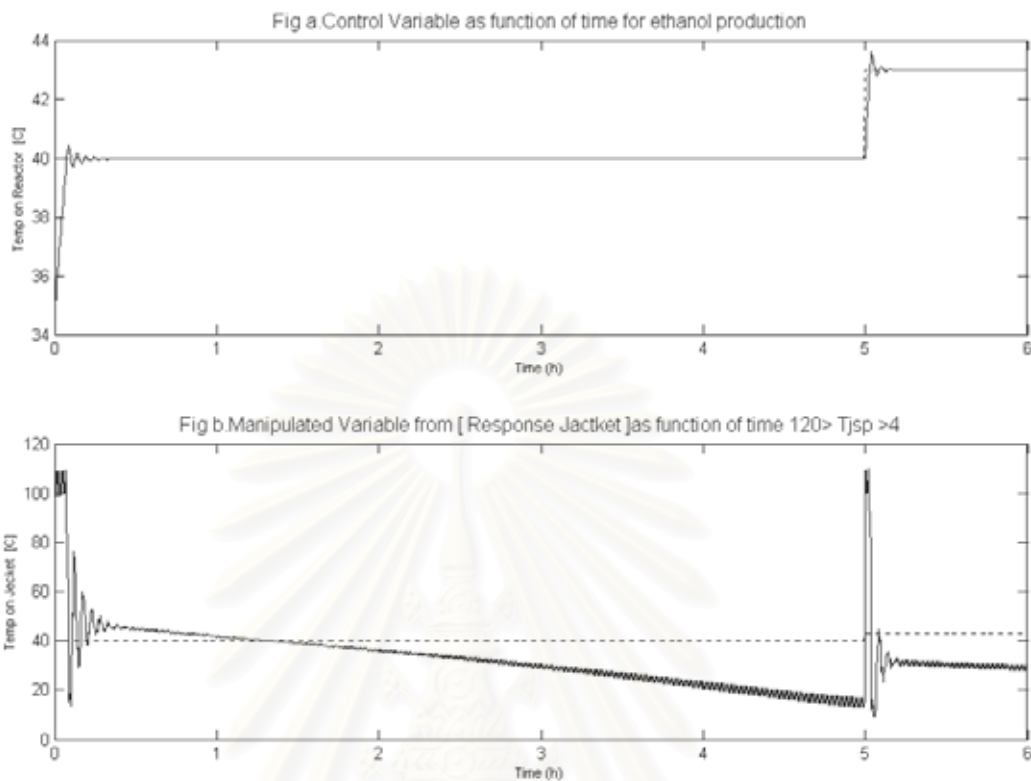


รูปที่ 4.14. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเทียบกับเวลาในช่วง 80 ชั่วโมง เมื่อ (S = 'เส้นทึบ'), (X = 'เส้นประ'), (G = 'เส้นจุด'), (P = 'เส้นประผสมจุด')

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

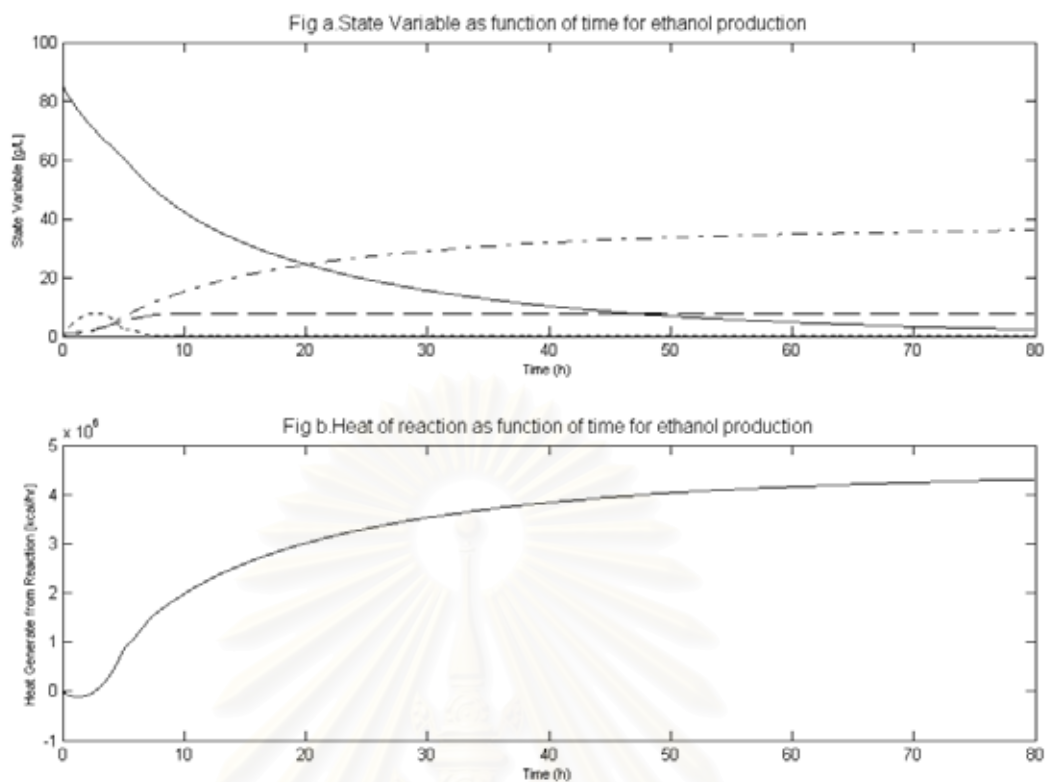
จากผลการทดสอบดังกล่าว ให้ผลการทดสอบโดยแสดงออกเป็นค่า ISE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 758.53 โดยมีการปรับจูนค่า $K1 = 140$ และ $K2 = 0.3322$

4.6.2. กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเอทานอล (ΔH_p) ผิดพลาด
ประมาณ +30 %



รูปที่ 4.15. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมตัวแปรปรับเทียบกับเวลาในช่วง 6 ชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

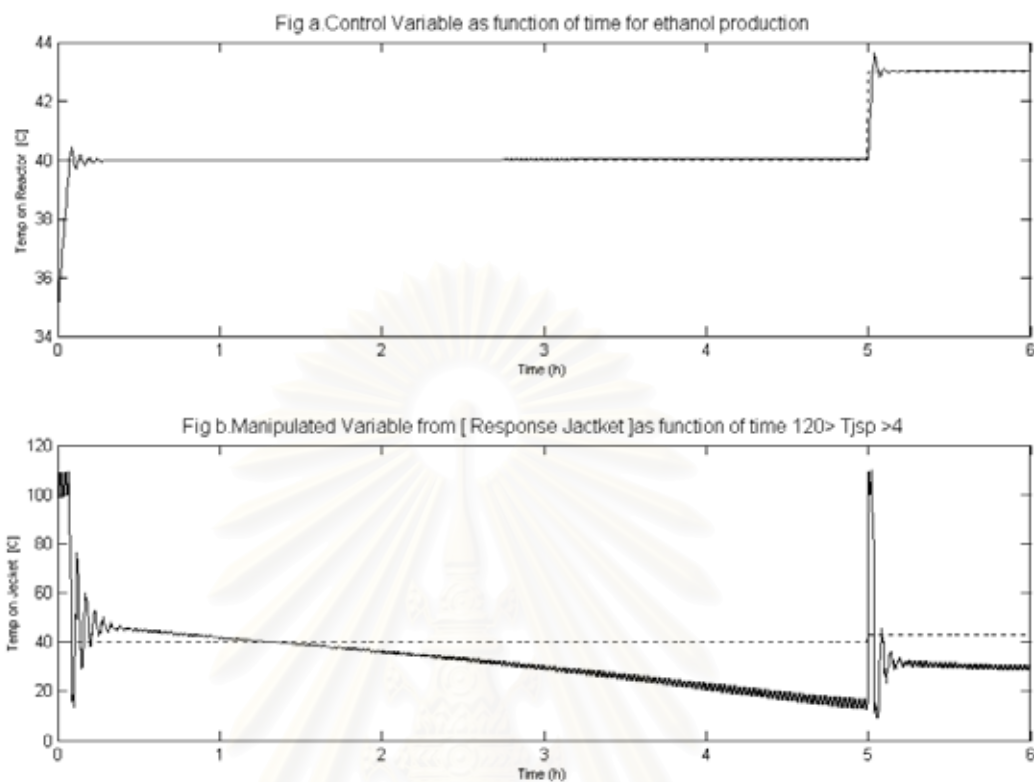


รูปที่ 4.16. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเทียบกับเวลาในช่วง 80 ชั่วโมง เมื่อ (S = 'เส้นทึบ'), (X = 'เส้นประ'), (G = 'เส้นจุด'), (P = 'เส้นประผสมจุด')

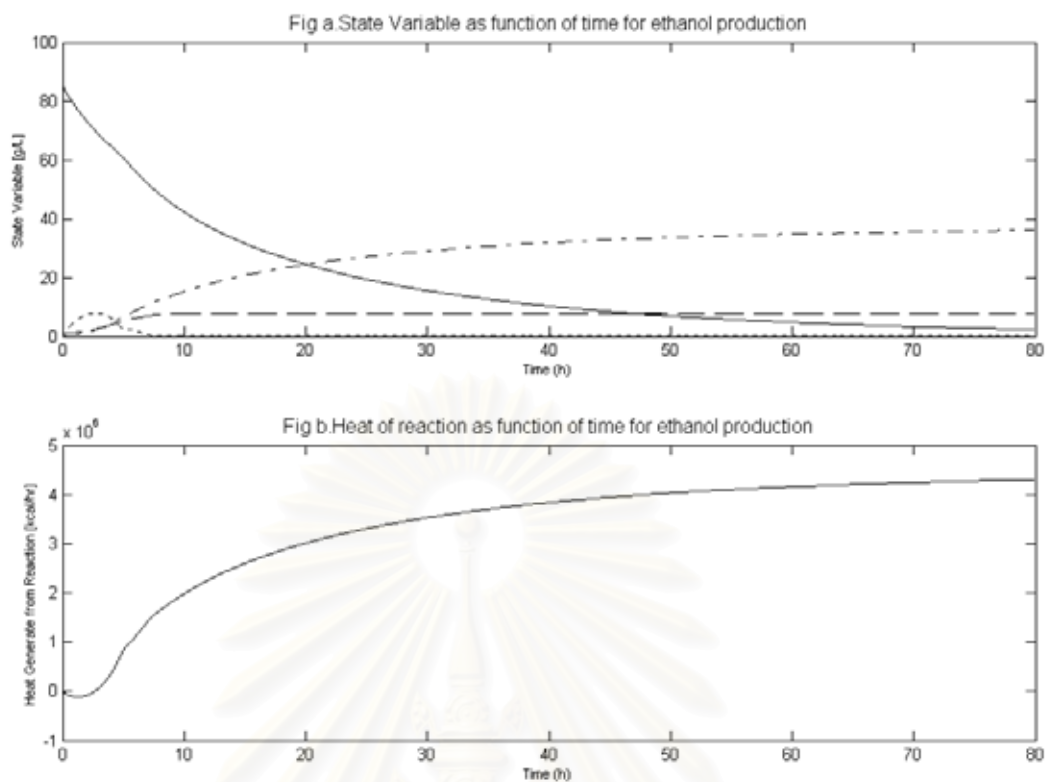
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบดังกล่าว ให้ผลการทดสอบโดยแสดงออกเป็นค่า ISE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 155.27 โดยมีการปรับจูนค่า $K1 = 140$ และ $K2 = 0.3322$

4.6.3. กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเซล (ΔH_a) ผิดพลาดประมาณ +30 %



รูปที่ 4.17. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมตัวแปรปรับเทียบกับเวลาในช่วง 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.18. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเทียบกับเวลาในช่วง 80 ชั่วโมง เมื่อ (S = 'เส้นทึบ'), (X = 'เส้นประ'), (G = 'เส้นจุด'), (P = 'เส้นประผสมจุด')

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบดังกล่าว ให้ผลการทดสอบโดยแสดงออกเป็นค่า ISE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 153.38 โดยมีการปรับจูนค่า $K1 = 140$ และ $K2 = 0.3322$

4.7. การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมานเมื่อมีความคลาดเคลื่อนระหว่างกระบวนการจริงกับแบบจำลอง

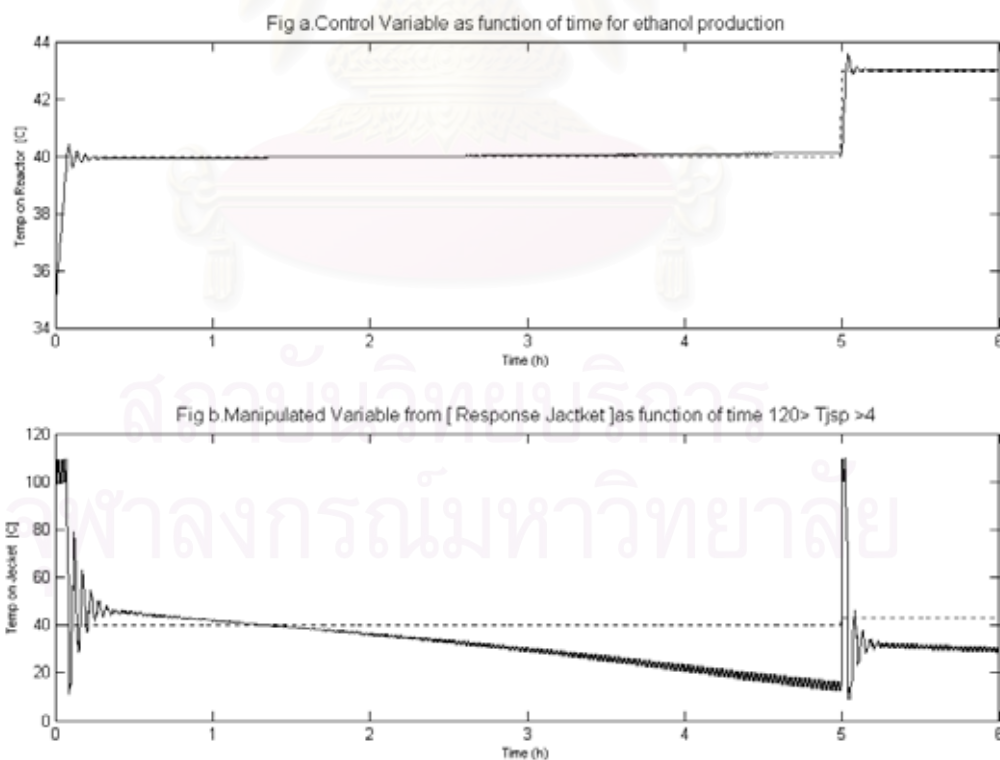
ได้ทำการทดสอบตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน โดยจะทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว โดยเปลี่ยนแปลงค่าดังนี้

1. กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U_r) ลดลงประมาณ -30 %
2. กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเอทานอล (ΔH_p) เพิ่มขึ้นประมาณ +30 %
3. กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเซล (ΔH_a) เพิ่มขึ้นประมาณ +30 %

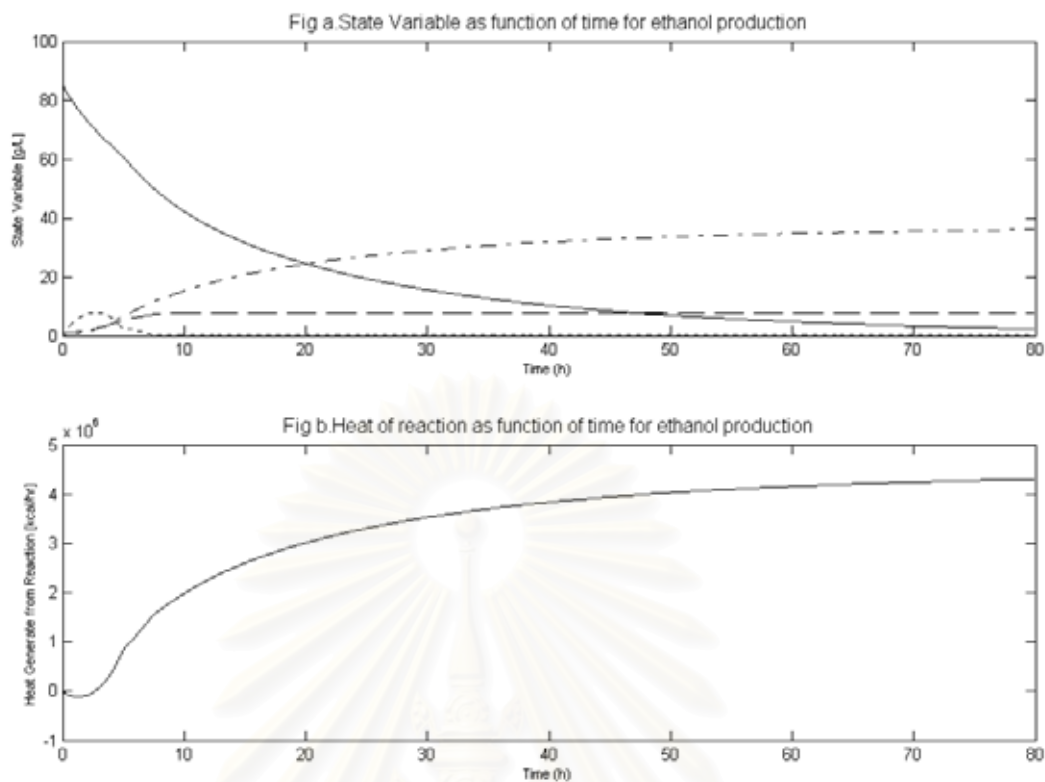
โดยใช้สภาวะที่ได้จากผลการจำลองในหัวข้อที่ 4.4. สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

4.7.1. กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U_r) ผิดพลาดประมาณ 30 %

ได้ดำเนินการทดสอบ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า U_r จากเดิม 1000 ให้มีค่าเท่ากับ 700 โดยนำตัวกรอง Kalman Filter และการประมาณค่าสเตทกับพารามิเตอร์ มาช่วยในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U_r) และความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.19. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมตัวแปรปรับเทียบกับเวลาในช่วง 6 ชั่วโมง

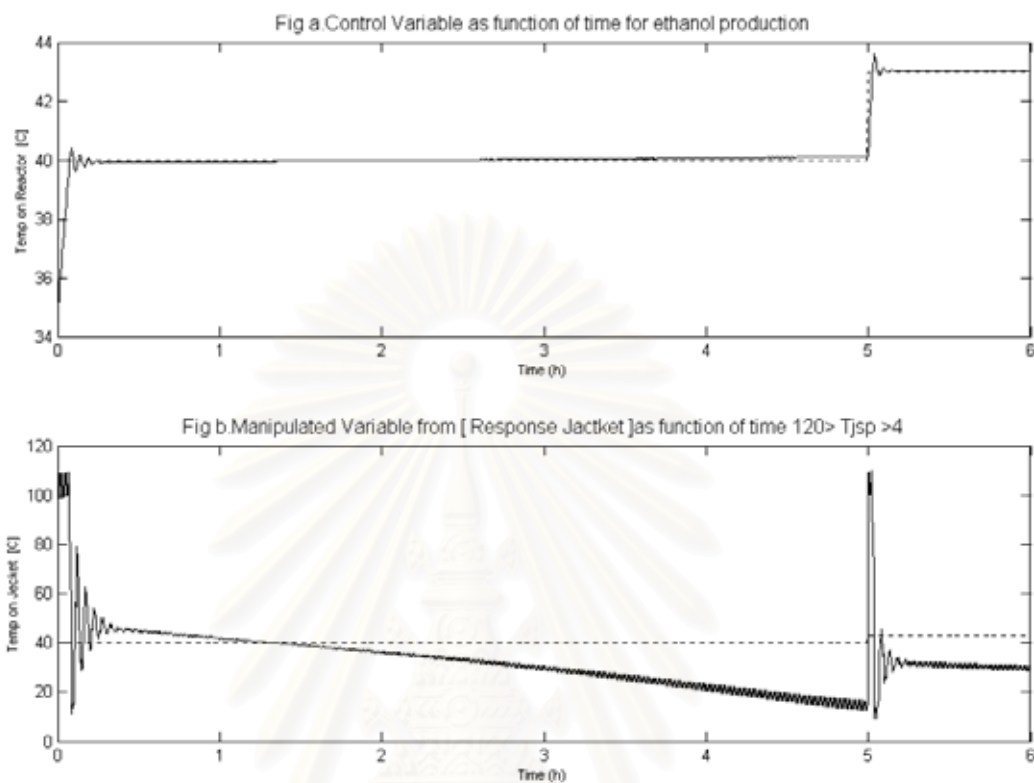


รูปที่ 4.20. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเทียบกับเวลาในช่วง 80 ชั่วโมง เมื่อ (S = 'เส้นทึบ'), (X = 'เส้นประ'), (G = 'เส้นจุด'), (P = 'เส้นประผสมจุด')

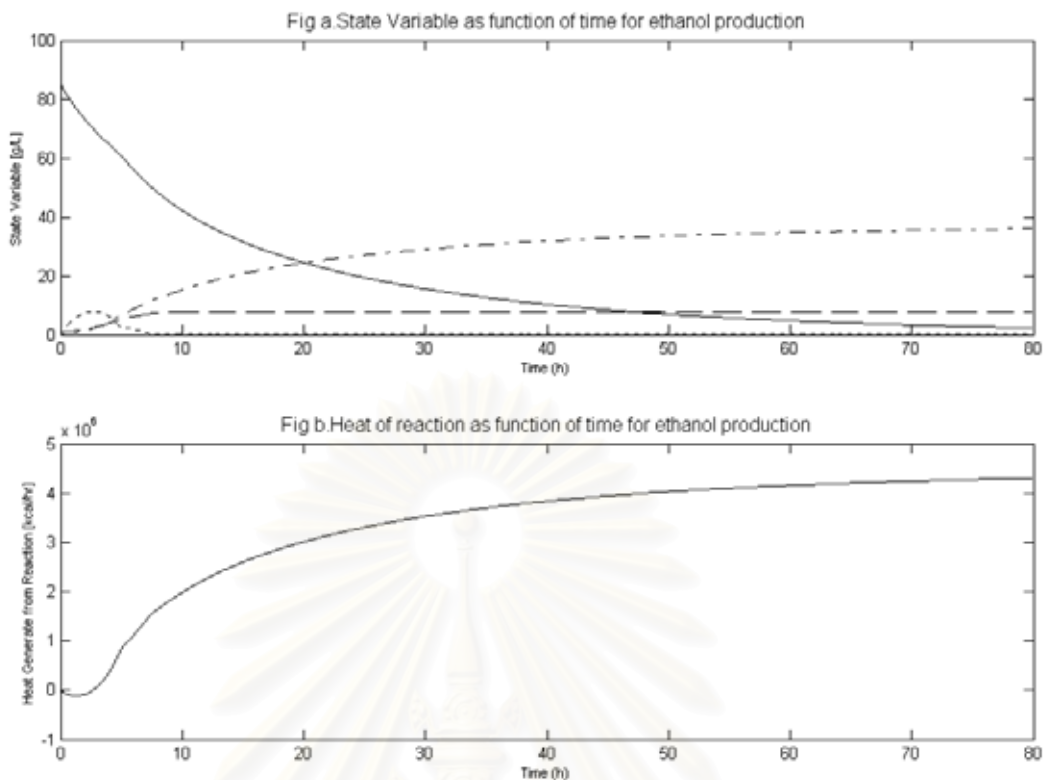
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบดังกล่าว ให้ผลการทดสอบโดยแสดงออกเป็นค่า ISE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 153.44 โดยมีการปรับจูนค่า $K1 = 144$ และ $K2 = 1.81$

4.7.2 กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเอทานอล (ΔH_p) ผิดพลาดประมาณ +30 %



รูปที่ 4.21. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมตัวแปรปรับเทียบกับเวลาในช่วง 6 ชั่วโมง

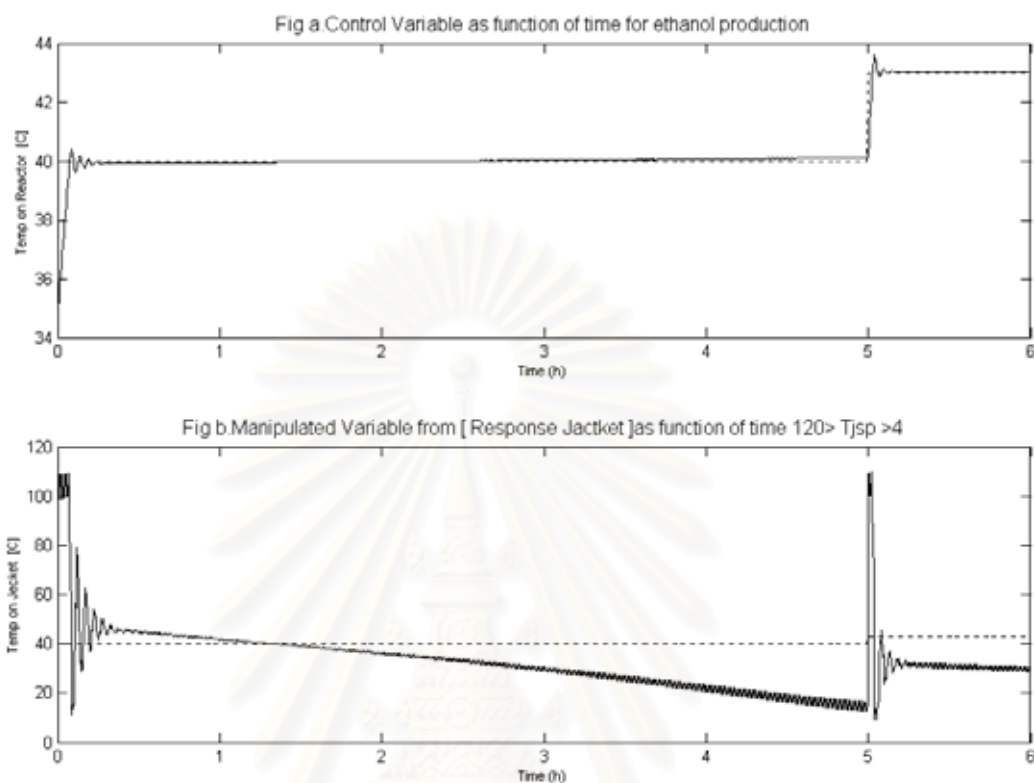


รูปที่ 4.22. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเทียบกับเวลาในช่วง 80 ชั่วโมง เมื่อ (S = 'เส้นทึบ'), (X = 'เส้นประ'), (G = 'เส้นจุด'), (P = 'เส้นประผสมจุด')

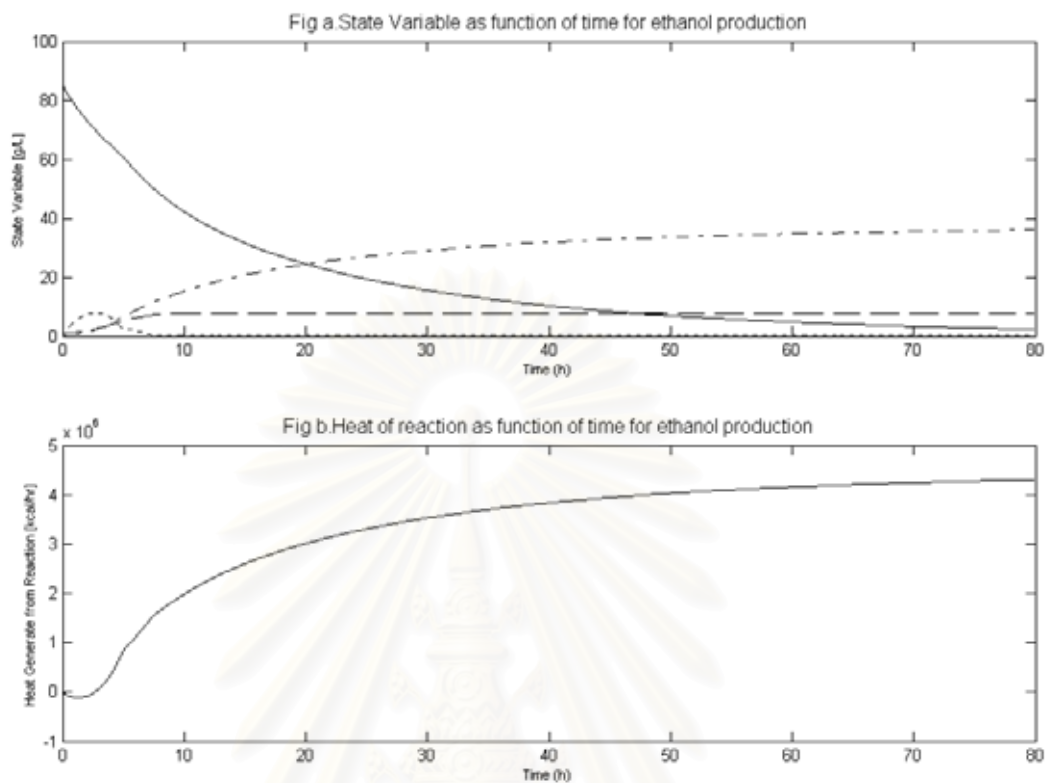
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบดังกล่าว ให้ผลการทดสอบโดยแสดงออกเป็นค่า ISE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 153.44 โดยมีการปรับจูนค่า $K1 = 144$ และ $K2 = 1.81$

4.7.3. กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเซล (ΔH_a) ผิดพลาดประมาณ +30 %



รูปที่ 4.23. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมตัวแปรปรับเทียบกับเวลาในช่วง 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.24. (a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ (b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเทียบกับเวลาในช่วง 80 ชั่วโมง เมื่อ (S = 'เส้นทึบ'), (X = 'เส้นประ'), (G = 'เส้นจุด'), (P = 'เส้นประผสมจุด')

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.8 วิเคราะห์ผลการจำลอง

4.8.1 กรณีแบบจำลองของกระบวนการถูกต้อง

รูปที่ 4.1 แสดงผลการตอบสนองที่ได้รับจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ พีไอดี จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบ พีไอดี สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายแรกที่ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ และค่าเป้าหมายที่สองที่ $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้โดยอุณหภูมิจะเกิดการแกว่งแล้วจากนั้นจึงวิ่งเข้าสู่ค่าเป้าหมาย โดยมีค่า $\text{ISE} = 157.75$ ส่วนตัวแปรปรับ Tr จะเกิดการแกว่งและไม่วิ่งเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง

รูปที่ 4.3 แสดงผลการตอบสนองที่ได้รับจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ จีเอ็มซี จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบ จีเอ็มซี สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายแรกที่ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ และค่าเป้าหมายที่สองที่ $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้โดยอุณหภูมิจะเกิดการแกว่งแล้วจากนั้นจึงวิ่งเข้าสู่ค่าเป้าหมายโดยค่า $\text{ISE} = 153.34$ ส่วนตัวแปรปรับ Tr จะเกิดการแกว่งและไม่วิ่งเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ลักษณะการควบคุมที่ได้คล้ายกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ซึ่งการเปรียบเทียบตัวควบคุมสามารถกระทำได้โดยใช้ค่าดัชนีชี้วัดในบทต่อไป

รูปที่ 4.5 แสดงผลการตอบสนองที่ได้รับจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ จีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบ จีเอ็มซีกับตัวกรองคาลมาน สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายแรกที่ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ และค่าเป้าหมายที่สองที่ $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้โดยอุณหภูมิจะเกิดการแกว่งแล้วจากนั้นจึงวิ่งเข้าสู่ค่าเป้าหมายโดยมีค่า $\text{ISE} = 153.45$ ส่วนตัวแปรปรับ Tr จะเกิดการแกว่งและไม่วิ่งเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ลักษณะการควบคุมที่ได้คล้ายกับตัวควบคุมแบบ จีเอ็มซี ทั้งนี้เนื่องจากเป็นกรณีที่ตั้งสมมุติฐานว่าแบบจำลองของกระบวนการไม่ผิดพลาด

4.8.2 กรณีแบบจำลองของกระบวนการผิดพลาด

- กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเอทานอล (ΔH_p) เพิ่มขึ้นประมาณ +30 %

จากรูปที่ 4.9 , 4.15 และ 4.21 พบว่าเมื่อมีการปรับค่าHp เพิ่มขึ้น 30% ตัวควบคุมแบบ พีไอดี , จีเอ็มซี และ จีเอ็มซีกับตัวกรองคาลมาน ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ โดยมีค่า ISE เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย แสดงว่าการปรับค่า Hp ขึ้น 30% มีอิทธิพลต่อการควบคุมไม่มากนัก

- กรณีที่ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาการผลิตเซล (ΔH_d) เพิ่มขึ้นประมาณ +30 %

จากรูปที่ 4.11 , 4.17 และ 4.23 พบว่าเมื่อมีการปรับค่าHa เพิ่มขึ้น 30% ตัวควบคุมแบบ พีไอดี , จีเอ็มซี และ จีเอ็มซีกับตัวกรองคาลมาน ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้

โดยมีค่า ISE เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย แสดงว่าการปรับค่า Hp ขึ้น 30% มีอิทธิพลต่อการควบคุมไม่มากนัก

- กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Ur) ลดลงประมาณ -30 %

จากรูปที่ 4.7, 4.15 และ 4.19 พบว่าเมื่อมีการปรับค่าUr ลดลง30% ตัวควบคุมแบบ พีไอดี ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ โดยมีค่า ISE เพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวควบคุมแบบ จีเอ็มซี ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายได้ โดยค่าตัวแปรควบคุมจะแกว่งอยู่รอบค่าเป้าหมาย แต่เมื่อมีการใช้ KF เข้ามาร่วมกันกับตัวควบคุมแบบ จีเอ็มซี แล้วสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ โดยมีค่า ISE ต่ำกว่ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบการผลิตเอธานอล เพื่อให้ผลผลิตมีปริมาณสูงขึ้น อีกทั้งยังลดต้นทุนในการผลิต ส่วนหนึ่งคือการนำความรู้ทางด้านการควบคุมกระบวนการมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการทางเทคโนโลยีทางชีวภาพ ปัจจัยที่สำคัญต่อปฏิบัติการเกิดเอธานอลคือ การรักษาอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้เป็นไปตามเป้าหมาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาเพื่อนำระบบการควบคุมแบบโมเดลเบสหรือการควบคุมแบบเจนเนริกโมเดล (Generic Model Control, GMC) มาประยุกต์ใช้ โดยนำมาทดสอบเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) และได้นำเทคนิคการประมาณค่าสเตทและพารามิเตอร์มาช่วยในการควบคุมแบบ จีเอ็มซี สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบสมรรถนะของ Controller ทั้งสองแบบ

BASED CASE	PARAMETER					ISE
	K1	K2	Kcc	Tii	Tdd	
1. พีไอดี Controller			75	0.014	0.002	157.7487
2. จีเอ็มซี Controller	140	0.3322				153.3410

การทดสอบสมรรถนะของ

พีไอดี

1. Ur (-30%)			75	0.014	0.002	386.8083
2. Δ Hp (+30%)			75	0.014	0.002	156.4139
3. Δ Ha (+30%)			75	0.014	0.002	157.6195

การทดสอบสมรรถนะของ

จีเอ็มซี controller

1. Ur (-30%)	140	0.3322				760.1796
2. Δ Hp (+30%)	140	0.3322				155.2907
3. Δ Ha (+30%)	140	0.3322				153.3824

การทดสอบสมรรถนะของ จีเอ็มซี

controller with Kalman Filter

1. Ur (-30%)	144	1.81				153.4427
--------------	-----	------	--	--	--	----------

ค่าไอเอสอี (Integral of Square of the Error) มีค่าเท่ากับ ผลรวมของค่าความผิดพลาด ยกกำลังสองคูณเวลาดังสมการ

$$I S E = \int_0^{\infty} [S R (t) - C V (t)]^2 d t \quad 5.1$$

เมื่อ SP (t) คือ ค่าเป้าหมาย
CV (t) คือ ค่าตัวแปรปรับ
t คือ เวลา

ในการจำลอง จะคำนวณค่าไอเอสอีด้วยวิธีเชิงตัวเลข ดังสมการ

$$I S E = \sum_{i=1}^n [S P_i - C V_i]^2 \Delta t \quad 5.2$$

เมื่อ i คือ สเต็ปใดๆ ในการคำนวณ
n คือ สเต็ปสุดท้าย ในการคำนวณ
SP_i คือ ค่าเป้าหมายที่สเต็ปใดๆ ในการคำนวณ
CV_i คือ ค่าตัวแปรปรับที่สเต็ปใดๆ ในการคำนวณ
Δt คือ ขนาดของสเต็ป ในการคำนวณ

พรพจน์ เบียมสมบวรณ (2544) อ้างว่า ค่าไอเอสอีเป็นดัชนีชี้วัดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ ที่ให้ความสำคัญกับข้อมูลที่มีความเบี่ยงเบนมาก เพราะ ข้อมูลที่มีความเบี่ยงเบนมาก เมื่อยกกำลังสองก็จะมีค่ามาก ส่วนข้อมูลที่มีค่าความเบี่ยงเบนน้อยกว่า 1 เมื่อยกกำลังสองก็จะมีค่าน้อย

และเนื่องจากกระบวนการที่ทำการศึกษานี้ เป็นกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งต้องปรับสภาวะให้เหมาะสมกับการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ ควรจะให้ความสำคัญกับอุณหภูมิที่มีความเบี่ยงเบนมาก เพราะถ้าอุณหภูมียิ่งเบี่ยงเบนไปจากค่าเป้าหมาย ก็จะมีผลต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์มากจึงสมควรจะใช้ค่าไอเอสอีเป็นดัชนีชี้วัดสำหรับกระบวนการนี้

5.1. สรุปผล

1.กรณีไม่เกิดความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

จากการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบ พีไอดี, จีเอ็มซี และ จีเอ็มซีกับตัวกรองคาลมาน ในการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการผลิตเอทานอลแบบกะ พบว่า ตัวควบคุมแบบ จีเอ็มซี และ จีเอ็มซีกับตัวกรองคาลมาน มีประสิทธิภาพในการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบ พีไอดี ซึ่งให้เห็นว่า การนำระบบควบคุมแบบ จีเอ็มซี มาประยุกต์ใช้นั้น ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการควบคุมแบบเดิม ส่งผลให้อัตราการผลิตเอทานอลสูงขึ้น

2. กรณีที่เกิดความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

การทดสอบความทนทานของตัวควบคุมในสถานะที่แบบจำลองของตัวควบคุมมีความผิดพลาดของแบบจำลองของกระบวนการจริงนั้น ทำเพื่อให้แน่ใจว่าการควบคุมจะสามารถประยุกต์ใช้ได้จริง เนื่องจากในกระบวนการจริงอาจจะมีสถานะบางอย่างแตกต่างไปจากแบบจำลอง ซึ่งถ้าหากว่าตัวควบคุมสามารถควบคุมกระบวนการในสถานะเหล่านี้ได้ ก็แสดงเป็นนัยได้ว่าตัวควบคุมนี้สามารถควบคุมกระบวนการจริงได้ โดยผู้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมนี้มีความมั่นใจว่า ตัวควบคุมนี้ยังคงมีสมรรถนะดี และมีความทนทานสูงถึงแม้ว่าแบบจำลองของตัวควบคุมมีความผิดพลาดไปจากแบบจำลองของกระบวนการจริง

จากผลการจำลอง ในกรณีที่พารามิเตอร์ของแบบจำลองมีความผิดพลาดนั้น มีอิทธิพลต่อการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ พีไอดีไม่มากนัก เนื่องจากที่ตัวควบคุมแบบ พีไอดี ไม่ได้อาศัยแบบจำลองของกระบวนการ แต่จะใช้ค่าความแตกต่างระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าที่เวลาใดๆ ในขณะเดียวกัน พบว่า การที่พารามิเตอร์ของแบบจำลองมีความผิดพลาดนั้น จะมีอิทธิพลต่อการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ จีเอ็มซีมาก เนื่องจากการหาสมการตัวแปรปรับของตัวควบคุมแบบ จีเอ็มซี อาศัยแบบจำลองของกระบวนการ นอกจากนี้ ยังพบว่าการใช้เทคนิคการประมาณค่าตัวแปรสเตตและพารามิเตอร์เข้ามารวมกันกับตัวควบคุมแบบ จีเอ็มซี สามารถชดเชยความผิดพลาด และทำให้สมรรถนะในการควบคุมดีมากกว่าเดิมได้อย่างชัดเจน

ดังนั้นในการออกแบบเพื่อสร้างระบบการผลิตเอทานอล สามารถนำระบบการควบคุมแบบ จีเอ็มซี และตัวกรองคาลมาน ไปใช้จริงได้ในทางอุตสาหกรรม

5.2. ข้อเสนอแนะ

-ในงานศึกษาวิจัยชิ้นนี้ ได้แสดงให้เห็นว่า การนำระบบควบคุมแบบ จีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน มาใช้งาน กับเทคโนโลยีทางชีวภาพนั้น สามารถให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แม้ว่าจะไม่ได้ทดลองจริง เป็นผลสืบเนื่องจากการใช้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมเคมี โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่น่าเชื่อถือมาใช้เป็นตัวแทนของระบบ และได้มีการทดสอบต่าง ๆ ตามหลักการของการควบคุมกระบวนการอัตโนมัติขั้นสูง ทำให้เชื่อมั่นได้ว่า การควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ควบคุมในทางอุตสาหกรรมได้จริง

-การควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการผลิตเอทานอลแบบกะนี้เป็นเพียงกรณีหนึ่งของการควบคุมกระบวนการทางชีวภาพเท่านั้น การประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจีเอ็มซีร่วมกับตัวกรองคาลมาน กับกระบวนการทางชีวภาพอื่นๆ จึงนับว่าเป็นงานที่น่าสนใจอย่างยิ่ง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ณรงค์ เฟื่องปรีชา. มันสำปะหลังวัสดุเส้นใยใหม่, กองวิจัยผลผลิตป่าไม้ กรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2512.
- ชราธร มงคลศรี. เอกสารประกอบคำสอนวิชา 165-374 วิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับวิศวกรรมเคมี. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- ปราโมทย์ เตชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ ในงานวิศวกรรม, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- ปิ่นฉวี เวชชานุเคราะห์. จูลินทรีย์และการผลิตชีวก๊าซจากพืช รายงาน การสัมมนาเรื่องพืช รายงาน การสัมมนาเรื่องพืชพลังงาน และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไปคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
- ไพศาล กิตติศุกร. เอกสารประกอบคำสอนวิชา 2105-619 การควบคุมกระบวนการอัตโนมัติขั้นสูง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542
- พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์. พลศาสตร์กระบวนการ : การควบคุมกระบวนการ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ท.วัฒนาการพิมพ์, 2544
- วีรยุทธ เลิศบำรุงสุข. การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ขั้นตอนวิธีตัวกรองกาลมานสำหรับกระบวนการเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543
- สุพัตรา ทองมีสี. การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับกาลมานฟิลเตอร์ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีพอลิเมอร์แบบเบตซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- สาโรจน์ ศิริสันสนียกุลและประวิทย์ วงศ์คงคาเทพ. วิศวกรรมเคมีชีวภาพพื้นฐาน 1, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- Astrom, K.J. and Haggglund, T., Automatic Tuning of พีไอดี Controllers, ISA : Research Triangle Park, 1988.
- Brown, M.W., Lee, P.L., Sullivan, G.R. and Zhou, W., A Constrained Nonlinear Multivariable Control Algorithm, Trans IChemE., Vol. 68, 1990 : 464-476.
- Charles E., Hand Book On Bioethanol Production and Utilization, Notional renewavle Energy Laboratory, 1996 : 253-278
- Cott, B.J. and Macchietto, S., Temperature control of exothermic batch reactor using Generic model control, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 28, 1989 : 1177-1184.
- Cott, B.J., Durham, R.G., Lee, P.L. and Sullivan, G.R., Process Model-Based Engineering, Comput. Chem. Eng., Vol. 13, No.9, 1989 : 984.
- Dechapongsa Kanchanalaksana., Overview of Ethanol Industry in Thailand, WorkShop on Biomass Derived Ethanol as Automotive Fuels in Thailand, 2000 : 30-31
- Doran P.M. Bioprocess Engineering, academic, 1-12
- Flathouse, S.E., and Riggs, J.B., Tuning พีไอดี Controllers Using The ATV Procedure, Comput. cem. Eng. Vol.20, No.8, 1996 : 979-988.
- Hamilton, J.C.; Seborg, D.E. and fisher, D.G., An Experimental Evaluation of Kalman Filing, ALChE J., Vol. 19, 1973 : 901-909.
- Henson, M.A. and Seborg, D.E., Input-Output Linearization of General Nonlinear Processes, AICHE J., Vol.36, 1990 : 1753-1757.
- Henson, M.A. and Sebog, D.E., Nonlinear Process Control. New Jersey : Prentice Hall, 1997
- Kalman. R.E., Contributions to the theory of optimal control, Bull. Soc. Math. Mex., vol. 5, 1960 : 102-119.
- Kershenbaum, L.S. and Kittisupakorn, P., The Use of A Partially Simulated Exothermic (PARSEX) Reactor for Experimental Testinmg of Control Algorithms, Trans LchemE, Vol. 72, Part A, January 1994 : 55-63.
- Lee. P.L. and Sullivan. G.R., Generic Model Control (พีไอดี), Comput. Chem. Eng., Vol. 12, No.6, 1988 : 573-580.

- Liptak, B.G., Controlling and optimizing chemical reactors. Chemical Engineering, May 1986 : 69-81.
- McLellan, P.J., Harris, T.J. and Bacon, D.W., Error Trajectory descriptions of nonlinear controller designs. Chem. Eng. Sci., Vol. 45. 1990 : 3017-3034.
- Michael D. Ackerson, Ph. D, Production of Ethanol from MSW via concentrated Engineering University of Arkansas, 725-742
- Parisi, F., Advance in Lignocellulosic Hydrolysis and in the Utilization of Hydrolysates, In Fiechter, A., ed, New York Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Seborg, D.E., Edgar, T.F., and Mellichamp, D.A., Process Dynamics and Control, New York : Wiley. 1989
- Staniforth, A.R., Cereal Straw, Oxford Clarendon, 1979 : 118-119.
- Swaminathan M.S., Sprague, E. W. and Joginder, S. The present and future industrial processing of maize grain and maize stover, Processing Utilization and Marketing of Maize, p.300-316, New York, (1982)
- Signal, P.D. and Lee, P.L., Generic Model Adaptive Control, Chem. Eng. Commun., Vol. 115, 1992 : 35-52.
- Signal, P.D. and Lee, P.L., Robust Stability and Performance Analysis of Generic Model Control (กรณีศึกษา). Chem. Eng. Commun., Vol. 124, 1993 : 57-76.
- Smith, C.A. and Corripio, A.B., Principles and Practice of Automatic Process Control. Canada: John Wiley & Sons, 1997
- Stephanopoulos, G. m Process Dynamic and Control. Englewood Cliffs. NJ : Prentice-Hall 1984.
- J.A. Asenjo Optimization of Batch Process Involving Simultaneous Enzymatic and Microbial Reactions, Biotechnology and Bioengineering, Vol. 37, P. 1087-1094, (1991)
- Valliere, P. De and Bonvin, D., Application of Estimation techniques to Batch Reactors-II. Experimental Studies in State and Parameter Estimation, Comput. Chem. Eng., vol. 13, No. 1 / 2, 1989 : 11- 20.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ณรงค์ ดวงเกตุ เกิดวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2518 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสระบุรีวิทยาคม เมื่อ พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปี พ.ศ. 2541 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย