



การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR B5020

แบบกึ่งกะด้วยพีซีลอจิก

Fuzzy Logic Control of Fed-Batch Fermentation of *Saccharomyces cerevisiae*

TISTR B5020

อรรณมณ พูลศิริ

Annarumon Phoonsiri

Order Key..... 20423
BIB Key..... 161201 ✓

๑

เลขหมู่ QR 151 044 2542 น.2
เลขทะเบียน.....
..... ๕๐.๐.๐. ๒๕๔๒

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Science Thesis in Biotechnology

Prince of Songkla University

2542

ชื่อวิทยานิพนธ์ การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae*

TISTR B5020 แบบกึ่งกะด้วยไฟซึลอลจิก

ผู้เขียน นางสาวอรณณมล พูลศิริ

สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ

คณะกรรมการที่ปรึกษา

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ ศิริพันธ์)

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ ศิริพันธ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หันพงษ์กิตติกุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หันพงษ์กิตติกุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ สันตินานาเลิศ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ก้าน จันทร์พรหมมา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์      การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae*  
TISTR B5020 แบบกึ่งกะด้วยพีซีซิลลอปจิก  
ผู้เขียน              นางสาวอรณณมล พูลศิริ  
สาขาวิชา            เทคโนโลยีชีวภาพ  
ปีการศึกษา          2541

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาระบบควบคุมการหมักยีสต์ (*Saccharomyces cerevisiae* TISTR B5020) ที่สามารถให้ผลผลิตเซลล์ต่อน้ำตาลที่ใช้สูง และมีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมน้อย ขึ้นแรกของการพัฒนาระบบควบคุมคือ การพัฒนาวิธีการวัดปริมาณกลูโคสและเอทานอล โดยใช้การวัดแบบทางอ้อม (gateway sensor) ซึ่งคำนวณจากสมการสตอยคิโอเมตริก ร่วมกับการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และปริมาณเซลล์แบบออนไลน์ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดจากการทดลองโดยตรงกับค่าที่ได้จากการวัดทางอ้อมมีความสัมพันธ์สามารถแทนด้วยสมการเชิงเส้น เมื่อปรับค่าให้สอดคล้องกันแล้ว สามารถนำไปใช้ในระบบวัดและการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ได้เป็นอย่างดี

ขั้นต่อมาคือการเลือกแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อนำมาจำลองสถานการณ์และออกแบบระบบควบคุม เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาโดย Takamatsu และคณะ (1985) สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ของยีสต์สายพันธุ์ที่ศึกษาทั้งแบบกะและแบบกึ่งกะได้เป็นอย่างดี เมื่อนำเอาผลการทดลองมาเทียบเคียงกับแบบจำลองแล้วหาค่าพารามิเตอร์ พบว่าค่าอัตราการผลิตสูงสุด ( $\mu_{max}$ ) เท่ากับ 0.25 ต่อชั่วโมง, ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้น้ำตาล ( $Y$ ) เท่ากับ 0.12 กรัมเซลล์ต่อกรัมน้ำตาล, ปริมาณเอทานอลที่สร้างต่อการใช้น้ำตาล ( $Y_e$ ) เท่ากับ 0.12 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาล, ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้อเอทานอล ( $Y_{xe}$ ) เท่ากับ 0.48 กรัมเซลล์ต่อกรัมเอทานอลและค่าโคเนคติกพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่  $k_1 = 0.01$ ,  $k_2 = 0.01$ ,  $k_3 = 0.1$  และ  $m = 0.03$

ขั้นที่สามเป็นการออกแบบกฎการควบคุมแบบพีซีซีและจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลองที่ได้จากขั้นที่สอง เพื่อดูผลสัมฤทธิ์ของการควบคุมเปรียบเทียบกับ การควบคุม

แบบพีไอดั้งเดิม การควบคุมแบบพีซีอาศัยหลักการของประโยค “ถ้า {ความเข้มข้นของ กลูโคสเท่ากับ...และความเข้มข้นของเอธานอลเท่ากับ...}, ดังนั้น {อัตราการเติมอาหาร เท่ากับ...}” กฎการควบคุมประกอบด้วยฟังก์ชันสมาชิก 2 ฟังก์ชัน (ความเข้มข้นของ กลูโคสและความเข้มข้นของเอธานอล) และมีกฎการผลิต 9 กฎ ตั้งค่าการควบคุม (set point) ความเข้มข้นของกลูโคสและเอธานอลในการหมัก *S.cerevisiae* TISTR B5020 แบบกึ่งกะที่ 0.2 กรัมต่อลิตร และ 2 กรัมต่อลิตรตามลำดับ สำหรับการควบคุมแบบพีไอใช้ ค่า  $K_c$  เท่ากับ 0.02 และ  $\tau_i$  เท่ากับ 200 ผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องกับ ผลการทดลองจริงทั้งการควบคุมแบบพีซีลอจิกและแบบพีไอ

ขั้นสุดท้าย เป็นการนำระบบควบคุมแบบพีซีที่ออกแบบมาใช้ในการหมักยีสต์ ขนบปังแบบกึ่งกะได้ปริมาณเซลล์ 3.69 กรัมต่อลิตร ผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาล เท่ากับ 0.13 กรัมเซลล์ต่อกรัมน้ำตาล สามารถควบคุมปริมาณกลูโคสและเอธานอลให้อยู่ใน ช่วง  $0.37 \pm 0.31$  กรัมต่อลิตร และ  $1.10 \pm 0.25$  กรัมต่อลิตรตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการ ควบคุมแบบพีซีกับการควบคุมแบบพีไอ พบว่าให้ประสิทธิภาพในการควบคุมใกล้เคียง กัน และเมื่อนำระบบการควบคุมแบบพีซีมาควบคุมกระบวนการที่มีปัจจัยรบกวน 2 กรณี (เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพีเอช) พบว่าระบบควบคุมสามารถทำงานได้ดีเหมือนในกรณีที่ ไม่มีปัจจัยรบกวน

Thesis Title            Fuzzy Logic Control of Fed-Batch Fermentation of  
                                 *Saccharomyces cerevisiae* TISTR B5020

Author                    Miss Annarumon Phoonsiri

Major Program         Biotechnology

Academic Year         1998

### Abstract

This work aims to develop the control system for baker's yeast (*Saccharomyces cerevisiae* TISTR B5020) production using fuzzy logic. The system developed must give high yield of cells on available sugar and low level of control error. The first step of development was to create a gateway sensor for measuring glucose and ethanol using stoichiometric equations and CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> on-line measurement. It was found that there was a linear relation between the values obtained from direct measurement and that from gateway sensor. After a simple correction, the indirect measurement can be used for measuring and control of the fermentation process satisfactorily.

Next step was the selection of appropriate mathematical model for simulation and design of control system. By composition with the experimental data, the model of Takamatsu, *et al.*, (1995) was chosen because it could explain the batch and fed-batch process so well. It was also found that, by model fitting, the maximum specific growth rate ( $\mu_{max}$ ) was 0.25 hr<sup>-1</sup>, growth yield of yeast on available sugar (Y) was 0.12 g-cell/g-sugar, yield of ethanol on available sugar (Y<sub>es</sub>) was 0.12 g-EtoH/g-sugar, growth yield of ethanol (Y<sub>xe</sub>) was 0.48 and the kinetic parameter were taken as  $k_1 = 0.01$ ,  $k_2 = 0.01$ ,  $k_s = 0.1$  and  $m = 0.03$

The third step was the design of fuzzy rules and simulation of the model obtained from the previous step for effectiveness evaluation as compared to a traditional PI control. The fuzzy rules were "IF {glucose concentration is... and ethanol concentration is...}, THEN {glucose feed rate is...}". This fuzzy controller consisted of two membership

functions (concentrations of glucose and ethanol ) and 9 production rules. The medium concentrations of glucose and ethanol in fed-batch culture of *S.cerevisiae* TISTR B5020 were set at 0.2 g/l and 2 g/l, respectively, For PI control  $K_c$  and  $\tau_i$  were set at 0.02 and 200, respectively. It was found that results of simulation agreed well with the experiment results.

The final step was the application of fuzzy control in the fed-batch fermentation of the yeast. The maximum cell concentration was 3.69 g/l, growth yield of yeast on available glucose was 0.13 g-cell/g-glucose. The system was capable to control the process with control (errors)  $0.37 \pm 0.31$  g/l and  $1.10 \pm 0.25$  g/l for glucose and ethanol, respectively. Both fuzzy control and PI control gave comparable result either without disturbance and with high temperature and pH fluctuation.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้จากการได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ ศิริพัชระ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำชี้แนะแนวทางในการทำวิจัยและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง กราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ หันพงษ์กิตติกุล กรรมการที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าวิจัยและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ สันตินานาเลิศ ที่กรุณาตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบุคลากรในคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เพื่อให้การวิจัยดำเนินไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณเพื่อนๆที่เป็นกำลังใจให้ตลอดมา

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่กรุณามอบความรักและให้กำลังใจเป็นพิเศษตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัย และขอขอบพระคุณคุณพี่และน้องที่รักที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

อรรณณมถ พูลศิริ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
Abstract.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
รายการตาราง.....	(11)
รายการภาพ.....	(12)
คำย่อและสัญลักษณ์.....	(16)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
บทนำต้นเรื่อง.....	1
ตรวจเอกสาร.....	2
1. ลักษณะ โดยทั่วไปและกระบวนการผลิต	
ยีสต์ขนมปัง.....	2
1.1 ยีสต์ขนมปัง.....	2
1.2 กรรมวิธีการผลิตยีสต์ขนมปัง.....	3
1.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตยีสต์ขนมปัง.....	3
2. ทฤษฎีฟิซซีลोजิก.....	5
2.1 โครงสร้างของระบบฟิซซี.....	6
2.2 กระบวนการฟิซซีฟิเคชัน.....	7
2.3 การหาค่าเอาต์พุตจากกฎพื้นฐาน.....	8
2.4 กระบวนการคิฟิซซีฟิเคชัน.....	9
3. การควบคุมกระบวนการผลิต.....	9
3.1 การควบคุมด้วยฟิซซี.....	9
3.2 การควบคุมแบบฟิไอ.....	12
3.3 วิธีการควบคุมกระบวนการ โดยฟิซซีลोजิก.....	13



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์ขนมปัง สำหรับควบคุมการหมักแบบกึ่งกะ .....	14
5. วัตถุประสงค์.....	18
2 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย.....	19
1. การพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และวิธีการวัดเอทานอล และกลูโคสโดยทางอ้อมด้วยสมการสตอยคิโอมेटริก เพื่อใช้ ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง.....	19
2. การสร้างระบบควบคุมแบบพีซีและพีไอและจำลอง สถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักด้วย คอมพิวเตอร์.....	22
3. ทดสอบประสิทธิภาพของการทำงานของระบบการควบคุม แบบพีซี โดยทำการทดลองหมักยีสต์แบบกึ่งกะ .....	24
3 แนวคิดและการพัฒนาระบบควบคุมกระบวนการหมัก.....	27
แนวคิด.....	27
1. ทฤษฎีที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ การเจริญของยีสต์.....	28
2. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์แบบ กึ่งกะ.....	29
3. การพัฒนาระบบการควบคุมแบบพีซี.....	35
4. การควบคุมอัตราการเติมกลูโคสในกระบวนการหมัก ยีสต์ขนมปัง.....	37
5. กฎพีซี.....	38
6. การวัดโดยทางอ้อม.....	44
7. โครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการ จำลองสถานการณ์.....	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
8. โครงสร้างของระบบวัดและควบคุมกระบวนการหมัก ยีสต์ขนมปังด้วยคอมพิวเตอร์.....	48
4 ผลและวิจารณ์.....	50
1. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์แบบกะ และแบบกึ่งกะ.....	50
2. การวัดทางอ้อม โดยใช้สมการสโตยคิโอมตริก.....	64
3. การจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักด้วยพีซี.....	68
4. การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังด้วยพีซี.....	73
กรณีที่ 1 การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบ กึ่งกะ โดยใช้พีซี เมื่อไม่มีปัจจัยรบกวน.....	73
กรณีที่ 2 การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบ กึ่งกะ โดยใช้พีซี เมื่อมีปัจจัยรบกวน.....	77
5. การจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมัก ยีสต์ขนมปังแบบพีไอ.....	84
6. การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ ด้วยการควบคุมแบบพีไอ.....	88
5 บทสรุป.....	91
บรรณานุกรม.....	97
ภาคผนวก.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	157

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
1	แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์ขนมปัง ในสภาวะต่างๆและพารามิเตอร์	30
2	กฎพีชคณิตที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบ กึ่งกะ	43
3	ค่าเริ่มต้นในการหมักที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การควบคุม กระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง	50
4	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองเลี้ยงยีสต์แบบ กะและกึ่งกะ	52
5	ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ ขนมปังแบบกึ่งกะเมื่อใช้การควบคุมแบบต่างๆ	70
6	เปรียบเทียบผลการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง แบบพีชคณิตเมื่อการหมักมีปัจจัยรบกวนและไม่มีปัจจัยรบกวน	83
7	ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ ขนมปังแบบพีไอ เมื่อ ใช้ค่า $K_c$ และ $\tau_i$ ต่างๆ	85
8	กฎการควบคุมแบบพีชคณิต	93
9	เปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมการหมักแบบต่างๆ	94

## รายการภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ฟีชชีเซตของระยะเวลาในการทำโครงการ	5
1.2 โครงสร้างของระบบฟีชชี	6
1.3 ฟีชชีเซตของความเข้มข้นของเอธานอล	7
1.4 กระบวนการคัฟี่ชชีฟี่เคชั่น โดยใช้วิธีหาจุดศูนย์ถ่วง	10
1.5 กระบวนการควบคุมด้วยฟีชชีลอจิก	11
1.6 การควบคุมแบบพีไอ	12
1.7 วิธีการควบคุมด้วยฟีชชีลอจิก	13
1.8 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์	15
2.1 ขั้นตอนการสร้างระบบการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ ขนมปังด้วยคอมพิวเตอร์	21
2.2 ขั้นตอนการสร้างระบบควบคุมและจำลองสถานการณ์ การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ	23
2.3 แบบการรบกวนของปัจจัยรบกวน (พีเอชและอุณหภูมิ) ในการหมัก	26
3.1 การควบคุมแบบฟีชชี	36
3.2 วิธีการควบคุมกระบวนการหมักด้วยฟีชชีลอจิก	37
3.3 ฟีชชีเซตฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตกลูโคสและเอธานอล	41
3.4 ฟีชชีเซตฟังก์ชันสมาชิกของอัตราการเติมอาหาร (เอาต์พุต)	42
3.5 ขั้นตอนการคำนวณใน โปรแกรมฟีชชี	46
3.6 โครงสร้างของโปรแกรมการจำลองสถานการณ์การควบคุม กระบวนการหมักยีสต์	47
3.7 ระบบการวัดและควบคุมในกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง ด้วยคอมพิวเตอร์	49
4.1 ผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกะ	51

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.2 ขั้นตอนการปรับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ การเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะ	54
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะกับ ผลจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เมื่อมีการปรับ $m$	59
4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะกับ ผลจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เมื่อมีการปรับ $k_1$	60
4.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะกับ ผลจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เมื่อมีการปรับ $k_2$	61
4.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะกับ ผลจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เมื่อมีการปรับ $k_3$	62
4.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะกับ ผลจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เมื่อมีการปรับ $Y_{x/e}$	63
4.8 การเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากการทดลองหมักยีสต์ขนมปัง แบบกึ่งกะกับการคำนวณจากสมการสโตยคิโอมेटริก	66
4.9 ความสัมพันธ์ของปริมาณเอธานอลจากการคำนวณและ ค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง	67
4.10 ความสัมพันธ์ของปริมาณกลูโคสจากการคำนวณและ ค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง	67
4.11 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ ขนมปังแบบกึ่งกะ เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 8	71
4.12 อัตราการเติมอาหารในผลการจำลองสถานการณ์การควบคุม กระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะเมื่อใช้การควบคุม แบบที่ 8	72

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 ผลการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ ด้วยฟัซซี่ เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 8 ควบคุมพีเอชเท่ากับ 4.5 และอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส	75
4.14 อัตราการเติมอาหารในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง แบบกึ่งกะด้วยฟัซซี่ เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 8	76
4.15 ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไปและปริมาณก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยฟัซซี่ เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 8	76
4.16 ผลการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ ด้วยระบบฟัซซี่ เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 8 และมีปัจจัยรบกวน ในกรณีที่ 1	79
4.17 อัตราการเติมกลูโคสในการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยฟัซซี่ เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 8 และมี ปัจจัยรบกวน ในกรณีที่ 1	80
4.18 ปริมาณก๊าซออกซิเจน และคาร์บอน ไดออกไซด์ ในการทดลอง ควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยระบบฟัซซี่ เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 8 และมีปัจจัยรบกวน ในกรณีที่ 1	80
4.19 ผลการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ ด้วยฟัซซี่ เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 8 และมีปัจจัยรบกวน ในกรณีที่ 2	81
4.20 อัตราการเติมอาหารในการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยระบบฟัซซี่ เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 8 และมีปัจจัยรบกวน ในกรณีที่ 2	82

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.21 ปริมาณก๊าซออกซิเจน และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ ด้วยระบบพีซีซี เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 8 และมีปัจจัยรบกวน ในกรณีที่ 2	82
4.22 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยพีไอ	86
4.23 อัตราการเติมอาหารในการจำลองสถานการณ์การควบคุม กระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยพีไอ	87
4.24 ผลการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ ด้วยการควบคุมแบบพีไอ	89
4.25 อัตราการเติมอาหารในการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีไอ	90
4.26 ปริมาณก๊าซออกซิเจน และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ ด้วยการควบคุมแบบพีไอ	90
5.1 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการควบคุม กระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบพีซีซี	93

### ตัวย่อและสัญลักษณ์

$S$	=	ความเข้มข้นของสารอาหาร (กรัมต่อลิตร)
$X$	=	ความเข้มข้นของเซลล์ (กรัมต่อลิตร)
$C_o$	=	ความเข้มข้นของเอธานอล (กรัมต่อลิตร)
$V$	=	ปริมาตรการใช้งาน (ลิตร)
$K_s$	=	ค่าคงที่ของ โมนอด
$h_s$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของอาหาร (เมตรต่อวินาที)
$d_c$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์ (เมตร)
$A_c$	=	พื้นที่ผิวของเซลล์ (ตารางเมตร)
$r_x$	=	อัตราการเกิดเซลล์ (กรัมต่อลิตร)
$r_s$	=	อัตราการใช้สารอาหาร (กรัมต่อลิตร)
$r_p$	=	อัตราการผลิตผลิตภัณฑ์ (กรัมต่อลิตร)
$F$	=	อัตราการเติมอาหาร (ลิตรต่อชั่วโมง)
$F^*$	=	อัตราการเติมอาหารแบบป้อนล่วงหน้า (ลิตรต่อชั่วโมง)
$\Delta F$	=	อัตราการเติมอาหารแบบป้อนกลับ (ลิตรต่อชั่วโมง)
$S_o$	=	ความเข้มข้นของอาหารที่เติม (กรัมต่อลิตร)
$Q(s)$	=	สัมประสิทธิ์การยับยั้งการใช้เอธานอล โดยกลูโคส
$R(s)$	=	อัตราการใช้ไปต่อกลูโคสทั้งหมด
$E/X$	=	กิจกรรมของเอนไซม์อินเวอร์เทสจำเพาะ (กิโลยูนิตต่อกรัมเซลล์)
$Y_{PS}^F$	=	ผลผลิตเอธานอลต่อการใช้กลูโคสในช่วงการหมักแบบไม่มีอากาศ (กรัมเอธานอลต่อกรัมกลูโคส)
$Y_{XS}^F$	=	ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้กลูโคสในช่วงการหมักแบบไม่มีอากาศ (กรัมเซลล์ต่อกรัมกลูโคส)
$Y_{XP}^R$	=	ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้เอธานอลในช่วงการหมักแบบมีอากาศ (กรัมเซลล์ต่อกรัมเอธานอล)
$Y_{XS}^R$	=	ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้กลูโคสในช่วงการหมักแบบมีอากาศ (กรัมเซลล์ต่อกรัมกลูโคส)



ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$Y$	=	ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้น้ำตาล (กรัมเซลล์ต่อกรัมน้ำตาล)
$Y_{x/o}$	=	ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้อเอทานอล (กรัมเซลล์ต่อกรัมเอทานอล)
$Y_{e/s}$	=	ปริมาณเอทานอลที่สร้างต่อการใช้น้ำตาล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาล)
$\mu$	=	อัตราการเจริญจำเพาะ (ต่อชั่วโมง)
$\pi_e$	=	อัตราการสร้างเอทานอลจำเพาะ (กรัมต่อกรัมต่อชั่วโมง)
$v_e$	=	อัตราการใช้อเอทานอล (กรัมต่อกรัมต่อชั่วโมง)
$\eta_s$	=	อัตราการสร้างอินเวอร์เทสต่ออัตราการเจริญจำเพาะเมื่อใช้กลูโคส
$\eta_A$	=	อัตราการสร้างอินเวอร์เทสต่ออัตราการเจริญจำเพาะเมื่อใช้อเอทานอล
$m$	=	ค่าคงที่
$k_i$	=	โคนคิกพารามิเตอร์ ( $i=1,2,s$ )
$a_i$	=	พารามิเตอร์ ( $i=1,2$ )
$a$	=	ปริมาณกลูโคสที่ลด (โมล)
$d$	=	ปริมาณเซลล์ที่เพิ่ม (โมล)
$g$	=	ปริมาณเอทานอลที่เปลี่ยนแปลง (โมล)
$b$	=	ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ลด (โมล)
$f$	=	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่ม (โมล)

## บทที่ 1

### บทนำ

#### บทนำต้นเรื่อง

การควบคุมกระบวนการผลิตเป็นหัวใจของการจัดกระบวนการผลิตเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ถึงแม้ว่าได้มีการนำระบบควบคุมอัตโนมัติมาใช้มากขึ้น แต่ความจำเป็นในการใช้คนตัดสินใจยังคงมีอยู่อีกมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนถ้าขาดบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญอาจทำให้กระบวนการผลิตมีคุณภาพไม่ดีพอหรืออาจจะไม่สามารถควบคุมได้ เนื่องจากการควบคุมขึ้นอยู่กับความสามารถและประสบการณ์ของผู้ควบคุมเป็นสำคัญ อีกทั้งในกระบวนการทางชีวภาพยังอาจเกิดปัญหาจากความสลับซับซ้อนและความไม่แน่นอนในกระบวนการ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางชีวเคมีและสภาวะแวดล้อม จึงได้มีการพัฒนาระบบควบคุมที่มีการนำเอาเทคโนโลยีระบบผู้เชี่ยวชาญ (expert system) มาใช้ ระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิกเป็นแบบหนึ่งของระบบดังกล่าวที่มีการสนใจกันอย่างมากในปัจจุบัน

ฟัซซีลอจิกเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาในการควบคุม มีการพัฒนาขึ้นมาสำหรับการใช้ข้อมูลเชิงคุณภาพให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ในทางเทคโนโลยีชีวภาพได้มีการนำฟัซซีลอจิกมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและควบคุมกระบวนการหมัก เช่น ควบคุมกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ การผลิตโปรตีนเซลล์เดียว กระบวนการระบบตะกอนเร่ง (activated sludge) (Kishimoto, *et al.*, 1991) การผลิตกรดกลูตามิก (Kishimoto, *et al.*, 1989 ; Kitsuta and Kishimoto, 1994) และควบคุมการผลิตยีสต์ขนมปัง (Park, *et al.*, 1993 ; Siimes and Linko, 1995 ; Siimes, *et al.*, 1995 ; Kishimoto, *et al.*, 1991 ; Shi and Shimizu, 1992 ; Kaiming, *et al.*, 1996) ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การควบคุมด้วยวิธีดังกล่าวมีข้อดีว่าการควบคุมด้วยวิธีอื่นคือฟัซซีลอจิกสามารถช่วยให้การควบคุมมีความราบเรียบมากขึ้น ทำให้ระบบที่ควบคุมมีความยืดหยุ่น ใช้ได้ง่าย สะดวกรวดเร็วและสามารถปรับเปลี่ยนแก้ไขได้ง่าย งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทฤษฎีฟัซซีลอจิกในการควบคุม

กระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ (fed-batch fermentation) เพื่อให้ได้มวลชีวภาพสูงสุด นับเป็นก้าวแรกของการนำเอาระบบผู้เชี่ยวชาญมาใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตทางเทคโนโลยีชีวภาพในประเทศไทย

## ตรวจเอกสาร

### 1. ลักษณะโดยทั่วไปและกระบวนการผลิตยีสต์ขนมปัง (baker's yeast)

#### 1.1 ยีสต์ขนมปัง

##### 1.1.1 ยีสต์ขนมปัง

ยีสต์ที่ใช้ในการผลิตยีสต์ขนมปังคือ *Saccharomyces cerevisiae* มีรูปร่างเป็นเซลล์เดี่ยว (unicellular) รูปไข่ ค่อนข้างกลม ไม่มีสี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6-8 ไมครอน เจริญได้ดีทั้งในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจน มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ โดยการสร้างแอสโกสปอร์ (ascospore) และมีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศโดยการแตกหน่อ (budding) (Reed and Pepple, 1973) เซลล์ยีสต์ 1 เซลล์ มีน้ำหนักแห้งประมาณ  $1 \times 10^{-11}$  กรัม (Brown and Rose, 1964)

##### 1.1.2 อัตราการเจริญเติบโตของยีสต์

ในกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังที่อยู่ภายใต้สภาวะที่สารอาหารมีความเข้มข้นมาก และมีปริมาณเซลล์ต่ำ อัตราการเจริญจำเพาะของยีสต์มีค่าประมาณ 0.60 ต่อชั่วโมง วัตถุประสงค์ของการผลิตยีสต์ขนมปังก็คือให้ได้เซลล์ยีสต์ปริมาณมากและมีความสามารถในการเปลี่ยนสารอาหารที่ใช้เลี้ยงไปเป็นองค์ประกอบของเซลล์ได้สูงสุด (กรัมเซลล์ต่อสารอาหารที่ถูกใช้) ดังนั้นในการผลิตระดับอุตสาหกรรมมักจะควบคุมให้อัตราการเจริญจำเพาะอยู่ในช่วง 0.05 - 0.30 ต่อชั่วโมง (Burrows, 1970) ในช่วงที่มีอัตราการเจริญเติบโตระหว่าง 0.08 - 0.18 ต่อชั่วโมง ผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อสารอาหารที่ถูกใช้มีค่าคงที่ ถ้าอัตราการเจริญสูงกว่า 0.18 ต่อชั่วโมง สารอาหารที่มีความเข้มข้นสูงจะถูกเปลี่ยนไปเป็นเอทานอลทั้งที่มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอ ถ้าอัตราการเจริญต่ำกว่า 0.08 ต่อชั่วโมง สารอาหารจะถูก

ออกซิไดส์ไปเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์อย่างสมบูรณ์ (Hansford and Humphrey, 1966; Mor and Fiechter, 1968)

## 1.2 กรรมวิธีการผลิตยีสต์ขนมปัง

ยีสต์ขนมปังประกอบด้วยเซลล์ *Saccharomyces cerevisiae* ซึ่งมีหลายสายพันธุ์หน้าที่ของยีสต์คือทำให้ขนมปังฟูและมีลักษณะเป็นเนื้อสัมผัสตามที่ต้องการ โดยทั่วไปในการทำให้ขนมปังฟู มักใช้ปริมาณยีสต์ประมาณ  $3.0 \times 10^8$  เซลล์ต่อกรัม ซึ่งยีสต์จะหมักน้ำตาลที่มีอยู่ในแป้งให้เป็นแอลกอฮอล์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซที่เกิดขึ้นนี้จะกระจายเป็นฟองเล็กๆ ในระหว่างเนื้อแป้งทำให้แป้งขยายตัว

กระบวนการหมักเริ่มต้นโดยการถ่ายเชื้อจากหลอดอาหารแข็ง นำมาขยายจำนวนในฟลาสก์ที่มีอาหารเหลวกลูโคส และเลี้ยงเชื้อแบบ static flask culture หลังจากนั้นจึงถ่ายใส่ถังหมักที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การเลี้ยงยีสต์ในถังหมักส่วนใหญ่จะเป็นแบบกะ อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้คือกากน้ำตาลที่นำมาทำให้เจือจางและปรับพีเอชให้ได้ประมาณ 4.0 นอกจากนี้ยังต้องกำจัดสารแขวนลอยที่มีอยู่ในกากน้ำตาล เนื่องจากสารแขวนลอยที่ปนมาจะมีผลต่อการเจริญของยีสต์ เวลาที่ใช้ในการหมักคือ 10 - 13 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับชนิดของถังหมักและความต้องการปริมาณเซลล์ยีสต์

เมื่อกระบวนการหมักสิ้นสุดลง ในอาหารเหลวจะมียีสต์ปริมาณร้อยละ 5 ขั้นตอนแรกของการเก็บเกี่ยวยีสต์ออกจากถังหมักคือ การแยกเอาเซลล์ยีสต์ออกโดยการใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifugal separator) หลังจากนั้นนำเซลล์ยีสต์มาล้างให้สะอาด ยีสต์ที่ได้จะมีสีขาวเรียกว่า ครีมยีสต์ (yeast cream) (คุยฉี ษนะบริพัฒน์, 2537)

## 1.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตยีสต์ขนมปัง

### 1.3.1 อุณหภูมิ

ยีสต์เจริญได้ในช่วงอุณหภูมิ 20 - 40 องศาเซลเซียส (White, 1954) แต่การเลี้ยงยีสต์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 35 องศาเซลเซียสจะให้ผลผลิตในการหมักลดลง ยีสต์สามารถทนอุณหภูมิสูงมากกว่า 40 องศาเซลเซียส ได้เพียง 1- 2 ชั่วโมงเท่านั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเลี้ยงยีสต์คือ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

### 1.3.2 ระดับพีเอช

ยีสต์ส่วนมากเจริญได้ที่พีเอชระหว่าง 3.5 - 7.0 ในช่วงพีเอช 3.5 - 4.5 จะมีการปนเปื้อนจากแบคทีเรียน้อย และในช่วงพีเอชต่ำกว่า 5 พบว่าผนังเซลล์ของยีสต์สามารถดูดซับสารอาหารได้ เช่น กากน้ำตาล ดังนั้นในบางครั้งจึงมีการใช้พีเอชสูงกว่า 5 เพื่อหลีกเลี่ยงการดูดซับกากน้ำตาล (White, 1954)

### 1.3.3 การให้อากาศ การหล่อเย็น และการกำจัดฟอง

ปริมาณออกซิเจนที่พ่นลงไปในถังหมักเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการหมัก ปริมาณอากาศที่ใช้ในกระบวนการควรมีปริมาณสูงแต่ไม่ควรเกิน 1 ปริมาตรของอากาศต่อปริมาตรของถังหมักต่อนาที (vvm) ในระหว่างการเจริญของยีสต์ในถังหมักมักจะมีฟองเกิดขึ้นมาก การกำจัดฟองทำได้โดยใช้เครื่องตีฟองให้สลายหรือใส่สารกำจัดฟอง(antifoam) เช่น ซิลิโคน อนุพันธ์ของกรดไขมัน หรือสารกำจัดฟองอื่นๆ สารกำจัดฟองที่ดีควรมีคุณสมบัติทำให้ฟองหายไปอย่างรวดเร็ว เกิดปฏิกิริยาได้นาน ไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ คน และสัตว์ นอกจากนี้การเลี้ยงยีสต์จะต้องมีระบบน้ำเย็นหล่อถังหมัก เพราะในขณะที่ยีสต์มีการเจริญและขยายพันธุ์จะมีความร้อนเกิดขึ้นอุณหภูมิในถังหมักจะถูกควบคุมให้อยู่ระหว่าง 25 - 30 องศาเซลเซียส (อุษณี ฐานะบริพัฒน์, 2537)

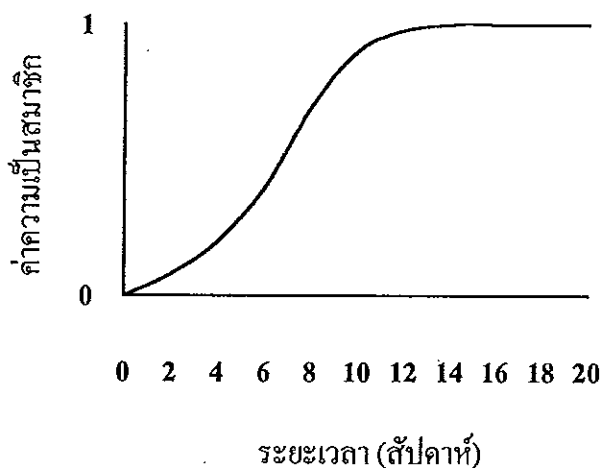
### 1.3.4 ความเข้มข้นของกลูโคส

เมื่อกลูโคสมีปริมาณมากจะทำให้เกิดการสะสมของเอทานอลในอาหารเลี้ยงเชื้อในการหมักแบบให้อากาศ เอทานอลจะเป็นเมตาโบไลต์ยับยั้งการเจริญ(inhibitory metabolites) ทำให้เกิดปรากฏการณ์แครปทรี(Crabtree effect) ซึ่งจะยับยั้งการเจริญของเซลล์และการเกิดผลิตภัณฑ์ จึงมีการรักษาระดับความเข้มข้นของเอทานอลให้อยู่ในปริมาณต่ำโดยควบคุมให้กลูโคสอยู่ในระดับที่เหมาะสมอยู่ในช่วงประมาณ 0.2 กรัมต่อลิตร เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการยับยั้งการเจริญเนื่องจากเอทานอล และให้ได้ปริมาณเซลล์สูงสุด (Park, et al., 1993 ; Bailey and Ollis, 1986)

## 2. ทฤษฎีฟัซซีลอจิก

Lofti Zadeh ได้เสนอทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy Set) ทฤษฎีของฟัซซีเซตเป็นวิธีการหนึ่งในการจัดการข้อมูลที่ไม่มีความแน่นอนให้เข้าสู่รูปแบบที่สามารถเข้าใจได้ง่ายและสะดวกต่อการทำงานของคอมพิวเตอร์ โครงสร้างของฟัซซีลอจิกไม่ต้องใช้การคำนวณที่สลับซับซ้อน ฟัซซีเซตมีลักษณะคล้ายคริสป์เซต (Crisp Set) แต่จะต่างที่การระบุถึงการเป็นสมาชิกของเซต ในคริสป์เซตจะระบุการเป็นสมาชิกให้เป็น “เป็นสมาชิก” และ “ไม่เป็นสมาชิก” ส่วนฟัซซีเซตมีการระบุถึงระดับของการเป็นสมาชิกเป็น “ค่าความเป็นสมาชิก” (membership value) โดยที่ฟัซซีเซตจะถูกส่งค่าไปเป็นค่าความเป็นสมาชิกที่มีค่าตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่ง ค่าที่เป็นศูนย์แสดงว่าค่านั้นไม่เป็นสมาชิก ถ้ามีค่าเป็นหนึ่งแสดงว่าเป็นสมาชิกโดยสมบูรณ์ ดังภาพที่ 1.1 แสดงฟัซซีเซตของระยะเวลาในการทำโครงการ

ฟัซซีเซตนี้แสดงถึงเซตของความยาวของโครงการ โครงการที่ใช้เวลามากกว่า 4 สัปดาห์ ถือว่าเป็นโครงการที่ยาวนานเพราะมีค่าความเป็นสมาชิกมากกว่าศูนย์และโครงการที่ใช้เวลามากกว่า 10 สัปดาห์ ถือว่าเป็นโครงการที่ยาวนานโดยสมบูรณ์ ซึ่งเห็นได้จากค่าความเป็นสมาชิกที่มีค่าเป็นหนึ่ง



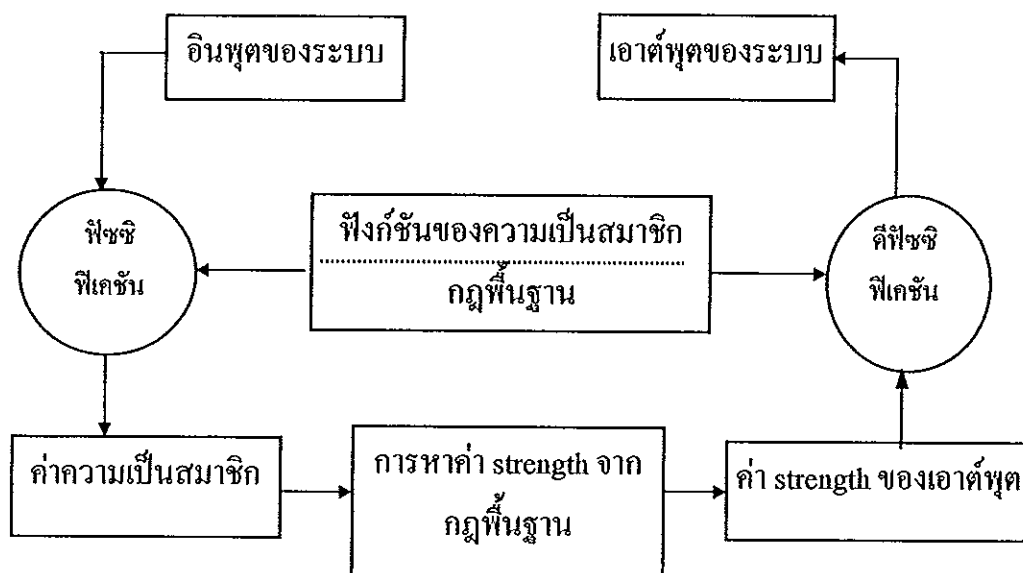
ภาพที่ 1.1 ฟัซซีเซตของระยะเวลาในการทำโครงการ

ที่มา : Cox (1994)

จากการที่ใช้ค่าความเป็นสมาชิกในการบ่งสถานภาพนี้เอง ทำให้ฟัซซีลอจิกมีความยืดหยุ่นมากกว่าลอจิกแบบเก่า เซตของฟัซซีลอจิกสามารถบ่งบอกคุณลักษณะที่มีระดับหลายระดับได้ คล้ายภาษาในคำพูดทั่วไป เช่น ร้อนมาก ค่อนข้างหนาว สูงหรือยาว ซึ่งระดับของความหนักเบาของคุณลักษณะนั้นแสดงออกมาโดยใช้ค่าความเป็นสมาชิก

## 2.1 โครงสร้างของระบบฟัซซี

โครงสร้างของระบบฟัซซีแสดงได้ดังภาพที่ 1.2 กระบวนการที่จะทำให้อินพุตออกมาเป็นเอาต์พุตของระบบฟัซซีประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้ กระบวนการแรกเรียกว่าฟัซซีฟิเคชัน (fuzzification) คือกระบวนการเปลี่ยนค่าที่แสดงคุณลักษณะให้เป็นฟัซซี เป็นกระบวนการแปลง (mapping) จากค่าของอินพุตมาเป็นค่าความเป็นสมาชิก (membership function) กระบวนการที่สองคือ การหาค่าเอาต์พุตจากกฎพื้นฐานของทฤษฎีฟัซซีเซต เอาต์พุตจากกระบวนการนี้จะถูกแปลงกลับไปเป็นเอาต์พุตของระบบในขั้นตอนที่สามซึ่งเรียกว่า ดีฟัซซีฟิเคชัน (defuzzification)



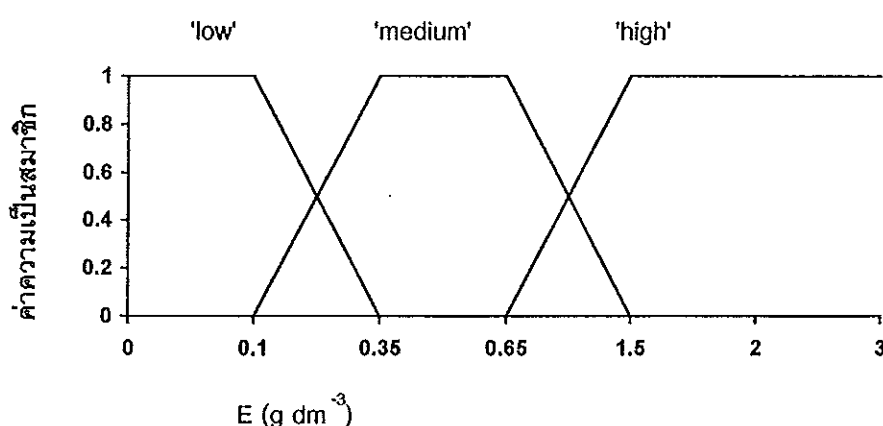
ภาพที่ 1.2 โครงสร้างของระบบฟัซซี

ที่มา : Zadeh (1965)

## 2.2 กระบวนการฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification)

กระบวนการฟัซซีฟิเคชันเป็นกระบวนการคำนวณหรือหาค่าของความเป็นสมาชิกของอินพุตที่ป้อนเข้ามาในระบบ โดยใช้ฟัซซีเซตดังแสดงในตัวอย่างตามภาพที่ 1.3 (Siimes, *et al.*, 1995) ซึ่งมีอินพุตเป็นความเข้มข้นของเอธานอล และหาเอาต์พุตที่เป็นค่าความเป็นสมาชิกจากฟัซซีเซต “ต่ำ” “กลาง” และ “สูง” จากรูปจะเห็นว่า ค่าความเข้มข้นของเอธานอลแต่ละค่าจะให้ค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละเซตออกมา ค่าความเป็นสมาชิกนี้ ได้มาจากฟังก์ชันของความเป็นสมาชิก (membership function) ซึ่งหามาได้จากการทดลองหรือโดยวิธีการประมาณค่า

ในการประยุกต์ใช้ทั่วไป ฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกจะไม่มีเปลี่ยนแปลงในขณะที่ระบบฟัซซีกำลังทำงานและมักใช้ฟังก์ชันที่มีลักษณะง่ายๆ เพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เช่น รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยมคางหมู หรืออาจใช้ฟังก์ชันอื่นได้ตามความเหมาะสม (Siimes, *et al.*, 1995) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนของฟัซซีเซตต่ออินพุตของระบบ สำหรับระบบที่มีพลวัตซับซ้อนฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมในขณะที่ระบบฟัซซีกำลังทำงาน



ภาพที่ 1.3 ฟัซซี เซตของความเข้มข้นของเอธานอล

ที่มา : Siimes และคณะ (1995)



### 2.3 การหาค่าเอาต์พุตจากกฎพื้นฐาน

ฟังก์ชันเซต  $A$  ซึ่งอยู่ในเอกภพ  $X$  โดยมีฟังก์ชันสมาชิกแสดงระดับสมาชิก  $\mu_A(x_i)$  โดยที่  $x_i$  เป็นจำนวนจริง  $\mu_A(x_i)$  อยู่ในช่วง  $[0,1]$  นั่นคือ (Siimes, et al., 1995)

$$\mu_A(x_i) \in [0,1] \quad \forall x_i \in X \quad (\mu_A(x_i) : X \rightarrow [0,1])$$

ถ้า  $A \subset X$  และ  $B \subset Y$  เป็นฟังก์ชันเซต ความสัมพันธ์ฟังก์ชัน  $R$  จาก  $X$  ไป  $Y$  สามารถแสดงเป็นผลคูณคาร์ทีเซียน (Cartesian product),  $R \subset X \circ Y$  ในรูปฟังก์ชันสมาชิก

$$\mu_R(x,y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

เมื่อ  $x \in X$  และ  $y \in Y$  ผลคูณคาร์ทีเซียนสามารถแสดงในรูปเมตริก (matrix) เมื่อจำนวนของแถวและคอลัมน์แสดงถึงสมาชิกในเอกภพ ความสัมพันธ์ฟังก์ชัน  $R$  เป็นการบ่งบอกผลของประโยคที่ประกอบด้วย "ถ้า (if)" และ "ดังนั้น (then)" ใช้เป็นกฎพื้นฐานในระบบฟังก์ชัน โดยมีรูปประโยคดังนี้

$$R = \text{ถ้า (อินพุต,เหตุ) , ดังนั้น (เอาต์พุต,ผล)}$$

โดยที่ในประโยค "ถ้า" จะประกอบด้วยเงื่อนไขต่างๆที่เป็นมูลเหตุ (antecedents) และประโยค "ดังนั้น" จะประกอบไปด้วยการกระทำต่างๆที่เป็นผลที่ตามมา (consequence) ในแต่ละมูลเหตุจะมีค่าความเป็นสมาชิกเป็นของตัวเอง ซึ่งได้มาจากกระบวนการฟังก์ชันฟิเคชัน ส่วนผลที่ตามมาจะเป็นฟังก์ชันเอาต์พุต โดยทั่วไปเอาต์พุตหาได้จากค่าความเป็นสมาชิกของมูลเหตุ โดยจะใช้ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของผลที่ตามมาจากกฎแต่ละกฎ แสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

กฎที่ 1 ถ้า  $A$  และ  $B$  ดังนั้น  $Z$  และ  $X$

กฎที่ 2 ถ้า  $C$  และ  $D$  ดังนั้น  $Z$  และ  $Y$

Strength ของกฎที่ 1 =  $\min(A,B)$

Strength ของกฎที่ 2 =  $\min(C,D)$

$X$  = Strength ของกฎที่ 1

$Y$  = Strength ของกฎที่ 2

$$Z = \max(\text{Strength ของกฎที่ 1}, \text{Strength ของกฎที่ 2})$$

$$= \max(\min(A,B), \min(C,D))$$

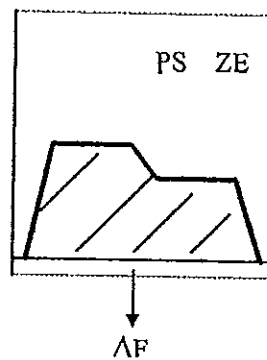
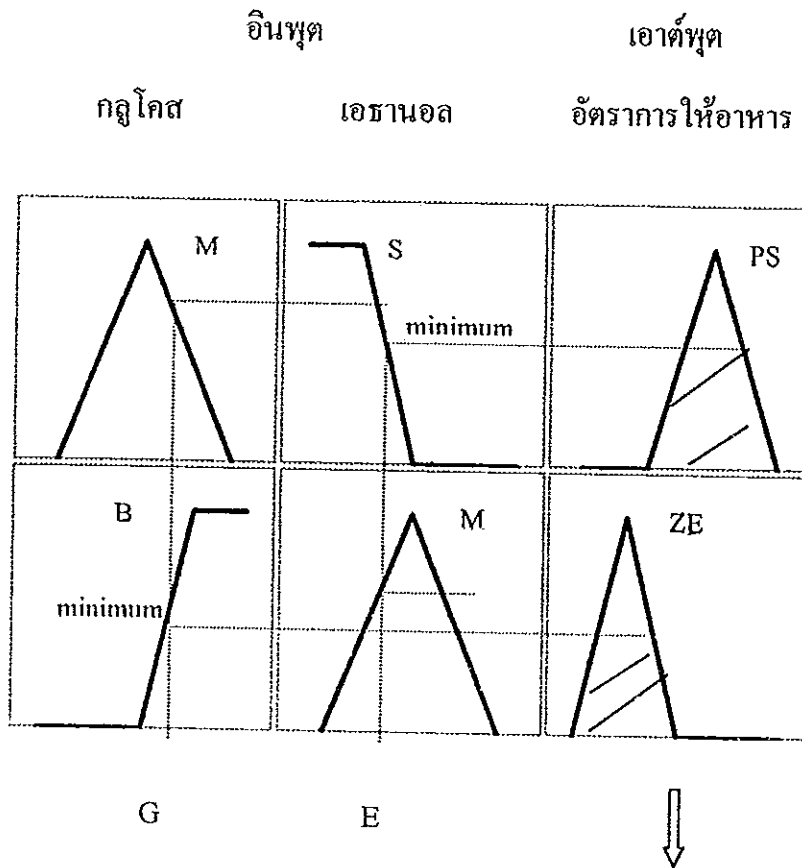
## 2.4 กระบวนการดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification)

กระบวนการดีฟัซซีฟิเคชันคือการแปลงเอาต์พุตที่มีความคลุมเครือ (fuzzy) ให้อยู่ในรูปของเอาต์พุตระบบจริงที่สามารถนำไปใช้งานได้ ไม่ให้มีความกำกวม โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วง (Center of Gravity Method) เริ่มจากการหาจุดเซ็นทรอยด์ (Centroid) บนแกน X ในแต่ละฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต โดยใช้เอาต์พุตที่ได้จากกฎพื้นฐานมาช่วยคำนวณพื้นที่ที่ได้กราฟ แล้วจึงคำนวณหาค่าที่กำหนดน้ำหนัก (weight) แสดงดังภาพที่ 1.4

## 3. การควบคุมกระบวนการผลิต

### 3.1 การควบคุมด้วยฟัซซี

การควบคุมกระบวนการผลิตด้วยฟัซซีลอจิกมีลักษณะบางส่วนคล้ายกับระบบการควบคุมแบบพีไอ (proportional-integral (PI) controllers) แต่แตกต่างกันที่ระบบการควบคุมแบบพีไอเป็นการจัดระบบการควบคุมโดยการ ใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดมาใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วนำมาควบคุมกระบวนการ ส่วนการควบคุมด้วยฟัซซีเป็นการควบคุมที่ใช้ประสบการณ์มากกว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบฟัซซีใช้การประมาณค่า ช่วงการตัดสินใจ และฟังก์ชัน ใช้ฟัซซีเซตในการแสดงคุณสมบัติของตัวแปรต่างๆในการควบคุม จากนั้นใช้กฎ ถ้า-ดังนั้น (IF-THEN) เพื่อกำหนดค่าอินพุตและเอาต์พุต



M ย่อจาก medium

B ย่อจาก big

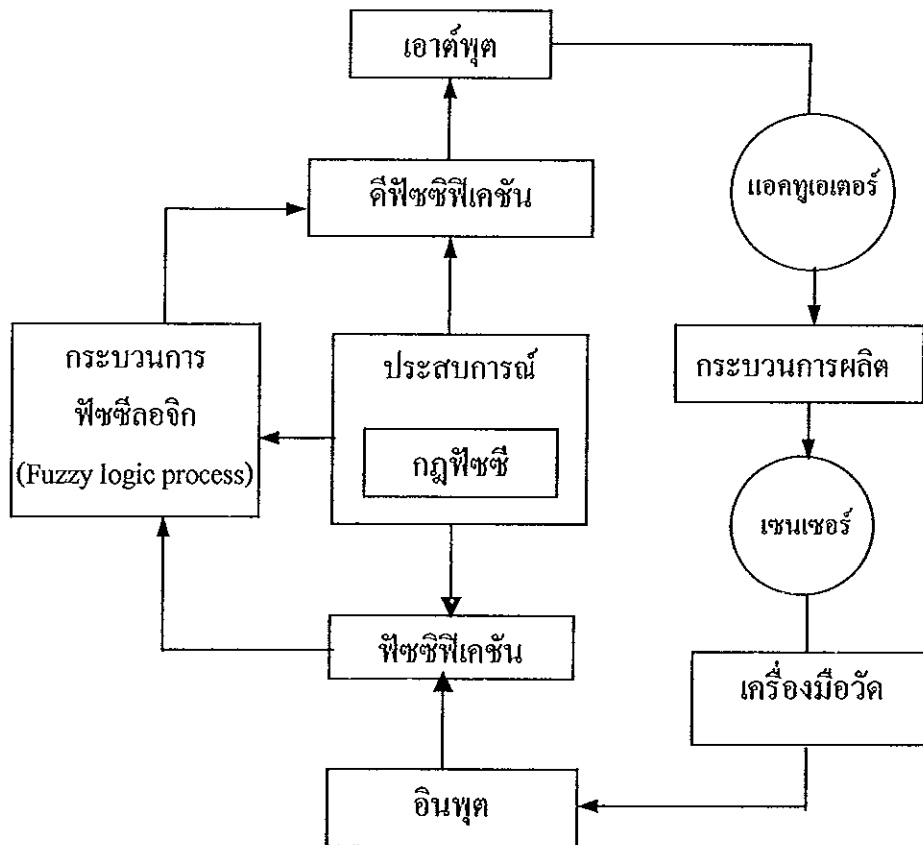
S ย่อจาก small

PS ย่อจาก positive small

ZE ย่อจาก zero

ภาพที่ 1.4 กระบวนการดีฟัซซิฟิเคชันโดยใช้วิธีหาจุดศูนย์ถ่วง

ที่มา : Park และคณะ (1991)



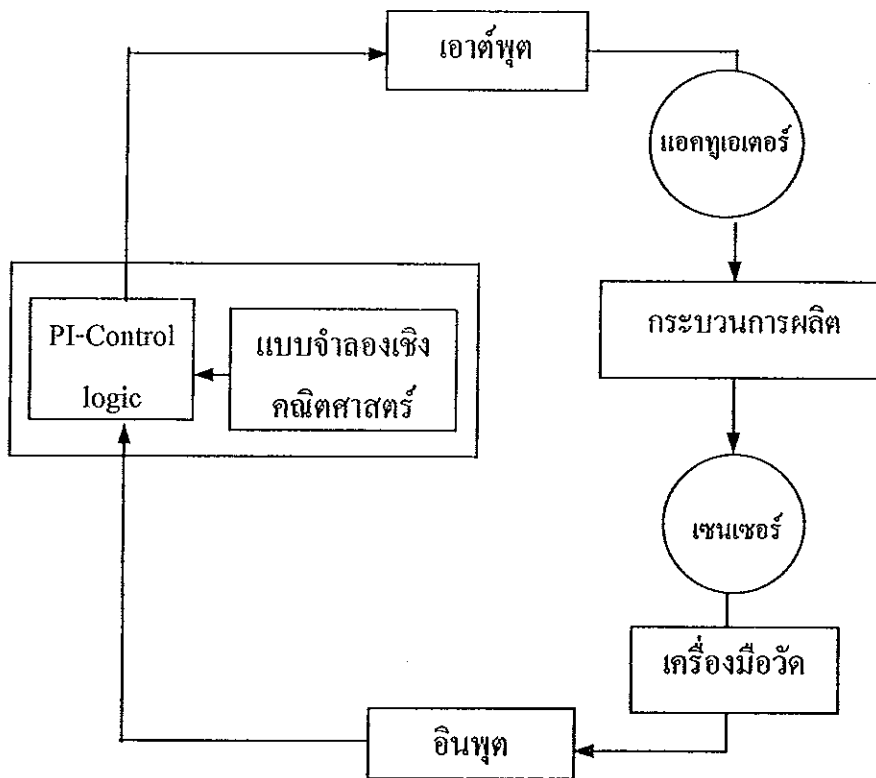
ภาพที่ 1.5 กระบวนการควบคุมด้วยระบบฟัซซีลอจิก

ที่มา : Cox (1994)

จากภาพที่ 1.5 กระบวนการควบคุมด้วยระบบฟัซซีลอจิกเริ่มจากด้านล่างของภาพ โดยอินพุตรับค่าสัญญาณจากเครื่องมือวัด จากนั้นจึงแปลงสัญญาณ โดยกระบวนการฟัซซีฟิเคชันให้เป็นค่าตัวแปรฟัซซีเมื่อใช้ร่วมกับกฎต่าง ๆ ทำให้เกิดฟัซซีเซตใหม่ขึ้นในแต่ละตัวแปร ในขั้นตอนดีฟัซซีฟิเคชันนิยมใช้จุดเซนทรอยด์เป็นค่าที่นำไปใช้ในการส่งเอาต์พุตไปควบคุม

### 3.2 การควบคุมแบบพีไอ (PI-controllers)

ระบบการควบคุมแบบพีไอ เป็นระบบควบคุมที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายถึงพลวัตของระบบ ดังภาพที่ 1.6 แสดงกระบวนการควบคุมแบบพีไอ (PI-controllers) ตัวควบคุมจะอ่านค่าจากเซนเซอร์ (sensor) แล้วนำไปประยุกต์เข้ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ค่าเอาต์พุตออกมาเป็นสัญญาณที่นำไปใช้ในการควบคุม

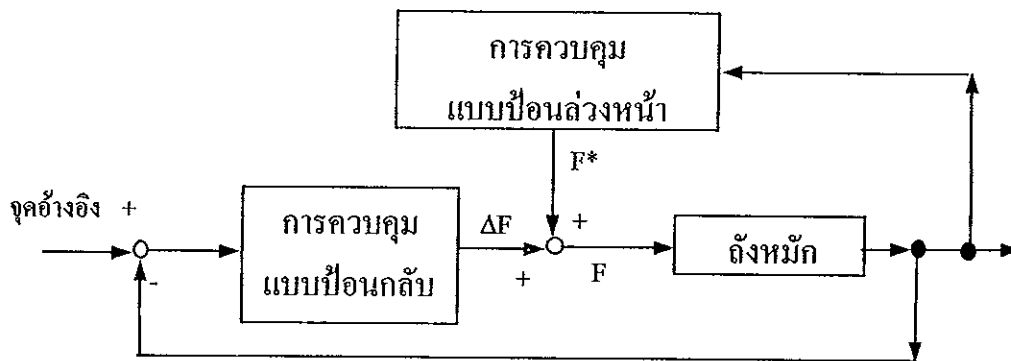


ภาพที่ 1.6 การควบคุมแบบพีไอ (PI-controllers)

ที่มา : Cox (1994)

### 3.3 วิธีการควบคุมกระบวนการ โดยฟีดลอค

Park และคณะ (1995) ได้เสนอวิธีการควบคุมแสดงดังภาพที่ 1.7 การควบคุมกระบวนการประกอบไปด้วยการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (feedforward control) และการควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control)



ภาพที่ 1.7 วิธีการควบคุมด้วยฟีดลอค

ที่มา : Park และคณะ (1995)

#### 3.3.1 การควบคุมอัตราการให้กลูโคสแบบป้อนล่วงหน้า

ในการเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะจะมีการรักษาระดับการเจริญของเซลล์ให้อยู่ในช่วงการเจริญเติบโตแบบเอกโปเนนเชียล (exponential growth phase) พบว่าในช่วงดังกล่าวเซลล์มีความต้องการใช้กลูโคสอย่างมาก ในขณะที่สารอาหารอื่นมักจะใช้เพียงเล็กน้อย ดังนั้นอัตราการให้กลูโคสจึงเป็นสัดส่วนกับการเจริญของเซลล์ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างอาหารที่ให้และที่ใช้ไป อัตราการให้กลูโคสปกติ ( $F^*$ ) สามารถได้ดังนี้ (Park, et al., 1995)

$$F^* \cong \frac{\mu X}{Y_{X/S} S_0}$$

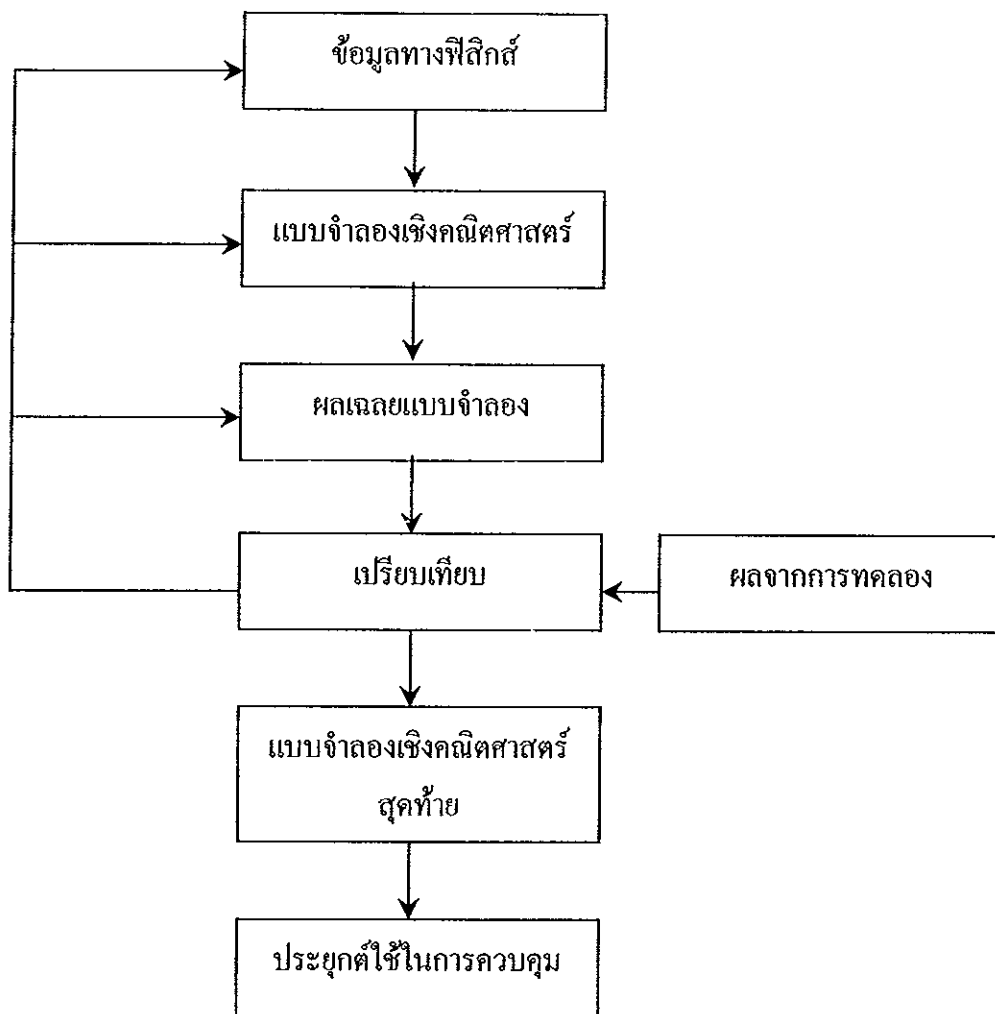
### 3.3.2 การควบคุมอัตราการให้กลูโคสแบบป้อนกลับ

การกำหนดค่า  $F^*$  เป็นการประมาณอัตราการเติมกลูโคสอย่างคร่าวๆ จากอัตราการเจริญของเซลล์ แต่เนื่องจากกิจกรรมของเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะแวดล้อม เช่น ที่เอช อุณหภูมิ หรือออกซิเจนที่ละลายได้ ดังนั้นถ้าจะต้องมีการปรับอัตราการให้อาหารให้ใกล้เคียงกับความต้องการจริงมากยิ่งขึ้นก็อาจจะต้องเพิ่มพจน์ที่มีการพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมเข้าไปพิจารณาด้วย โดยใช้  $\Delta F$  ได้จากระบบการควบคุมแบบฟีดแบ็ค ดังนั้นจะได้ว่า (Park, *et al.*, 1995)

$$F = F^* + \Delta F$$

## 4. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์ขนมปังสำหรับควบคุมการหมักแบบกึ่งกะ

ในการพัฒนาระบบควบคุมกระบวนการจะมีการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์แทนกระบวนการจริง มีผู้พัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์กระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะสำหรับนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการ โดยที่มีการกำหนดข้อสมมติในการควบคุมและสภาวะในการหมักที่ต่างกันออกไป (Agrawal, *et al.*, 1987; Takamatsu, *et al.*, 1985; O'Conner, *et al.*, 1992; Wang, *et al.*, 1979; Wu, *et al.*, 1985; Hatch and Veilleux, 1995) แบบจำลองเหล่านี้มีสมการดุลมวลสารที่ใกล้เคียงกัน แต่อาจมีการตั้งข้อสมมติเพิ่มเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการพิจารณานำไปใช้ในการควบคุมให้ได้ปริมาณยีสต์สูงสุด ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 1.8



ภาพที่ 1.8 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

ที่มา : Scragg (1991)



การหมักยีสต์แบบกึ่งกะเป็นการหมักที่มีการเติมอาหาร (feed) โดยที่ไม่มีการถ่ายออก (outflow) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเซลล์ (X) ความเข้มข้นของอาหาร (S) ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (P) และอัตราการเติมอาหาร (F) แสดงดังนี้

$$\frac{dV}{dt} = F$$

$$\frac{d(VX)}{dt} = r_x V$$

$$\frac{d(VS)}{dt} = FS_F + r_s V$$

$$\frac{d(VP)}{dt} = r_p V$$

Siimes และคณะ (1995) ได้ศึกษาถึงการควบคุมกระบวนการผลิตยีสต์ขนมปัง (*Saccharomyces cerevisiae*) แบบกะ โดยใช้การควบคุมแบบพีชชี โดยในแต่ละช่วงเฟสจะมีการควบคุมที่ต่างกันไป แบ่งช่วงกระบวนการเจริญตามการเมตาโบลิซึมได้เป็น 5 เฟส คือ เฟส1 คือ การเกิดเอทานอล เฟส2 คือ เฟสออกซิเดทีฟผสม เฟส3 คือ ออกซิเดชันน้ำตาลอย่างสมบูรณ์ เฟส4 คือ การใช้เอทานอล และเฟส5 คือ การเกิดเอทานอลครั้งที่2 (Zhang, 1994) พบว่าระบบพีชชีเป็นการควบคุมที่สามารถเปลี่ยนพีชชีเซตให้เป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ ทำให้การควบคุมมีความเรียบ อีกทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมมีความยืดหยุ่น ใช้ได้ง่าย สะดวกและรวดเร็ว ตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมสถานะในการหมัก คือ ความเข้มข้นของน้ำตาล ความเข้มข้นของเอทานอล การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอล ออกซิเจนที่ละลายได้ (dissolved oxygen) อัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อออกซิเจน (respiratory quotient, RQ) สารยับยั้งเมตาโบไลต์ เช่น เอทานอล หรือกรดอะซิติก จะเกิดสะสมในอาหารเลี้ยงตลอดระยะเวลาในการหมักยีสต์แบบมีอากาศตามลำดับ การเกิดสารยับยั้งนี้จะมีผลให้เกิดปรากฏการณ์แคปทรี และจะมีผลไปยับยั้งการเจริญของเซลล์และการเกิดผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำให้สารยับยั้งเหล่านี้อยู่ในปริมาณต่ำโดยการให้ความเข้มข้นกลูโคสในช่วงที่เหมาะสม จึงได้มีการศึกษาการควบคุมความเข้มข้นของกลูโคสและเอทานอลในการหมักยีสต์ขนมปังแบบกะ โดยใช้การควบคุมโดย

ระบบพีซี พบว่าถ้าต้องการควบคุมความเข้มข้นของเอทานอลและกลูโคสในอาหารเลี้ยงเชื้อเป็น 2 กรัมต่อลิตร และ 0.2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เอทานอลและกลูโคสสามารถควบคุมได้อยู่ในช่วง  $2.67 \pm 0.35$  กรัมต่อลิตร และ  $0.27 \pm 0.25$  กรัมต่อลิตร ตามลำดับ การเกิดเอทานอลลดลงจาก 26 กรัมต่อลิตร เป็น 3-4 กรัมต่อลิตร และผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาลเพิ่มขึ้นจาก 0.38 เป็น 0.53 กรัมเซลล์แห้งต่อกรัมกลูโคสที่ใช้ เอทานอลที่เกิดขึ้นลดลงจาก 0.50 เป็น 0.14 กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคสที่ใช้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมกลูโคสเพียงอย่างเดียว (Park, *et al.*, 1993)

O'Conner และคณะ (1992) ได้เสนอวิธีการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง โดยพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควบคู่กับการใช้สมการสโตยชิโอเมตริก (stoichiometric equation) และใช้วิธีการควบคุมที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงสถานะของการเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งการควบคุมนี้เป็นการควบคุมปริมาณการให้กลูโคสให้อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.2 กรัมต่อลิตร โดยกำหนดปริมาณของกลูโคสจากการประมาณค่าของ RQ โดยใช้เทคนิค recursive least square estimator และ minimization of a linear quadratic performance indicator พบว่าการควบคุมที่ใช้การกำหนดอัตราการใช้ออกซิเจนนี้จะให้ผลดีเมื่อ RQ มีค่าน้อยกว่า 1.1

จากการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้น การควบคุมกระบวนการหมักมักจะใช้การวัดแบบออฟ-ไลน์ (off-line) ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Schalien และคณะ (1995) ได้เสนอแบบจำลองที่สามารถใช้กับการควบคุมแบบออนไลน์ (on-line) แบบจำลองที่ใช้แสดงในรูปแบบอะแดปทีฟ (adaptive) โดยใช้พื้นฐานของสมการสมดุลอะตอมและมวลสาร สามารถประมาณค่าความเข้มข้นของมวลชีวภาพ สารอาหารและผลิตภัณฑ์แบบออนไลน์ (on-line) ได้ จากการทำสมดุลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ ใช้เทคนิคการประมาณค่าแบบ recursive regression analysis จากการทดสอบแบบจำลองโดยเลี้ยง *S.cerevisiae* พบว่าสามารถประมาณค่าองค์ประกอบต่างๆ ได้ใกล้เคียงกับการใช้วิธีวิเคราะห์โครมาโตกราฟี (high-performance liquid chromatography (HPLC))

Saxen and Saxen (1996) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวัดและควบคุมขึ้น โดยที่สามารถประมาณค่าความเข้มข้นของมวลชีวภาพ สารอาหารและผลิตภัณฑ์ได้จาก การวัดค่าตัวแปรอื่นที่สามารถวัดได้ง่าย เช่น พีเอช และอุณหภูมิ แบบจำลองนี้

เป็นการใช้แบบจำลองสมมูลสารร่วมกับนิวรอลเน็ตเวิร์ค (neural networks) สำหรับศึกษา จลศาสตร์การหมัก แบบจำลองนี้สามารถทำนายค่าได้อย่างแม่นยำ โดยที่ไม่จำเป็นต้องรู้ กลไกปฏิกิริยาภายในของกระบวนการมากนัก

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเครื่องมือและระบบวัดที่มีความซับซ้อน มีราคาแพง มาใช้ ในระบบการควบคุม เนื่องจากเป็นการวัดองค์ประกอบที่มีความซับซ้อน แต่ในงานวิจัยนี้ ต้องการพัฒนาระบบนำวิธีการวัดอย่างง่ายมาใช้ในการคำนวณหาองค์ประกอบอื่นโดยวิธีการ วัดโดยทางอ้อม เพื่อลดความจำเป็นในการใช้เครื่องมือที่มีความซับซ้อนแต่ใช้เครื่องมือ พื้นฐานเท่านั้น ได้แก่ เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง และเครื่องวัดและวิเคราะห์ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจน

#### วัตถุประสงค์

1. พัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังเพื่อ ประยุกต์ใช้กับการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยคอมพิวเตอร์
2. พัฒนาระบบการวัดโดยนำการวัดโดยทางอ้อมมาใช้ร่วมกับการควบคุมกระบวนการ หมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ
3. พัฒนาระบบควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยเทคนิคแบบ ฟัซซีลอจิก

## บทที่ 2

### อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยแสดงดังภาพที่ 2.1 แบ่งเป็นขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ตอน คือ

1. การพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และวิธีการวัดเอชานอลและกลูโคสโดยทางอ้อมด้วยสมการสโตยคิโอเมตริก เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง
2. การสร้างระบบควบคุมแบบพีซีและพีโอ และจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักด้วยคอมพิวเตอร์
3. ทดสอบประสิทธิภาพของการทำงานของระบบการควบคุมแบบพีซี โดยนำมาใช้กับการควบคุมการหมักยีสต์แบบกึ่งกะ

1. การพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ และวิธีการวัดเอชานอลและกลูโคสโดยทางอ้อมด้วยสมการสโตยคิโอเมตริก เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง

1.1 รวบรวมข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องและปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะจากผลการวิจัยที่ผ่านมา

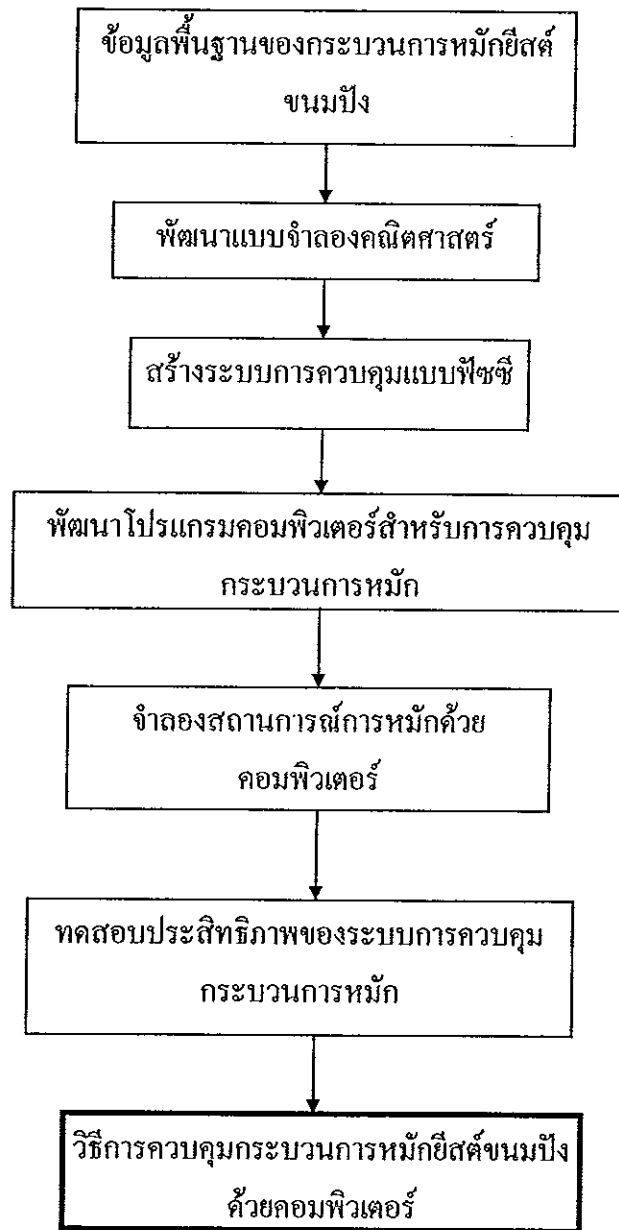
1.2 การทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกะ เพื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อนำไปใช้ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค)

1.3 รวบรวมแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะและหาผลเฉลยของแบบจำลองด้วยวิธีการเชิงเลข (numerical method) โดยการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการแก้สมการแบบจำลอง โปรแกรมที่สร้างขึ้นเป็นโปรแกรมที่ดำเนินการภายใต้ระบบปฏิบัติการดอส (DOS application) ใช้ภาษา C++ เขียนโปรแกรม ตัวแปลภาษา (compiler) ที่ใช้คือ Borland C++ เวอร์ชัน 4.02

1.4 ทำการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ โดยเติมอาหารในอัตราคงที่ นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาพารามิเตอร์และนำผลการทดลองไปเทียบกับผลเฉลยจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและสอดคล้องกับผลการทดลอง

1.5 นำสมการสโตยคิโอมेटริก (stoichiometric equation) สำหรับการเจริญของยีสต์ขนมปังมาใช้ในการทำนายปริมาณการสะสมของเอทานอลและการใช้กลูโคสจากการวัดการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ การใช้ออกซิเจน และปริมาณเซลล์ที่เพิ่ม

1.6 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากสมการสโตยคิโอมेटริกกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง เพื่อนำสมการสโตยคิโอมेटริกไปใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ



ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการสร้างระบบการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังด้วยคอมพิวเตอร์

2. การสร้างระบบควบคุมแบบพีซีและพีไอ และจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักด้วยคอมพิวเตอร์ ขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 2.2 ประกอบด้วย

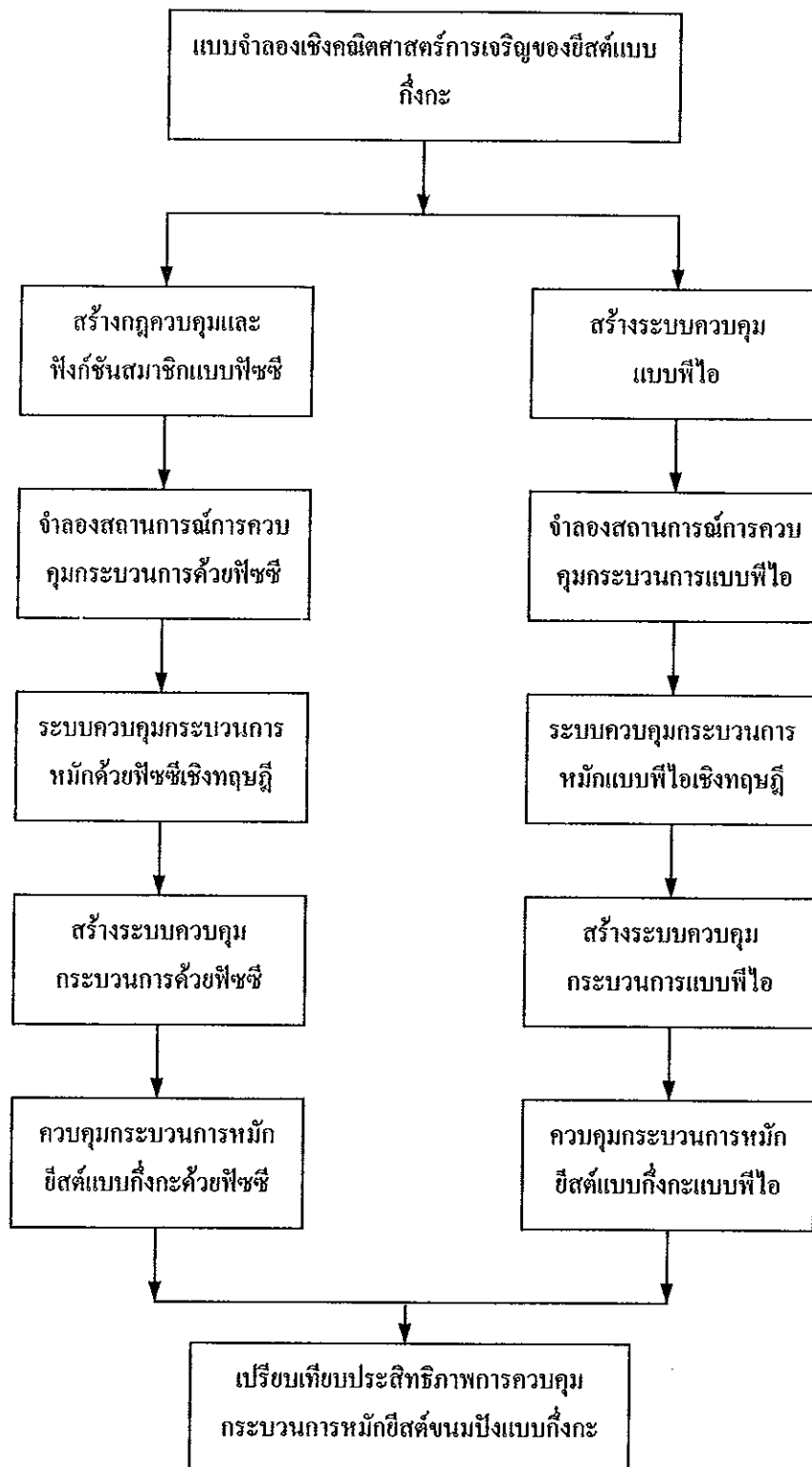
2.1 สร้างกฎควบคุมแบบพีซี (ถ้า-คั้งนั้น) และฟังก์ชันสมาชิกเพื่อใช้ในการควบคุมการหมักยีสต์แบบกึ่งกะ จากผลการวิจัยที่ผ่านมาและจากผลการทดลองในงานวิจัยนี้

2.2 สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีซีและแบบพีไอ วิธีการควบคุมประกอบด้วย การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับ โปรแกรมที่สร้างขึ้นเป็นโปรแกรมที่ดำเนินการภายใต้ระบบปฏิบัติการคอส ใช้ภาษา C++ ในการเขียนโปรแกรม ตัวแปรภาษาที่ใช้ คือ Borland C++ เวอร์ชัน 4.02

2.3 จำลองสถานการณ์การควบคุมโดยนำแบบจำลองการเจริญและซอฟต์แวร์ระบบควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น เพื่อศึกษาผลการใช้กฎพีซีและฟังก์ชันสมาชิกจากที่ได้กำหนดไว้ตามข้อ 2.1

2.4 จำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีไอ เพื่อนำผลการควบคุมที่ได้มาเปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบพีซี

2.5 สร้างโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะ โดยโปรแกรมที่สร้างขึ้นเป็นโปรแกรมที่ดำเนินการภายใต้ระบบปฏิบัติการคอส ใช้ภาษา C++ ในการเขียนโปรแกรม ตัวแปรภาษาที่ใช้ คือ Borland C++ เวอร์ชัน 4.02



ภาพที่ 2.2 ขั้นตอนการสร้างระบบควบคุมและจำลองสถานการณ์การควบคุม  
กระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ



### 3. ทดสอบประสิทธิภาพของการทำงานของระบบการควบคุมแบบพีซี โดยทำการทดลองหมักยีสต์แบบกึ่งกะ

#### 3.1 จุลินทรีย์และการเลี้ยง

ใช้ยีสต์บริสุทธิ์สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR B5020 จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

อาหารเลี้ยงเชื้อประกอบด้วย เปปโตน 5 กรัม ยีสต์สกัด 3 กรัม โปตัสเซียม-ไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 1 กรัม แอมโมเนียมซัลเฟต ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นกลูโคสเริ่มต้นแบบกะ 10 กรัมต่อลิตร แบบกึ่งกะ 0.7 กรัมต่อลิตร

เลี้ยงแบบกะ (batch) และแบบกึ่งกะ (fed-batch) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พีเอชเท่ากับ 4.5 (อุณหภูมิและพีเอชอาจควบคุมให้มีรูปแบบตามที่กำหนดล่วงหน้า) ให้อากาศคงที่ 1 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรถังหมักต่อนาที (vvm) อัตราการกวน 500 รอบต่อนาที ปริมาตรใช้งาน 1.5 ลิตร

ความเข้มข้นของกลูโคสที่เติมเป็น 200 กรัมต่อลิตร

#### 3.2 ระบบการควบคุมกระบวนการหมักด้วยคอมพิวเตอร์

3.2.1 ออกแบบ ประกอบและเชื่อมโยง (interface) ระบบวัดและระบบการเติมอาหารเข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข)

3.2.2 ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และการวัดเอทานอลและกลูโคสโดยใช้สมการสตอยคิโอเมตริกโดยการหมักยีสต์ขบวนการแบบกึ่งกะที่มีอัตราการให้อาหารคงที่ เก็บตัวอย่างนำมาวิเคราะห์ทุก 1 ชั่วโมง ดังนี้

3.2.2.1 วิเคราะห์ปริมาณกลูโคส โดยใช้วิธี DNS reagent (Miller, 1959) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก)

3.2.2.2 วิเคราะห์ปริมาณเอทานอล โดยใช้วิธีการ diffusion (ใช้ conway) (Thienes and Haley, 1979) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก)

3.2.2.3 วิเคราะห์น้ำหนักเซลล์แห้ง (Stanier, et al., 1976) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก)

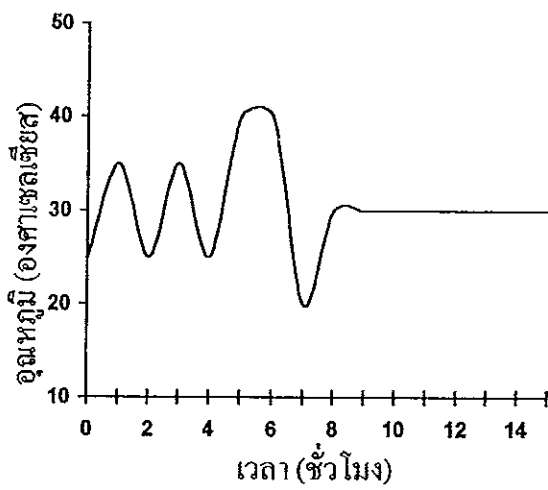
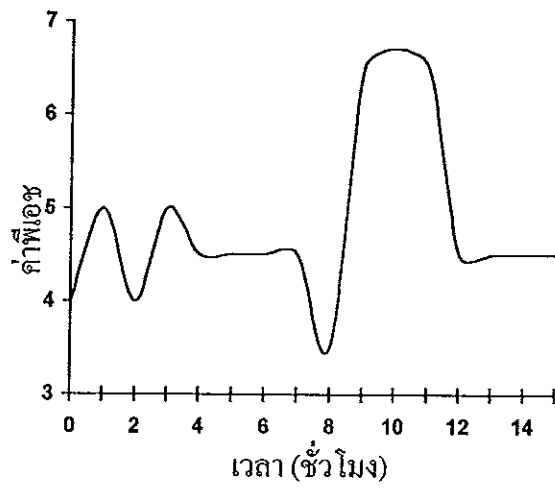
3.2.2.4 วัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจน รุ่น MGA-100 ของบริษัท TOKYO RIKAKIKAI จำกัด และวัดปริมาณเซลล์ โดยวิธีหาค่าดูดกลืนแสง (OD) ทุก 15 นาที ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงรุ่น spectronic 21 series ของบริษัท SPECTRONIC INSTRUMENTS จำกัด

3.2.3 ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรมควบคุมแบบพีซีและแบบพีไอ โดยหมักยีสต์ขุ่นมัวแบบกึ่งกะด้วยวิธีการควบคุมแบบพีซีและแบบพีไอ ตลอดกระบวนการวัดค่าปริมาณก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณเซลล์แบบออนไลน์ทุก 15 นาที นำผลเข้าประมวลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อกำหนดปริมาณกลูโคสและเอธานอล โดยทางอ้อมและควบคุมอัตราการเติมกลูโคสในกระบวนการหมักแบบป้อนกลับ (feedback control) (รายละเอียดแสดงในบทที่ 3)

3.3 ประเมินประสิทธิภาพการควบคุมกระบวนการหมักในแง่ต่างๆ เช่น ปริมาณมวลชีวภาพที่ได้ ผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาล (yield) ความคลาดเคลื่อนของความเข้มข้นกลูโคสและเอธานอลเทียบกับค่าที่ต้องการควบคุม

3.4 เปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อการควบคุมในการควบคุมแบบพีไอกับแบบพีซี โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

3.5 เปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อการควบคุมแบบพีซี เมื่อมีปัจจัยรบกวน 2 กรณี คือ เปลี่ยนแปลงพีเอชและอุณหภูมิ มีโพรไฟล์แสดงดังภาพที่ 2.3 ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง



ภาพที่ 2.3 แบบการรบกวนของปัจจัยรบกวน (พีเอช และอุณหภูมิ) ในการหมัก

### บทที่ 3

#### แนวคิดและการพัฒนาระบบควบคุมกระบวนการหมัก

##### แนวคิด

การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการทางชีวภาพมักมีความซับซ้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี การควบคุมแบบดั้งเดิมไม่สามารถครอบคลุมปัญหาที่เกิดขึ้นในหลายๆ กรณีได้ เช่น จากการศึกษาของ Park และคณะ (1993) พบว่าการควบคุมแบบอะแดปทีฟ (adaptive) ไม่สามารถควบคุมกระบวนการหมักให้ได้ปริมาณเซลล์สูง เนื่องจากเกิดการยับยั้งการเจริญจากการเกิดผลิตภัณฑ์ และจากการศึกษาของ Alfafara และคณะ (1993) พบว่าการควบคุมแบบฟuzzyทำให้ระบบมีการตอบสนองต่ออินพุตช้าเกินไป ทำให้เกิดลักษณะ high overshoot ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้วิธีการควบคุมแบบฟuzzy ซึ่งเป็นการควบคุมที่ไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน แต่เป็นการนำเอาข้อมูลจากการทดลองและจากความรู้ประสบการณ์มาใช้ในการตัดสินใจและควบคุม ทำให้การควบคุมมีความราบเรียบ สามารถปรับเปลี่ยนแก้ไขได้ง่าย และมีความยืดหยุ่นสูง (Kishimoto, *et al.*, 1991 ; Siimes and Linko, 1995)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ระบบควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. ต้องเป็นระบบควบคุมที่มีความยืดหยุ่นสูง ในงานวิจัยนี้จึงนำระบบฟuzzyมาใช้ในการควบคุม ระบบนี้เป็นระบบที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ง่ายโดยการเปลี่ยนฟuzzyเซตและค่าความเป็นสมาชิก (membership function) ให้เหมาะสมกับสถานะของกระบวนการ นอกจากนี้ในส่วนซอฟต์แวร์ของระบบควบคุมนี้จะต้องเป็น โปรแกรมที่สามารถใช้ได้สะดวกและสามารถปรับเปลี่ยนแก้ไขได้ง่าย

2. ระบบควบคุมสามารถควบคุมกระบวนการให้มีการตอบสนองที่ราบเรียบไม่เกิดลักษณะ high overshoot

3. ระบบควบคุมสามารถใช้เครื่องมือในการวัดพื้นฐานแบบที่ใช้ทั่วไปไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีความซับซ้อนและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้ โดยนำระบบการวัดโดยทางอ้อม (gateway sensor) มาใช้

4. ทำให้กระบวนการหมักได้มวลชีวภาพสูงและผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาลสูง

5. สามารถควบคุมกระบวนการหมักให้ระดับปริมาณสารที่ต้องการควบคุมมีค่าความคลาดเคลื่อนจากจุดอ้างอิงที่ต้องการต่ำ

เพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ต้องการ ระบบควบคุมที่ออกแบบในงานวิจัยนี้จะมีการประยุกต์นำสมการสโตยคิโอมेटริกมาใช้ในการวัดทางอ้อมเพื่อลดความซับซ้อนของระบบการวัด โดยวัดเพียงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไป และปริมาณเซลล์ที่เพิ่ม นำค่าที่ได้ไปคำนวณเพื่อทำนายปริมาณเอทานอลและกลูโคสโดยใช้สมการสโตยคิโอมेटริก จากนั้นนำผลเหล่านี้ไปวิเคราะห์ตามหลักการในทฤษฎีฟัซซีเซตเพื่อนำไปคำนวณค่าอัตราการผลิตกลูโคสต่อไป

การพัฒนากระบวนการควบคุมกระบวนการหมัก แบ่งเป็น 2 ช่วงใหญ่ๆ ดังนี้

1. พัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง
2. พัฒนาระบบการควบคุมกระบวนการหมักด้วยฟัซซีลอจิก

### 1. ทฤษฎีที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์

ในงานวิจัยนี้ได้นำกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะมาใช้ในการศึกษาการควบคุมกระบวนการ เนื่องจากในการหมักยีสต์แบบกึ่งกะ เราสามารถควบคุมปริมาณสารอาหารที่เติมให้มีความเข้มข้นต่ำได้ อีกทั้งยีสต์มีการเจริญและใช้ออกซิเจนในปริมาณที่ไม่มากเกินไปความสามารถในการให้อากาศของถังหมัก นอกจากนี้การหมักแบบนี้ยังช่วยลด repressive effect ของแหล่งคาร์บอนที่จุลินทรีย์สามารถใช้ได้อย่างรวดเร็วและลดความเป็นพิษของส่วนประกอบในอาหารเลี้ยงเชื้อ (Park, et al., 1993 ; Bailey and Ollis, 1986)

กระบวนการหมักยีสต์มักเกิดปัญหาการเกิดปรากฏการณ์แครปทีรี ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากในอาหารเลี้ยงเชื้อมีปริมาณกลูโคสมากเกินไปความต้องการของยีสต์ในการหมักแบบให้อากาศ (aerobic fermentation) เอทานอลที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์นี้จะไปยับยั้งการเจริญของเซลล์ ดังนั้นในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังจึงนำปริมาณความเข้มข้น

ของเอธานอล ความเข้มข้นของกลูโคส และปริมาณเซลล์ มาใช้ในการพิจารณา และนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มาใช้แทนสถานะการหมักจริงเพื่อใช้ในการทำนายการเจริญของยีสต์ การใช้อาหาร การสะสมเอธานอล การเกิดคาร์บอนไดออกไซด์และการใช้ออกซิเจน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสถานะการหมักในช่วงการเจริญต่างๆ

## 2. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะ

ในการควบคุมกระบวนการหมักจะต้องมีการศึกษาสถานะและกลไกการเจริญของเซลล์ จึงมักมีการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาแทนสถานะการหมักจริง จากการศึกษาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

แบบจำลองที่ 1 หรือ สมการ โมนอด (Monod equation) เป็นแบบจำลองที่ศึกษาด้านการส่งผ่านสารอาหารเข้าสู่เซลล์ โดยมีการตั้งข้อสมมติว่าอัตราการเจริญของเซลล์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย คือ อัตราการส่งผ่านสารอาหารเข้าสู่เซลล์และความเร็วในการเจริญสูงสุดเมื่อเซลล์มีการเจริญอยู่ในสถานะที่มีอาหารไม่จำกัด แบบจำลองนี้จึงมีการแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเจริญจำเพาะที่ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมวลและขนาดของเซลล์เป็นหลัก ดังนั้นในการนำแบบจำลองนี้ไปใช้จึงจำกัดอยู่ที่จะต้องเลี้ยงเซลล์ให้อยู่ในสถานะที่มีอาหารไม่จำกัด จึงเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง (continuous culture)

แบบจำลองที่ 2 และ 3 ซึ่งพัฒนาโดย Modak และคณะ (1987) เป็นแบบจำลองที่การเจริญของเซลล์มีการยับยั้งเนื่องจากสารอาหาร แบบจำลองที่ 2 และ 3 ต่างกันที่ผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาล (yield) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ แบบคงที่และแบบไม่คงที่ ซึ่งขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของสารอาหาร ในกรณีแบบคงที่ การยับยั้งการเจริญเนื่องจากสารอาหารจะแสดงในฟังก์ชันของอัตราการเจริญจำเพาะ ( $\mu$ ) และผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อปริมาณการใช้น้ำตาลมีค่าคงที่ ส่วนกรณีแบบไม่คงที่ การยับยั้งการเจริญเนื่องจากสารอาหารแสดงในฟังก์ชันของผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อปริมาณการใช้น้ำตาล ส่วนความเข้มข้นของสารอาหารไม่มีผลต่ออัตราการเจริญจำเพาะ

ในแบบจำลองที่ 2 เป็นแบบจำลองที่มีผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาลคงที่ จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการหมักแบบกึ่งกะ เนื่องจากในการหมักแบบนี้เป็นการ

ตารางที่ 1 แบบจำลองการเจริญยีสต์ขนมปังในสถานะต่างๆ และพารามิเตอร์

แบบจำลอง	รูปแบบ	พารามิเตอร์	สภาวะการหมัก	ค่าเริ่มต้น
1. Monod equation - constant yield - substrate : glucose - <i>S.cerevisiae</i>	$\mu = \frac{\mu_{\max}(S - S_c)}{K_s + (S - S_c)}$ $Y_{X/S} = 0.15$	$K_s = \frac{\mu_{\max}}{\left[ \frac{6Y_{X/S} h_s}{\rho_c d_c} \right]}$ $\mu_{\max} = 0.39 h^{-1}$ $h_s \times 10^5 = 0.85 ms^{-1}$ $d_c \times 10^6 = 8 m$ $k_s \times 10^3 = 42.7$ $\frac{A_s}{V} = \frac{6X}{\rho d_c}$	-	-
(Merchuk and Asenjo,1994)				
2.constant yield - substrate inhibition - <i>S.cerevisiae</i>	$\mu = \frac{S}{0.03 + S + 0.5S^2}$ $Y = 0.5$	$S = 0.24 g/L$ $\sigma = \mu/Y$	Temp. = 30 °C pH = 4.5	$XV(0) = 1 g$ $SV(0) = 0$ $V(0) = 1 L$ $V_{\max} = 5 L$ $F_{\max} = 4 L/h$ $S_0 = 10 g/L$ $t_f = 3.8 h$
(Modak and Lim,1987)				

ตารางที่ 1 (ต่อ)

แบบจำลอง	รูปแบบ	พารามิเตอร์	สภาวะการหมัก	ค่าเริ่มต้น
3.variable yield - substrate inhibition - <i>S.cerevisiae</i>	$\mu = \frac{0.504S(1-0.0204S)}{0.00849+S+0.0406S^2}$ $Y = \frac{0.383(1-0.0204S)}{1+0.296S-0.00501S^2}$	$\mu_{\max} = 0.482 h^{-1}$ $S = 0.37 g/L$ $\sigma = \mu/Y$	Temp. = 30 °C pH = 4.5	$XV(0) = 1 g$ $SV(0) = 1 g$ $V(0) = 1 L$ $V_{\max} = 5 L$ $F_{\max} = 4 L/h$ $S_0 = 10 g/L$ $t_f = 6 h$
(Modak and Lim ,1987)				
4.a biphasic growth model - substrate inhibition - variable yield - substrate : glucose - <i>S.carlsbergensis</i>	$\mu = \mu_{\max} \frac{S/(k_s + S)}{1 + \frac{Q(S)v_{e,\max} P/(k_p + P)}{Y = (1-R)Y_{x/s}^R + RY_{x/s}^F}}$ $R(S) = \frac{1 + 1.576 \times 10^4 S^{1.386}}{200 + 1.576 \times 10^4 S^{1.386}}$ $Q(S) = \frac{1 + 26.81S^{1.313}}{1 + 536.2S^{1.313}}$ $\pi_e = Y_{P/S}^F R(S) \sigma$ $\eta_s = 12 \frac{2950S^{1.5}}{1 + 2950S^{1.5}} \frac{1 + 421S^{1.73}}{1 + 555.3S^{1.73}}$	$\mu_{\max} = 0.39 h^{-1}$ $v_{e,\max} = 0.11 h^{-1}$ $k_s = 0.021 g/L$ $k_p = 0.014 g/L$ $Y_{x/s}^R = 0.52 g/g$ $Y_{x/s}^F = 0.15 g/g$ $Y_{P/S}^F = 0.33 g/g$ $\eta_A = 0.77$	Temp. = 30 °C pH = 4.5 1000 rpm air 1 vvm	$C_e(0) = 0 g$ $(E/X)_0 = 50 kJ/g$ $V(0) = 0.6 L$ $V_{\max} = 15 L$ $S_0 = 15 [V_{\max} - V(0)] g/L$
(Pyun, et al.,1987)				



ตารางที่ 1 (ต่อ)

แบบจำลอง	รูปแบบ	พารามิเตอร์	สภาวะการหมัก	ค่าเริ่มต้น
5. Substrate and product inhibition	$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{(k_s + S)(1 + P^2)}$	$k_1 = 0.0023$ $k_2 = 0.0070$	Temp. = 33 °C	$X(0) = 10 \text{ kg/m}^3$
-substrate : molasses	$v_e = 0.138 - 0.062P + \frac{0.0028}{S - 0.28}$	$k_s = 0.025$ $m = 0.03$	pH = 4.5	$V(0) = 10L$
- <i>S.cerevisiae</i>	$\pi_e = 0.155 + 0.123 \log S$ $Y = 0.5$	$\mu_{\max} = 0.42$ $Y_{X/P} = 0.48$ $Y_{P/S} = 0.51$ $a_1 = 0, a_2 = 1 \text{ for } S > 0.28$ $a_1 = 1, a_2 = 0 \text{ for } S \leq 0.28$	500 rpm air 1 vvm	$C_e(0) = 0$
				$P(0) = 0$
				$S(0) = 0.28$
				$S_0 = 200 \text{ kg/m}^3$

(Takamatsu, et al., 1985)

ปรับค่าการเติมอาหารให้พอเหมาะกับความต้องการของเซลล์ จึงทำให้ผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาลค่อนข้างคงที่ ต่างกับในแบบจำลองที่ 3 ซึ่งมีผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาลไม่คงที่ เนื่องจากการเติมอาหารต่อเนื่องตลอดเวลาโดยไม่คำนึงถึงปริมาณความต้องการของเซลล์ แต่ขึ้นกับอัตราการเติมต่ออาหารต่อปริมาณน้ำหมักเท่านั้น

แบบจำลองที่ 4 และ 5 ซึ่งพัฒนาโดย Pyun และคณะ (1987) และ Takamatsu และคณะ (1985) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเจริญของเซลล์นอกจากจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารอาหารแล้ว แต่เมื่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นจะมีผลทำให้อัตราการเจริญจำเพาะของเซลล์ลดลงด้วย ในแบบจำลองที่ 4 เป็นแบบจำลองที่มีการนำฟังก์ชันของกิจกรรมของเอนไซม์อินเวอร์เทส (invertase activity) มาพิจารณาร่วมด้วย โดยตั้งข้อสมมติว่ากิจกรรมของเอนไซม์อินเวอร์เทสขึ้นกับอัตราส่วนของอัตราการสร้างอินเวอร์เทสจำเพาะต่ออัตราการเจริญจำเพาะของกลูโคสและเอธานอล จากการจำลองสถานการณ์ ผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาลมีค่าสูงเมื่อกิจกรรมของเอนไซม์อินเวอร์เทสมีค่าสูง ในการนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้จึงต้องมีการศึกษารายละเอียดของปัจจัยการทำงานของเอนไซม์อินเวอร์เทสด้วย

จากการศึกษาแบบจำลองการเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะที่ผ่านมา (Merchuk, *et al.*, 1994 ; Modak and Lim, 1987 ; Pyun, *et al.*, 1987 ; Takamatsu, 1985) พบว่าแบบจำลองการเจริญของยีสต์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน อาจแบ่งได้เป็น 3 ปัจจัย คือ

1. ปัจจัยทางสภาวะสรีระของยีสต์ (physiological state) สภาวะสรีระของเซลล์เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลา พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มักนำมาพิจารณาได้แก่ อัตราการเจริญจำเพาะ อัตราการใช้สารอาหาร อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ ผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้สารอาหาร กิจกรรมของเอนไซม์ เป็นต้น นอกจากนี้สายพันธุ์ของจุลินทรีย์มีผลทำให้สภาวะสรีระแตกต่างกันด้วย ในแบบจำลองการเจริญของยีสต์สามารถแบ่งปัจจัยทางสภาวะสรีระในการเจริญที่มีความสัมพันธ์กับสารอาหารและผลิตภัณฑ์ ได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

- 1.1 เมื่อการเจริญมีอาหารเป็นตัวยับยั้งและผลผลิตเซลล์ต่อการใช้น้ำตาลคงที่
- 1.2 เมื่อการเจริญมีอาหารเป็นตัวยับยั้งและผลผลิตเซลล์ต่อการใช้น้ำตาลไม่คงที่
- 1.3 เมื่อการเจริญมีอาหารและผลิตภัณฑ์เป็นตัวยับยั้งและผลผลิตเซลล์ต่อการใช้น้ำตาลคงที่

2. ปัจจัยทางฟิสิกส์ (physical state) เช่น สภาวะในการหมัก ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ปริมาณน้ำหมัก และเวลาในการเลี้ยง

3. ปัจจัยทางเคมี (physiochemical state) เช่น อาหารเลี้ยงเชื้อ ความเข้มข้นของ สารอาหารที่ให้

ในการหมักยีสต์ขมปังแบบกึ่งระดับความเข้มข้นของสารอาหารมีผลต่อการ เกิดผลิตภัณฑ์ และทั้งความเข้มข้นของสารอาหารและผลิตภัณฑ์จะไปมีผลต่อการเจริญของ เซลล์ แบบจำลองที่ 5 มีความซับซ้อนตามกลไกการเจริญของเซลล์และสอดคล้องกับ สภาวะการหมักมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยในแบบจำลองนี้มีการพิจารณาผลของอาหาร และผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในหม้อของอัตราการเจริญจำเพาะ และพิจารณาสภาวะการสร้างและการ สะสมผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นกับระดับความเข้มข้นของสารอาหาร จึงเลือกแบบจำลองนี้มาใช้ในการ จำลองสถานการณ์ที่จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการหมักต่อไป

แบบจำลองที่ 5 มีสมการคุณมวลสารในการหมักแสดงดังสมการที่ 1 (Takamatsu, *et al.*, 1985) ดังนี้

$$d(VX)/dt = \mu \cdot VX + a_1 Y_{x/e} v_e VX \quad 1ก$$

$$d(VS)/dt = FS_0 - \mu VX/Y - mVX - a_2 \pi_e / Y_{e/s} VX \quad 1ข$$

$$d(VC_e)/dt = a_2 \pi_e VX - a_1 v_e VX \quad 1ค$$

$$d(VP)/dt = k_1 VX + k_2 \mu VX \quad 1ง$$

$$dV/dt = F \quad 1จ$$

ในแบบจำลองที่ 5 การเกิดเอทานอลในกระบวนการหมักแบบให้อากาศมีความ สัมพันธ์ขึ้นกับค่าความเข้มข้นของกลูโคส พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกลูโคสมีค่าสูงกว่า 0.28 กรัมต่อลิตร จะมีผลทำให้เกิดการสร้างเอทานอลมาก แต่เมื่อความเข้มข้นของกลูโคสมี ค่าต่ำกว่า 0.28 กรัมต่อลิตร อัตราการเกิดเอทานอลจะลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ต่างๆ แสดงดังนี้

เมื่อ  $S > 0.28$  ให้  $a_1 = 0$  และ  $a_2 = 1$  และ

เมื่อ  $S \leq 0.28$  ให้  $a_1 = 1$  และ  $a_2 = 0$

### 3. การพัฒนาระบบการควบคุมแบบฟัซซี

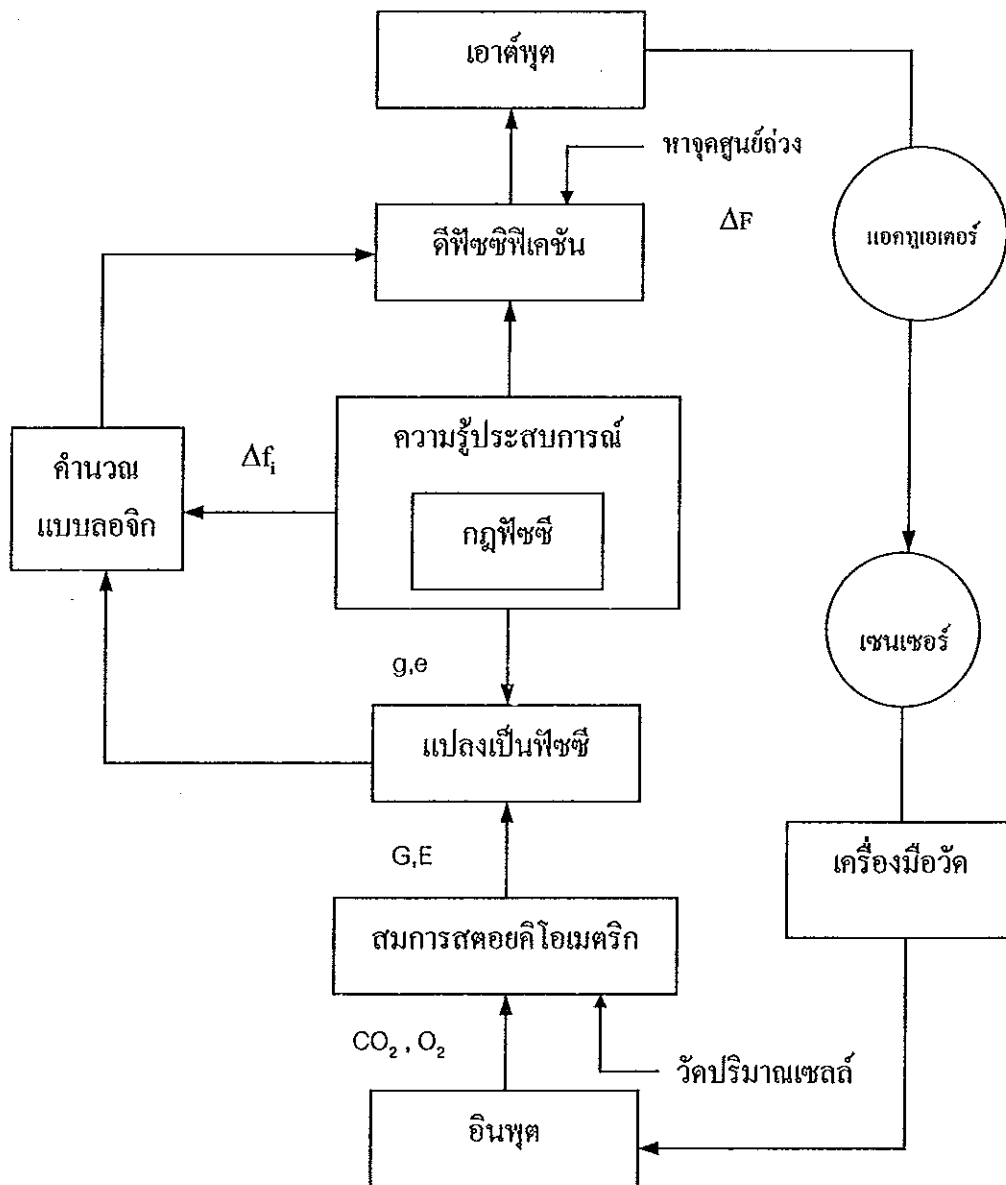
ขั้นตอนในการสร้างระบบการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังด้วยฟัซซีลอจิก แบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือการสร้างกฎฟัซซีในการควบคุม หลังจากนั้นจึงนำกฎฟัซซีไปประยุกต์ใช้ ขั้นตอนโดยรวมแสดงได้ดังภาพที่ 3.1

#### 1. การสร้างกฎฟัซซี

กระบวนการควบคุมเริ่มจากการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไป ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) แบบออนไลน์ และวัดปริมาณเซลล์ที่เพิ่ม (X) นำค่าทั้งสามมาทำนายปริมาณเอทานอล (E) และปริมาณกลูโคส (G) โดยคำนวณจากสมการสโตยชิโอเมตริก (stoichiometric equation) และแปลงค่าเหล่านี้ให้เป็นตัวแปรฟัซซี (e,g) ด้วยกระบวนการดีฟัซซีฟิเคชัน จากนั้นนำข้อมูลสถานะการหมักในช่วงต่างๆ แบ่งตามปฏิกิริยาทางชีวเคมีมาสร้างกฎฟัซซี เพื่อวิเคราะห์หาค่าปริมาณกลูโคสที่ต้องการในการควบคุมอัตราการเติมอาหารแบบป้อนกลับ ในขั้นตอนนี้จะได้ค่าอัตราการเติมกลูโคส ( $\Delta f$ ) จากกฎฟัซซี i กฎ

#### 2. การนำกฎฟัซซีไปใช้ในการควบคุม

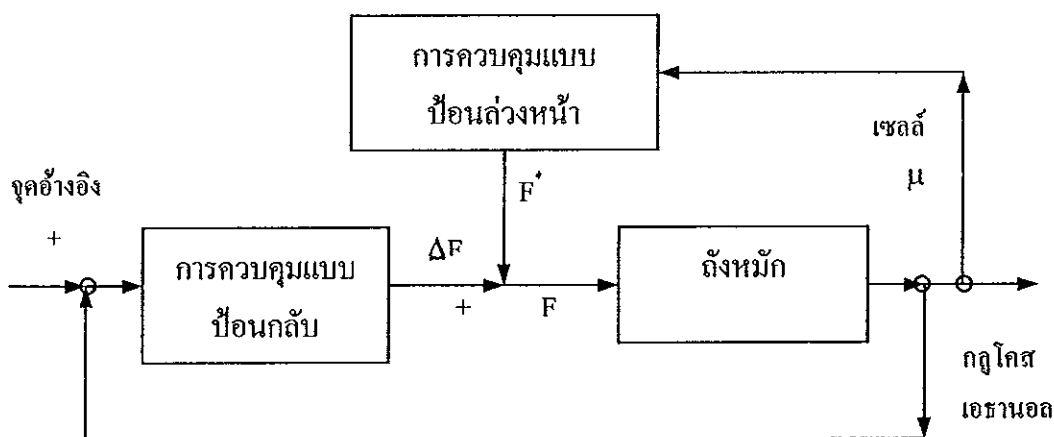
ในระบบการควบคุมแบบฟัซซี แสดงดังภาพที่ 3.1 ในช่วงเวลาหนึ่งๆ ระบบการวัดและควบคุมจะรับค่าความเข้มข้นของเอทานอล (E) และความเข้มข้นของกลูโคส (G) จากการวัดค่าโดยทางอ้อม คือวัด  $\text{CO}_2$  ที่เกิดขึ้นและ  $\text{O}_2$  ที่ใช้ไป จากเครื่องวัดและวิเคราะห์ปริมาณก๊าซ และรับค่าปริมาณเซลล์ (X) จากการวัดค่าการดูดกลืนแสง นำค่าเอทานอลและกลูโคสที่คำนวณได้มาวิเคราะห์เลือกกฎฟัซซีตามกรณีที่สอดคล้องกับเงื่อนไข จะได้อัตราการเติมกลูโคส ( $\Delta f$ ) โดยที่ i บ่งบอกถึงผลการประเมินกฎที่ i จากการใช้หลักการค่าต่ำสุด (intersection, minimum) และนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ตามหลักการค่าสูงสุด (maximum) ได้ช่วงปริมาณของอัตรากลูโคสที่ต้องเติมซึ่งยังเป็นค่าที่ยังมีความคลุมเคลืออยู่ (fuzzy) นำค่านี้ไปแปลงเป็นค่าที่ชัดเจนโดยใช้วิธีการหาจุดศูนย์กลาง จะได้ค่าอัตราการเติมกลูโคสค่าหนึ่ง ( $\Delta f$ ) เพื่อนำไปใช้ในระบบการควบคุมแบบป้อนกลับต่อไป



ภาพที่ 3.1 การควบคุมแบบฟิชซี

#### 4. การควบคุมอัตราการเติมกลูโคสในระบบการหมักยีสต์ขุ่นมัว

ระบบการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นมัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับที่เสนอโดย Park และคณะ (1995) และ Shiba และคณะ (1994) การควบคุมกระบวนการประกอบด้วย การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าและการควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งในช่วงการควบคุมแบบป้อนกลับนี้ นำเอาระบบการควบคุมแบบพีชชีมาใช้ในการกำหนดอัตราการเติมกลูโคสเพื่อให้ระดับอาหารในถังหมักมีความพอดีตามความต้องการของจุลินทรีย์ วิธีการควบคุมแสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 วิธีการควบคุมกระบวนการหมักด้วยพีชชีลอจิก

การคำนวณอัตราการเติมอาหารในการควบคุมกระบวนการประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

1. การคำนวณอัตราการเติมอาหารแบบป้อนล่วงหน้า

$$F^* \cong \frac{\mu X}{Y_{X/S} S_0} \quad (2)$$

## 2. การคำนวณอัตราการเติมอาหารแบบป้อนกลับ (feedback control)

$$F = F^* + \Delta F \quad (3)$$

ซึ่ง  $\Delta F$  คำนวณจากระบบการควบคุมแบบพีชชี โดยพีชชีที่เค้นพีชชีเซตของความเข้มข้นของกลูโคสและเอทานอลตามกฎของพีชชีเซต (ถ้า-คังนั้น)

### 5. กฎพีชชี

ในการเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะให้อากาศ มักเกิดปัญหาปรากฏการณ์แคปทรี คือเมื่อกลูโคสมีปริมาณมากเกินความต้องการของเซลล์ เป็นผลทำให้เซลล์มีการสร้างเอทานอลมากและเกิดการสะสม ถึงแม้ว่าจะมีการให้อากาศเพียงพอ เอทานอลจะไปยับยั้งการเจริญของเซลล์ ดังนั้นในการกำหนดกฎพีชชีที่จะใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะจึงมีการพิจารณาความเข้มข้นของกลูโคสและเอทานอลเป็นหลัก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการยับยั้งการเจริญและเพื่อให้ได้ปริมาณเซลล์สูงสุด ในการเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะพบว่าเมื่อกลูโคสมีปริมาณมากกว่า 0.2 กรัมต่อลิตร จะมีผลทำให้เซลล์มีการสร้างเอทานอลและที่ระดับความเข้มข้น 0.2 กรัมต่อลิตร อัตราการเจริญจะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญสูงสุด (O'Conner, 1992) ดังนั้นเพื่อให้การหมักยีสต์แบบกึ่งกะได้ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้น้ำตาลสูงสุดจึงต้องมีการรักษาระดับกลูโคสให้อยู่ในระดับสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการสร้างเอทานอลได้

กระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะมีการเจริญที่ซับซ้อนแตกต่างกันในแต่ละช่วงสถานะการเจริญ ยีสต์ใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนเมื่อมีกลูโคสอยู่ในระดับที่เพียงพอ แต่ในบางสถานะที่เซลล์ขาดแคลนกลูโคส เซลล์สามารถนำเอทานอลมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ ระดับความเข้มข้นของกลูโคสและเอทานอลจึงมีความสัมพันธ์กัน และเป็นปัจจัยหลักสำคัญที่จะนำไปตัดสินใจปริมาณการเติมอาหารในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่สามารถนำมาบ่งชี้สถานะการหมักเพื่อใช้ในการควบคุมได้ เช่น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ (DO) อัตราการเจริญจำเพาะต่ออัตราการเจริญสูงสุด ( $\mu/\mu_{max}$ )

เนื่องจากในการควบคุมแบบพีซีจำเป็นต้องใช้ข้อมูลและความรู้ประสบการณ์มาใช้ร่วมกันในการสร้างกฎควบคุม ในงานวิจัยนี้จึงเลือกนางานวิจัยที่ผ่านมา (Park, *et al.*, 1995 ; Siimes, *et al.*, 1995 ; Jin, *et al.*, 1996 ; Shi and Shimizu, 1992) ที่มีข้อมูลมากเพียงพอมาประกอบกับข้อมูลจากการทดลองเพื่อนำมาใช้ในการสร้างกฎการควบคุมแบบพีซี นอกจากนี้จะต้องมีข้อมูลมากเพียงพอแล้วยังต้องคำนึงถึงความสามารถของเครื่องมือวัดเพื่อใช้ในการกำหนดฟังก์ชันอินพุตอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกนำเอาปริมาณกลูโคสและเอธานอลเป็นอินพุตเพื่อใช้ในการควบคุมแบบพีซีต่อไป

Park และคณะ (1993) ได้เสนอให้ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของกลูโคสมี 3 ระดับ คือ “S”, “M” และ “B” (“S”, “M” และ “B” ย่อจาก small, medium และ big ตามลำดับ) กำหนดค่าจุดอ้างอิงที่ 0.2 กรัมต่อลิตร ค่าจุดอ้างอิงให้อยู่ในเซต “M” ส่วน “S” และ “B” กำหนดให้เท่ากับ 0.1 กรัมต่อลิตร และ 0.3 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในงานวิจัยของ Siimes และคณะ (1995) เสนอให้จุดอ้างอิงของกลูโคสมีค่าเท่ากับ 0.15 กรัมต่อลิตร กำหนดพีซีเซตอินพุตมี 3 ระดับ ที่ “S”, “M” และ “B” เท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร, 0.15 กรัมต่อลิตรและ 0.25 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ระดับความเข้มข้นของเอธานอลจะมีผลต่อการยับยั้งการเจริญ ที่ระดับความเข้มข้นมากกว่า 2 กรัมต่อลิตร จะมีผลต่อการยับยั้งการเจริญของเซลล์อย่างมาก ดังนั้นจึงต้องพยายามรักษาระดับความเข้มข้นของเอธานอลให้มีค่าต่ำกว่า 2 กรัมต่อลิตร Shi และ Shimizu (1992) และ Park และคณะ (1993) กำหนดฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของเอธานอลมีจุดอ้างอิงที่ 2 กรัมต่อลิตร โดยพีซีเซต “S”, “M” และ “B” มีค่าเท่ากับ 1 กรัมต่อลิตร, 2 กรัมต่อลิตร และ 3 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วน Siimes และคณะ (1995) ต้องการควบคุมให้เซลล์สร้างเอธานอลน้อยที่สุดจึงได้กำหนดจุดอ้างอิงของเอธานอลเท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ดังนั้นพีซีเซต “S”, “M” และ “B” มีค่าเท่ากับ 0 กรัมต่อลิตร , 0.5 กรัมต่อลิตร และ 1.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากการศึกษาข้างต้น พบว่าในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะ มีการตั้งค่าจุดอ้างอิง (set point) ที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จึงนำพีซีเซตของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตทั้งหมดมาศึกษาและจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นมึนแบบกึ่งกะ เพื่อหาพีซีเซตที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการต่อไป พีซีเซตฟังก์ชันสมาชิกทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงดังภาพที่ 3.3



การกำหนดพืชซีเซตของอินพุตนั้นนอกจากจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของช่วงค่าอินพุตแล้วยังต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์กับเอาต์พุตอีกด้วย เอาต์พุตของระบบในงานวิจัยนี้คือพืชซีเซตของอัตราการเติมอาหาร ซึ่งเป็นการกำหนดเทียบกับอัตราการเติมอาหารแบบป้อนล่วงหน้า วิธีการควบคุมแสดงดังภาพที่ 3.3 การหาค่าเอาต์พุตของระบบ (ดีพีซีพีเคชัน) ใช้วิธีการหาค่าสูงสุด-ต่ำสุด และหาค่าจุดศูนย์ถ่วง

Park และคณะ (1993) กำหนดพืชซีเซตของเอาต์พุต 7 เซต โดยที่ค่า  $\Delta F$  อยู่ในช่วง  $-1F^*(\Delta F_{\min})$  และ  $+3F^*(\Delta F_{\max})$  เมื่อ  $\Delta F$  คือ อัตราการเติมอาหารในการควบคุมแบบป้อนกลับ  $F^*$  คือ อัตราการเติมอาหารแบบป้อนล่วงหน้า เมื่อ  $\Delta F$  มีค่าเท่ากับ  $\Delta F_{\min}$  อัตราการให้อาหารจะเท่ากับศูนย์ และถ้า  $\Delta F$  เท่ากับ  $\Delta F_{\max}$  อัตราการเติมอาหารจะมีค่าสูงสุด ( $4F^*$ ) พืชซีเซตของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต แสดงดังภาพที่ 3.4

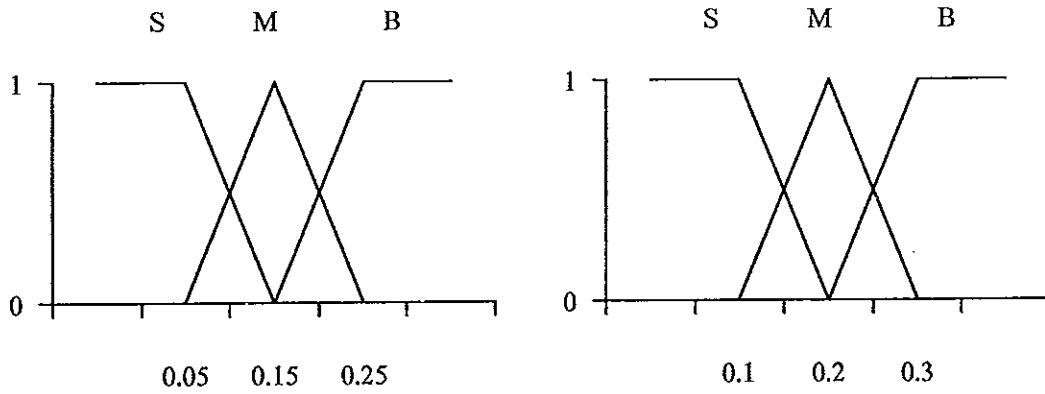
การสร้างกฎพืชซีเซตเพื่อใช้ในการควบคุมต้องให้มีความสัมพันธ์สอดคล้องกันระหว่างอินพุตทั้งสองค่าและเอาต์พุต ตารางที่ 2 แสดงกฎพืชซีเซตที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะ โดยประยุกต์จากกฎพืชซีเซตที่เสนอโดย Park และคณะ (1993) แตกต่างกันในงานวิจัยนี้ไม่มีการนำค่าออกซิเจนที่ละลายได้มาพิจารณาเป็นฟังก์ชันอินพุต แต่ได้พัฒนากฎพืชซีเซตให้มีความหลากหลายมากขึ้น โดยสร้างกฎที่ใช้ในการควบคุม 2 ชุด ชุดละ 9 กฎ และนำกฎควบคุมทั้งสองชุดไปจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักเพื่อหาชุดควบคุมที่สามารถทำให้ระบบควบคุมมีประสิทธิภาพดีที่สุด

ตัวอย่างกฎควบคุม

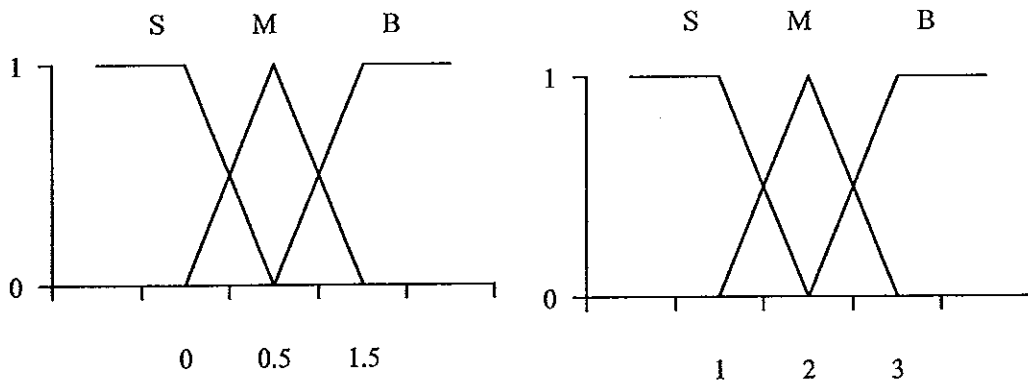
ชุดที่ 1 กฎที่ 1 เมื่อปริมาณกลูโคสเป็น “S” และปริมาณเอทานอลเป็น “S”

ดังนั้นอัตราการเติมกลูโคสเป็น “PB”

หมายความว่าในน้ำหมักมีปริมาณกลูโคสน้อยและปริมาณเอทานอลน้อย แสดงว่าขณะนี้เซลล์ต้องการสารอาหารเพิ่ม และปริมาณเอทานอลก็ไม่มีผลต่อการยับยั้งการเจริญ เนื่องจากมีปริมาณน้อย จึงสามารถเติมอาหารได้สูงสุด อัตราการเติมอาหารเท่ากับอัตราการเติมแบบป้อนกลับรวมกับอัตราการเติมแบบป้อนล่วงหน้า ดังนั้นเมื่อดีพีซีพีเคชันแล้วต้องเติมอาหารแบบป้อนกลับอยู่ในช่วง  $2F^*$  ถึง  $3F^*$  รวมกับอัตราการเติมอาหารแบบป้อนล่วงหน้า  $F^*$

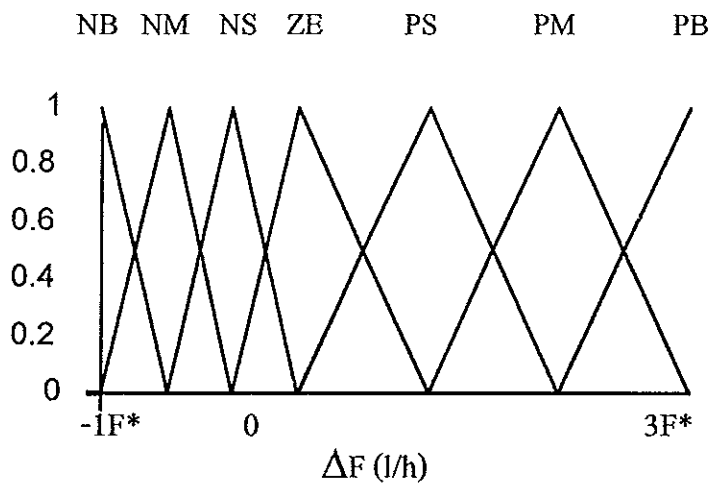


ก ฟัซซีเซตฟังก์ชันสมาชิกของกลูโคส เมื่อตั้งค่าอ้างอิงที่ 0.15 และ 0.2 กรัมต่อลิตร



ข ฟัซซีเซตฟังก์ชันสมาชิกของเอทานอล เมื่อตั้งค่าอ้างอิงที่ 0.5 และ 2 กรัมต่อลิตร

ภาพที่ 3.3 ฟัซซีเซตฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต



ภาพที่ 3.4 ฟัซซีเซตฟังก์ชันสมาชิกของอัตราการเติมอาหาร (เอาต์พุต)

จุดที่ 1 กฎที่ 7 เมื่อปริมาณกลูโคสเป็น “S” และปริมาณเอธานอลเป็น “B”  
 ดังนั้นอัตราการเติมกลูโคสเป็น “ZE”

หมายความว่าในน้ำหมักมีปริมาณกลูโคสน้อยแต่มีปริมาณเอธานอลมาก ในการเจริญช่วงนี้ถ้ามีการเติมอาหารมากเกินไปความต้องการของเซลล์จะมีผลทำให้เซลล์สร้างเอธานอลเพิ่ม และระดับความเข้มข้นของปริมาณเอธานอลที่สูงนี้ จะไปมีผลยับยั้งการเจริญของเซลล์ ในช่วงนี้จึงควรเติมอาหารให้พอดีกับความต้องการของเซลล์

ตารางที่ 2 กฎพีชคณิตที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขั้นหมักแบบกึ่งกะ

ชุดที่ 1

		Glucose			
		S	M	B	
		S	PB	PM	ZE
Ethanol	M	PM	ZE	NS	
	B	ZE	NS	NB	

ชุดที่ 2

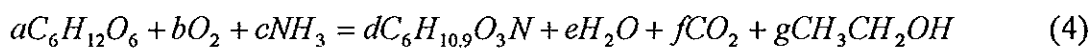
		Glucose			
		S	M	B	
		S	PM	PS	NS
Ethanol	M	PS	ZE	NM	
	B	NS	NM	NB	

เมื่อ	NB	ย่อจาก	negative big
	NM	ย่อจาก	negative medium
	NS	ย่อจาก	negative small
	ZE	ย่อจาก	zero
	PS	ย่อจาก	positive small
	PM	ย่อจาก	positive medium
	PB	ย่อจาก	positive big

## 6. การวัดโดยทางอ้อม (Gateway sensor)

เราสามารถนำวิธีการวัด โดยทางอ้อมมาใช้ในระบบการวัดและควบคุม ทำให้ระบบควบคุมไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์การวัดที่มีความซับซ้อน สามารถใช้งานได้ง่ายและราคาไม่สูงอีกด้วย ในงานวิจัยนี้สามารถทราบปริมาณเอทานอลและปริมาณกลูโคสได้จากการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไปและปริมาณเซลล์ที่เพิ่ม โดยใช้วิธีการวัด โดยทางอ้อมด้วยการใช้สมการสโตยคิโอเมตริก

ในการหมักยีสต์แบบมีอากาศ ยีสต์จะใช้สารอาหารจากแหล่งคาร์บอน ในโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟต และฟอสเฟต เพื่อเปลี่ยนเป็นมวลชีวภาพ เอทานอล พร้อมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยใช้สารเลี้ยงเชื้อประกอบด้วยกลูโคส แอมโมเนีย และเกลืออนินทรีย์เล็กน้อย ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเลี้ยงเชื้อยีสต์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4



ใช้สูตรโมเลกุลตามสมการสมดุลมวลสาร (สมการที่ 4) เขียนเป็นสมการเมตริกได้ดังสมการที่ 5

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -6 & 0 & 0 & 6 & 0 & 1 & 2 \\ -12 & 0 & -3 & 10.9 & 2 & 0 & 6 \\ -6 & -2 & 0 & 3 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \end{bmatrix} \quad (5)$$

จากสมการที่ 5 มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 7 ตัวแปร แต่มีสมการเมตริก 4 สมการ ดังนั้นต้องเพิ่มสมการอีก 3 สมการเพื่อใช้ในการแก้ตัวแปร ในงานวิจัยนี้เลือกวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และปริมาณเซลล์ เพื่อนำค่าทั้งหมดมาใช้ในการแก้สมการหาค่าความเข้มข้นของกลูโคสและเอทานอล

จากการแก้สมการดุลคาร์บอน(C) ไฮโดรเจน(H) ออกซิเจน(O) และไนโตรเจน(N) สามารถคำนวณหาปริมาณเอธานอล (g) และปริมาณกลูโคส (a) ได้ดังสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ถ้าทราบปริมาณก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น (f) ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไป (b) และปริมาณเซลล์ที่เพิ่ม (d) โดยคำนวณหน่วยเป็น โมล

$$g = f - b - 0.475d \quad (6)$$

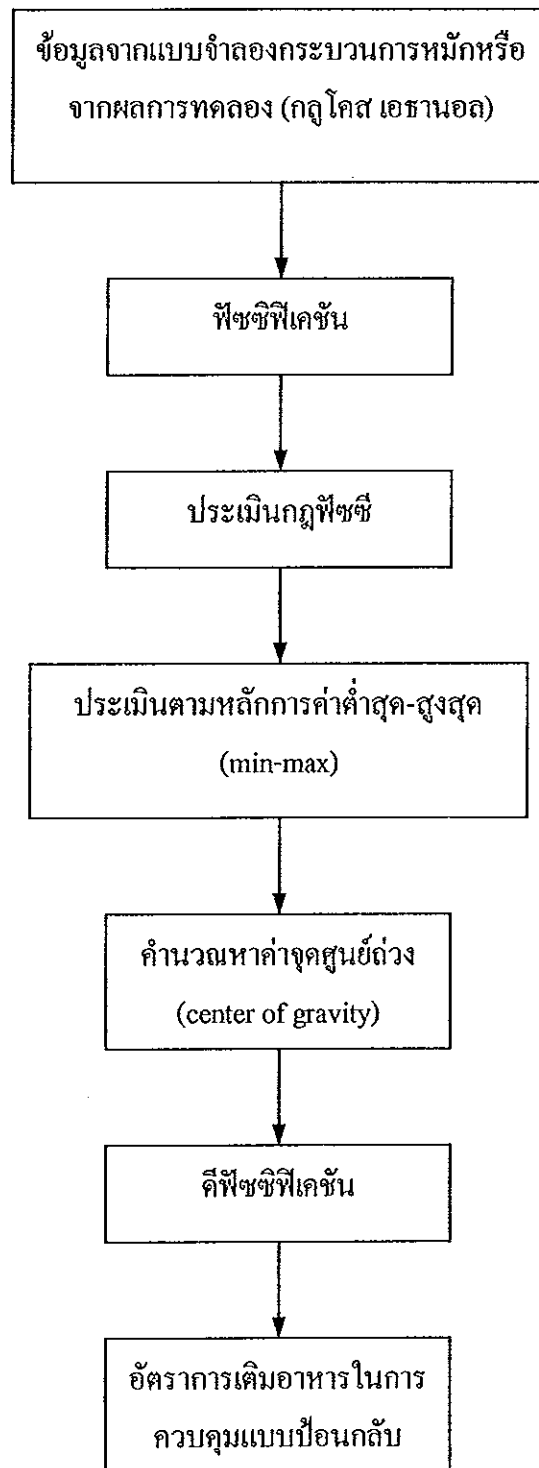
$$a = 0.166f + d + 0.33g \quad (7)$$

### 7. โครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์

โปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการหาผลเฉลี่ยและจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะเป็น โปรแกรมที่ดำเนินการภายใต้ระบบดอส โดยใช้ภาษา C++ ในการเขียนโปรแกรม ตัวแปลภาษาที่ใช้คือ Borland C++ เวอร์ชัน 4.02 โปรแกรมสามารถใช้ได้กับเครื่องคอมพิวเตอร์รุ่น 486DX ขึ้นไป โดยที่โปรแกรมสามารถคำนวณ แสดงผลทางหน้าจอและจัดเก็บข้อมูลลงไฟล์ได้

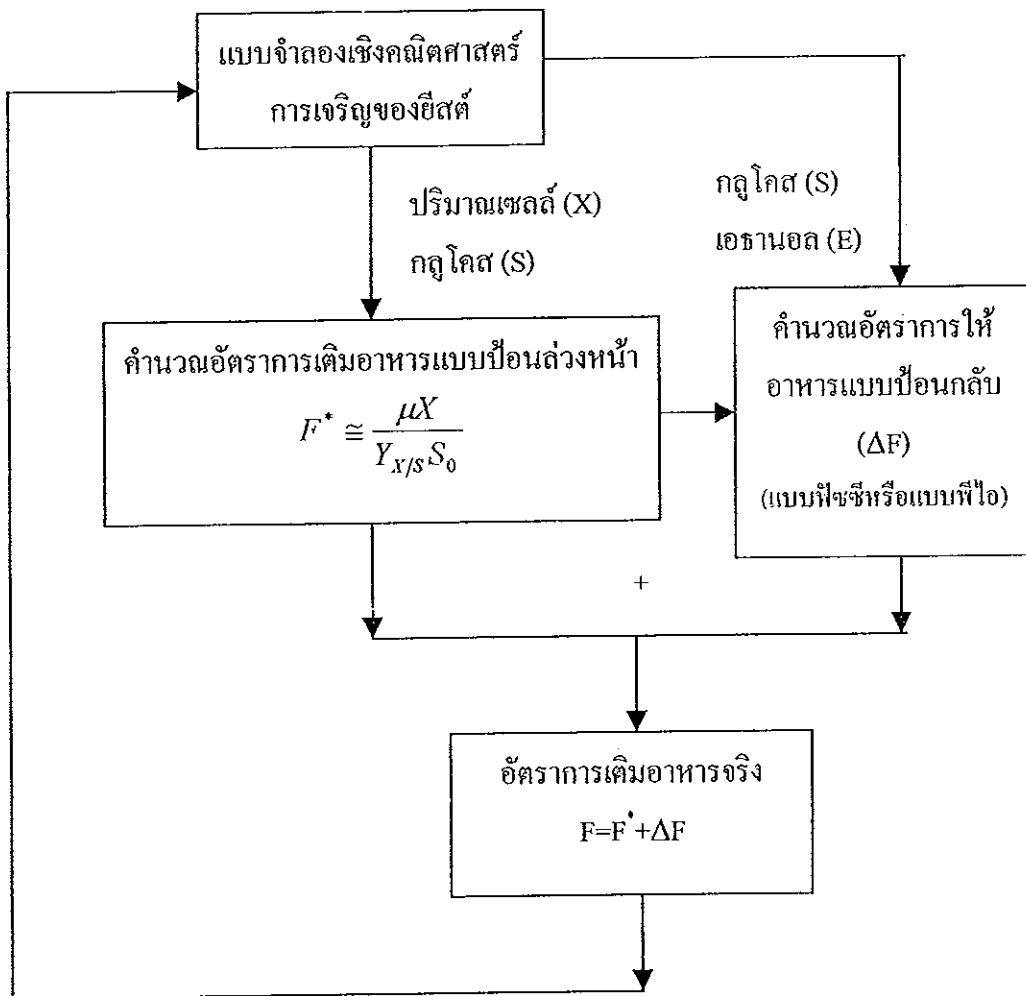
โปรแกรมที่สร้างขึ้นประกอบด้วยโปรแกรมต่างๆ ดังนี้

1. โปรแกรมจำลองสถานการณ์แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ
2. โปรแกรมการคำนวณสมการสตอยคิโอมेटริกเพื่อใช้ร่วมกับการควบคุม
3. โปรแกรมการคำนวณระบบพีชชีลोजิก (แสดงดังภาพที่ 3.5)
4. โปรแกรมจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ (แสดงดังภาพที่ 3.6)
  - 4.1 การควบคุมด้วยพีชชี
  - 4.2 การควบคุมแบบพีไอ
5. โปรแกรมการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ
  - 5.1 การควบคุมด้วยพีชชี
  - 5.2 การควบคุมแบบพีไอ



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรมการคำนวณแบบฟัซซี

โครงสร้างของโปรแกรมที่ 4 แสดงดังภาพที่ 3.6 ซึ่งคล้ายคลึงกับโครงสร้างของโปรแกรมที่ 5 ต่างกันที่โปรแกรมที่ 5 ใช้กระบวนการหมักจริงแทนแบบจำลองการเจริญของยีสต์ในโปรแกรมที่ 4



ภาพที่ 3.6 โครงสร้างของ โปรแกรมการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ



### 8. โครงสร้างของระบบวัดและควบคุมกระบวนการหมักด้วยคอมพิวเตอร์

ระบบวัดและควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงดังภาพที่ 3.7 ระบบการวัดปริมาณก๊าซทำโดยวัดปริมาณก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ก๊าซ ซึ่งต่อเชื่อมด้วยตัวแปลงสัญญาณจากอะนาลอกเป็นดิจิทัล (A/D converter) เพื่อแปลงสัญญาณเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยมี RS232 เป็นตัวส่งผ่านสัญญาณ และรับค่าปริมาณเซลล์จากภายนอก จากนั้นคอมพิวเตอร์จะประมวลผลการเติมอาหารแบบป้อนกลับตามหลักการควบคุมแบบพีโอหรือแบบพีซี และส่งค่าที่ได้มาควบคุมปั๊มเติมอาหารซึ่งต่อเชื่อมด้วยตัวแปลงสัญญาณจากดิจิทัลเป็นอะนาลอก (D/A converter) และระบบควบคุมมีการรับค่าจากภายนอกเพื่อปรับค่าใหม่จากการวัดแบบออฟ-ไลน์ เพื่อให้ระบบควบคุมมีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

ระบบการวัดและคำนวณผลทางคอมพิวเตอร์ ระหว่างกระบวนการหมักมีขั้นตอน ดังนี้

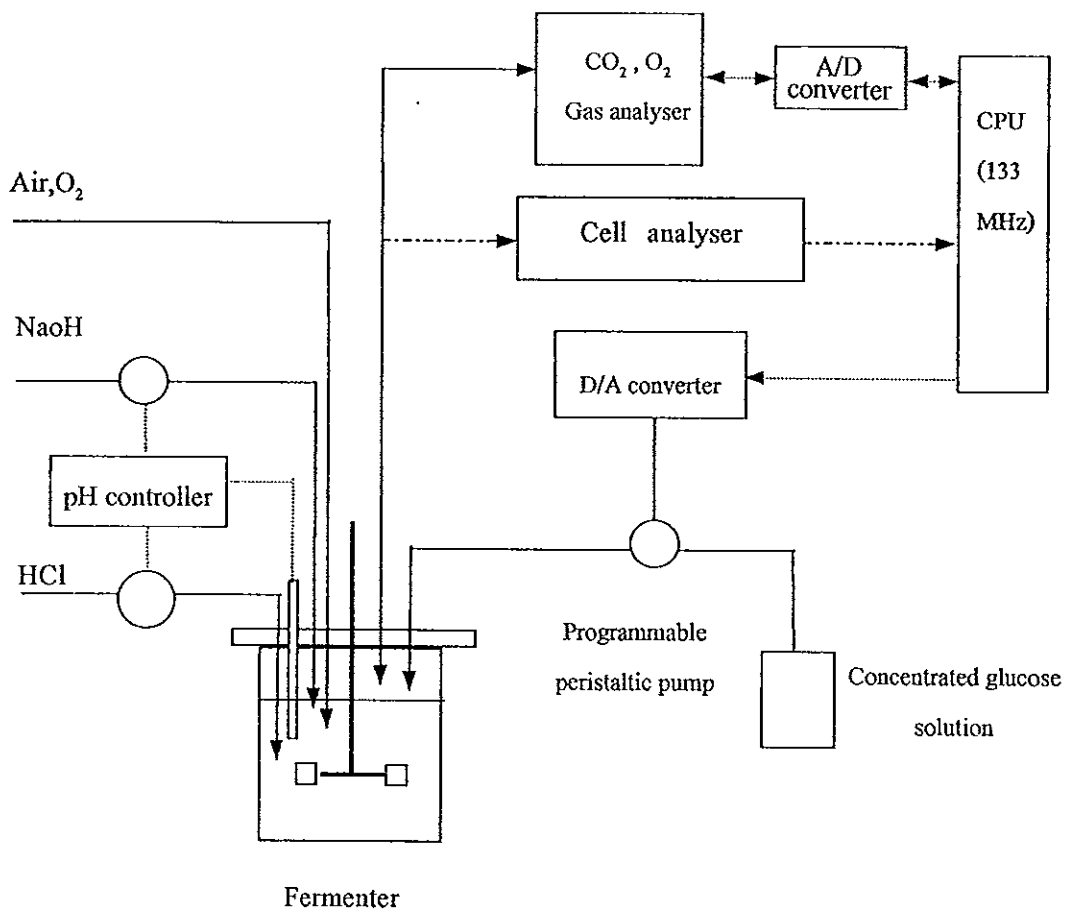
1. วัดค่าปริมาณก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณเซลล์ทุก 15 นาที
2. คำนวณปริมาณกลูโคสและเอทานอลเมื่อได้รับข้อมูลจากข้อ 1 เพื่อประมวลผลเป็นค่าอัตราการเติมกลูโคส
3. คำนวณค่าอัตราการเจริญจำเพาะและผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาลทุก 20 นาที นำค่าที่ได้ไปคำนวณอัตราการเติมกลูโคสแบบป้อนล่วงหน้า สมการการคำนวณแสดงดังสมการที่ 8 และ 9

การคำนวณอัตราการเจริญจำเพาะ

$$\mu = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (8)$$

การคำนวณผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาล

$$Y_{x/s} = \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (9)$$



ภาพที่ 3.7 ระบบการวัดและควบคุมในกระบวนการหมักยีสต์ด้วยคอมพิวเตอร์

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์

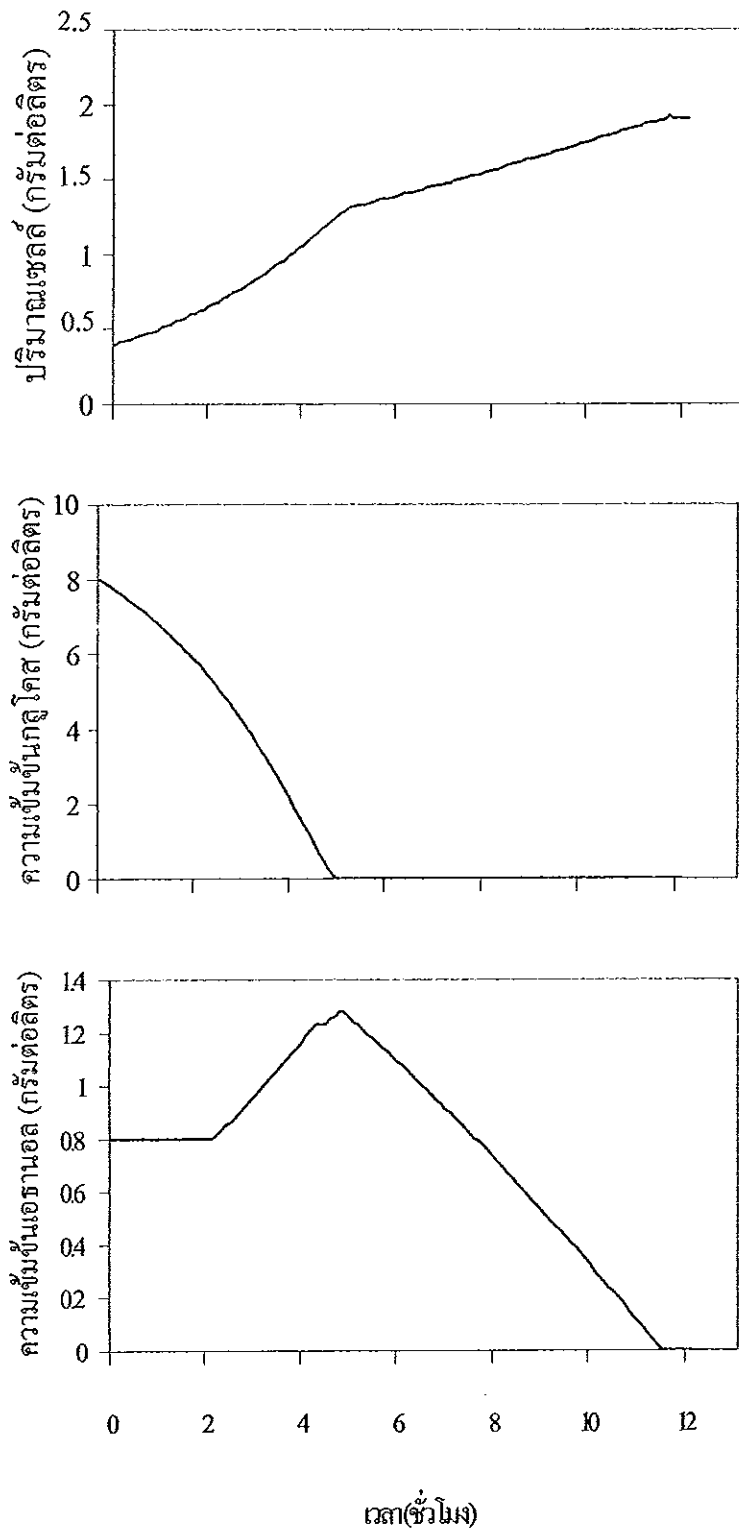
#### 1. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์แบบกะและแบบกึ่งกะ

ทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกะ โดยมีค่าเริ่มต้นในการหมักแสดงดังตารางที่ 3 ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.1 ในช่วงแรกของการหมักเซลล์ใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนและมีการสร้างเอทานอล จนเมื่อเวลาในการหมักผ่านไปประมาณ 5 ชั่วโมง ปริมาณกลูโคสลดลงเกือบหมด เซลล์เริ่มเปลี่ยนไปใช้เอทานอลเป็นแหล่งคาร์บอน ปริมาณเอทานอลจึงค่อยๆลดลงจนหมดในชั่วโมงที่ 12 เซลล์เริ่มหยุดการเจริญเติบโตได้ปริมาณเซลล์ยีสต์ 1.56 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 3 ค่าเริ่มต้นในการหมักที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

ค่าเริ่มต้นในการหมัก	การหมักแบบกะ	การหมักแบบกึ่งกะ
ปริมาณเซลล์ (กรัมต่อลิตร)	0.40	0.40
ความเข้มข้นกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	8.05	8.42
ความเข้มข้นเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	0.82	0.87
ปริมาตรการหมัก (ลิตร)	1.0	1.0

จากการทดลองเลี้ยงยีสต์แบบกะได้ค่าประมาณของพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อนำไปใช้ทำนายค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะ พารามิเตอร์เหล่านี้คือ อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด( $\mu_{max}$ ), ปริมาณเซลล์ที่ได้ต่อการใช้ น้ำตาล(Y), อัตราการเกิดเอทานอลต่อปริมาณน้ำตาล( $Y_{e/s}$ ), อัตราการเกิดเซลล์ต่อปริมาณเอทานอล( $Y_{x/e}$ ) ค่าที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4 (การคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข) นอกจากนี้พารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์แล้วยังนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าประมาณของอัตราการเติมอาหารในการเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ



ภาพที่ 4.1 ผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกะ

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณ ได้จากการทดลองเลี้ยงยีสต์แบบกะและกึ่งกะ

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ คำนวณได้จากการทดลอง	การหมักแบบกะ	การหมักแบบ กึ่งกะ	ค่าที่ใช้ในแบบจำลอง เชิงคณิตศาสตร์
$\mu$ (ต่อชั่วโมง)	0.10-0.14	0.22-0.30	0.25
Y (กรัมต่อกรัม)	0.06-0.10	0.13-0.20	0.12
$Y_{e/s}$ (กรัมต่อกรัม)	0.05-0.27	0.07-0.24	0.12
$Y_{x/c}$ (กรัมต่อกรัม)	0.21-1.23	0.16-1.17	0.48

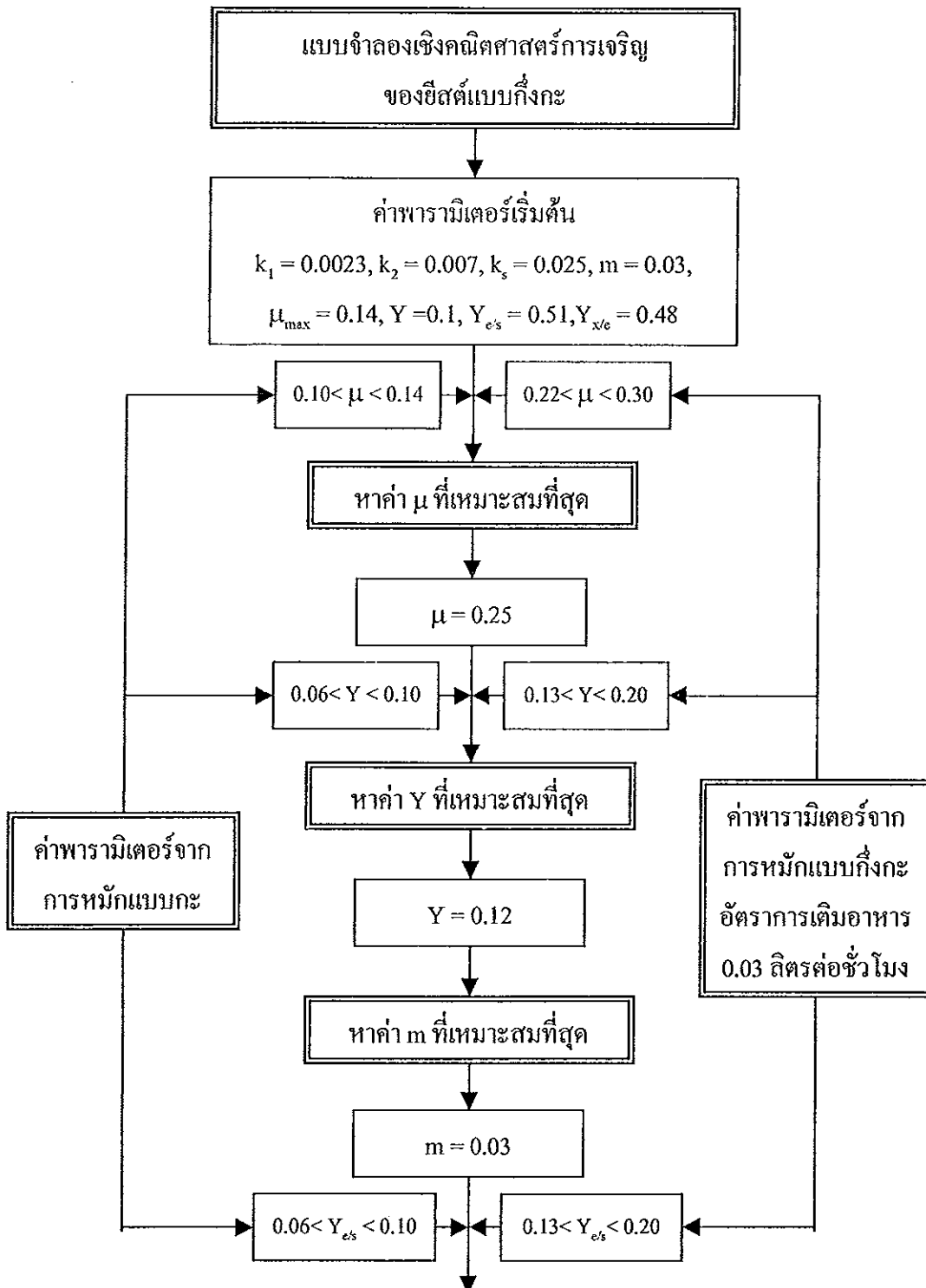
จากการทดลองเลี้ยงยีสต์แบบกะได้ปริมาณเซลล์ 1.56 กรัมต่อลิตร ส่วนปริมาณเซลล์ที่ได้ในการเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะมีมากกว่าการเลี้ยงยีสต์แบบกะเนื่องจากในการเลี้ยงยีสต์แบบกะสารอาหารที่ใช้ในการเจริญเติบโตมีปริมาณจำกัดและมีการให้ปริมาณกลูโคสปริมาณมากในช่วงแรกทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญจากเอทานอลที่สร้างขึ้นในช่วงที่มีปริมาณสารอาหารมากเกินความต้องการ ในการเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะจึงคำนวณอัตราการเติมอาหาร (สมการที่ 2) โดยกำหนดปริมาณเซลล์อยู่ในช่วง 5-7 กรัมต่อลิตร เพื่อให้ปริมาณอาหารที่จะให้แก่เซลล์มีปริมาณเพียงพอ อัตราการเติมอาหารที่คำนวณได้อยู่ในช่วงประมาณ 0.03-0.05 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อความเข้มข้นของกลูโคสที่เติมเท่ากับ 200 กรัมต่อลิตร

จากบทที่ 3 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการจำลองสถานการณ์คือแบบจำลองที่ 5 มาใช้ในการอธิบายผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณแบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกได้แก่  $\mu_{max}$ , Y,  $Y_{e/s}$  และ  $Y_{x/c}$  เป็นพารามิเตอร์ที่คำนวณจากผลการทดลอง นำค่าประมาณของพารามิเตอร์กลุ่มนี้ที่ได้จากการทดลองเลี้ยงยีสต์แบบกะมาใช้ในการจำลองสถานการณ์การเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะ กลุ่มที่ 2 ได้แก่  $k_1$  (associate inhibitor product),  $k_2$  (growth associate inhibitor product),  $k_s$  (saturation constant) และ  $m$  (respiration constant) พารามิเตอร์ในกลุ่มนี้ประมาณค่าขึ้นเพื่อใช้ในการปรับค่าของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อให้ผลการจำลองสถานการณ์สอดคล้องกับผลการทดลอง ในงานวิจัยนี้นำค่าพารามิเตอร์ของกลุ่มนี้จากงานวิจัยของ

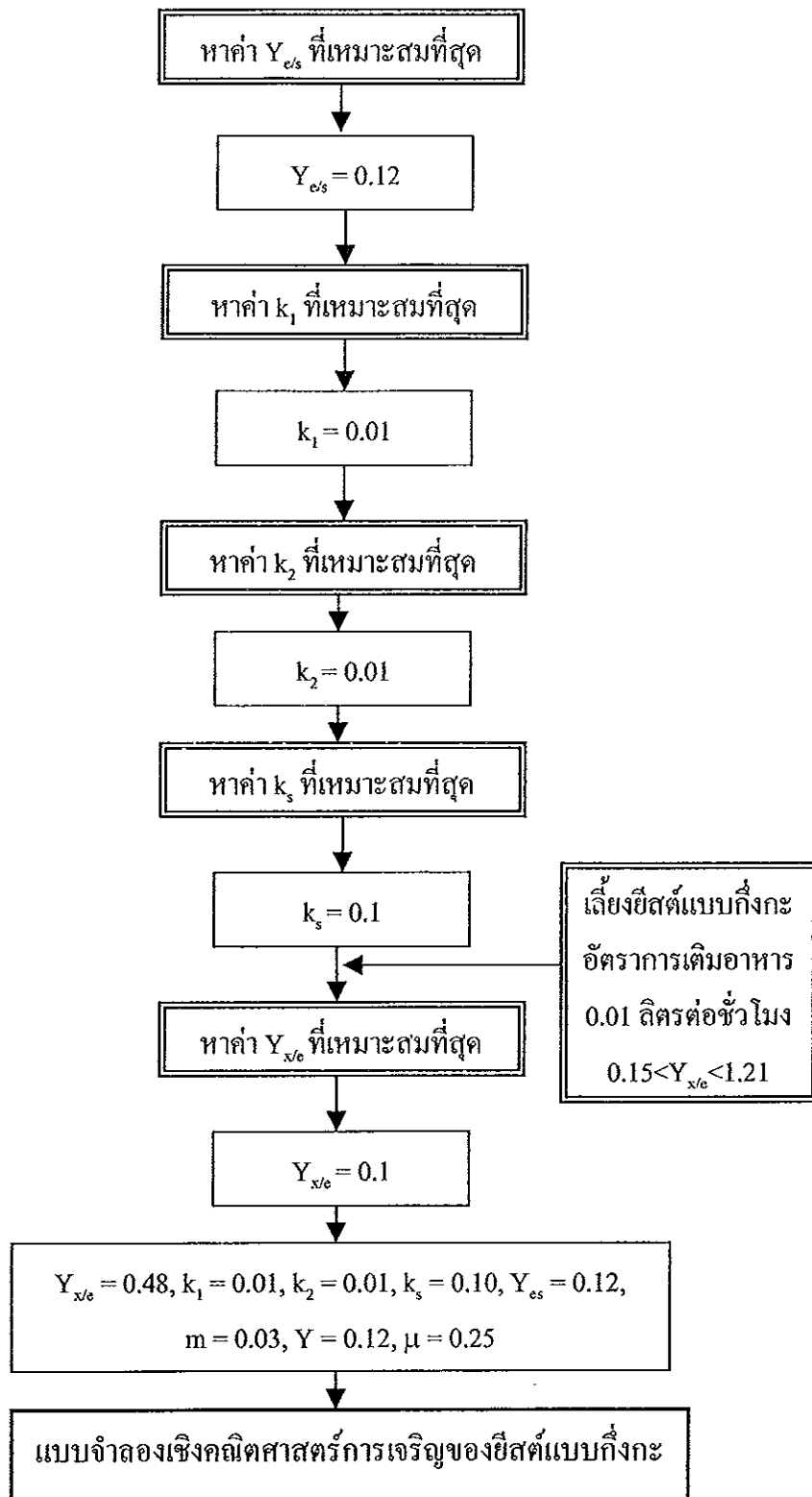
Takamatsu และคณะ (1995) มาใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการปรับค่าพารามิเตอร์ในการจำลองสถานการณ์การหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ

ทดลองเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะโดยเติมอาหารเมื่อระดับปริมาณกลูโคสในถังหมักลดลงถึงระดับประมาณ 2 กรัมต่อลิตร ด้วยอัตราการที่ 0.03 ลิตรต่อชั่วโมง ค่าเริ่มต้นในการหมักแสดงดังตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4 นำผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะมาเทียบเคียงกับแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เมื่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่  $k_1 = 0.0023$ ,  $k_2 = 0.007$ ,  $k_s = 0.025$ ,  $m = 0.03$ ,  $\mu_{\max} = 0.14$ ,  $Y = 0.1$ ,  $Y_{cs} = 0.51$  และ  $Y_{xe} = 0.48$  ผลการเปรียบเทียบพบว่าผลจากการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ยังไม่สอดคล้องกับผลการทดลองจึงต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการปรับค่าพารามิเตอร์นอกจากจะต้องทำให้แบบจำลองสอดคล้องกับผลการทดลองแล้วค่าพารามิเตอร์ที่ได้ยังต้องมีความสอดคล้องกับสถานะจริงในการหมักด้วย ดังนั้นในการเริ่มต้นการปรับค่าพารามิเตอร์จะเป็นการปรับค่าหยาบๆ จากพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโพรไฟล์ในแบบจำลองสูงสุดก่อน จากนั้นจะเป็นการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เป็นการปรับค่าละเอียดเพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้องมากขึ้น ขั้นตอนการปรับพารามิเตอร์แสดงดังภาพที่ 4.2

จากผลการทดลองเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะ ปริมาณกลูโคสที่เหลือในน้ำหมักมีค่ามากกว่า 0.28 กรัมต่อลิตร ตลอดระยะเวลาการหมัก ดังนั้นจากแบบจำลอง (สมการที่ 1) ได้ว่า  $a_1 = 0$  และ  $a_2 = 1$  เมื่อ  $a_1 = 0$  ดังนั้นการปรับค่า  $Y_{xe}$  จึงไม่มีผลต่อแบบจำลอง ดังนั้นพารามิเตอร์ที่จะต้องมีการปรับค่าในแบบจำลองได้แก่  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_s$ ,  $m$ ,  $\mu_{\max}$ ,  $Y$  และ  $Y_{cs}$  ในสมการ 1ก จึงเหลือพารามิเตอร์  $\mu_{\max}$  ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเซลล์เพียงค่าเดียว การคำนวณค่าอัตราการเจริญจำเพาะจากผลการทดลองได้ว่าอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดอยู่ในช่วง 0.22-0.30 ต่อชั่วโมง ปริมาณเซลล์ที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าแบบจำลองประมาณสองเท่าจึงมีการปรับค่า  $\mu_{\max}$  ตั้งแต่ 0.20, 0.25 และ 0.30 ผลการปรับค่า  $\mu_{\max}$  พบว่าเมื่อค่า  $\mu_{\max}$  เท่ากับ 0.25 ทำให้ปริมาณเซลล์ในแบบจำลองสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด แต่ปริมาณกลูโคสและเอทานอลในแบบจำลองยังไม่สอดคล้องกับผลการทดลองจึงต้องปรับค่าพารามิเตอร์อื่น โดยเริ่มจากการปรับค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อปริมาณกลูโคส เนื่องจากปริมาณการเกิดเอทานอลขึ้นอยู่กับปริมาณกลูโคสเป็นหลัก



ภาพที่ 4.2 ขั้นตอนการปรับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะ



ภาพที่ 4.2 (ต่อ)



จากสมการ 1x พารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อปริมาณกลูโคสได้แก่  $m$ ,  $\mu_{max}$ ,  $Y$  และ  $Y_{e/s}$  เลือกปรับ  $Y$  เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการปรับค่ากลูโคสซึ่งขึ้นกับปริมาณเซลล์มากที่สุด การปรับโพรไฟล์ของกลูโคสนี้จะไม่เลือกปรับ  $\mu_{max}$  อีก เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเซลล์แล้ว เมื่อพิจารณาพบว่าปริมาณกลูโคสที่เหลือในน้ำหมักหลังจากการปรับค่า  $\mu_{max}$  มีค่าต่ำกว่าผลการทดลองจึงต้องมีการปรับผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาลให้มีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้จากผลการทดลองนั้น คือ ค่า  $Y$  ที่คำนวณได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.13-0.20 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าเริ่มต้นในการจำลองสถานการณ์ ผลการปรับค่า  $Y$  พบว่าเมื่อปรับ  $Y$  ให้มีค่ามากขึ้น ปริมาณกลูโคสในแบบจำลองก็จะใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้น แต่การปรับค่าพารามิเตอร์ต้องคำนึงถึงความถูกต้องไปพร้อมกับความเหมาะสมกับสภาวะการหมักจริงด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการปรับพารามิเตอร์อื่นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกลูโคสต่อไป ในการปรับ  $Y$  เลือกใช้  $Y$  เท่ากับ 0.12 เนื่องจากเป็นค่ายังคงทำให้ปริมาณเซลล์จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณเอทานอลมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอทานอล (สมการ 1c) มีผลขึ้นกับปริมาณกลูโคสโดยตรง

ภาพที่ 4.3 แสดงผลการปรับพารามิเตอร์  $m$  จากการปรับค่า 3 ระดับ คือ 0.005, 0.010 และ 0.030 พบว่าการปรับค่า  $m$  ไม่มีความแตกต่างกันจึงเลือก  $m$  เท่ากับ 0.030 เพื่อให้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Takamatsu และคณะ (1995)

จากผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกะพบว่า  $Y_{e/s}$  มีค่าสูงสุดถึง 0.27 แต่ในการเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะได้ค่าอยู่ในช่วง 0.07-0.24 เนื่องจากในการเลี้ยงยีสต์แบบกะมีการเติมปริมาณกลูโคสมากในช่วงแรก ดังนั้นจะมีการสร้างเอทานอลมากกว่าในการเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะ ผลการปรับพารามิเตอร์  $Y_{e/s}$  พบว่าผลการปรับค่าไม่แตกต่างมากนัก จากการทดลองเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะ  $Y_{e/s}$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.12 ดังนั้นจึงเลือกค่า  $Y_{e/s}$  เท่ากับ 0.12 เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์มีความสอดคล้องกับสภาวะจริงมากที่สุด

จากการหาช่วงพารามิเตอร์  $m$ ,  $\mu_{max}$ ,  $Y$  และ  $Y_{e/s}$  ที่เหมาะสม พบว่าโพรไฟล์ปริมาณเซลล์จากแบบจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง ส่วนโพรไฟล์ของปริมาณกลูโคสและเอทานอลยังต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้มีโพรไฟล์ที่สอดคล้องกับการทดลอง โดย

ปรับพารามิเตอร์  $k_1$ ,  $k_2$  และ  $k_s$  โดยที่พารามิเตอร์ทั้งสามมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับทั้ง ปริมาณเซลล์ ปริมาณกลูโคส และปริมาณเอทานอล

การปรับค่า  $k_1$  และ  $k_2$  ในสมการ 1c จะมีผลต่อการเพิ่มหรือลดการยับยั้งการเจริญของเซลล์ โดยที่  $k_1$  จะปรับอัตราการยับยั้งการเจริญในพจน์ของปริมาณเซลล์ ส่วน  $k_2$  จะปรับอัตราการยับยั้งการเจริญในพจน์ของปริมาณเซลล์ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการเจริญจำเพาะด้วย เมื่อปรับค่า  $k_1$  และ  $k_2$  เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการยับยั้งการเจริญมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อปรับค่า  $k_1$  และ  $k_2$  ลงลงจะทำให้อัตราการยับยั้งการเจริญมีค่าลดลงตามด้วย ซึ่งการยับยั้งการเจริญนี้มีผลเกี่ยวเนื่องกับอัตราการเจริญจำเพาะและอัตราการเจริญจำเพาะเมื่อเกิดการสะสมเอทานอล เมื่อการยับยั้งการเจริญมีค่ามากขึ้นจะทำให้อัตราการเจริญจำเพาะและอัตราการเจริญจำเพาะเมื่อเกิดการสะสมเอทานอลมีค่าน้อยลงเป็นเหตุให้ปริมาณเซลล์ลดน้อยลง ปริมาณเอทานอลเพิ่มมากขึ้น และปริมาณกลูโคสที่ใช้ไปลดน้อยลง ในการปรับพารามิเตอร์ทั้งสองนี้จึงเป็นการปรับให้ค่าพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นเพื่อให้ปริมาณกลูโคสและปริมาณเอทานอลที่เหลือในน้ำหมักมีค่ามากขึ้น ผลการปรับค่า  $k_1$  และ  $k_2$  แสดงดังภาพที่ 4.4-4.5

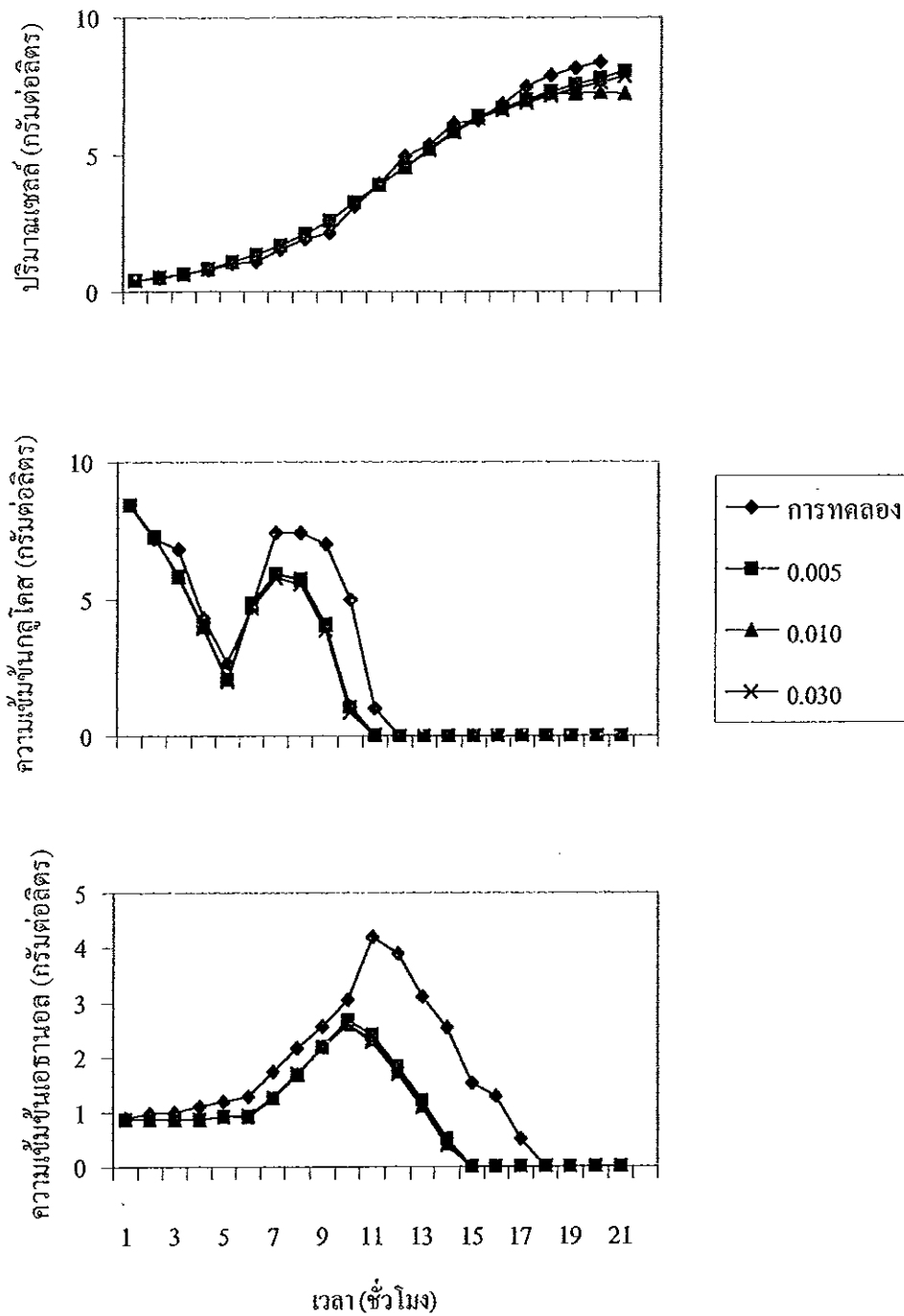
ส่วนการปรับ  $k_s$  (saturation constant) มีผลต่ออัตราการเจริญจำเพาะ เมื่อปรับ  $k_s$  มากขึ้นทำให้อัตราการเจริญจำเพาะมีค่าลดลงตามและเมื่อปรับ  $k_s$  ลดลงทำให้อัตราการเจริญจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการปรับ  $k_1$  และ  $k_2$  นั่นคือเมื่ออัตราการเจริญจำเพาะลดลงจะเป็นเหตุให้ปริมาณเซลล์ลดน้อยลง ปริมาณเอทานอลเพิ่มมากขึ้น และปริมาณกลูโคสที่ใช้ไปลดน้อยลง ดังนั้นจึงปรับค่า  $k_s$  ให้มีค่ามากขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.6

จากการปรับค่าพารามิเตอร์ทั้งสาม เมื่อ  $k_1 = 0.01$ ,  $k_2 = 0.01$  และ  $k_s = 0.10$  โพรไฟล์การเปลี่ยนแปลงเซลล์ กลูโคส และเอทานอลของแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด

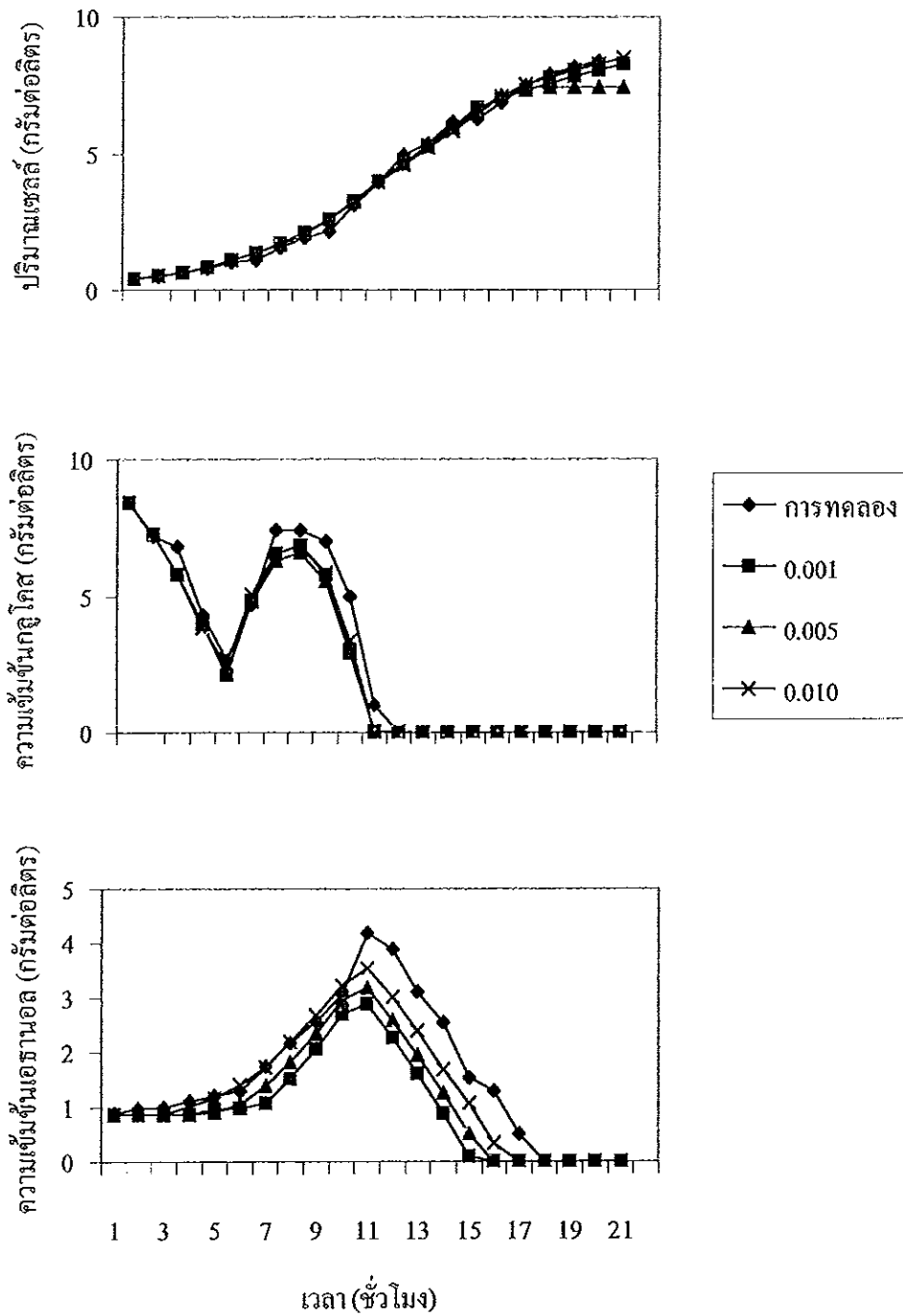
เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์  $Y_{x/e}$  จึงทำการทดลองเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะโดยรักษาระดับปริมาณกลูโคสในถังหมักให้น้อยกว่า 0.28 กรัมต่อลิตร โดยให้อาหารในอัตราคงที่เท่ากับ 0.01 ลิตรต่อชั่วโมง ค่าเริ่มต้นในการหมักเช่นเดียวกับการหมักยีสต์แบบกึ่งกะในช่วงแรก ซึ่งแสดงในตารางที่ 3 นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองการเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการปรับค่าในการทดลองที่ผ่านมา พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณมีค่าดังนี้  $k_1 = 0.01$ ,  $k_2 = 0.01$ ,  $k_s = 0.10$ ,  $m = 0.03$ ,  $\mu_{\max} = 0.25$ ,

$Y = 0.12$  และ  $Y_{e/s} = 0.12$  ส่วนค่า  $Y_{x/e}$  ที่คำนวณได้จากผลการทดลองพบว่าอยู่ในช่วง 0.15-1.21 ใช้ค่าเฉลี่ยประมาณ 0.48 ในการจำลองสถานการณ์ ผลการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 4.7 พบว่าโพรไฟล์ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นค่า  $Y_{x/e} = 0.48$  จึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการจำลองสถานการณ์การเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะและมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Takamatsu และคณะ (1995) อีกด้วย

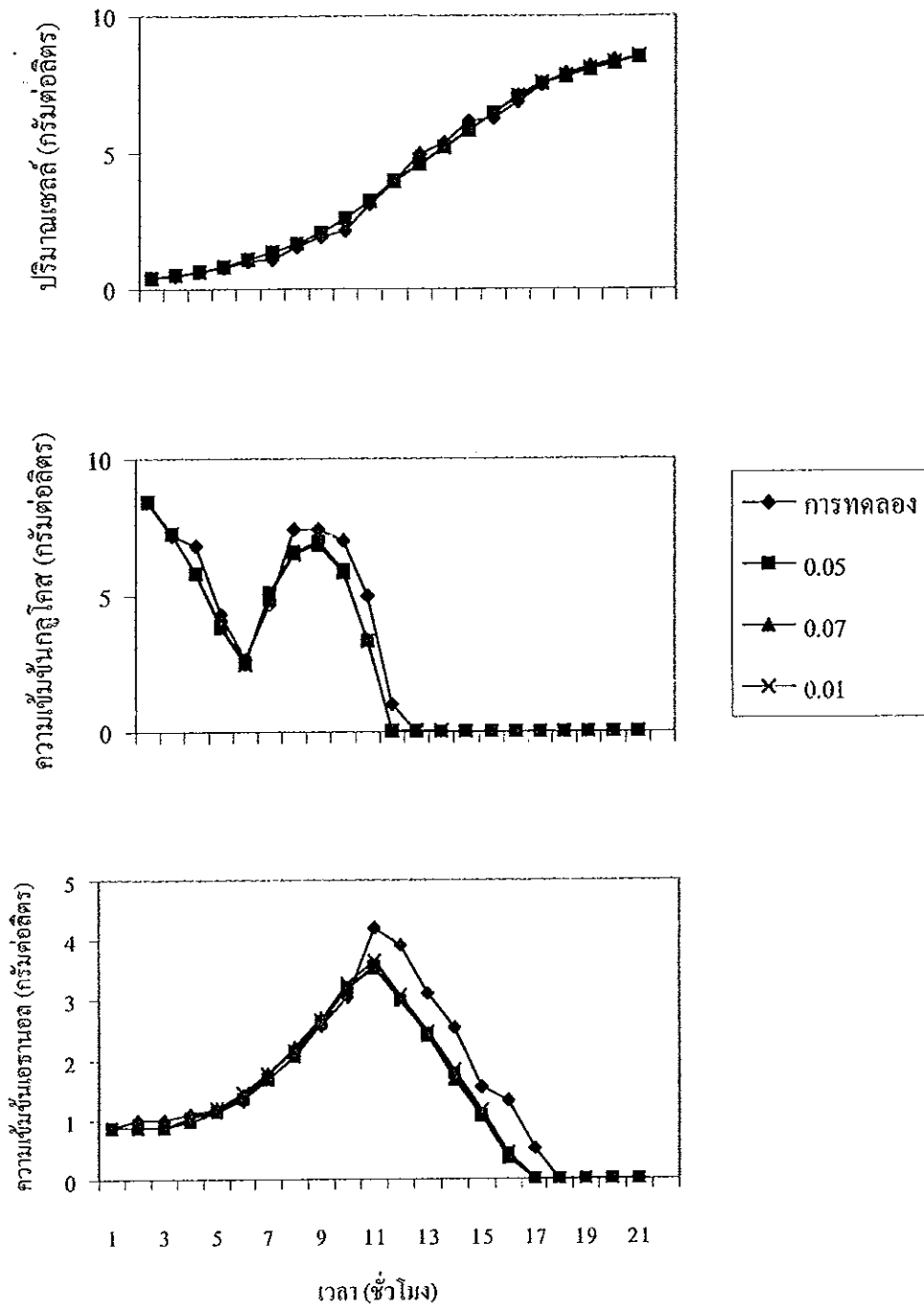
จากการปรับค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดพบว่าเมื่อ  $k_1 = 0.01$ ,  $k_2 = 0.01$ ,  $k_s = 0.1$ ,  $m = 0.03$ ,  $\mu_{\max} = 0.25$ ,  $Y = 0.12$ ,  $Y_{e/s} = 0.12$  และ  $Y_{x/e} = 0.48$  ทำให้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะมีโพรไฟล์สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด



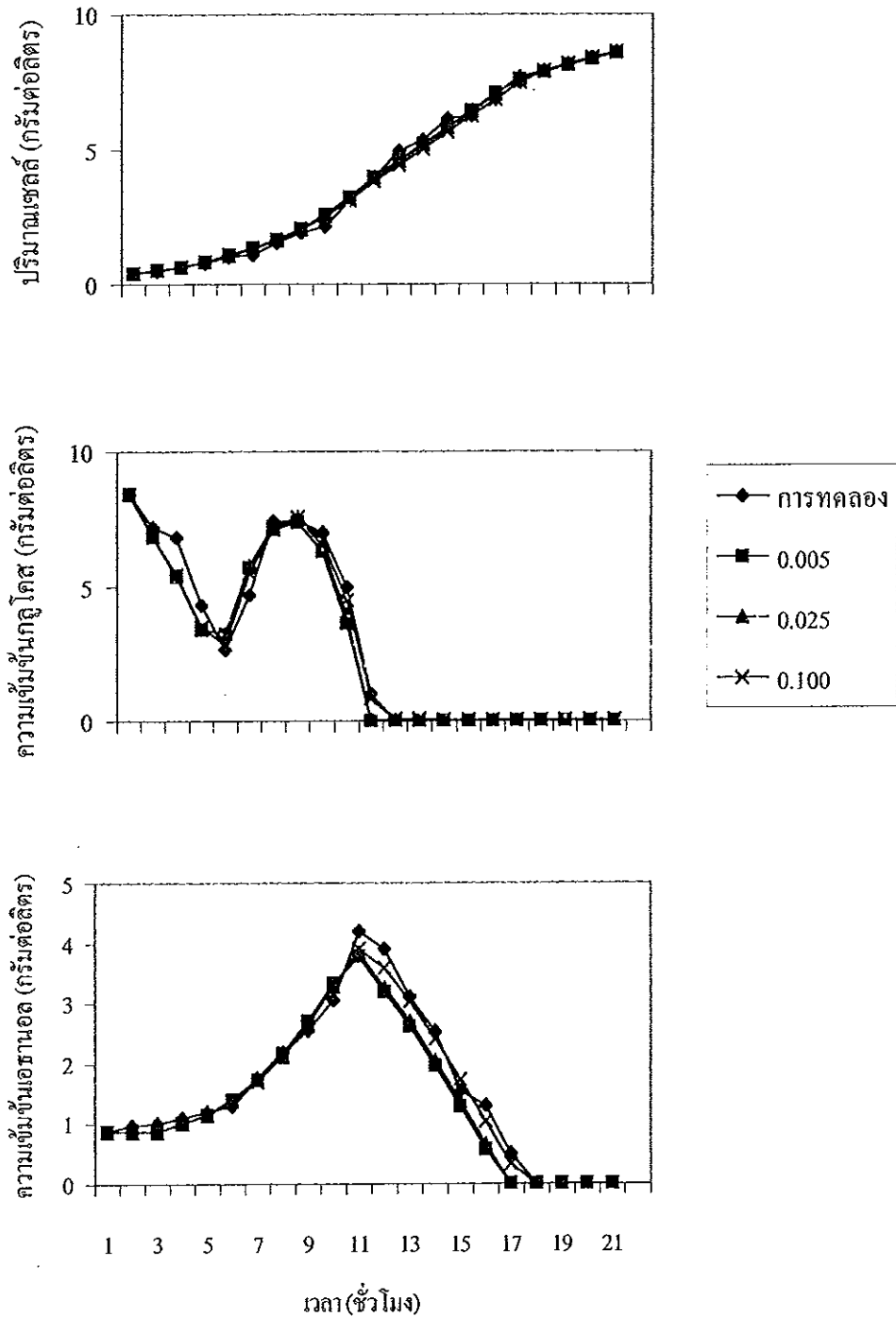
ภาพที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขั้วนมปังแบบกึ่งกะกับผลจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เมื่อปรับ  $m$  3 ระดับ คือ 0.005, 0.010 และ 0.030



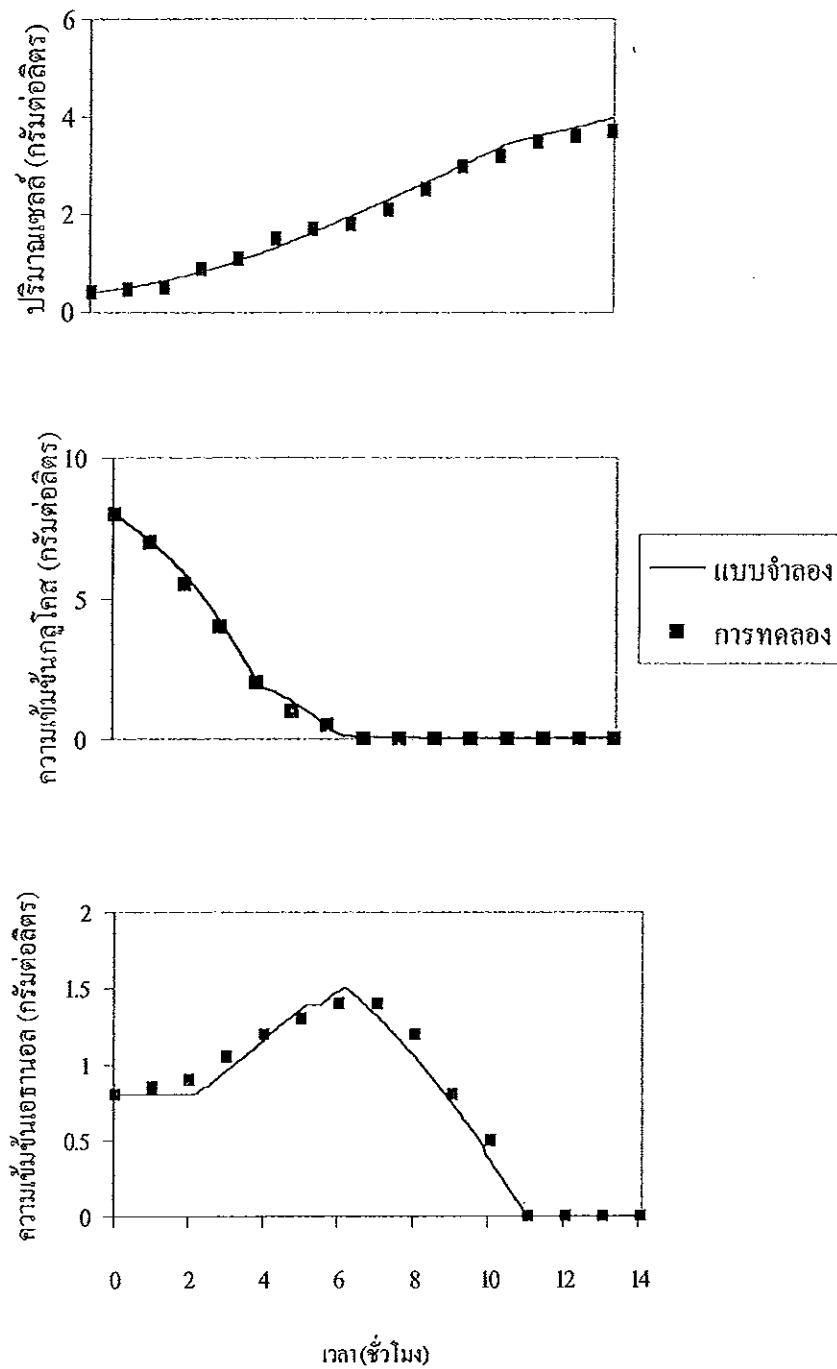
ภาพที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะกับผลจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เมื่อปรับ  $k_1$  3 ระดับ คือ 0.001 , 0.005 และ 0.010



ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะกับผลจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เมื่อปรับ  $k_2$  3 ระดับ คือ 0.005, 0.007 และ 0.010



ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขุ่นมึนแบบกึ่งกะกับผลจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เมื่อปรับ  $k_s$  3 ระดับ คือ 0.005, 0.025 และ 0.100



ภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลการเลี้ยงยีสต์แบบกึ่งกะกับผลจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์  
 เมื่อ  $k_1 = 0.01$ ,  $k_2 = 0.01$ ,  $k_s = 0.10$ ,  $m = 0.03$ ,  $\mu_{\max} = 0.25$ ,  $Y = 0.12$ ,  $Y_{e's} = 0.12$   
 และ  $Y_{x/e} = 0.48$



## 2. การวัดทางอ้อมโดยใช้สมการสโตยคิโอเมตริก

นำสมการสโตยคิโอเมตริก (สมการ 6-7) มาใช้ในการวัดโดยทางอ้อมเพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักต่อไป โดยทำนายค่าความเข้มข้นของกลูโคสและเอธานอลจากการวัดค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และปริมาณเซลล์ ทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะโดยเติมอาหารเมื่อปริมาณกลูโคสลดลงถึงระดับประมาณ 2 กรัมต่อลิตร ด้วยอัตราคงที่ 0.03 ลิตรต่อชั่วโมง ค่าเริ่มต้นในการหมักคือ ปริมาณเซลล์ยีสต์ 0.40 กรัมต่อลิตร กลูโคส 8.42 กรัมต่อลิตร เอธานอล 0.87 กรัมต่อลิตร และปริมาตรน้ำหมักเริ่มต้น 1 ลิตร ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.8 นำค่าที่คำนวณได้จากสมการสโตยคิโอเมตริกมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ พบว่าค่าความเข้มข้นของเอธานอลจากการทดลองมีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากสมการสโตยคิโอเมตริก แสดงดังภาพที่ 4.9 ส่วนความเข้มข้นของกลูโคสจากการคำนวณมีความแตกต่างกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง อาจเป็นสาเหตุเนื่องมาจาก

1. กระบวนการหมักทางชีวภาพของประกอบของเซลล์อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ แต่ในการคำนวณค่าใช้ของประกอบคงที่ตลอดระยะเวลาหมัก
2. การคำนวณจากสมการสโตยคิโอเมตริกเป็นการคำนวณหน่วยเป็น โมล ค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และปริมาณเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณจะต้องเป็นค่าที่มีความถูกต้องและแม่นยำ ความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับการทดลองอาจเกิดจากผลการวัดปริมาณทั้งสามมีความคลาดเคลื่อนบ้าง
3. วิธีวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสอาจมีความคลาดเคลื่อน
4. อาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่าปริมาณเซลล์จากการวัดปริมาณเซลล์แบบออนไลน์ ซึ่งใช้วิธีการวัดค่าดูดกลืนแสง (ความสัมพันธ์แสดงในภาคผนวก ก)

อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่วัดโดยตรงเมื่อเทียบกับการวัดทางอ้อมมีความสัมพันธ์กันอย่างมีระบบชัดเจนดังภาพที่ 4.10 ในแง่ของการนำมาใช้งานจึงสามารถทำได้ง่ายๆ โดยการปรับสมการการคำนวณทางอ้อมให้สอดคล้องกับผลการวัดโดยตรง

สมการสโตยคิโอเมตริกการเจริญของยีสต์ก่อนการปรับค่า ในการทดลองหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ เมื่อวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจนและปริมาณเซลล์

ทุก 15 นาที เพื่อนำไปคำนวณหาค่าปริมาณกลูโคสและเอธานอล ซึ่งค่าทั้งสองที่คำนวณได้นี้จะเป็นปริมาณที่เซลล์ได้ใช้ไปหรือสร้างขึ้นในช่วงเวลาที่วัดนั้น

สมการการคำนวณค่าความเข้มข้นของเอธานอล (g) และกลูโคส (a) จากสมการสโตยคิโอเมตริก มีหน่วยเป็น โมล แสดงได้ดังนี้

$$g = f - b - 0.475d \quad (6)$$

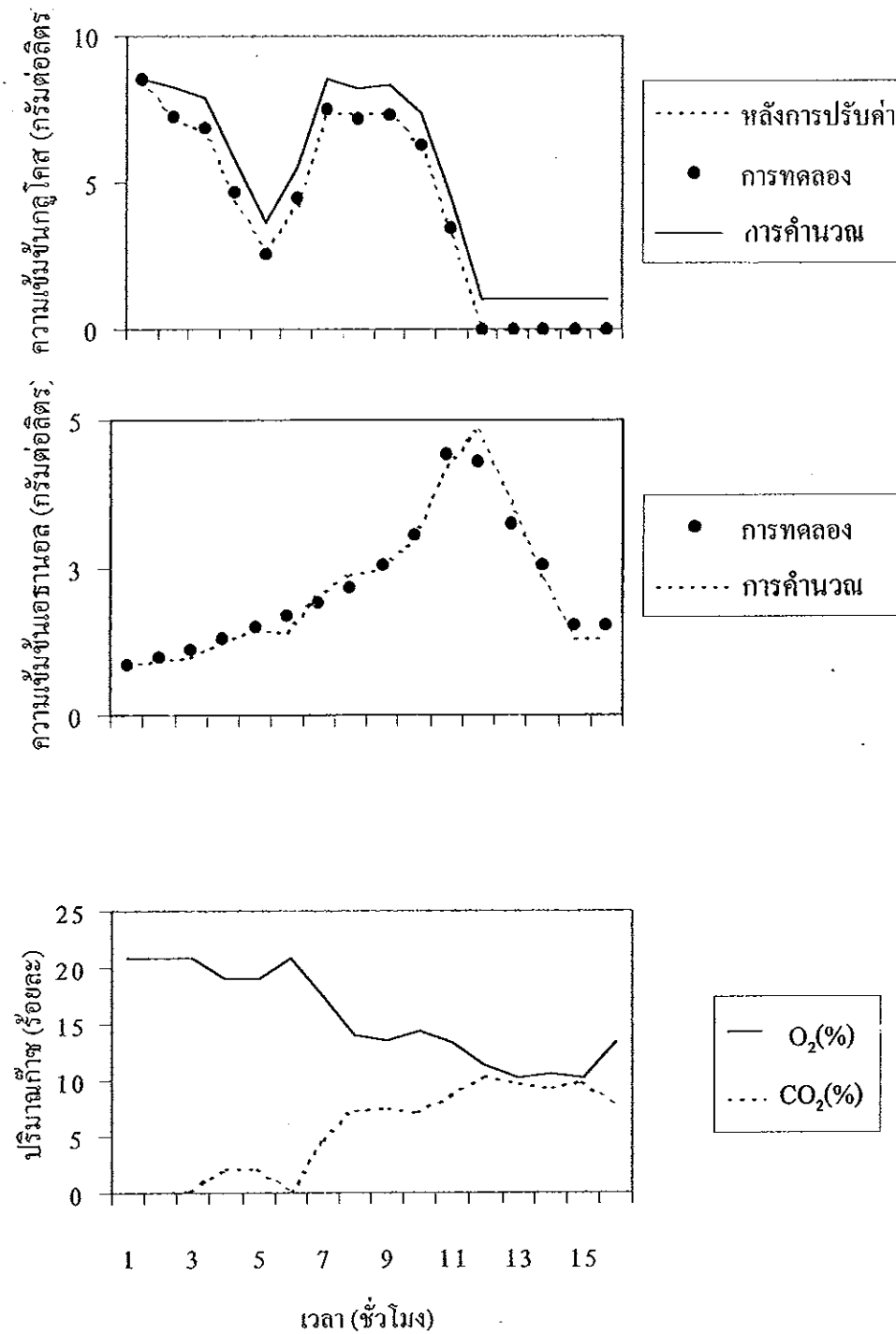
$$a = d + 0.166f + 0.33g \quad (7)$$

จากภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้จริงของปริมาณกลูโคสและค่าที่คำนวณได้แสดงดังสมการที่ 10 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงปริมาณของกลูโคสที่เหลือในถังหมักในขณะนั้น มีหน่วยเป็นกรัมต่อลิตร

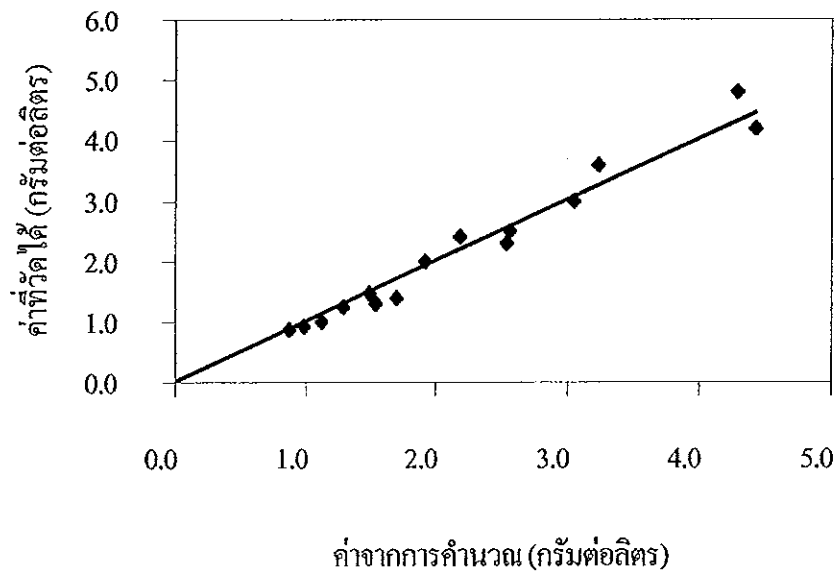
$$g_1 = 1.0499 \times g_2 - 1.3485 \quad (10)$$

เมื่อ  $g_1$  คือ ค่าปริมาณกลูโคสที่วัดได้จริง (กรัมต่อลิตร)

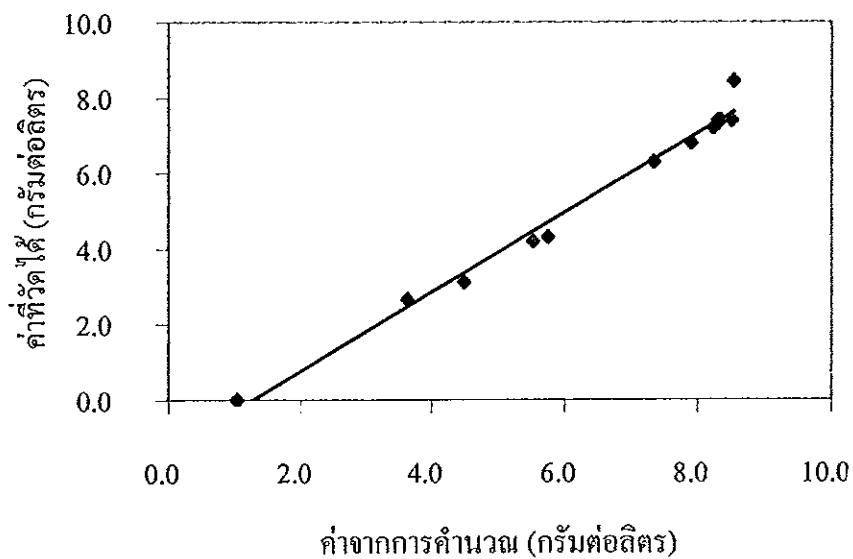
$g_2$  คือ ค่าปริมาณกลูโคสที่คำนวณได้ (กรัมต่อลิตร)



ภาพที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะกับการคำนวณจากสมการสโตยคิโอเมตริก



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของปริมาณเอชานอลจากการคำนวณกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของปริมาณกลูโคสจากการคำนวณกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง

### 3. การจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะด้วยพีชชี

จำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักโดยนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ การเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะที่ได้พัฒนาขึ้นมาทดสอบการควบคุมกระบวนการหมักแบบพีชชีโดยใช้กฎการควบคุมพีชชีและฟังก์ชันสมาชิกจากบทที่ 3 จุดมุ่งหมายของการควบคุมเพื่อให้สามารถควบคุมกระบวนการหมักให้ระดับกลูโคสและเอทานอลในน้ำหมักมีความเข้มข้นอยู่ในระดับที่ต้องการ โดยให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด การหมักต้องให้ปริมาณเซลล์มาก และให้ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้น้ำตาลสูง จากการพัฒนาในบทที่ 3 แบ่งการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบพีชชี ดังนี้

1. กฎควบคุมพีชชี แบ่งเป็น 2 ชุด (แสดงดังตารางที่ 2)
2. ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของกลูโคส จุดอ้างอิงมี 2 ระดับ คือ 0.15 และ 0.20 กรัมต่อลิตร
3. ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตของเอทานอล จุดอ้างอิงมี 2 ระดับ คือ 0.5 และ 2.0 กรัมต่อลิตร

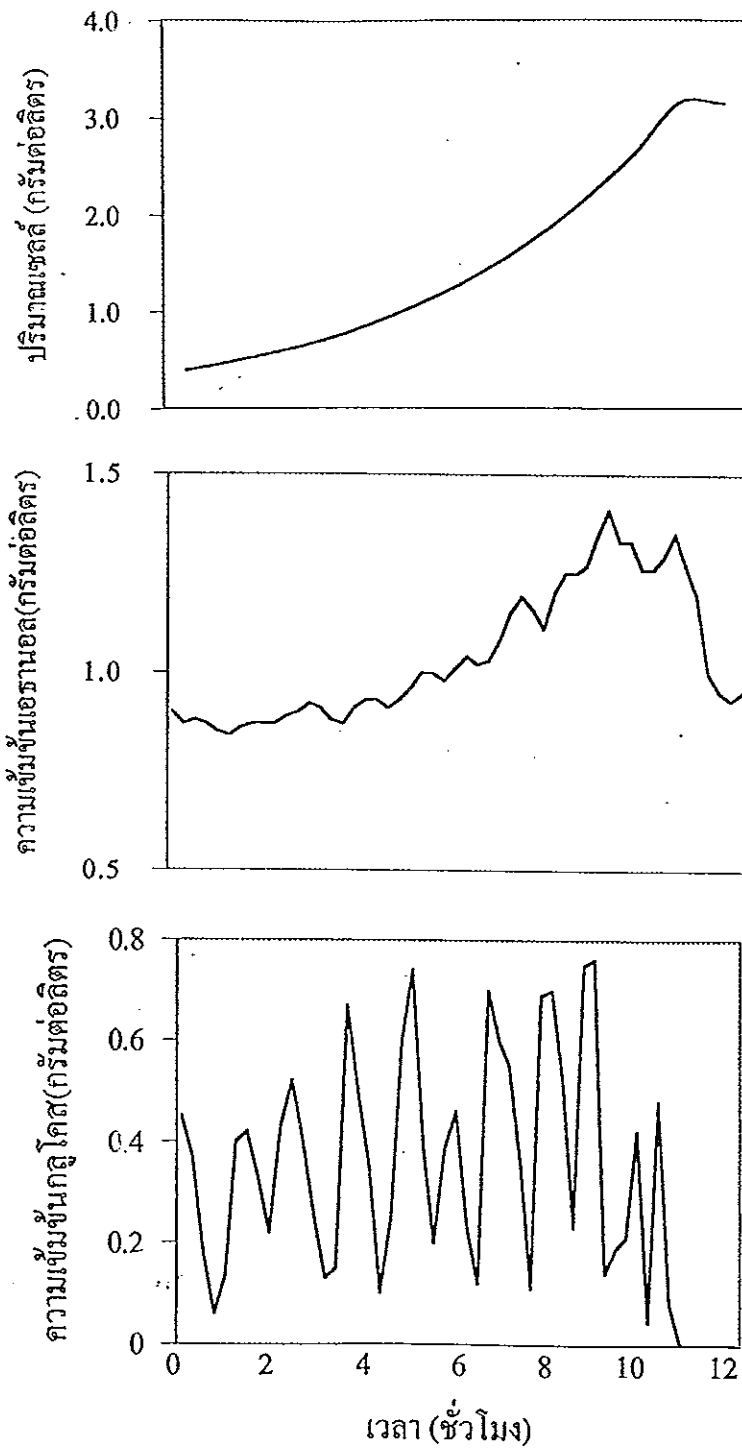
จากกฎควบคุมกระบวนการหมักและจุดอ้างอิงของอินพุตทั้งหมด สามารถแบ่งเป็นการควบคุมเพื่อนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังได้เป็น 8 แบบ

จำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง โดยมีค่าเริ่มต้นดังนี้ คือ ปริมาณเซลล์ 0.40 กรัมต่อลิตร เอทานอล 0.80 กรัมต่อลิตร กลูโคส 0.45 กรัมต่อลิตร และปริมาตรน้ำหมักเริ่มต้น 1 ลิตร ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังโดยใช้กฎควบคุมชุดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5 การควบคุมแบบที่ 8 โดยการใช้กฎควบคุมแบบพีชชีชุดที่ 2 และตั้งจุดอ้างอิงในการควบคุมปริมาณกลูโคสและเอทานอลที่ 0.2 กรัมต่อลิตร และ 2 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ให้ปริมาณเซลล์ยีสต์สูงถึง 3.31 กรัมต่อลิตร และให้ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้น้ำตาลสูงสุดเท่ากับ 0.19 เมื่อเทียบกับการใช้กฎควบคุมชุดอื่น ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังโดยใช้การควบคุมแบบที่ 8 แสดงดังภาพที่ 4.11 อัตราการเติมอาหารแสดงดังภาพที่ 4.12 นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาระดับปริมาณกลูโคสและเอทานอลที่ต้องการควบคุมในน้ำหมัก พบว่าในการควบคุมกระบวนการหมักในชุดนี้ สามารถควบคุมความเข้มข้นของกลูโคสอยู่ในระดับ  $0.39 \pm 0.34$  กรัมต่อลิตร และควบคุมปริมาณเอทานอลอยู่ในระดับ  $1.13 \pm 0.28$  กรัมต่อลิตร

จากการตั้งจุดอ้างอิงของกลูโคสและเอธานอลไว้ที่ 0.2 กรัมต่อลิตรและ 2 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำผลการควบคุมมาพิจารณาประกอบกันโดยรวมจะเห็นว่า การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังโดยใช้การควบคุมแบบที่ 8 ให้ผลการควบคุมในทางทฤษฎีที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด จากนั้นนำการควบคุมแบบดังกล่าวไปใช้ในการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะจริง

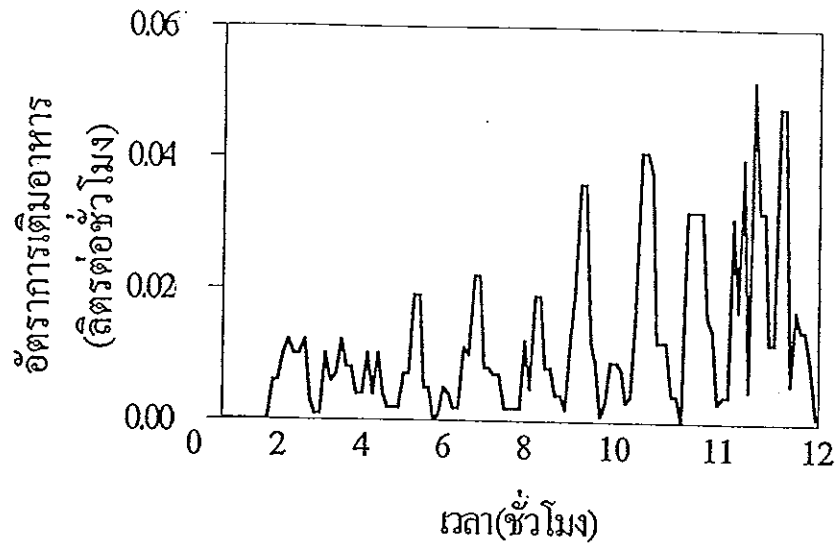
ตารางที่ 5 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ เมื่อใช้การควบคุมแบบต่างๆ

การควบคุม แบบที่	กฎควบคุม	ค่าอ้างอิงกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ค่าอ้างอิงเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณเซลล์ที่ได้ (กรัมต่อลิตร)	ผลผลิตเซลล์ที่ได้ ต่อการใช้น้ำตาล	ค่าความคลาด เคลื่อนกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ค่าความคลาด เคลื่อนเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	
1	ชุดที่ 1	0.15	0.5	0.94	0.18	0.25±0.25	0.78±0.06	
2			2.0	3.63	0.11	0.94±0.94	1.41±0.57	
3			0.20	0.5	1.78	0.14	0.25±0.25	0.75±0.16
4				2.0	2.61	0.11	1.07±1.02	1.43±0.58
5	ชุดที่ 2	0.15	0.5	0.97	0.19	0.19±0.19	0.74±0.14	
6			2.0	1.33	0.15	0.33±0.31	0.79±0.07	
7			0.20	0.5	0.91	0.19	0.21±0.21	0.78±0.06
8				2.0	3.31	0.19	0.39±0.34	1.13±0.28



ภาพที่ 4.11 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นมัวแบบกึ่งกะ  
เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 8 (กฎควบคุมชุดที่ 2 ตั้งค่าจุดอ้างอิงกลูโคสและ  
เอทานอลที่ 0.2 กรัมต่อลิตรและ 2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ)





ภาพที่ 4.12 อัตราการเติมอาหารในผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมัก  
ยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 8

#### 4. การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังด้วยฟัซซี

นำกฎควบคุมฟัซซีและจุดอ้างอิงกลูโคสและเอธานอลของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตที่ได้จากการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยฟัซซีในข้อ 3 มาทำการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ การทดลองแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

1. การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะเมื่อสถานะการเลี้ยงไม่มีปัจจัยรบกวน โดยควบคุมกระบวนการหมักให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสมตลอดระยะเวลาหมักคือควบคุมพีเอชเท่ากับ 4.5 และควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

2. การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะเมื่อสถานะการเลี้ยงมีปัจจัยรบกวน โดยมีการเปลี่ยนแปลงสถานะการหมักคือปรับพีเอชขึ้นลงอยู่ในช่วง 3.5-7.0 และปรับอุณหภูมิขึ้นลงอยู่ในช่วง 20-40 องศาเซลเซียส (โพรไฟล์การเปลี่ยนแปลงพีเอชและอุณหภูมิแสดงดังภาพที่ 2.3)

กรณีที่ 1 การควบคุมกระบวนการหมักโดยใช้ระบบฟัซซี เมื่อไม่มีปัจจัยรบกวน

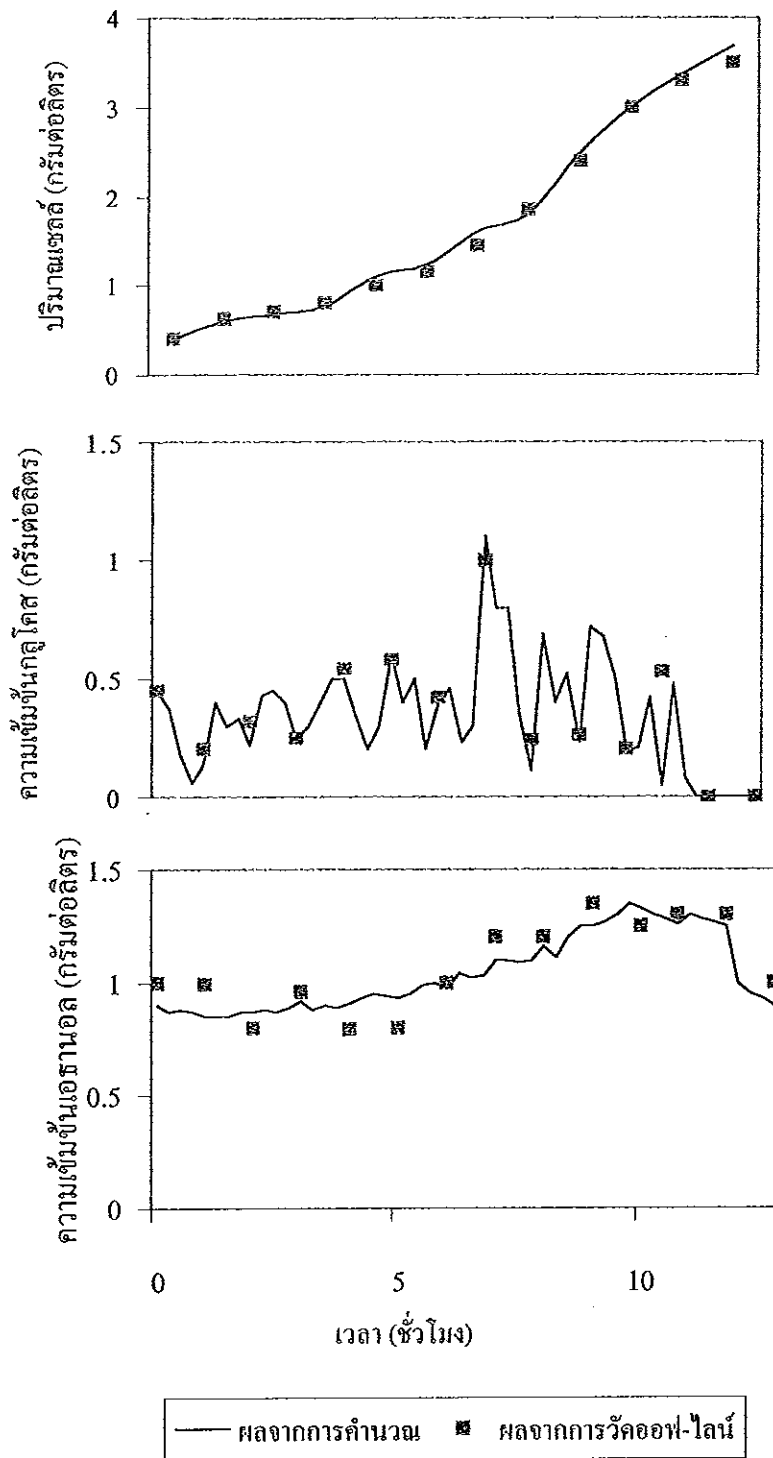
ทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยระบบฟัซซี โดยมีสถานะการหมักเริ่มต้นดังนี้ ปริมาณเซลล์ 0.40 กรัมต่อลิตร กลูโคส 0.45 กรัมต่อลิตร เอธานอล 1 กรัมต่อลิตร และปริมาตรน้ำหมักเริ่มต้น 1 ลิตร ต้องการควบคุมให้ระดับกลูโคสและเอธานอลในน้ำหมักอยู่ในระดับ 0.2 กรัมต่อลิตร และ 2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากการนำตัวอย่างน้ำหมักไปวิเคราะห์ปริมาณเซลล์ ปริมาณกลูโคส และปริมาณเอธานอล (วิธีวิเคราะห์แสดงดังภาคผนวก ข) ทุก 1 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการวัดค่าทางอ้อมจากสมการสโตยคิโอเมตริกที่ได้พัฒนาขึ้น ผลการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 4.13 พบว่าการวัดค่าแบบออฟ-ไลน์ของปริมาณทั้ง 3 ให้ผลที่สอดคล้องกับการคำนวณโดยสมการสโตยคิโอเมตริก โดยเฉพาะปริมาณเซลล์และปริมาณกลูโคสให้ผลที่ใกล้เคียงมาก ส่วนปริมาณเอธานอลถึงแม้จะมีความผิดพลาดบ้างแต่มีแนวโน้มการคำนวณที่ถูกต้องและสอดคล้องกับผลการทดลอง

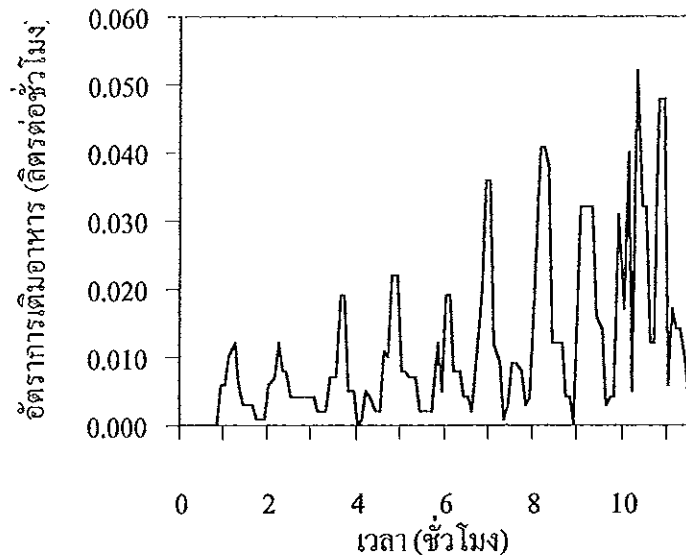
ในการทดลองโปรแกรมการควบคุมจะเริ่มสั่งให้ป้อนทำงานเมื่อระดับความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำหมักลดลงอยู่ในระดับ 0.2 กรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าในชั่วโมงที่ 1 ป้อนจะเริ่มเติมอาหารเข้าสู่ถังหมัก จากภาพที่ 4.14 เห็นว่าการควบคุมแบบฟัซซีมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงกลูโคสและเอธานอลได้ดีเนื่องจากอัตราการให้อาหารมีการ

เพิ่มลดตามความต้องการของเซลล์ได้อย่างรวดเร็ว ในช่วงแรกของการหมักเซลล์ยีสต์ใช้ กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนในช่วงนี้สภาวะการหมักจะเกิดความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ กลูโคสที่เติม ปริมาณเอทานอลที่เกิดจากการสร้างของยีสต์และปริมาณความต้องการสาร อาหารของยีสต์ ในช่วงหลัง (ประมาณหลังชั่วโมงที่ 8) เซลล์ยีสต์เริ่มใช้ทั้งกลูโคสและ เอทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนในช่วงนี้สภาวะการเจริญของยีสต์จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงมาก อัตราการเติมอาหารเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงมากเพื่อปรับระดับปริมาณกลูโคสและ เอทานอลในน้ำหมักและเพื่อรักษาระดับสารอาหารให้พอเหมาะแก่ความต้องการของเซลล์ ยีสต์ อัตราการเติมอาหารตลอดระยะเวลาการหมักอยู่ในช่วง 0-0.08 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อนำผล การทดลองมาเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมัก ในข้อที่ 3 (ภาพที่ 4.11) พบว่าผลการทดลองมีโพรไฟล์ที่สอดคล้องกับผลการจำลอง สถานการณ์ และในระยะเวลาการหมักประมาณ 12 ชั่วโมง ได้ปริมาณเซลล์ 3.69 กรัมต่อลิตร ผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาลเท่ากับ 0.13 ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมระดับ กลูโคสและเอทานอลในน้ำหมักเท่ากับ  $0.37 \pm 0.31$  กรัมต่อลิตรและ  $1.10 \pm 0.25$  กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลจากการจำลองสถานการณ์อีกด้วย

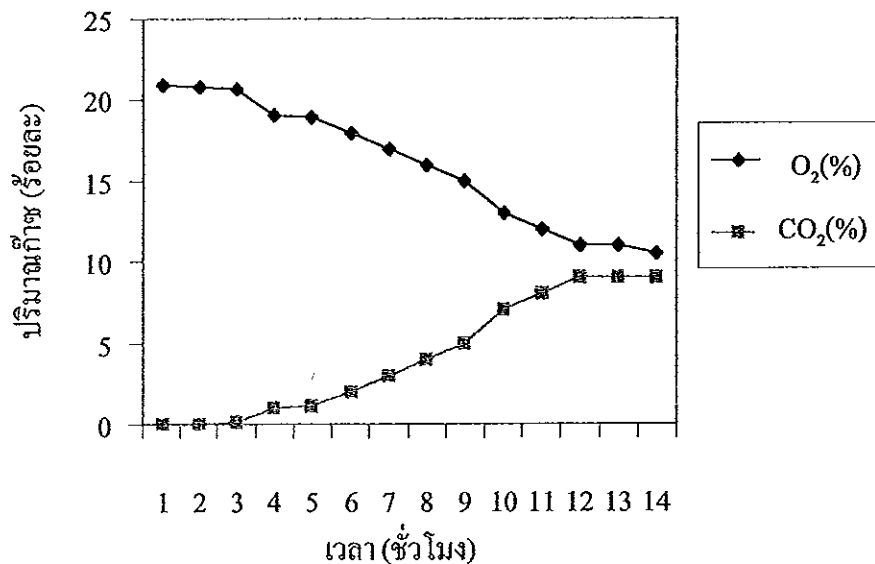
ในการทดลองมีการให้อากาศในปริมาตรคงที่ 1 vvm ปริมาณการใช้ก๊าซออกซิเจน และปริมาณการสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังภาพที่ 4.15 ปริมาณการใช้ก๊าซ ออกซิเจนจะมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้นจนคงที่ในช่วงที่เซลล์มีการเจริญคงที่ เช่นเดียวกับการสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้นจนค่อยๆคงที่ในช่วงที่เซลล์มี การเจริญคงที่



ภาพที่ 4.13 ผลการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขามบั้งแบบกึ่งกะด้วยระบบพีซีที่ใช้การควบคุมแบบที่ 8 ควบคุมพีเอชเท่ากับ 4.5 และอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.14 อัตราการเติมอาหารในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ  
ด้วยระบบพีซีซี โดยใช้การควบคุมแบบที่ 8



ภาพที่ 4.15 ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไปและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น  
ในกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ ควบคุมกระบวนการด้วยระบบ  
พีซีซีโดยใช้การควบคุมแบบที่ 8

## กรณีที่ 2 การควบคุมกระบวนการหมัก โดยใช้ระบบพีซีที่มีปัจจัยรบกวน

จากการทดลองในกรณีที่ไม่มีปัจจัยรบกวน (กรณีที่ 1) เป็นการทดลองเลี้ยงยีสต์ในสถานะที่เหมาะสมต่อการเจริญ พบว่าระบบการควบคุมสามารถตอบสนองต่อกระบวนการหมักได้ดี เพื่อทดสอบการตอบสนองของระบบควบคุมในสถานะที่อุณหภูมิและพีเอชผันแปร จึงทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะโดยนำชุดควบคุมที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในข้อ 3 มาใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะในสถานะการเลี้ยงต่างๆเหมือนในกรณีที่ 1 แต่ปัจจัยการหมักมีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการหมัก แบ่งการทดลองเป็น 2 กรณี คือ

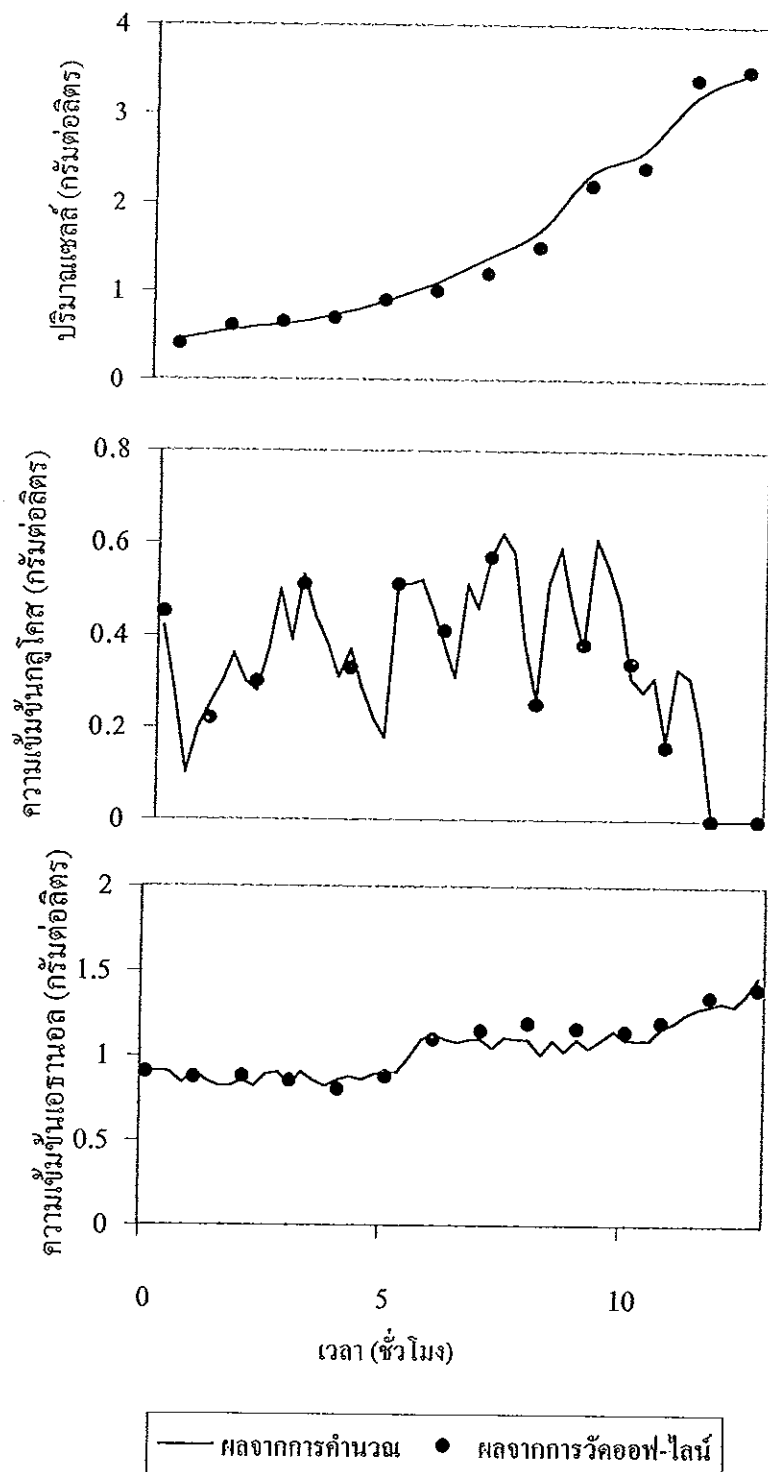
กรณี 1 เปลี่ยนแปลงระดับพีเอชในถังหมักอยู่ในช่วง 3.5 - 7.0 และควบคุมระดับอุณหภูมิในถังหมักคงที่เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

กรณี 2 เปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิในการหมักอยู่ในช่วง 20-40 องศาเซลเซียส และควบคุมระดับพีเอชคงที่เท่ากับ 4.5

การทดลองในกรณีที่ 1 มีสถานะการหมักเริ่มต้นดังนี้ ปริมาณเซลล์ 0.4 กรัมต่อลิตร กลูโคส 0.45 กรัมต่อลิตร เอทานอล 1 กรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำหมักเริ่มต้น 1 ลิตร ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.16 จะเห็นว่าในกรณีการเลี้ยงยีสต์แบบมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชนี้ อัตราการเติมอาหารมีค่าขึ้นลงถี่มากกว่าในกรณีไม่มีปัจจัยรบกวน แสดงดังภาพที่ 4.17 ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการปรับสถานะการเจริญของเซลล์ไปตามการเปลี่ยนแปลงสถานะการหมัก ในบางช่วงที่เซลล์อยู่ในสถานะที่ไม่เหมาะสมอาจมีอัตราการใช้อาหารหรือการสร้างผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากระดับปกติ โปรแกรมการคำนวณอัตราการเติมอาหารจึงพยายามปรับระดับของปริมาณกลูโคสและเอทานอลไปตามสถานะที่เปลี่ยนแปลงของการหมัก อัตราการเติมอาหารอยู่ในช่วง 0-0.05 ลิตรต่อชั่วโมง จากผลการทดลองในการเลี้ยงประมาณ 10 ชั่วโมง ได้ปริมาณเซลล์ 3.47 กรัมต่อลิตร ผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาลเท่ากับ 0.11 ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมระดับกลูโคสและเอทานอลในน้ำหมักเท่ากับ  $0.36 \pm 0.26$  และ  $1.14 \pm 0.32$  กรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าที่ได้ดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับการเลี้ยงยีสต์ในกรณีที่ไม่มีปัจจัยรบกวน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากการวัดทางอ้อมโดยใช้สมการสตอยคิโอเมตริกกับการวัดโดยออฟ-ไลน์ พบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกันเช่นเดียวกับการทดลองเลี้ยงยีสต์แบบไม่มีปัจจัยรบกวน อัตราการใช้ออกซิเจนและการสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังภาพที่ 4.18

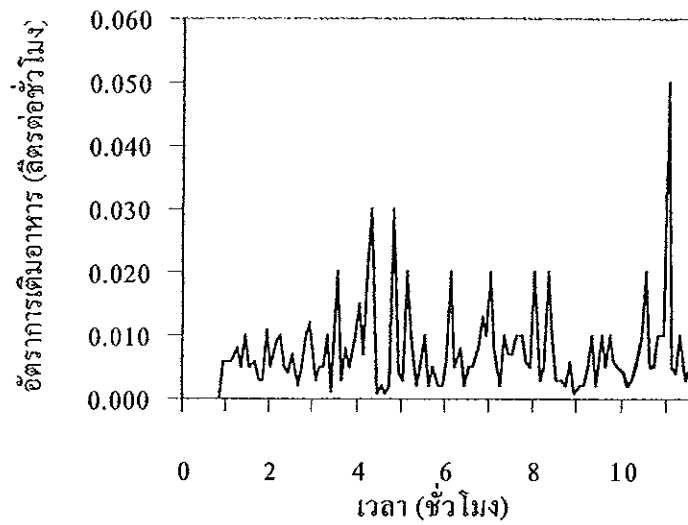
การทดลองในกรณีที่ 2 เป็นการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบ กึ่งกะด้วยระบบพีซีซีเมื่อมีปัจจัยรบกวนโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในถังหมัก สถานะ การหมักเริ่มต้นเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 (เปลี่ยนแปลงพีเอช) ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.19 อัตราการเติมอาหารในกรณีนี้มีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับในกรณีที่ 1 แสดงดังภาพ ที่ 4.20 อัตราการเติมอาหารอยู่ในช่วง 0-0.05 ลิตรต่อชั่วโมง จากผลการทดลองในการเลี้ยง ประมาณ 10 ชั่วโมง ได้ปริมาณเซลล์ 3.50 กรัมต่อลิตร ผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาล 0.12 ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมระดับกลูโคสและเอทานอลในน้ำหมักเท่ากับ  $0.41 \pm 0.31$  และ  $1.12 \pm 0.27$  กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณการใช้ก๊าซออกซิเจนและการ สร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังภาพที่ 4.21

จากการทดลองควบคุมกระบวนการหมักแบบมีปัจจัยรบกวนและแบบไม่มีปัจจัย รบกวน พบว่าระบบการควบคุมสามารถตอบสนองต่อสถานะการเปลี่ยนแปลงการหมัก ได้ดีทั้งในกรณีแบบมีปัจจัยรบกวนและแบบไม่มีปัจจัยรบกวน การเปรียบเทียบผลการ ควบคุมกระบวนการหมักของทั้งสองกรณีแสดงดังตารางที่ 6 ปริมาณเซลล์ที่ได้ในกรณีมี ปัจจัยรบกวนทั้งสองกรณี (เปลี่ยนแปลงพีเอชและเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) มีปริมาณใกล้เคียง กัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีปัจจัยรบกวนพบว่าปริมาณเซลล์ที่ได้น้อยกว่าไม่มาก นัก และผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อปริมาณการใช้น้ำตาลก็ได้ค่าที่ต่ำกว่าในกรณีที่ไม่มีปัจจัย รบกวนไม่มากนักเช่นกัน ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมระดับกลูโคสและ เอทานอลในน้ำหมัก ทั้งกรณีแบบมีปัจจัยรบกวนและแบบไม่มีปัจจัยรบกวนให้ผลการ ควบคุมอยู่ในช่วงเดียวกัน แต่ระยะเวลาในการหมักในกรณีที่ไม่มีปัจจัยรบกวนใช้เวลาใน การหมักถึง 12 ชั่วโมง เซลล์จึงเจริญในช่วง stationary phase ส่วนการหมักในกรณีมีปัจจัย รบกวนทั้งสองกรณีใช้เวลาในการหมักเพียง 10 ชั่วโมง ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงในแง่ เศรษฐศาสตร์ร่วมด้วย การควบคุมกระบวนการหมักในทั้งสองกรณีให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

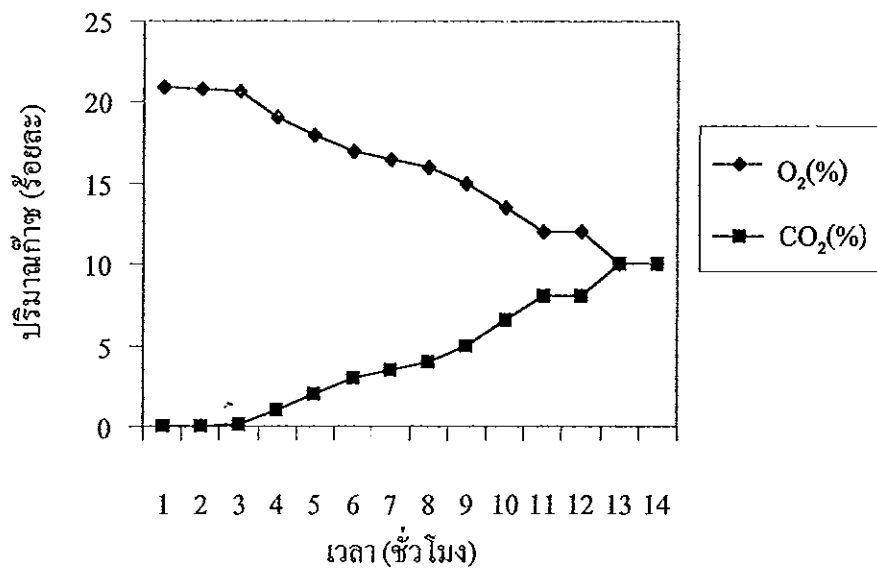


ภาพที่ 4.16 ผลการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์خمปังแบบกึ่งกะด้วยระบบฟัซซี่ โดยใช้วิธีการควบคุมแบบที่ 8 เปลี่ยนแปลงพีเอชอยู่ในช่วง 3.5-70 และ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

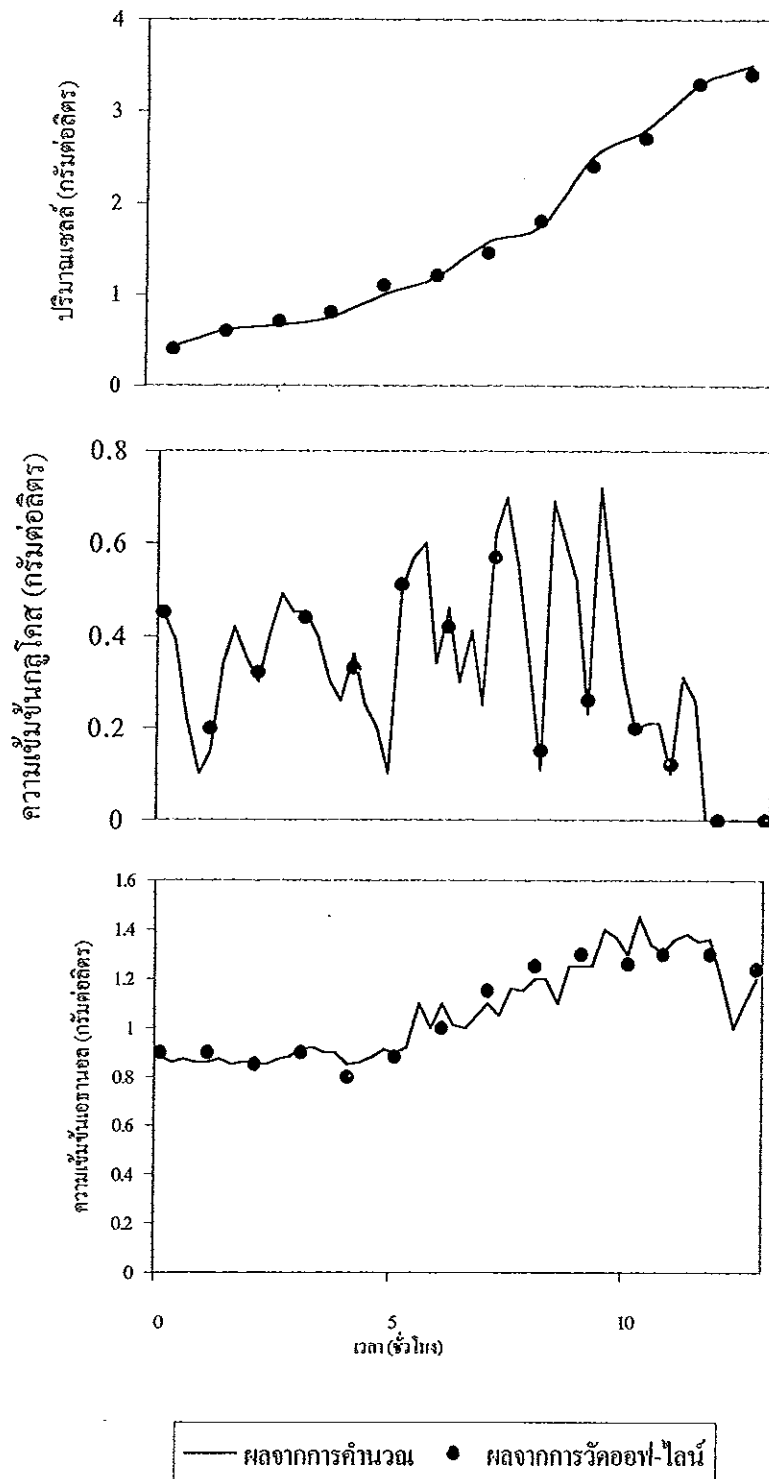




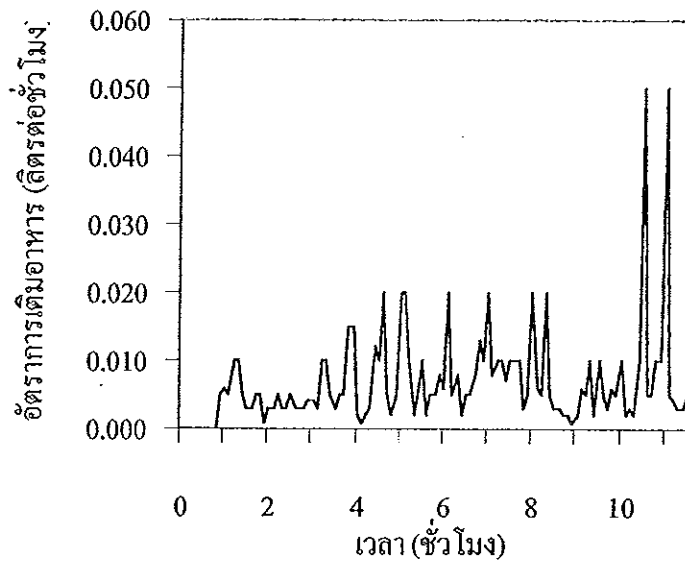
ภาพที่ 4.17 อัตราการเติมอาหารในการทดลองหมักยีสต์ขุ่นมัวแบบกึ่งกะด้วยระบบพีซซี โดยใช้การควบคุมแบบที่ 8 เปลี่ยนแปลงที่เอชอยู่ในช่วง 3.5-7.0 และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



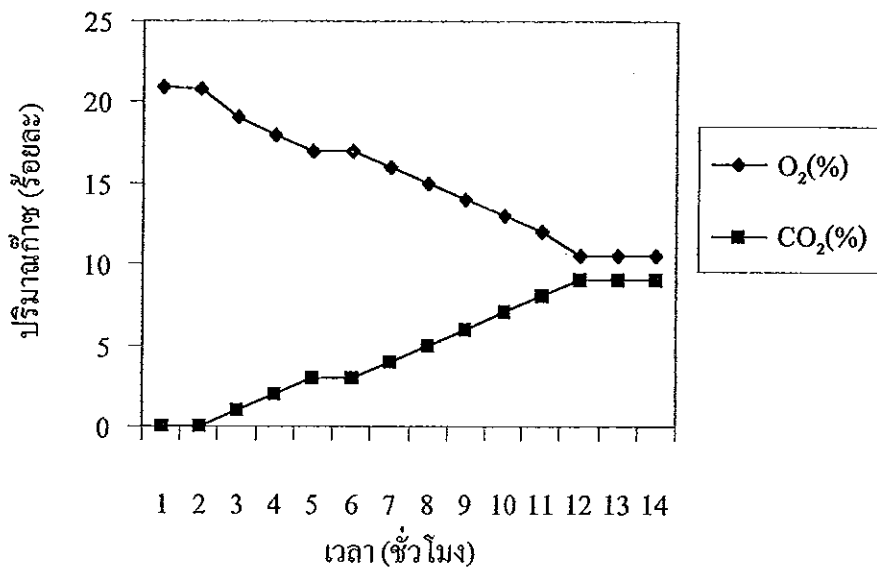
ภาพที่ 4.18 ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไปและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในการทดลองหมักยีสต์ขุ่นมัวแบบกึ่งกะด้วยระบบพีซซี โดยใช้การควบคุมแบบที่ 8



ภาพที่ 4.19 ผลการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นมัวแบบกึ่งกะด้วยระบบพีซซี โดยใช้การควบคุมแบบที่ 8 ควบคุมพีเอชเท่ากับ 3.5 และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอยู่ในช่วง 20-40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.20 อัตราการเติมอาหารในการทดลองหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยระบบพีซีซี โดยการใช้การควบคุมแบบที่ 8 ควบคุมที่เอชเท่ากับ 3.5 และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อยู่ในช่วง 20-40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.21 ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไปและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในการทดลองหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยพีซีซี โดยการใช้การควบคุมแบบที่ 8

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบฟิชซีเมื่อการหมัก  
มีปัจจัยรบกวนและไม่มีปัจจัยรบกวน

วิธีการหมัก	ปริมาณเซลล์ (กรัมต่อลิตร)	ผลผลิตเซลล์ ที่ได้ต่อการ ใช้น้ำตาล	ค่าความคลาด เคลื่อนกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ค่าความคลาด เคลื่อนเอทานอล (กรัมต่อลิตร)
ไม่มีปัจจัยรบกวน (ควบคุมพีเอชและ อุณหภูมิ)	3.69	0.13	$0.37 \pm 0.31$	$1.10 \pm 0.25$
มีปัจจัยรบกวน (เปลี่ยนพีเอชและ ควบคุมอุณหภูมิ)	3.47	0.11	$0.36 \pm 0.26$	$1.14 \pm 0.31$
มีปัจจัยรบกวน (เปลี่ยนอุณหภูมิ และควบคุมพีเอช)	3.50	0.12	$0.41 \pm 0.31$	$1.12 \pm 0.27$

### 5. การจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นแบบพีไอ

จากการทดลองที่ผ่านมาเป็นการนำระบบควบคุมแบบพีซีมาใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นแบบกึ่งกะ ในการทดลองส่วนนี้เป็นการนำการควบคุมแบบคั้งเคิม (แบบพีไอ) มาใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นแบบกึ่งกะ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมระหว่างการควบคุมทั้งสองแบบ โดยจุดมุ่งหมายในการควบคุมเหมือนกับควบคุมแบบพีซีคือ

1. การหมักต้องให้ปริมาณเซลล์มาก
2. ให้ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้น้ำตาลสูง
3. สามารถควบคุมกระบวนการหมักให้ระดับกลูโคสและเอทานอลในน้ำหมักมีความเข้มข้นอยู่ในระดับที่ต้องการ โดยให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

นำแบบจำลองการเจริญเชิงคณิตศาสตร์ของยีสต์ขุ่นแบบกึ่งกะที่ได้พัฒนาขึ้นจากข้อ 1 มาจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีไอ โดยที่การควบคุมแบบพีไอ มีการควบคุมตามความสัมพันธ์ (Donald, 1991)

$$\alpha = K_c \varepsilon + K_c / \tau_i \int_0^t \varepsilon \cdot dt + \alpha_s \quad (11)$$

เมื่อ  $K_c$  คือ gain

$\tau_i$  คือ เวลาอินทิกรัล (integral time, นาที)

$\alpha_s$  คือ ค่าคงที่

$\varepsilon$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

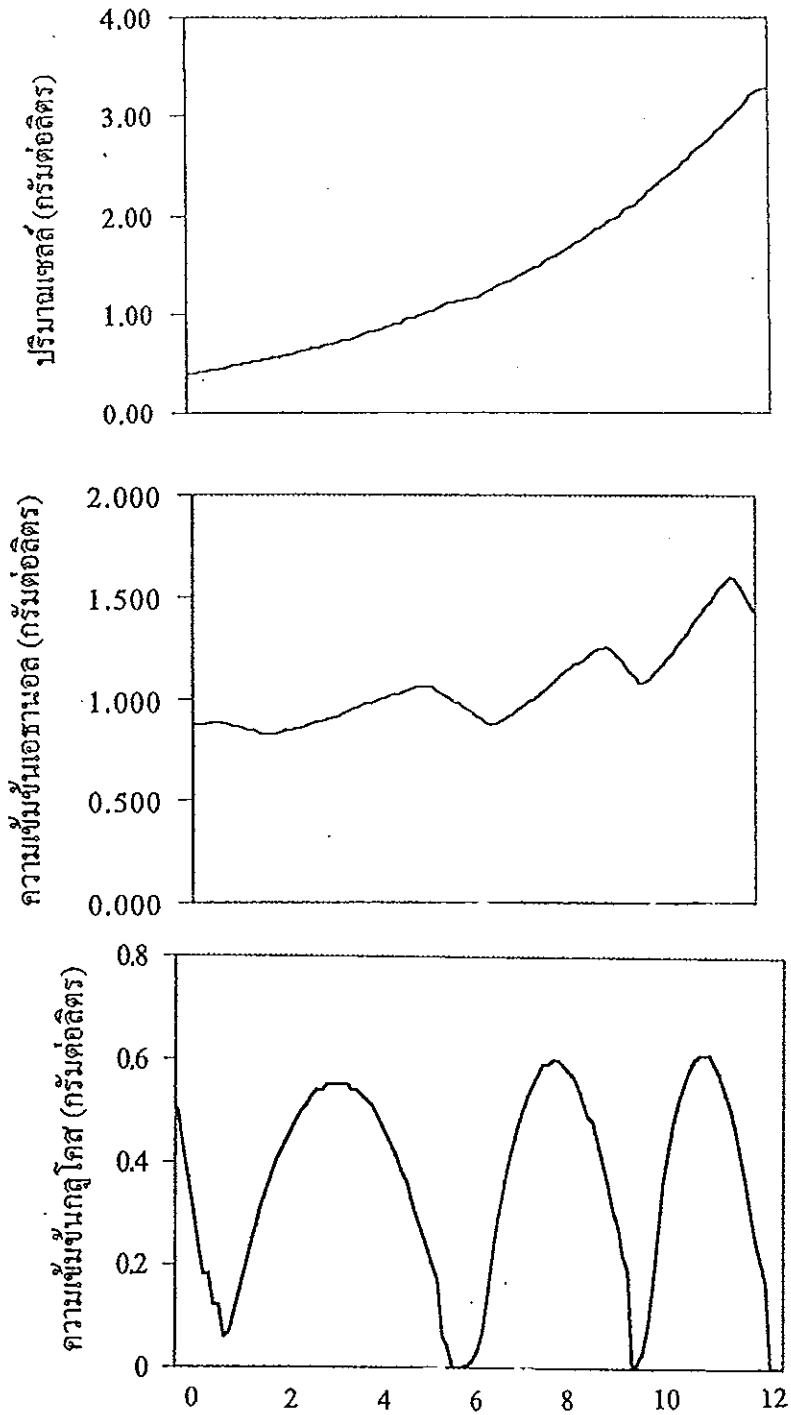
จำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมัก โดยปรับค่า  $K_c$  และ  $\tau_i$  เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่จะทำให้ระบบควบคุมมีประสิทธิภาพการควบคุมกระบวนการหมักดีที่สุด ค่าเริ่มต้นของสภาวะการหมักที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักแบบพีไอ คือ ปริมาณเซลล์ 0.4 กรัมต่อลิตร กลูโคส 0.5 กรัมต่อลิตร เอทานอล 0.87 กรัมต่อลิตร และปริมาตรน้ำหมักเริ่มต้น 1 ลิตร ตั้งค่าจุดอ้างอิงในการควบคุมปริมาณกลูโคสและ

เอทานอลในน้ำหมักเท่ากับในกรณีการควบคุมแบบพีซี คือ 0.2 กรัมต่อลิตร และ 2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

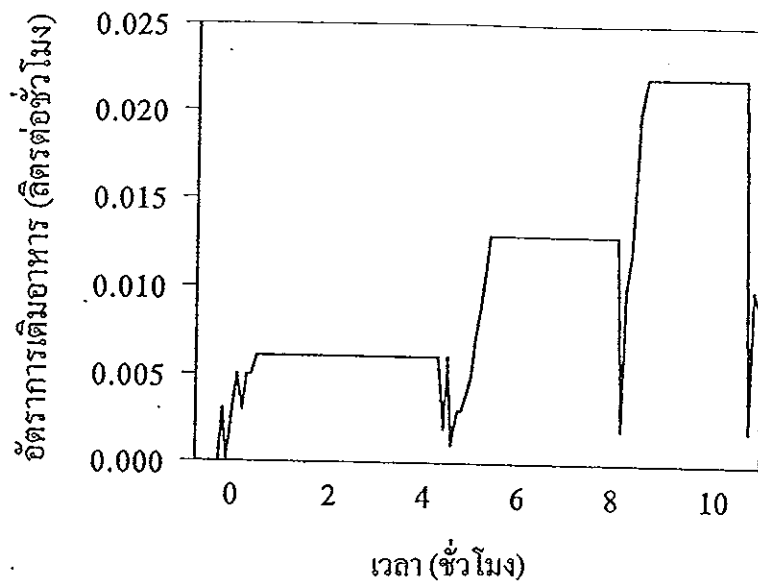
ตัวอย่างการตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่า  $K_c$  และ  $\tau_i$  ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 7 จะเห็นว่าเมื่อควบคุมกระบวนการแบบพีไอโดยใช้  $K_c$  เท่ากับ 0.002 และ  $\tau_i$  เท่ากับ 200 ได้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือให้ปริมาณเซลล์ 3.28 กรัมต่อลิตร ผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาลเท่ากับ 0.12 ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมระดับกลูโคสและเอทานอลในน้ำหมักเท่ากับ  $0.30 \pm 0.30$  และ  $1.21 \pm 0.38$  กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักเมื่อ  $K_c$  เท่ากับ 0.002 และ  $\tau_i$  เท่ากับ 200 แสดงดังภาพที่ 4.22 อัตราการเติมอาหารแสดงดังภาพที่ 4.23

ตารางที่ 7 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นมึนปึงแบบพีไอเมื่อใช้ค่า  $K_c$  และ  $\tau_i$  ต่างๆ

$K_c$	$\tau_i$	ปริมาณเซลล์ (กรัมต่อลิตร)	ผลผลิตเซลล์ ที่ได้ต่อการ ใช้น้ำตาล	ค่าความคลาด เคลื่อนกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ค่าความคลาด เคลื่อนเอทานอล (กรัมต่อลิตร)
0.0005	200	3.24	0.11	$0.33 \pm 0.33$	$1.18 \pm 0.36$
0.0010	200	2.00	0.12	$0.30 \pm 0.30$	$1.06 \pm 0.22$
0.0020	200	3.28	0.12	$0.30 \pm 0.30$	$1.21 \pm 0.38$
0.0010	100	2.05	0.12	$0.31 \pm 0.31$	$1.06 \pm 0.21$
0.0010	300	3.18	0.11	$0.32 \pm 0.32$	$1.24 \pm 0.39$
0.0010	400	3.13	0.11	$0.36 \pm 0.36$	$1.23 \pm 0.39$



ภาพที่ 4.22 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นปึงแบบกึ่งกะ  
ด้วยการควบคุมแบบพีไอ เมื่อ  $K_c = 0.002$  และ  $\tau_i = 200$



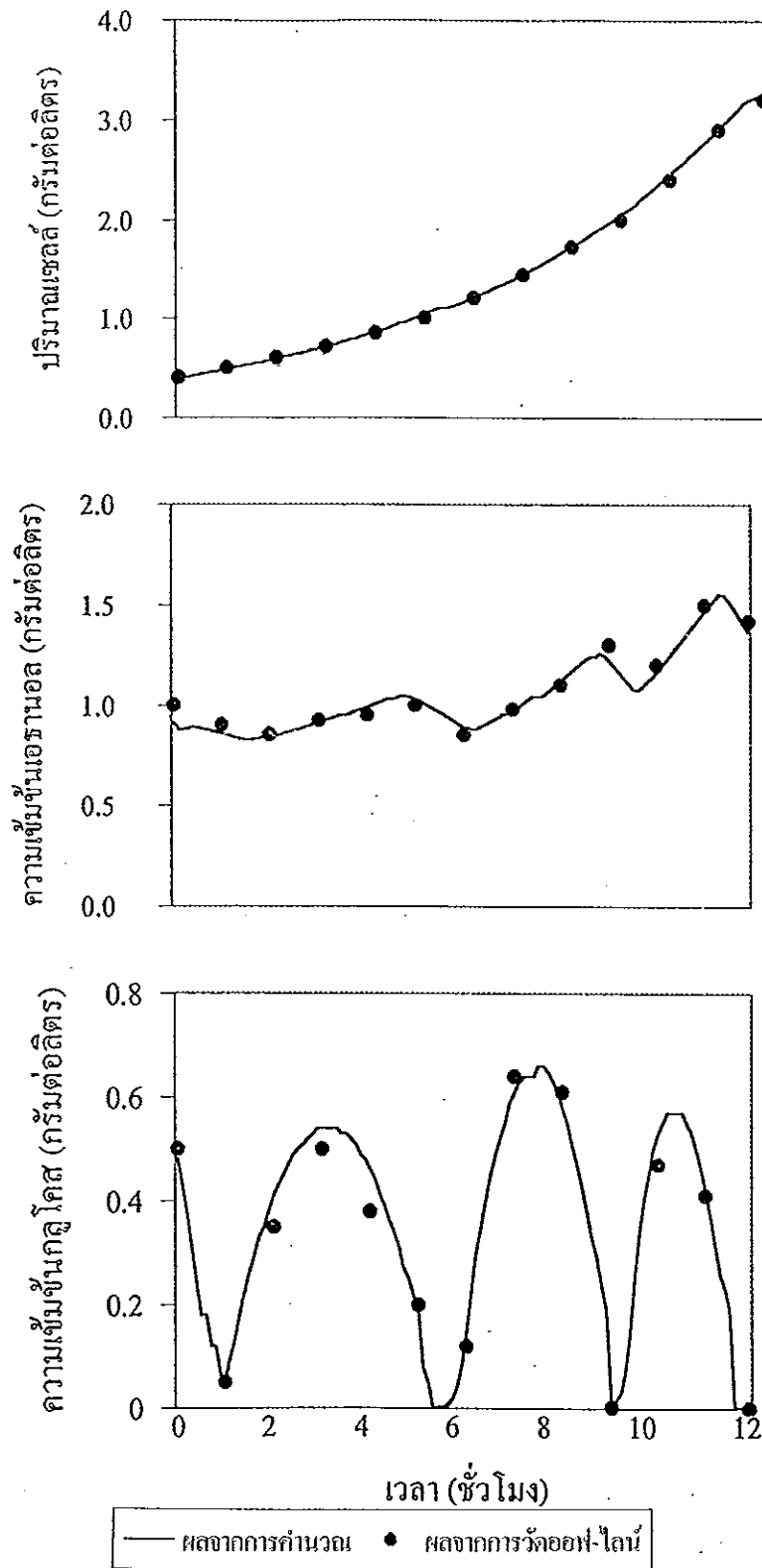
ภาพที่ 4.23 อัตราการเติมอาหารในการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมัก  
ยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีไอ เมื่อ  $K_C = 0.002$  และ  $\tau_1 = 200$



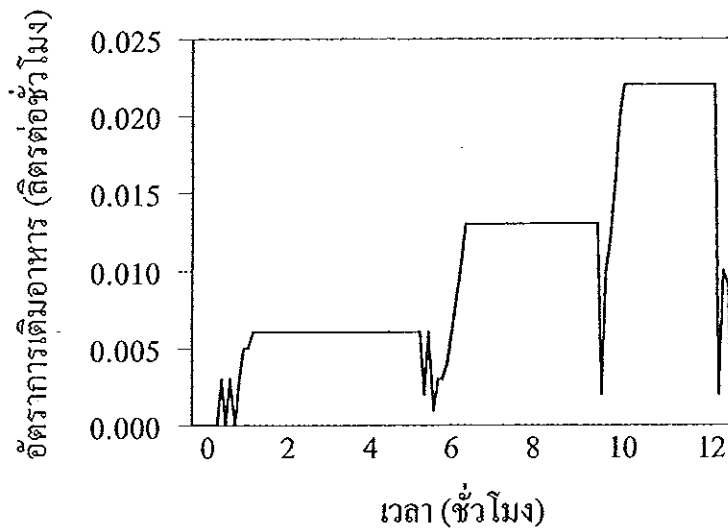
## 6. การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีไอ

จากการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีไอ พบว่าเมื่อ  $K_c$  เท่ากับ 0.002 และ  $\tau_c$  เท่ากับ 200 ให้ผลการควบคุมที่ดีที่สุด นำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาใช้ในการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังโดยสถานะการหมักเหมือนกับการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังด้วยพีซีซี ในระยะการหมัก 12 ชั่วโมง ให้ปริมาณเซลล์ 3.23 กรัมต่อลิตร ผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาลเท่ากับ 0.11 ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมระดับกลูโคสและเอธานอลในน้ำหมักเท่ากับ  $0.35 \pm 0.35$  และ  $1.20 \pm 0.35$  กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โพรไฟล์ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลจากการจำลองสถานการณ์ โพรไฟล์การเปลี่ยนแปลงกลูโคสมีความแตกต่างกับการทดลองควบคุมแบบพีซีซี คือ โพรไฟล์จากการควบคุมแบบพีไอมีลักษณะเปลี่ยนแปลงขึ้นลงด้วยความถี่น้อยกว่าการควบคุมด้วยพีซีซี ซึ่งโพรไฟล์การเปลี่ยนแปลงน้ำตาลนี้มีความสอดคล้องกับอัตราการเติมอาหาร แสดงดังภาพที่ 4.25 โดยที่อัตราการเติมอาหารในการควบคุมแบบพีไอมีการเปลี่ยนแปลงตอบสนองต่อสถานะการหมักเป็นช่วงคงที่เป็น 3 ระดับใหญ่ๆ เมื่อเวลาการหมักผ่านไป อัตราการเติมอาหารค่อย ๆ เพิ่มมากขึ้นเป็นระดับคงที่ ทำให้ปริมาณกลูโคสในถังหมักมีมากเกินความต้องการของเซลล์ การควบคุมที่ไม่ราบเรียบเช่นนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะการหมักมาก เซลล์ต้องมีการปรับสถานะการเจริญซึ่งมีผลทำให้เซลล์มีการเจริญได้น้อยลงและก่อให้เกิดสถานะที่มีการสร้างปริมาณเอธานอลมาก จะทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญ การควบคุมแบบดังกล่าวมีความแตกต่างจากการควบคุมด้วยพีซีซี ในการควบคุมด้วยพีซีซีอัตราการเติมอาหารมีการเพิ่มและลดอย่างรวดเร็วตามสถานะความต้องการอาหารเพื่อการเจริญของเซลล์ การควบคุมระดับปริมาณกลูโคสในน้ำหมักมีความราบเรียบกว่า

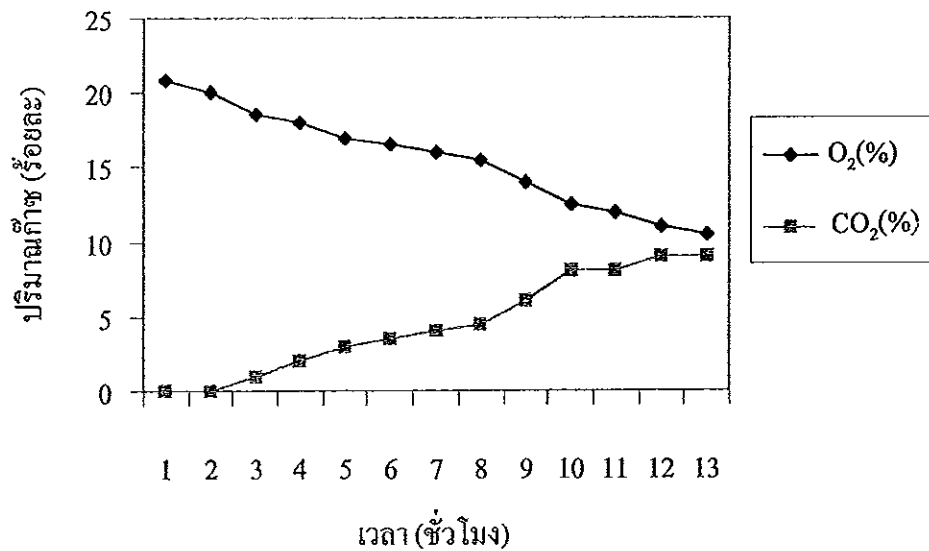
การวัดค่าแบบออฟ-ไลน์ในการควบคุมกระบวนการแบบพีไอ พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับการคำนวณจากสมการสตอยคิโอเมตริก แสดงดังภาพที่ 4.24 เช่นเดียวกับการทดลองควบคุมกระบวนการด้วยพีซีซี



ภาพที่ 4.24 ผลการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นมัวแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีไอ เมื่อ  $K_C = 0.002$  และ  $\tau_I = 200$



ภาพที่ 4.25 อัตราการเติมอาหารในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ  
ด้วยการควบคุมแบบพีไอ เมื่อ  $K_C = 0.002$  และ  $\tau_I = 200$



ภาพที่ 4.26 ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไปและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นใน  
การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีไอ  
เมื่อ  $K_C = 0.002$  และ  $\tau_I = 200$

## บทที่ 5

### บทสรุป

จากการศึกษาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะแบบต่างๆ พบว่าแบบจำลองที่มีการพิจารณาถึงผลจากความเข้มข้นของอาหารและผลิตภัณฑ์ที่มีต่อการเจริญของเซลล์เป็นแบบจำลองที่มีความสอดคล้องกับย่านของสภาวะการหมักที่ศึกษา เนื่องจากในสภาวะการเจริญของยีสต์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีการเจริญแบบ diauxic growth ยีสต์สามารถใช้ทั้งกลูโคสและเอทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญได้ และปริมาณของผลิตภัณฑ์นี้ (เอทานอล) ยังมีผลไปยับยั้งการเจริญของเซลล์อีกด้วย ในงานวิจัยนี้ นำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของ Takamatsu (1984) มาใช้ในการจำลองสถานการณ์การเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะ โดยมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองเพื่อให้ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุดอย่างมีระบบ พบว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมในการจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้ ได้แก่  $k_1 = 0.01$ ,  $k_2 = 0.01$ ,  $k_s = 0.1$ ,  $m = 0.03$ ,  $\mu_{\max} = 0.25$ ,  $Y = 0.12$ ,  $Y_{xs} = 0.12$  และ  $Y_{xe} = 0.48$  และแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถอธิบายผลการทดลองได้ถูกต้องและครอบคลุมสภาวะการหมักถึงแม้ว่าเซลล์จะเจริญในสภาวะขาดแคลนอาหารหรือมีอาหารมากเกินไปเกินความต้องการ ซึ่งสภาวะการเจริญของเซลล์นี้จะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของกลูโคสซึ่งมีความสอดคล้องกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอทานอลด้วย

ในแง่ของระบบการวัด งานวิจัยนี้ได้พัฒนาให้ระบบสามารถใช้เครื่องมือวัดแบบพื้นฐานที่ใช้ในการหมักอยู่ทั่วไป ได้แก่ เครื่องวัดวิเคราะห์ปริมาณก๊าซ เครื่องวัดค่าความดันกลั่นแสง โดยสามารถวัดปริมาณกลูโคสและปริมาณเอทานอลซึ่งเป็นปริมาณที่ต้องการใช้ในการควบคุมได้โดยทางอ้อม โดยคำนวณปริมาณทั้งสองจากการวัดปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไป ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สร้าง และปริมาณเซลล์ที่เพิ่ม เป็นวิธีการวัดโดยทางอ้อมที่ประยุกต์นำหลักการคำนวณตามสมการสโตยคิโอเมตริกมาใช้ร่วมกับการวัดแบบออนไลน์ พบว่าการคำนวณปริมาณกลูโคสต้องมีการปรับสมการสโตยคิโอเมตริกเพื่อให้ผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการสโตยคิโอเมตริกมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดจริง ส่วนปริมาณเอทานอลที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่วัด

ได้จริงมีความสอดคล้องกันจึงไม่ต้องการปรับสมการสโตยคิโอเมตริก สามารถนำสมการการคำนวณปริมาณเอธานอลและปริมาณกลูโคสไปใช้เป็นวิธีการวัดโดยทางอ้อมในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังเพื่อทดแทนอุปกรณ์ในงานวัด อีกทั้งผลการคำนวณที่ได้ยังมีความถูกต้องและสอดคล้องกับค่าจริงที่วัดได้อีกด้วย

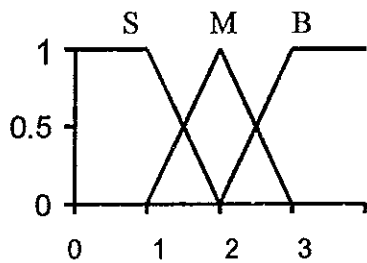
เมื่อนำแบบจำลองการเจริญเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้มาจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังด้วยระบบพีซี การควบคุมแบบพีซีประกอบด้วยฟังก์ชันอินพุตคือ ความเข้มข้นของกลูโคสและความเข้มข้นของเอธานอล และฟังก์ชันเอาต์พุตคือ อัตราการเติมอาหารแบบป้อนกลับ การจำลองสถานการณ์เริ่มต้นโดยการคัดเลือกชุดกฎควบคุมแบบต่างๆ และเลือกค่าจุดอ้างอิงของระดับปริมาณกลูโคสและเอธานอลที่ต้องการควบคุมมาใช้ในการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะจากการจำลองสถานการณ์พบว่าเมื่อใช้กฎควบคุมชุดที่ 2 และกำหนดค่าการควบคุมระดับความเข้มข้นของกลูโคสและเอธานอลไว้ที่ 0.2 และ 2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ให้ปริมาณเซลล์สูงสุด 3.31 กรัมต่อลิตร และให้ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้น้ำตาลสูงสุดเท่ากับ 0.19 เมื่อเทียบกับการใช้กฎควบคุมชุดอื่น ควบคุมความเข้มข้นของกลูโคสอยู่ในระดับ  $0.39 \pm 0.34$  กรัมต่อลิตร และควบคุมปริมาณเอธานอลอยู่ในระดับ  $1.13 \pm 0.28$  กรัมต่อลิตร จากการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักโดยใช้กฎควบคุมแบบนี้ให้ผลการควบคุมตรงตามจุดมุ่งหมายของการควบคุมที่ตั้งไว้มากที่สุด คือ

1. ให้ปริมาณเซลล์มาก
2. ให้ผลผลิตเซลล์ต่อการใช้น้ำตาลสูง
3. สามารถควบคุมกระบวนการหมักให้ระดับกลูโคสและเอธานอลในน้ำหมักมีความเข้มข้นอยู่ในระดับที่ต้องการ โดยให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

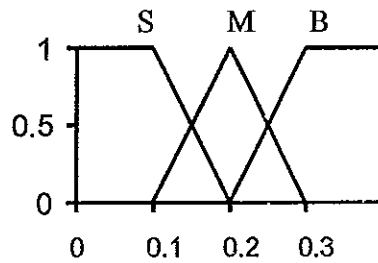
กฎควบคุมแบบพีซีที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสดงดังตารางที่ 8 และฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตแสดงดังภาพที่ 5.1 เมื่อค่าการควบคุมระดับความเข้มข้นของกลูโคสและเอธานอลเท่ากับ 0.2 และ 2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 8 กฎควบคุมแบบฟัซซี

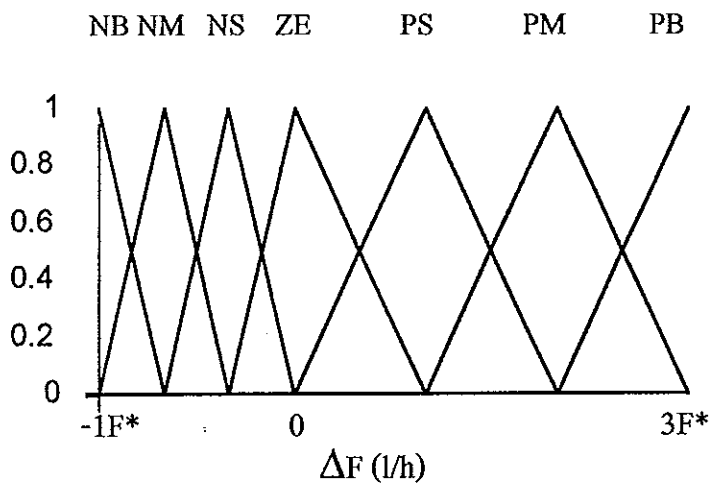
	Glucose		
	S	M	B
	S	PM	NS
Ethanol	M	PS	NM
	B	NS	NB



ก ฟังก์ชันสมาชิกของเอทานอล



ข ฟังก์ชันสมาชิกของกลูโคส



ค ฟังก์ชันสมาชิกของอัตราการให้อาหาร (เอาต์พุต)

ภาพที่ 5.1 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบฟัซซี

การทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ โดยใช้ชุดการควบคุมแบบพีซีซีที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ตั้งค่าจุดอ้างอิงในการควบคุมระดับกลูโคสและเอทานอลเท่ากับ 0.2 และ 2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ควบคุมสภาวะการหมักให้เหมาะสมต่อการเจริญตลอดระยะเวลาการหมัก โดยควบคุมระดับพีเอชเท่ากับ 4.5 และอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และนำการควบคุมแบบพีซีซีชุดเดิมมาทำการทดลองเลี้ยงยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ แต่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการหมักโดยมีการเปลี่ยนแปลงระดับพีเอชและอุณหภูมิในถังหมัก

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมการหมักแบบต่างๆ

วิธีการหมัก	ปริมาณเซลล์ (กรัมต่อลิตร)	ผลผลิตเซลล์ ที่ได้ต่อการ ใช้น้ำตาล	ค่าความคลาด เคลื่อนกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ค่าความคลาด เคลื่อนเอทานอล (กรัมต่อลิตร)
แบบพีซีซี ไม่มีปัจจัยรบกวน (ควบคุมพีเอชและ อุณหภูมิ)	3.69	0.13	$0.37 \pm 0.31$	$1.10 \pm 0.25$
แบบพีซีซี มีปัจจัยรบกวน (เปลี่ยนพีเอช)	3.47	0.11	$0.36 \pm 0.26$	$1.14 \pm 0.31$
แบบพีซีซี มีปัจจัยรบกวน (เปลี่ยนอุณหภูมิ)	3.50	0.12	$0.41 \pm 0.31$	$1.12 \pm 0.27$
แบบพีไอ	3.23	0.11	$0.35 \pm 0.35$	$1.20 \pm 0.35$

จากการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังด้วยฟัซซีทั้งในกรณีมีปัจจัยรบกวนและไม่มีปัจจัยรบกวน แสดงดังตารางที่ 9 ถึงแม้ว่าระดับการควบคุมปริมาณกลูโคสและเอทานอลที่ควบคุมได้จะได้อัตราที่ต่างจากค่าที่ต้องการควบคุม แต่ช่วงที่ควบคุมได้ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญของยีสต์โดยไม่ทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญ เนื่องจากระดับความเข้มข้นของเอทานอลที่มากกว่า 2 กรัมต่อลิตร จะไปมีผลยับยั้งการเจริญของยีสต์และการควบคุมปริมาณกลูโคสที่ระดับ 0.2 กรัมต่อลิตร เพื่อไม่ต้องการให้เซลล์ยีสต์มีการสร้างเอทานอล แต่การควบคุมแบบฟัซซีสามารถควบคุมให้ระดับปริมาณเอทานอลอยู่ในระดับต่ำได้ถึงแม้ว่าระดับกลูโคสสูงกว่า 0.2 กรัมต่อลิตร ดังนั้นช่วงการควบคุมระดับปริมาณกลูโคสและเอทานอลที่ควบคุมได้จึงเป็นช่วงที่ยอมรับได้ในการใช้ควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง

การควบคุมแบบฟัซซีทั้งในกรณีมีปัจจัยรบกวนและไม่มีปัจจัยรบกวนให้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกัน และโพรไฟล์ที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับผลจากการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการ

ทดสอบการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบดั้งเดิม (แบบพีไอ) โดยจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมัก พบว่าเมื่อใช้ค่า  $K_c$  เท่ากับ 0.002 และ  $\tau_i$  เท่ากับ 200 ทำให้ระบบควบคุมกระบวนการหมักมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พารามิเตอร์อื่นๆ ในช่วงค่า  $K_c$  ตั้งแต่ 0.0005-0.0020 และ  $\tau_i$  ตั้งแต่ 100-300 นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มาใช้ในการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง โดยกำหนดสภาวะการหมักเหมือนกับการทดลองควบคุมกระบวนการหมักด้วยฟัซซี

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังด้วยฟัซซีและการควบคุมแบบพีไอ พบว่าอย่างน้อยที่สุดการควบคุมแบบฟัซซีให้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกับการควบคุมแบบพีไอ และระบบการควบคุมแบบฟัซซียังสามารถที่จะพัฒนาต่อไปได้เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นเพียงการนำเอาหลักการควบคุมแบบฟัซซีขั้นต้นมาลองใช้ในการควบคุมกระบวนการหมักเท่านั้น ยังไม่ได้มีการศึกษาปรับปรุงหาผลเลิศในการควบคุม จึงยังมีโอกาสที่จะพัฒนาให้ดีขึ้นอีกมาก เพื่อทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น การนำระบบควบคุมแบบฟัซซีมาใช้กับกระบวนการหมักจึงสามารถที่จะพัฒนาได้อีกมาก ซึ่งผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะหลายประการในการที่จะศึกษาวิจัยในเรื่องนี้ต่อไป ได้แก่



1. ระบบพีซีเป็นระบบที่มีความยืดหยุ่น และปรับเปลี่ยนแก้ไขได้ง่าย ถ้ามีเครื่องมือวัดอื่นๆ ที่สามารถอ่านวัดค่าได้รวดเร็ว แม่นยำมากขึ้น ก็สามารถเพิ่มฟังก์ชันการคำนวณได้ ทำให้ระบบการควบคุมสามารถกำหนดอัตราการผลิตอาหาร ได้ตรงกับสภาวะการหมักได้ดียิ่งขึ้น
2. อาจจะเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันและพีซีเซตต่างๆ เพื่อให้การควบคุมเหมาะสมมากขึ้น
3. จากการใช้วิธีการวัด โดยทางอ้อม เป็นการพัฒนาระบบการวัดอีกระดับหนึ่งเพื่อเป็นการขยายความสามารถในการควบคุมกระบวนการ วิธีการนี้จึงเป็นวิธีการที่น่าสนใจศึกษาและปรับปรุงเพื่อให้การวัดและการควบคุมมีความถูกต้องมากขึ้น
4. น่าจะมีการศึกษาวิจัยนำเอาการควบคุมแบบดั้งเดิม การควบคุมแบบอะแดปทีฟ และระบบผู้เชี่ยวชาญเข้ามาใช้ร่วมกับการควบคุมแบบพีซี เพื่อนำข้อดีของระบบการควบคุมแบบต่างๆมาใช้และพัฒนาระบบควบคุมแบบบูรณาการ (Integrated control) ที่มีประสิทธิภาพ มีความยืดหยุ่น และความน่าเชื่อถือ (reliability) สูงที่สุด

## บรรณานุกรม

คุณณี ธาระบริพัฒน์. 2537. การผลิตยีสต์ขนมปัง. จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : ภาควิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Agrawal, P., Koshy, G. and Ramseier, M. 1989. An algorithm for operating a fed-batch fermentor at optimum specific-growth rate. *Biotechnol. Bioeng.* 33 : 115-125.

Alfara, C.G., Miura, K., Shimizu, H., Shioya, S., Suga, K. and Suzuki, K. 1993. Fuzzy control of ethanol concentration and its application to maximum glutathione production in yeast fed-batch culture. *Biotechnol. Bioeng.* 41 : 493-501.

Bailey, J.E. and Ollis, D.F. 1986. Biochemical engineering fundamentals. 2nd ed. Singapore : B&JO Enterprice.

Brown, C.M. and Rose, A.H., 1964. *J. of Bacteriology.* 97 : 261-272.

Burrows, S. 1970. Baker's Yeast. In Rose AH, Harrison JS(eds). The Yeasts. New York : Academic Press.

Cooney, C.L., Wang, H.Y. and Daniel, I.C. 1977. Computer-aided material balancing for prediction of fermentation parameters. *Biotechnol. Bioeng.* 11 : 55-67.

Coughaowr, Donald, R. 1991. Process Systems Analysis and Control. 2 ed. Singapore : McGraw-Hill, Inc.

Cox, E. 1994. The Fuzzy Systems Handbook. London : Acedemic Press.

Hansford and Humphrey. 1966. *Biotechnol. Bioeng.* 8 : 85-96.

Jin, S., Ye, K., Shimizu, K., and Mikawa, J. 1996. Application of Artificial neural network and fuzzy control for fed-batch cultivation of recombinant *Saccharomyces cerevisiae*. *J. Ferment. Bioeng.* 81 : 412-421.

Hatch, R.T. and Veilleux, B.G. 1995. Monitoring of *Saccharomyces cerevisiae* in commercial bakers' yeast fermentation. *Biotechnol. Bioeng.* 46 : 371-374.

Kishimoto, M., Kitta, Y., Takeuchi, S., Nakajima, M. and Yoshida, T. 1991. Computer control of glutamic acid based on fuzzy clusterization of culture phases. *J. Ferment. Bioeng.* 72 : 110-114.

Kitsuta, Y. and Kishimoto, M. 1994. Fuzzy supervisory control of glutamic acid production. *Biotechnol. Bioeng.* 44 : 87-94.

Merchuk, J.C. and Asenjo, J.A. 1995. Communication to the editor : the monod equation and mass transfer. *Biotechnol. Bioeng.* 45 : 91-94.

Miller, G.L. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal.Chem.* 31 : 426-428.

Modak, J.M. and Lim, H.C. 1989. Simple nonsingular control approach to fed-batch fermentation optimization. *Biotechnol. Bioeng.* 33 : 11-15.

Mor, J.R. and Fiechter, A. 1968. *Biotechnol. Bioeng.* 10 : 159-176.

- O'Connor, G.M., Sanchez-Riera, F. and Cooney C.L. 1992. Design and evaluation of control strategies for high cell density fermentation. *Biotechnol. Bioeng.* 39 : 293-304.
- Park, Y.S., Shi, Z.P., Shiba, S., Chantal, C., Iijima, S. and Kobayashi, T. 1993. Application of fuzzy reasoning to control of glucose and ethanol concentrations in baker's yeast culture. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 38 : 649-655.
- Pyun, Y.R., Modak, J.M., Chang, Y.K. and Lim, H.C. 1989. Optimization of biphasic growth in *Saccharomyces carlsbergensis* in fed-batch culture. *Biotechnol. Bioeng.* 33 : 1-10.
- Reed, G. and Pepler, H.J. 1973. Yeast Technology. AVI Publishing Westport. Conn
- Roels, J.A. 1983. Energetics and kinetics in biotechnology. Amsterdam : elsevier biomedical press.
- Saxen, B. and Saxen, H. 1996. A neural network based model of bioreaction kinetics. *The canadian J. of chem. Eng.* 74 : 124-131.
- Schalien, R.V., Fagervik, K., Saxen, B., Ringbom, K. and Rydstrom, M. 1995. Adaptive on-line model for aerobic *Saccharomyces cerevisiae* fermentation. *Biotechnol. Bioeng.* 48 : 631-638.
- Scragg, A.H. 1991. Bioreactors in Biotechnology. London : Ellis horwood Limited.
- Shi, Z. and Shimizu, K. 1992. Neuro-fuzzy control of bioreactor systems with pattern recognition. *J. Ferment. Bioeng.* 74 : 39-45.

- Shiba, S., Nishida, Y., Park, Y.S., Iijima, S. and Kobayashi, T. 1993. Improvement of cloned  $\alpha$ -amylase gene expression in fed-batch culture of recombinant *Saccharomyces cerevisiae* by regulating both glucose and ethanol concentration using a fuzzy controller. *Biotechnol. Bioeng.* 44 : 1055-1063.
- Siimes, T. and Linko, P. 1995. Fuzzy supervisory control of fed-batch baker's yeast process. *Biotechnol. Tech.* 9 : 799-804.
- Siimes, T., Linko, P., Numers, C.V., Nakajima, M. and Endo, I. 1995. Real-time fuzzy-knowledge-based control of baker's yeast production. *Biotechnol. Bioeng.* 45 : 135-143.
- Stanier, R.Y., Adelberg, E.A. and Ingraham, J.L. 1976. The Microbial World. New Jersey : Prentice-Hall Inc.
- Takamatsu, T., Shioya, S. and Okada, Y. 1985. Profile control scheme in a baker's yeast fed-batch culture. *Biotechnol. Bioeng.* 27 : 1675-1686.
- Thienes, C.H. and Haley, T.J. Clinical Toxicology. 5 th ed. Philadelphia : Lea&Febiger
- Wang, H.Y., Cooney, C.L. and Wang, D.I. 1979. Computer control of baker's yeast production. *Biotechnol. Bioeng.* 21 : 975-995.
- White, J. 1954. Yeast Technology. London : Chapman and Hall.
- Wu, W., Chen, K. and Chiou, H. 1985. On-line optimal control for fed-batch culture of baker's yeast production. *Biotechnol. Bioeng.* 27 : 756-760.

Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy sets . Information and control. 8 : 338-353.

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ วิธี diffusion โดยใช้ conway cell  
(Thienes and Haley ,1976)

#### สารเคมี

1. สารละลาย  $K_2Cr_2O_7$

ละลาย  $K_2Cr_2O_7$  4.262 กรัม ในน้ำ 100 มิลลิลิตร เติม  $H_2SO_4$  เข้มข้น 500 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1000 มิลลิลิตร

2. 20%  $Na_2CO_3$

ละลาย  $Na_2CO_3$  10 กรัม ด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรครบ 50 มิลลิลิตร

#### วิธีการ

1. ดูดสารละลาย  $K_2Cr_2O_7$  3.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในส่วนของ Conway cell
2. ใส่ 20%  $Na_2CO_3$  1 มิลลิลิตรลงในส่วนนอกของ Conway cell
3. ทากรีสที่ฝาและรอบขอบของ Conway cell
4. ดูดสารละลายตัวอย่างปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในส่วนนอก
5. บ่มที่ 90 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แล้ววางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 5 นาที
6. ดูดสารละลายจากส่วนใน ใส่ volumetric flask ขนาด 25 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ปริมาตรครบ 25 มิลลิลิตร
7. วัดค่าดูดกลืนแสงที่ 450 นาโนเมตร

## 2. การวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสโดยใช้ DNS reagent ตามวิธีของ Miller (1959)

### สารเคมี

DNS reagent ประกอบด้วย

1. dinitrosalicylic (DNS) acid	1.0 เปอร์เซ็นต์
2. phenol	0.2 เปอร์เซ็นต์
3. sodium potassium tartrate (Rochelle salt)	20 เปอร์เซ็นต์
4. $\text{Na}_2\text{SO}_3$	0.05 เปอร์เซ็นต์
5. NaOH	1.0 เปอร์เซ็นต์

### วิธีการเตรียม DNS reagent

ละลาย NaOH ในน้ำตามปริมาณที่ต้องการ แล้วจึงสารละลายอื่นๆ ลงในสารละลาย NaOH

### วิธีการ

1. ดูดสารละลายตัวอย่างมา 1 มิลลิลิตร
2. เติม DNS reagent ลงไป 3 มิลลิลิตร
3. นำไปต้มในน้ำเดือดนาน 5 นาที แล้วรีบทำให้เย็น
4. เติมน้ำกลั่นหลอดละ 6 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร

## 3. การหาน้ำหนักแห้งของยีสต์ ดัดแปลงจาก Stanier และคณะ (1976)

### การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมอาหารเลี้ยงยีสต์ใส่ในพลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส (ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) นาน 15 นาที ทิ้งให้เย็น จากนั้นเติมเชื้อยีสต์ลงไปโดยใช้เข็มเขี่ยเชื้อจาก slant นำไปบ่มเขย่าด้วยเครื่องบ่มเขย่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็ว 150 รอบต่อนาที นาน 24 ชั่วโมง



### การหาน้ำหนักแห้ง

ดูดตัวอย่างที่เตรียมไว้มา 20 , 18 , 16 , 14 , 12 , 10 , 8 , 6 , 4 และ 2 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงใช้ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที แยกเอาเซลล์ที่ได้ออกมาล้างด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง นำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาใส่โถดูดความชื้นจนเย็น ชั่งน้ำหนัก เมื่อลบน้ำหนักหลอดออกจากน้ำหนักที่ได้ น้ำหนักที่เหลือคือ ค่าน้ำหนักแห้งของยีสต์

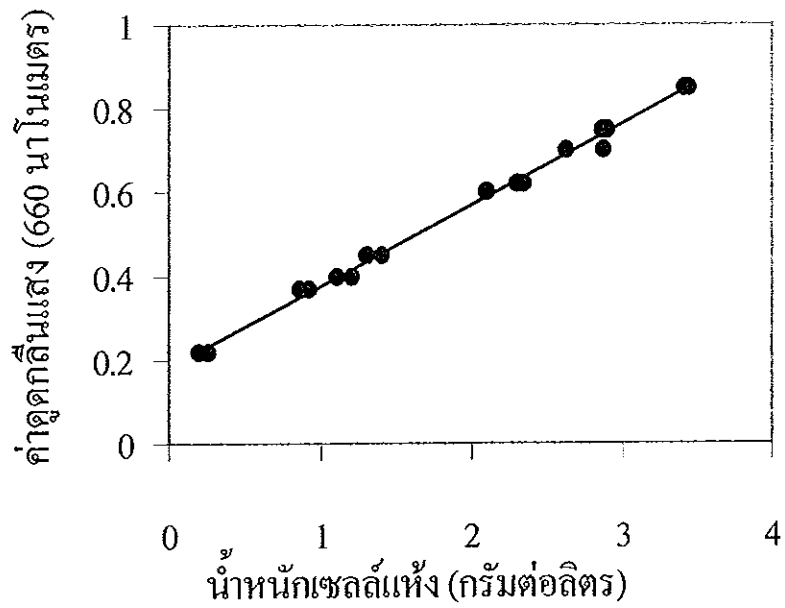
### การหาค่าความขุ่น (Optical Density : OD)

จากตัวอย่างที่เตรียมไว้ นำไปหาค่า OD ที่ 660 นาโนเมตร โดยทำ dilution ดังตารางผนวก ก1

ตารางผนวก ก1

ปริมาณตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ปริมาณอาหารเลี้ยงเชื้อ (มิลลิลิตร)
20	0
18	2
16	4
14	6
12	8
10	10
8	12
6	14
4	16
2	18

จะได้ค่า OD สัมพันธ์กับน้ำหนักแห้งของยีสต์แสดงดังรูปผนวก ก1



รูปผนวก ก1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเซลล์แห้งของยีสต์กับค่าการดูดกลืนแสง

## ภาคผนวก ข

### ลักษณะของถังหมักและระบบควบคุม

#### 1. ลักษณะของถังหมัก

ถังหมักขนาด 1.5 ลิตร รุ่น BIOSTAT B ของบริษัท B.Braun Biotech International ถังหมักและระบบควบคุมการหมักประกอบด้วย

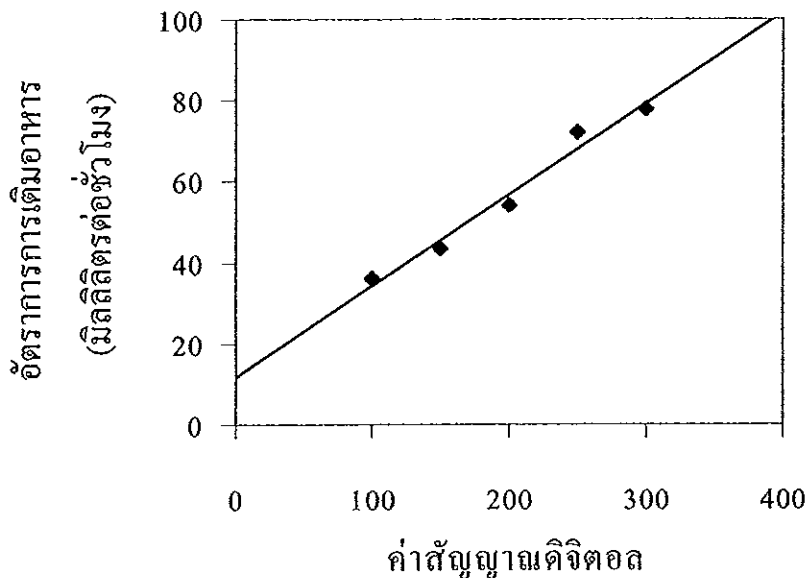
1. ถังหมัก
2. ระบบควบคุมการให้อากาศ
3. ระบบควบคุมการกวน
4. ระบบควบคุมอุณหภูมิ
5. ระบบควบคุมพีเอช
6. ระบบควบคุมฟอง
7. ระบบควบคุมการเติมอาหาร

#### 2. วิธีการใช้ถังหมัก

1. ตรวจสอบความเรียบร้อยของส่วนประกอบต่างๆของถังหมัก
2. สอบเทียบเซนเซอร์ต่างๆ เช่น พีเอช ออกซิเจนที่ละลายน้ำ
3. เติมอาหารที่ใช้เลี้ยงยีสต์จนมπίงลงในถังหมัก (สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อแสดงในบทที่ 2)
4. นำถังหมักไปเข้าหม้อนึ่งความดันที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลา 20 นาที
5. ต่อหัวเซนเซอร์ต่างๆ เข้ากับชุดควบคุมให้เรียบร้อย
6. ต่อระบบควบคุมการเติมอาหาร (แสดงในหัวข้อที่ 3 ของภาคผนวก ข)
7. เติมเชื้อยีสต์ตั้งต้น โดยใช้เทคนิคการปลอดเชื้อ
8. ตั้งค่าที่ต้องการควบคุมในชุดควบคุม ได้แก่รอบการกวน อัตราการให้อากาศ อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่าง

### 3. ระบบควบคุมการเติมอาหาร

ในงานวิจัยนี้ นำ peristaltic pump รุ่น SJ-1211 ของบริษัท Chromatograph ATTA มาใช้เป็นปั๊มในการเติมอาหาร โดยปกติปั๊มนี้มีการควบคุมอัตราการไหลเป็นอนาล็อกไม่สามารถรับสัญญาณจากคอมพิวเตอร์ได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ดัดแปลงปั๊มรุ่นนี้เพื่อให้สามารถรับสัญญาณจากคอมพิวเตอร์ได้ โดยรับสัญญาณผ่านทางดีพูเอการ์ต โดยต่อดีพูเอการ์ตเข้ากับคอมพิวเตอร์ในตำแหน่งแอดเดรสของพอร์ต 632 ดีพูเอการ์ตจะรับค่าที่เป็นเลขฐานสองขนาด 12 หลัก มีค่าระหว่าง 0-4095 และแปลงค่านี้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีค่าอยู่ในช่วง 0-9 โวลต์ จากนั้นจะส่งค่าสัญญาณไฟฟ้านี้ไปควบคุมอัตราการไหลของปั๊ม โดยที่ค่าเลขฐานสองได้จากการคำนวณอัตราการเติมอาหารจากโปรแกรมการควบคุมกระบวนการหมัก ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณดิจิทัลและอัตราการไหลแสดงดังรูปผนวก ข1



รูปผนวก ข1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณดิจิทัลและอัตราการไหล

คุณสมบัติของตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาลอกแสดงดังนี้

- D/A :
- 12 bit, 1 channel.
  - output voltage 0-9V
  - Unipolar or bipolar
  - setting time 500 nsec
  - Nonlinearity 0.2%

- A/D :
- 12 bit, 16 channel.
  - input voltage 0-9V
  - Unipolar
  - Successive approximation method
  - Conversion time 60 nsec

#### 4. ตัวอย่างการคำนวณในวิธีการวัดแบบทางอ้อม

จากการทดลองควบคุมกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะ โดยให้อากาศ 1 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรถังหมักต่อนาที (VVM) ปริมาตรเริ่มต้นในการหมักเท่ากับ 1 ลิตร ปริมาณเซลล์ 0.4 กรัมต่อลิตร กลูโคส 0.5 กรัมต่อลิตร และเอทานอล 0.871 กรัมต่อลิตร วัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และปริมาณเซลล์ทุก 15 นาที นำค่าที่ได้ไปคำนวณความเข้มข้นของกลูโคสและเอทานอล ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวก ข1 ซึ่งเป็นข้อมูลจากการนำเอาบางช่วงของการทดลองมาแสดงตัวอย่างการคำนวณการวัดโดยทางอ้อมโดยใช้สมการสตอยคิโอเมตริก จากบทที่ 4 แบ่งการคำนวณเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ยังไม่มีการเติมกลูโคส ชั่วโมงที่ 0.30-0.45 และช่วงที่มีการเติมกลูโคส ชั่วโมงที่ 4.30-4.45 ในช่วงนี้มีการเติมกลูโคสความเข้มข้น 200 กรัมต่อลิตร เป็นอัตรา 0.006 ลิตรต่อชั่วโมง ปริมาณน้ำหมัก 1.022 ลิตร

ตารางผนวก ข1 ผลการทดลองการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์แบบกึ่งกะ

ชั่วโมงที่	เซลล์ (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (กรัมต่อลิตร)	เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	O <sub>2</sub> (เปอร์เซ็นต์)	CO <sub>2</sub> (เปอร์เซ็นต์)
0.15	0.408	0.438	0.875	19.38	1.53
0.30	0.415	0.374	0.879	19.37	1.55
4.30	0.984	0.279	1.045	19.62	1.31
4.45	1.002	0.257	1.042	18.05	2.85

#### 4.1. ตัวอย่างการคำนวณในช่วงแรก ระหว่างชั่วโมงที่ 0.15 ถึง 0.30

ในการทดลองให้อากาศ 1 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรถังหมักก่อนที่ ดังนั้นในช่วงเวลา 15 นาที ให้อากาศในถังหมัก 15 ลิตร ในสมการสตอยคิโอเมตริก แปลงหน่วยการคำนวณเป็น โมล

ปริมาณ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ร้อยละ 1.55 เท่ากับ

$$(1.55/100 \times 15 \text{ ลิตร} / 22.4 \text{ ลิตรต่อ โมล})$$

$$= 0.0103 \text{ โมล}$$

ปริมาณ ก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไป เหลือร้อยละ 19.37 เท่ากับ

$$(20.9 - 19.37) / 100 \times 15 \text{ ลิตร} / 22.4 \text{ ลิตรต่อ โมล}$$

$$= 0.0102 \text{ โมล}$$

ปริมาณเซลล์เพิ่มขึ้น 0.007 กรัมต่อลิตร เท่ากับ

$$(0.007 \text{ กรัมต่อลิตร} \times \text{ปริมาตร 1 ลิตร}) / \text{มวลโมเลกุล 160 กรัมต่อ โมล}$$

$$= 0.000044 \text{ โมล}$$

จากบทที่ 4 สมการการคำนวณปริมาณกลูโคสที่ใช้ไปและปริมาณเอทานอลที่เพิ่มขึ้น ดังนี้

ปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้น

$$g = f - b - 0.475d$$

$$= 0.0103 - 0.0102 - (0.475 \times 0.000044)$$

$$= 0.0000791 \text{ โมล}$$

ได้ปริมาณเอทานอลเพิ่มขึ้น 0.000179 โมล เท่ากับ

$$(0.0000791 \text{ โมล} \times 46 \text{ กรัมต่อ โมล} / 1 \text{ ลิตร})$$

$$= 0.00363 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

ดังนั้นปริมาณเอทานอลที่สะสมในชั่วโมงที่ 0.30 เท่ากับ  $0.875 + 0.00363$

$$= 0.879 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

ปริมาณกลูโคสที่ใช้ไป

$$\begin{aligned} a &= d+0.166f+0.33g \\ &= 0.000044+(0.166\times 0.0103)+(0.33\times 0.0000791) \\ &= 0.00177 \text{ โมล} \\ &= 0.32 \text{ กรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

ปริมาณกลูโคสที่ใช้ไปจริง เท่ากับ 0.32 กรัมต่อลิตร ลบด้วยแฟกเตอร์ 0.26 = 0.06  
ดังนั้นปริมาณกลูโคสที่เหลืออยู่ในชั่วโมงที่ 0.30 เท่ากับ 0.438-0.06  
= 0.378 กรัมต่อลิตร

4.2. ตัวอย่างการคำนวณในช่วงที่ 2 ระหว่างชั่วโมงที่ 4.30 ถึง 4.45

ปริมาณ ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์เกิดขึ้น ร้อยละ 2.85 เท่ากับ

$$\begin{aligned} &(2.85/100\times 15 \text{ ลิตร}/22.4 \text{ ลิตรต่อ โมล}) \\ &= 0.01908 \text{ โมล} \end{aligned}$$

ปริมาณ ก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไป เหลือร้อยละ 18.05 เท่ากับ

$$\begin{aligned} &(20.9-18.05)/100\times 15 \text{ ลิตร}/22.4 \text{ ลิตรต่อ โมล} \\ &= 0.01908 \text{ โมล} \end{aligned}$$

ปริมาณเซลล์เพิ่มขึ้น 0.018 กรัมต่อลิตร เท่ากับ

$$\begin{aligned} &(0.018 \text{ กรัมต่อลิตร} \times \text{ปริมาตร } 1.022 \text{ ลิตร})/\text{มวลโมเลกุล } 160 \text{ กรัมต่อ โมล} \\ &= 0.0001149 \text{ โมล} \end{aligned}$$

สมการการคำนวณปริมาณกลูโคสที่ใช้ไปและปริมาณเอทานอลที่เพิ่มขึ้น ดังนี้

ปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้น

$$\begin{aligned} g &= f-b-0.475d \\ &= 0.01908-0.01908-(0.475\times 0.0001149) \\ &= -0.0000545 \text{ โมล} \end{aligned}$$



ปริมาณเอทานอลถูกใช้ไป 0.0000545 โมล เท่ากับ

(0.0000545 โมล  $\times$  46 กรัมต่อ โมล / 1.022 ลิตร)

$$= 0.00245 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

ดังนั้นปริมาณเอทานอลที่สะสมในชั่วโมงที่ 0.30 เท่ากับ 1.045-0.00245

$$= 1.042 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

ปริมาณกลูโคสที่ใช้ไป

$$a = d + 0.166f + 0.33g$$

$$= 0.0001146 + (0.166 \times 0.01908) + (0.33 \times -0.0000545)$$

$$= 0.0032 \text{ โมล}$$

$$= 0.574 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

ปริมาณกลูโคสที่ใช้ไปจริง เท่ากับ 0.574 กรัมต่อลิตร ลบด้วยแฟกเตอร์ 0.26

$$= 0.314 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

เติมกลูโคสเท่ากับ 0.006 ลิตรต่อชั่วโมง  $\times$  200 กรัมต่อลิตร  $\times$  1 ชั่วโมง / 60 นาที  $\times$  15

นาที

$$= 0.3 \text{ กรัม}$$

$$= 0.293 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

ดังนั้นปริมาณกลูโคสที่เหลืออยู่ในชั่วโมงที่ 4.45 เท่ากับ

ปริมาณกลูโคสในชั่วโมงที่ 4.30 (0.279 กรัมต่อลิตร) + ปริมาณกลูโคสที่เติม

(0.293 กรัมต่อลิตร) - ปริมาณกลูโคสที่ใช้จริง (0.314 กรัมต่อลิตร)

$$= 0.257 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

## 5. ตัวอย่างการคำนวณอัตราการเจริญจำเพาะและyield

ในการปรับแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ให้มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง พารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับแบบจำลองบางส่วนเป็นค่าที่คำนวณได้จากผลการทดลอง พารามิเตอร์เหล่านี้ ได้แก่  $\mu_{\max}$ ,  $Y$ ,  $Y_{es}$ ,  $Y_{xs}$

ผลจากการทดลองหมักยีสต์ขุ่นมัวแบบกึ่งกะ โดยเติมอาหารด้วยอัตราคงที่ 0.01 ลิตรต่อชั่วโมง ยกตัวอย่างการคำนวณในชั่วโมงที่ 4-5

ตารางผนวก ข2 ผลการทดลองเลี้ยงยีสต์ขุ่นมัวแบบกึ่งกะในชั่วโมงที่ 4-5

ชั่วโมงที่	ปริมาณเซลล์ (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นเอทานอล (กรัมต่อลิตร)
4	1.06	2.11	1.16
5	1.33	1.35	1.37

### 5.1 การคำนวณอัตราการเจริญจำเพาะ ( $\mu$ )

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} \cong \frac{1}{X} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{1.33} \cdot \frac{(1.33 - 1.06)}{1} \\ &= 0.20\end{aligned}$$

### 5.2 การคำนวณผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้น้ำตาล (Y)

$$\begin{aligned}Y &= \frac{\Delta X}{\Delta S} \\ &= \frac{1.33 - 1.06}{2 - 1} \\ &= 0.27\end{aligned}$$

5.3 การคำนวณปริมาณเอธานอลที่สร้างต่อปริมาณกลูโคสที่เพิ่ม ( $Y_{es}$ )

$$\begin{aligned} Y_{es} &= \frac{\Delta C_e}{\Delta S} \\ &= \frac{1.37 - 1.16}{2 - 1} \\ &= 0.21 \end{aligned}$$

5.4 การคำนวณผลผลิตเซลล์ที่ได้ต่อการใช้เอธานอล ( $Y_{xe}$ )

$$\begin{aligned} Y_{xe} &= \frac{\Delta X}{\Delta C_e} \\ &= \frac{1.3 - 1}{1.37 - 1.16} \\ &= 1.42 \end{aligned}$$

## ภาคผนวก ก

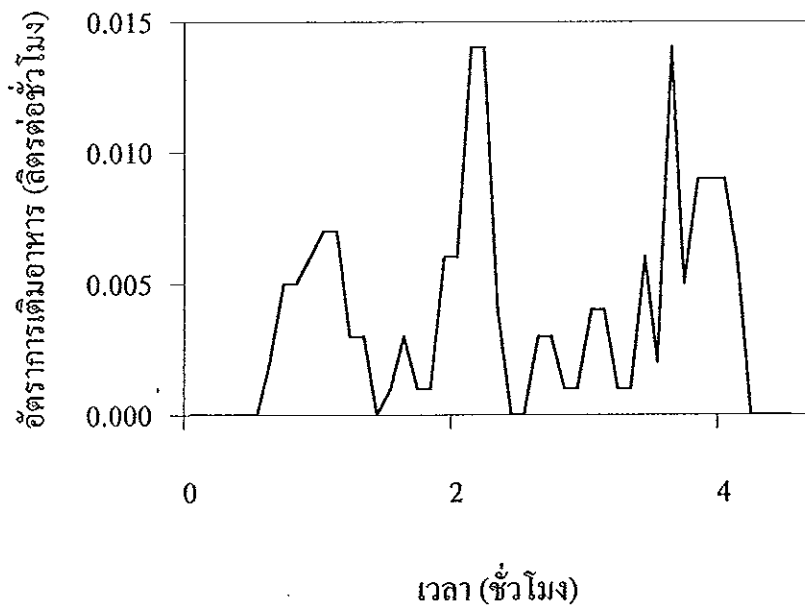
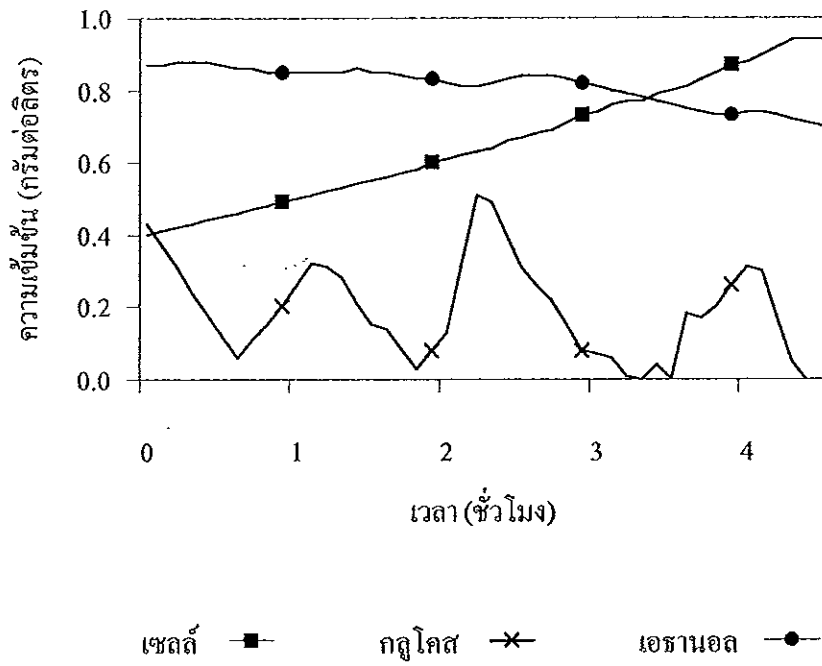
## ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปัง

## 1. ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังด้วยพีซีซี

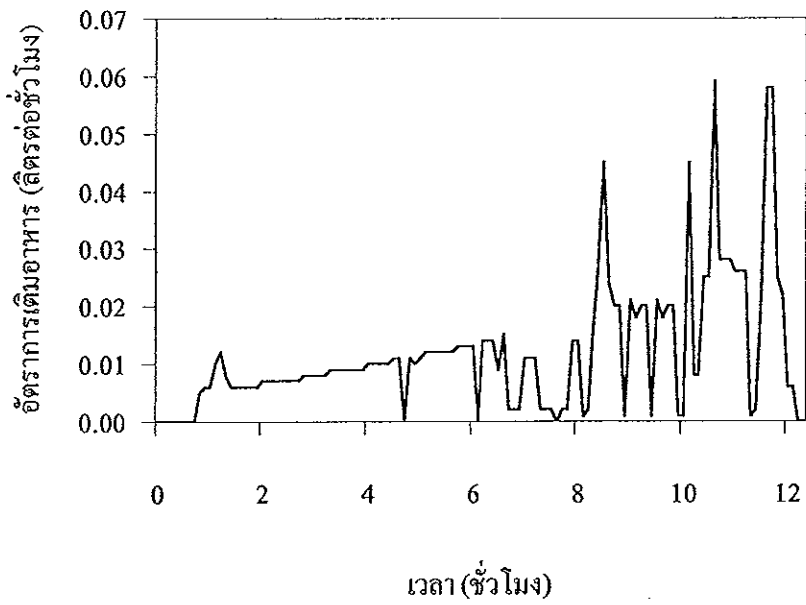
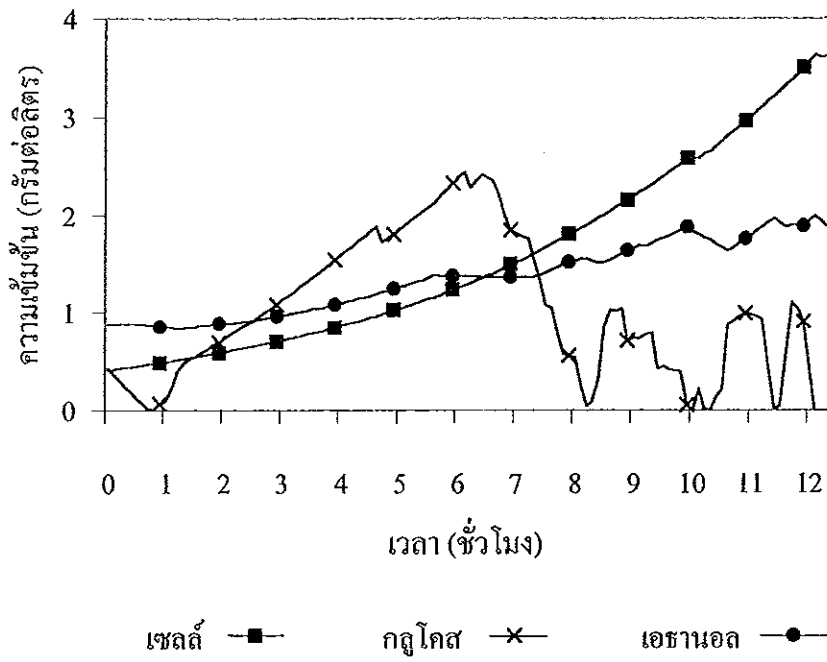
จำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ นำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะในงานวิจัยของ Takamatsu และคณะ (1985) ที่มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับผลจากตัวอย่างการทดลองแล้วในบทที่ 4 มาใช้ในการจำลองสถานการณ์ โดยพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าดังนี้  $k_1 = 0.01$ ,  $k_2 = 0.01$ ,  $k_s = 0.10$ ,  $m = 0.03$ ,  $\mu_{max} = 0.25$ ,  $Y = 0.12$ ,  $Y_{cs} = 0.12$  และ  $Y_{xe} = 0.48$  ระบบควบคุมแบบพีซีซีที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงในบทที่ 3 มีชุดการควบคุมแสดงดังตาราง ก1 ค่าเริ่มต้นของสภาวะการหมักที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์คือ ปริมาณเซลล์ 0.40 กรัมต่อลิตร กลูโคส 0.45 กรัมต่อลิตร เอทานอล 0.80 กรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำหมักเริ่มต้น 1 ลิตร

ตารางผนวก ก1 การควบคุมแบบพีซีซีที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักด้วยพีซีซี

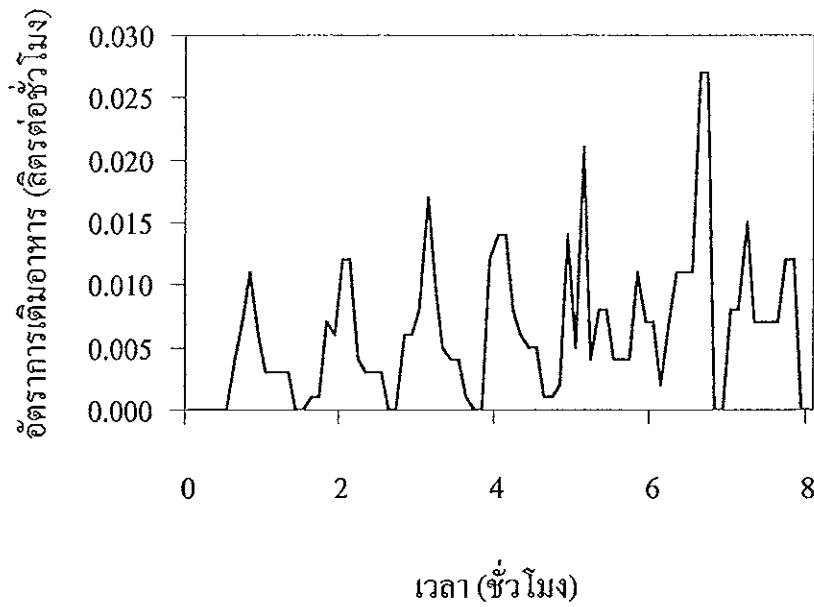
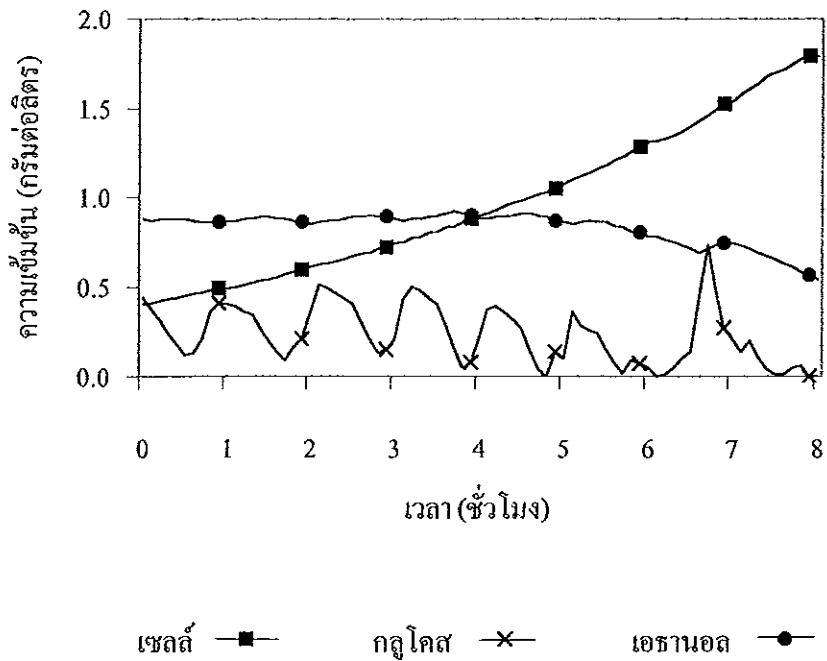
การควบคุมแบบที่	กฎการควบคุมชุดที่	จุดอ้างอิงกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	จุดอ้างอิงเอทานอล (กรัมต่อลิตร)
1	1	0.15	0.5
2			2.0
3		0.20	0.5
4			2.0
5	2	0.15	0.5
6			2.0
7		0.20	0.5
8			2.0



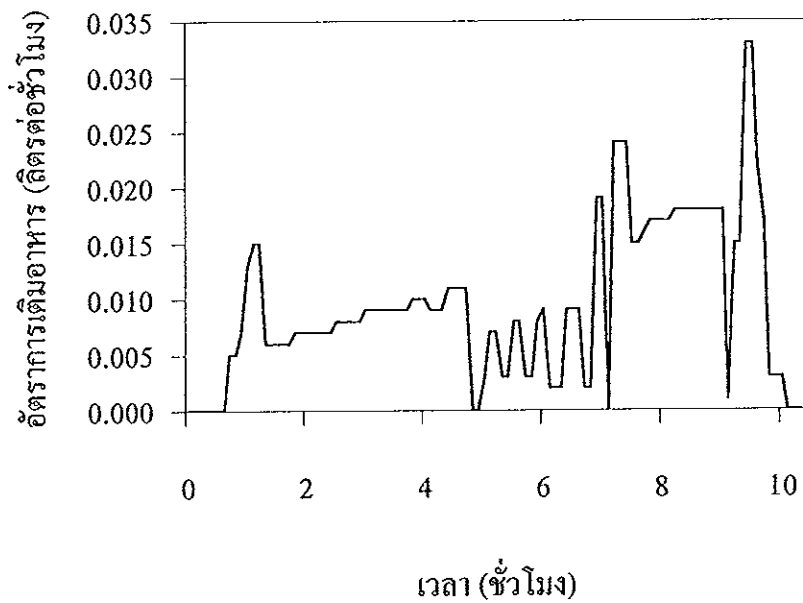
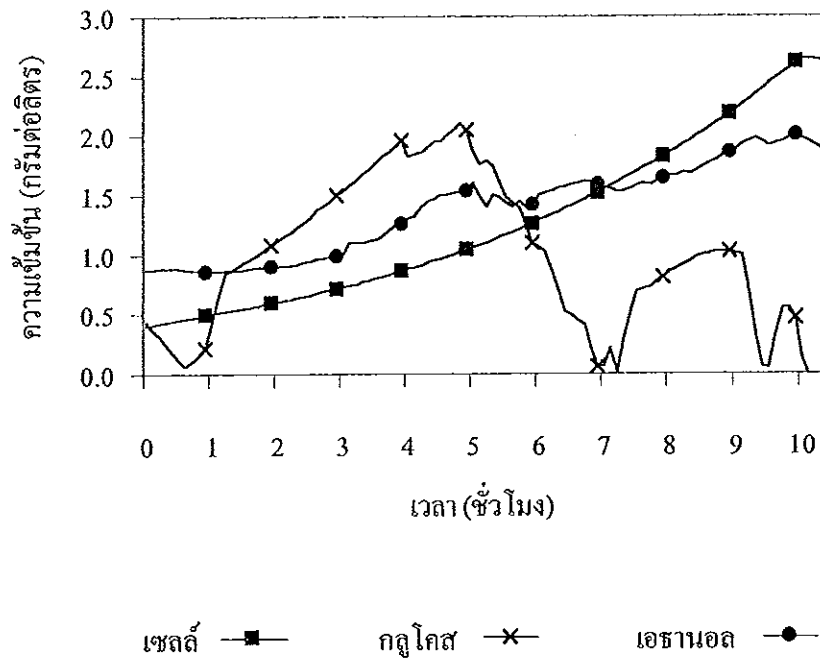
ภาพผนวก ค1 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบ กึ่งกะด้วยระบบฟัซซี่ เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 1



ภาพผนวก ค2 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นมัวแบบกึ่งกะด้วยระบบพีซีซี เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 2

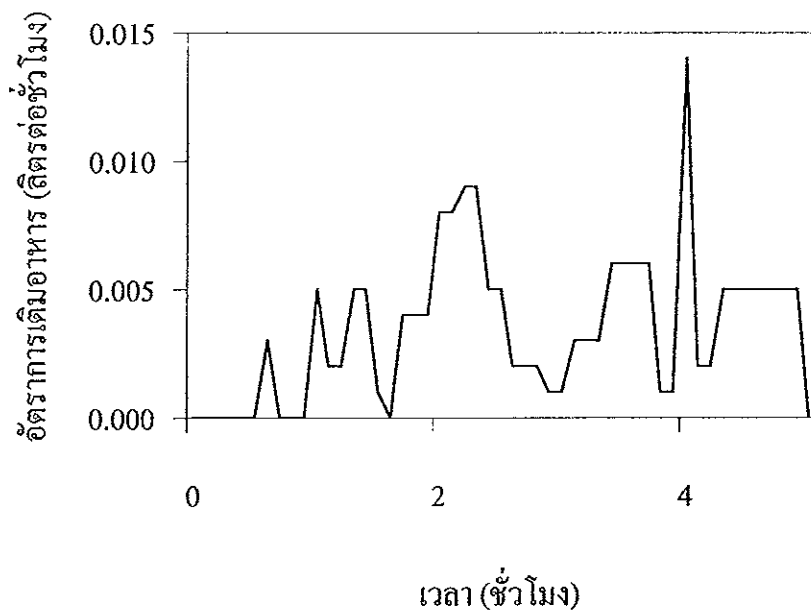
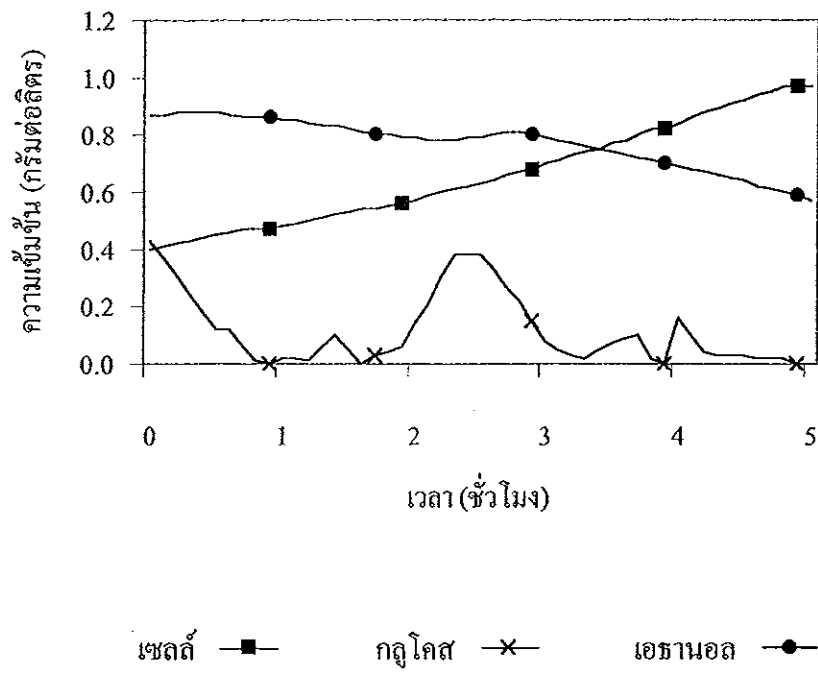


ภาพผนวก ค3 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขุ่นมัวแบบกึ่งกะด้วยระบบพีซีซี เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 3

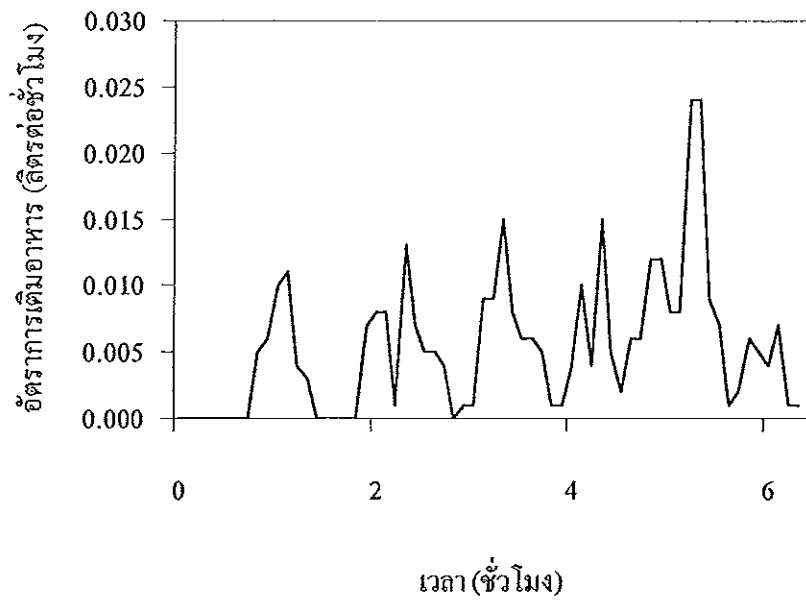
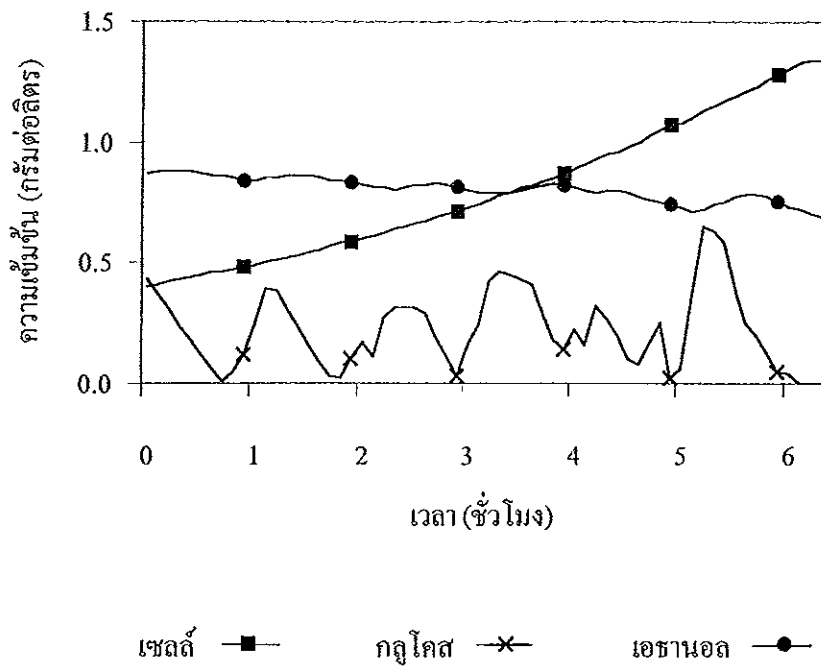


ภาพผนวก ค4 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ข้ามมปีงแบบ  
กึ่งกะด้วยระบบพีซซี เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 4

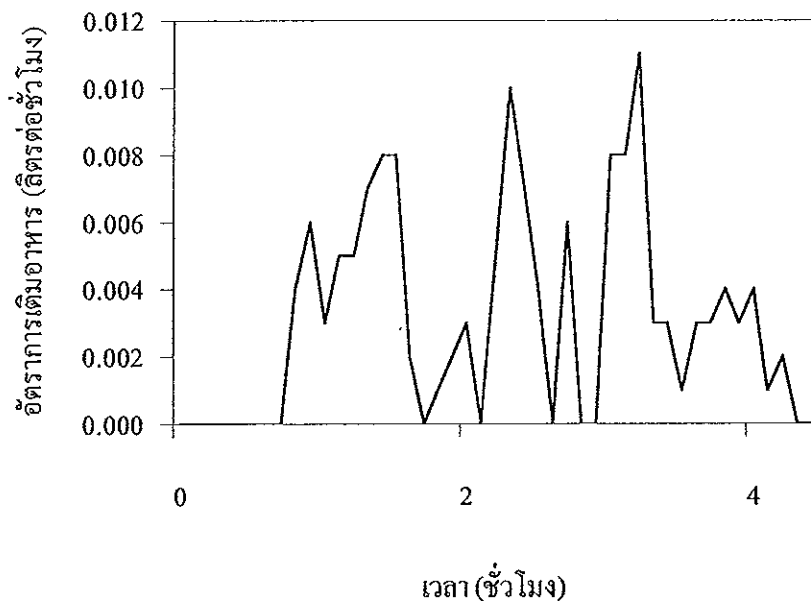
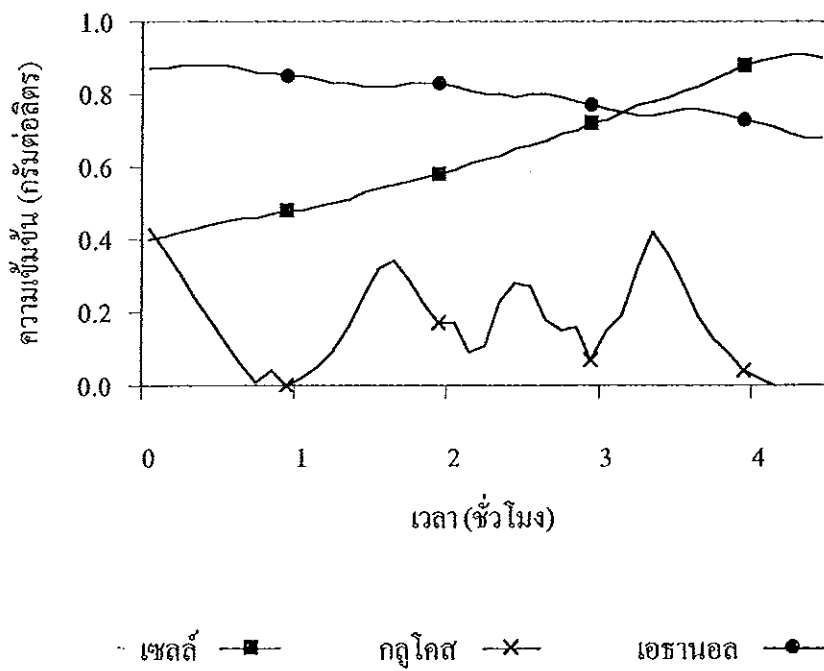




ภาพผนวก ค5 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบ กึ่งกะด้วยระบบพีซี เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 5



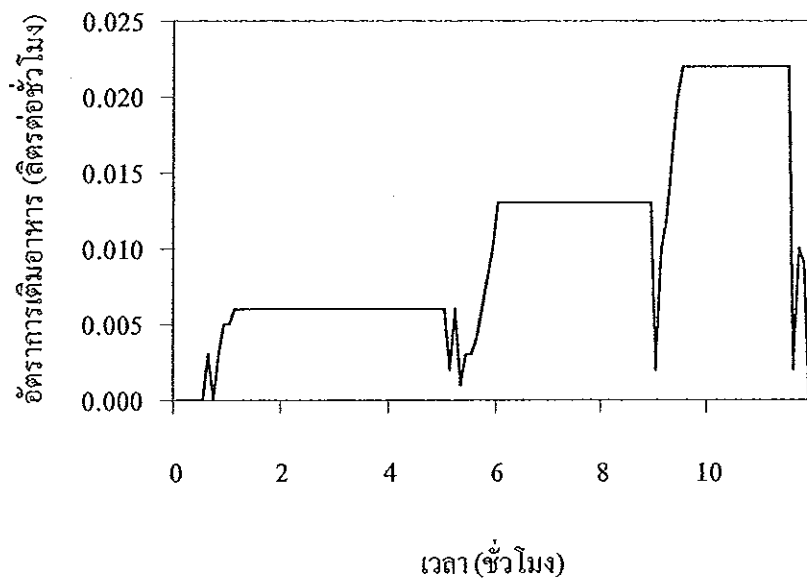
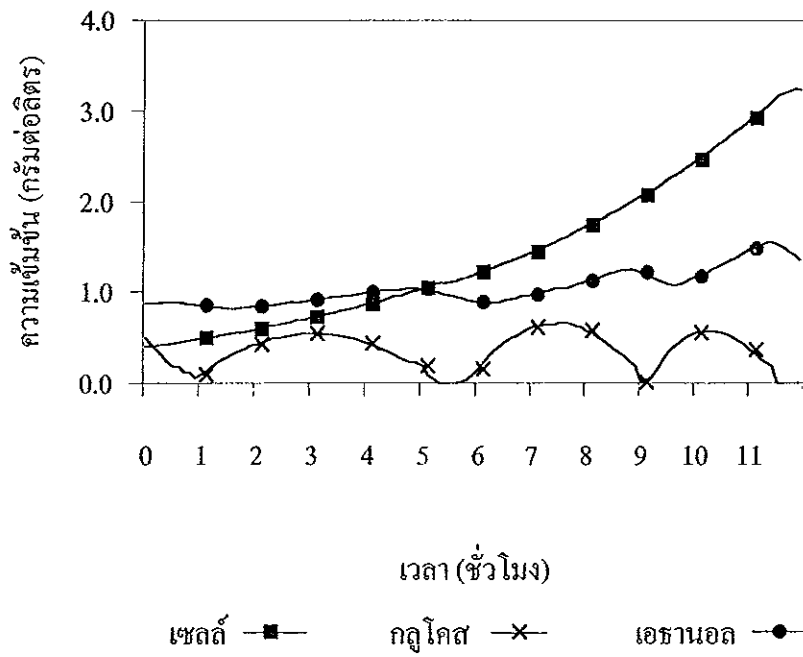
ภาพผนวก ค6 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบ กึ่งกะด้วยระบบพีซีซี เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 6



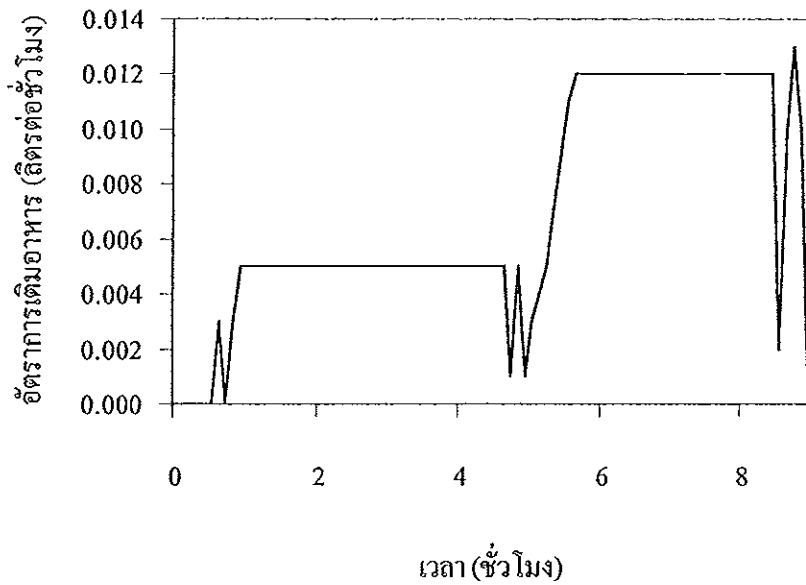
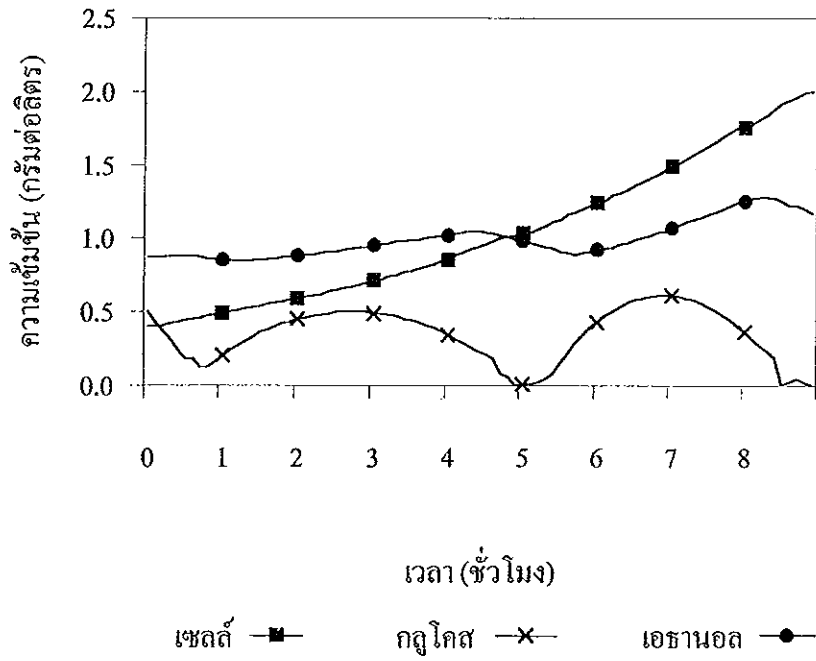
ภาพผนวก ก7 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์จำแนมปังแบบ กึ่งกะด้วยระบบพีซีซี เมื่อใช้การควบคุมแบบที่ 7

## 2. ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบฟีด

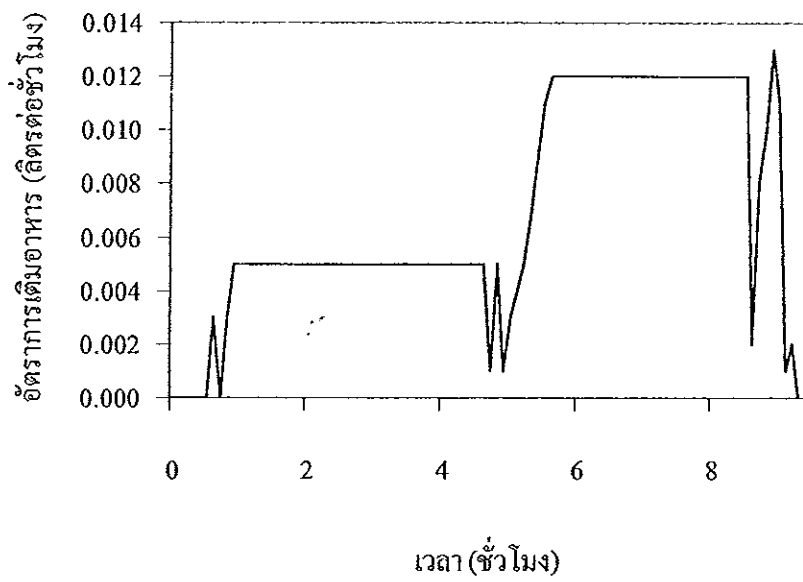
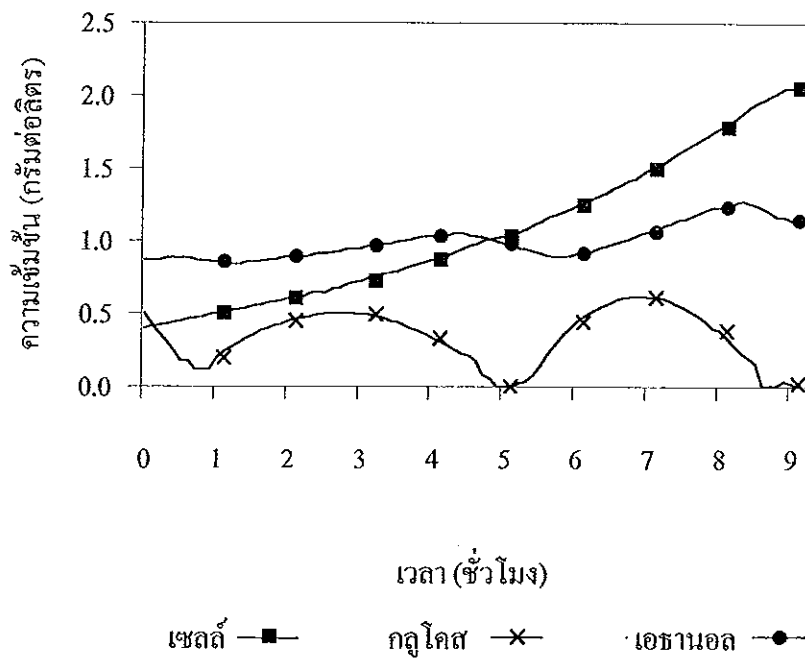
จำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบฟีด นำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเจริญของยีสต์แบบกึ่งกะในงานวิจัยของ Takamatsu และคณะ(1985) ที่มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับผลจากตัวอย่างการทดลองแล้วในบทที่ 4 มาใช้ในการจำลองสถานการณ์ โดยพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าดังนี้  $k_1 = 0.01$ ,  $k_2 = 0.01$ ,  $k_s = 0.10$ ,  $m = 0.03$ ,  $\mu_{\max} = 0.25$ ,  $Y = 0.12$ ,  $Y_{e,s} = 0.12$  และ  $Y_{x/s} = 0.48$  ค่าเริ่มต้นของสภาวะการหมักที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์คือ ปริมาณเซลล์ 0.40 กรัมต่อลิตร กลูโคส 0.50 กรัมต่อลิตร เอทานอล 0.87 กรัมต่อลิตร และปริมาตรน้ำหมักเริ่มต้น 1 ลิตร ปรับค่าพารามิเตอร์  $K_c$  และ  $\tau_1$  ในการควบคุมแบบฟีด เพื่อต้องการระบบควบคุมที่ให้ประสิทธิภาพดีตรงตามจุดมุ่งหมายมากที่สุด



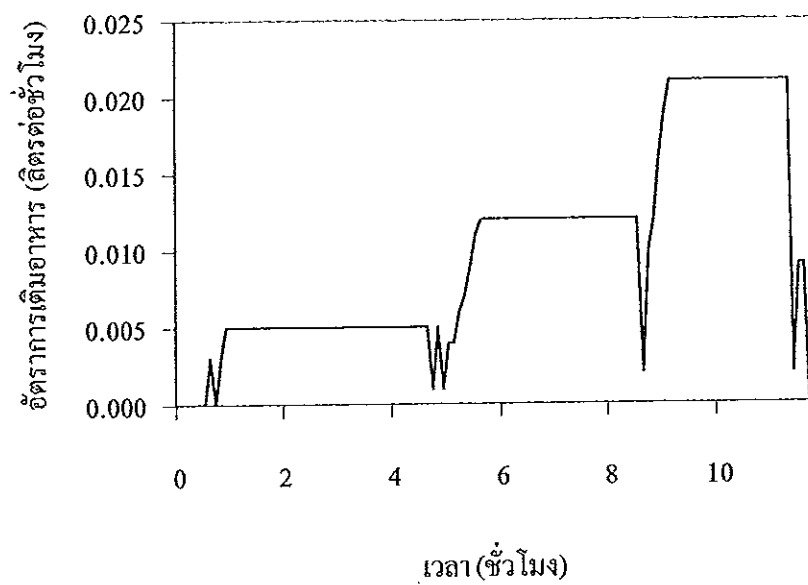
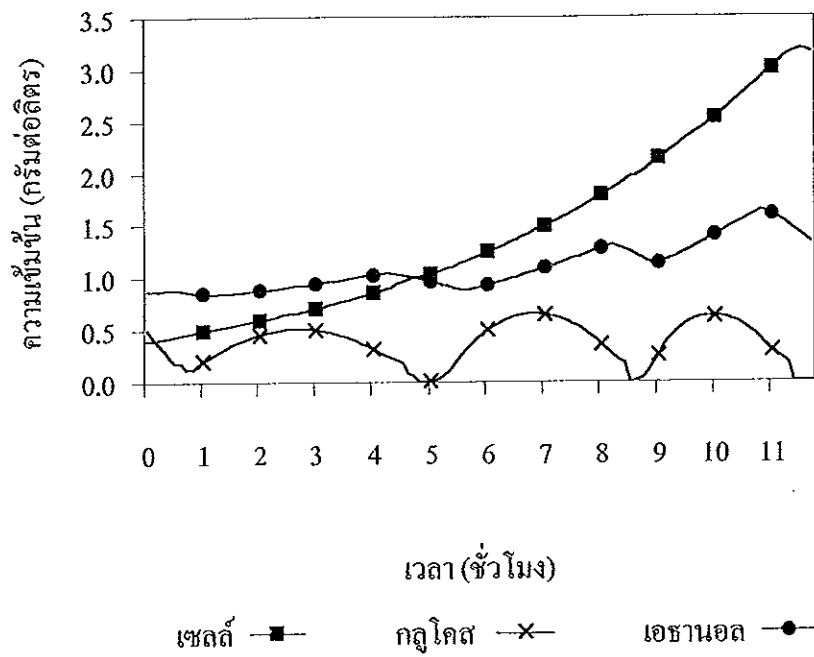
ภาพผนวก ค8 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีไอ เมื่อ  $K_c = 0.0005$  และ  $\tau_1 = 200$



ภาพผนวก ค9 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีไอ เมื่อ  $K_c = 0.0010$  และ  $\tau_i = 200$

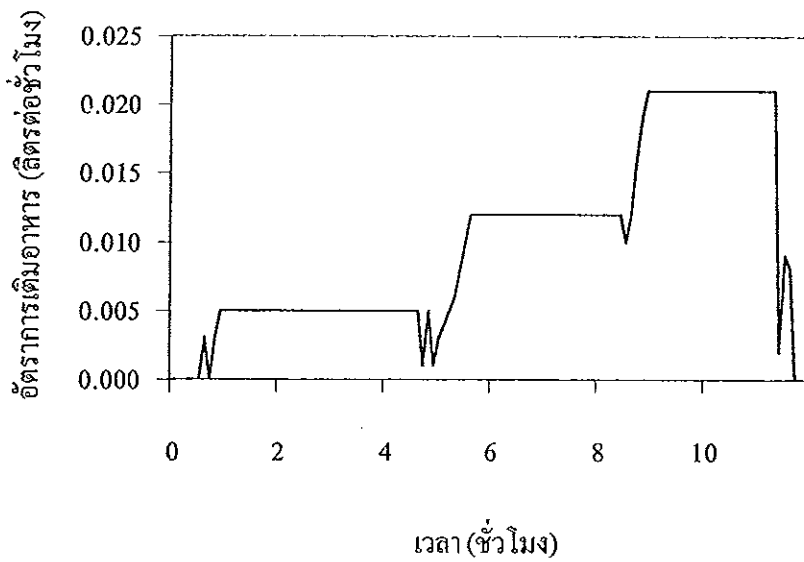
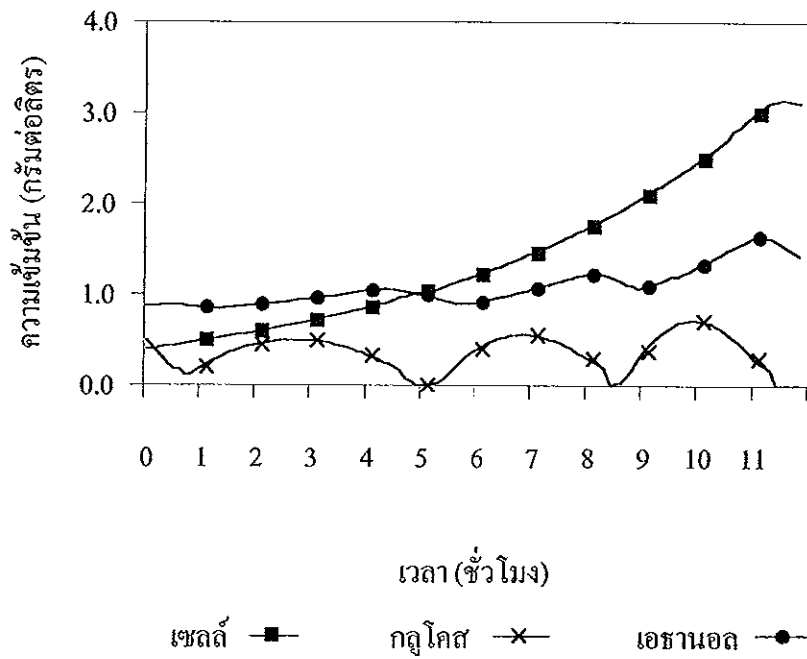


ภาพผนวก ค10 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีไอ เมื่อ  $K_c = 0.0010$  และ  $\tau_i = 100$



ภาพผนวก ค11 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบพีไอ เมื่อ  $K_c = 0.0010$  และ  $\tau_i = 300$





ภาพผนวก ค12 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักแบบกึ่งกะด้วยการควบคุมแบบฟีด เมื่อ  $K_C = 0.0010$  และ  $\tau_I = 400$

## ภาคผนวก ง

### โปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการหาผลเฉลยและจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะเป็นโปรแกรมที่ดำเนินการภายใต้ระบบดอส โดยใช้ภาษา C++ ในการเขียนโปรแกรม ตัวแปลภาษาที่ใช้คือ Borland C++ เวอร์ชัน 4.02 โปรแกรมสามารถใช้ได้กับเครื่องคอมพิวเตอร์รุ่น 486DX ขึ้นไป โดยที่โปรแกรมสามารถคำนวณ แสดงผลทางหน้าจอและจัดเก็บข้อมูลลงไฟล์ได้

โปรแกรมที่สร้างขึ้นประกอบด้วยโปรแกรมต่างๆ ดังนี้

1. โปรแกรมจำลองสถานการณ์แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ

2. โปรแกรมการคำนวณสมการสตอยคิโอมेटริกเพื่อใช้ร่วมกับการควบคุม

3. โปรแกรมการคำนวณระบบฟัซซี่ลอจิก

4. โปรแกรมจำลองสถานการณ์การควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ

4.1 การควบคุมด้วยฟัซซี่

4.2 การควบคุมแบบพีไอ

5. โปรแกรมการควบคุมกระบวนการหมักยีสต์ขนมปังแบบกึ่งกะ

5.1 การควบคุมด้วยฟัซซี่

5.2 การควบคุมแบบพีไอ

ฟังก์ชันอื่นๆที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์และการควบคุมด้วยระบบฟัซซี่ลอจิก ได้แก่ (Cox, 1994)

FzyAND	FzyCompAND	FzyCompOR
FzyCondProposition	FzyCoordSeries	FzyCopyVector
FzyCorrMinimum	FzyCorrProduct	FzyCreateSet
FzyDefuzzify	FzyDeledteSet	FzyFindPlateau
FzyFuzzyScalar	FzyGetHeight	FzyGetMembership

```

//-----//
//          ANNARUMON PHOONSIRI 'S FUZZY LOGIC PROGRAM          //
//-----//

#include <iostream.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <share.h>
#include <fcntl.h>
#include <sys/stat.h>
#include <io.h>
#include <math.h>
#include <dos.h>
#include <time.h>
#include "PDB.hpp"
#include "FDB.hpp"
#include "SFZYctl.hpp"
#include "SSYSctl.hpp"
#include "fuzzy.hpp"
#include "mtypes.hpp"
#include "mtsptype.hpp"
//-----Rules in Process Control-----//

static const char *Rules[] =
{
  "R1  glucose is S and ethanol is S then F is PM",
  "R2  glucose is M and ethanol is S then F is PS",
  "R3  glucose is B and ethanol is S then F is NS",
  "R4  glucose is S and ethanol is M then F is PS",
  "R5  glucose is M and ethanol is M then F is ZE",
  "R6  glucose is B and ethanol is M then F is NM",
  "R7  glucose is S and ethanol is B then F is NS",
  "R8  glucose is M and ethanol is B then F is NM",
  "R9  glucose is B and ethanol is B then F is NB" };

```

```

static const Rulemax=9;
extern unsigned _stklen=50000;
//---- Fuzzy sets in Feed-----//---- total 7 sets ,but triangle set 5 sets -----//
char *FeFDBnames[]=
{
    "NM",
    "NS",
    "ZE",
    "PS",
    "PM" };

const int FzyFeMax=5;
double FePoint[]={-1,-.66,-.33,0,1,2,3};
//----Fuzzy sets in Glucose-----//
char *GIFDBnames[]=
{
    "SMALL",
    "MEDIUM",
    "BIG" };

const int FzyGIMax=3;
double GIPoint[]={0,0.1,0.2,0.3,0.4};
//----Fuzzy sets in ethanol-----//
char *EtFDBnames[]=
{
    "S",
    "M",
    "B" };

const int FzyEtMax=3;
double EtPoint[]={0,1,2,3,4};
double fshpr1policy(const char**,double,double,float*,int*);
//----start main-----//
void main(void)
{
    PDB      *prcPDBptr;
    FDB      *FDBptr[FDBvecmax],
             *FeFDBptr[FzyFeMax],
             *GIFDBptr[FzyGIMax],

```

```

        *EtFDBptr[FzyEtMax];
VDB      *VDBptr;
Int      i,status,FDBcnt,Hdgcnt,TryCnt[2];
double   Domain[2],Parms[4];
float    compidx;
FILE     *mdlout,*outp;
int      hand,handle,pp;
float    a_buf[20],r_buf[20],p_buf[10];
float    FF,    //feed forward (L/hr)
         mu,   //specific growth rate (hr^-1)
         x,    //cell concentration (g/L)
         Yxs;  //cell yield/sugar consume (g/g)
int      p;
float    Feed,FB,glucose,ethanol,F;
unsigned value;
float    v=1;  //medium volume (L) 1 L
float    S=200; //feed concentration (g/L) 120 g/L
clock_t  start,end;

```

```

MdlConnecttoFMS(&status);
prcPDBptr=MdlCreatePolicy("FEEDING",MODELADD,&status);
XSYSctl.XSYScurrPDBptr=prcPDBptr;
MdlInsertHedges(prcPDBptr,&Hdgcnt,&status);
mdlout=MtsGetSystemFile(SYSMODFILE);
/--create and insert the control variable
Domain[0]=FePoint[0];  Domain[1]=FePoint[6];
VDBptr=VarCreateScalar("FEED",REAL,Domain,"0",&status);
MdlLinkVDB(VDBptr,prcPDBptr,&status);
/--Create the basic fuzzy sets (FEED)
Domain[2]=FePoint[5];
FeFDBptr[0]=FzyCreateSet("PB",INCREASE,Domain,Parms,0,&status);
strcpy(FeFDBptr[0]->FDBdesc,"PB for Feed");
MdlLinkFDB(FeFDBptr[0],prcPDBptr,&status);

```

```

Domain[2]=FePoint[1];
FeFDBptr[1]=FzyCreateSet("NB", DECREASE,Domain,Parms,0,&status);
strcpy(FeFDBptr[1]->FDBdesc,"NB for Feed");
MdlLinkFDB(FeFDBptr[1],prcPDBptr,&status);
/--Create Triangle (FEED)
for(i=0;i<FzyFeMax;i++)
{
FeFDBptr[i+2]=new FDB;
FzyInitFDB(FeFDBptr[i+2]);
strcpy(FeFDBptr[i+2]->FDBid,FeFDBnames[i]);
FeFDBptr[i+2]->FDBdomain[0]=Domain[0];
FeFDBptr[i+2]->FDBdomain[1]=Domain[1];
MdlLinkFDB(FeFDBptr[i+2],prcPDBptr,&status);
myFzyTriangleCurve(FeFDBptr[i+2],Domain,FePoint[i],FePoint[i+1],
FePoint[i+2],&status); }
//FDBcnt=7;
//FzyPlotVar("Feed",FeFDBptr,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
/--Create the basic fuzzy sets (Glucose)
for(i=0;i<FzyGIMax;i++)
{
GIFDBptr[i]=new FDB;
FzyInitFDB(GIFDBptr[i]);
strcpy(GIFDBptr[i]->FDBid,GIFDBnames[i]);
GIFDBptr[i]->FDBdomain[0]=GIPoint[i];
GIFDBptr[i]->FDBdomain[1]=GIPoint[i+2];
MdlLinkFDB(GIFDBptr[i],prcPDBptr,&status); }
FzyShoulderedCurve(GIFDBptr[0],LEFTSHOULDER,GIPoint[1],GIPoint[2],&status);
for(i=1;i<2;i++)
{
FzyTriangleCurve(GIFDBptr[i],GIPoint[i],GIPoint[i+1],
GIPoint[i+2],&status); }
FzyShoulderedCurve(GIFDBptr[2],RITESHOULDER,GIPoint[3],GIPoint [2],&status);
//
FDBcnt=3;

```

```

//      FzyPlotVar("Glucose",GIFDBptr,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
//--Create the basic fuzzy sets (Ethanol)
for(i=0;i<FzyEtMax;i++)
{
    EtFDBptr[i]=new FDB;
    FzyInitFDB(EtFDBptr[i]);
    strcpy(EtFDBptr[i]->FDBid,EtFDBnames[i]);
    EtFDBptr[i]->FDBdomain[0]=EtPoint[i];
    EtFDBptr[i]->FDBdomain[1]=EtPoint[i+2];
    MdLinkFDB(EtFDBptr[i],prcPDBptr,&status); }
FzyShoulderedCurve(EtFDBptr[0],LEFTSHOULDER,EtPoint[1],EtPoint [2],&status);
for(i=1;i<2;i++)
{
    FzyTriangleCurve(EtFDBptr[i],EtPoint[i],EtPoint[i+1],
    EtPoint[i+2],&status); }
FzyShoulderedCurve(EtFDBptr[2],RITESHOUULDER,EtPoint[3],EtPoint [2],&status);
//      FDBcnt=3;
//      FzyPlotVar("Ethanol",EtFDBptr,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
//--Create an empty fuzzy set as a working area
FDBptr[0]=FzyCreateSet("NULL",EMPTYSET,Domain,Parms,0,&status);
MdLinkFDB(FDBptr[0],prcPDBptr,&status);
//-----Prompt for the model Data (yeast)-----//
//initialize
mu=.1; Yxs=.1; //initialize feed=0;
handle = fopen("c:\\eu\\feed.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
r_buf[0]=0;
write(handle,r_buf,10*sizeof(float));
close(handle);
pp = fopen("c:\\eu\\pp.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
p_buf[0]=0;
write(pp,p_buf,10*sizeof(float));
close(pp);
for(;;){

```

```

pp = sopen("c:\\eu\\pp.fil",O_RDONLY,SH_DENYWR, S_IREAD);
lseek(pp, 0L, SEEK_SET);
read(pp,p_buf,10*sizeof(float));
close(pp);
p=p_buf[0];
cout<<"\n password to start control : "<<p;
if (p==1)
{ for(;;){ start=clock();
        for(;;) {
            delay(300);
            hand = open("c:\\eu\\rk.fil",O_RDONLY,SH_DENYWR,S_IREAD);
            lseek(hand, 0L, SEEK_SET);
            read(hand,a_buf,10*sizeof(float));
            glucose=a_buf[0]; // g/L
            ethanol=a_buf[1]; // g/L
            x=a_buf[4]; // g/L
            v=a_buf[5]; //L
            close(hand);
            cout<<"\n glucose = "<<a_buf[0];
            cout<<"\n ethanol = "<<a_buf[1];
            cout<<"\n cell = "<<a_buf[4];
            cout<<"\n volume = "<<a_buf[5];

            FF=mu*x*v/Yxs/S; //feed forward
            cout<<"\n\n feed forward : "<<FF;
            F=fshpr1policy(Rules,glucose,ethanol,&compidx,&status);
            FB=F*FF;
            cout<<"\n fuzzy feedback : "<<FB;
            Feed=FF+FB; // l/h
            handle = sopen("c:\\eu\\feed.fil",
                O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
            r_buf[0]=Feed;
            write(handle,r_buf,10*sizeof(float));

```



```

close(handle);
cout<<"\n\nreal feed    : "<<Feed;
cout<<"\n-----";
end=clock();
hand = sopen("c:\eu\muu.fil",O_RDONLY,SH_DENYWR,
            S_IREAD);
lseek(hand, 0L, SEEK_SET);
read(hand,a_buf,10*sizeof(float));
mu=a_buf[0]; Yxs=a_buf[1];
cout<<"\ncalculate specific growth and yield";
cout<<"\nu    : "<<mu;
cout<<"\nY    : "<<Yxs;
close(hand);
if(end-start>=120000)break;
} //end for(;;)
} //end for(;;)
} //end if
if(p==1) break;
} //end for(;;)
return;
} //end main program

```

```

//-----//
//          ANNARUMON PHOONSIRI 'S FUZZY LOGIC PROGRAM          //
//          FSHPOL1.CPP                                         //
//-----//

#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include "PDB.hpp" // The Policy descriptor
#include "FDB.hpp" // The Fuzzy Set descriptor
#include "HDB.hpp" // The Hedge descriptor
#include "VDB.hpp" // A Variable descriptor
#include "XFZYctl.hpp" // The fuzzy parallel processor work area
#include "XSYSctl.hpp" // The System control region
#include "mtypes.hpp" // System constants and symbolics
#include "fuzzy.hpp" // Fuzzy Logic constants and symbolics
#include "mtsptype.hpp" // Function prototypes

double fshpr1policy(const char **Rules,double Glucose,double Ethanol,float *Compldpxtr,int
*statusPtr)
{
    PDB          *prcPDBptr;
    FDB          *NBFDDBptr,*NMFDDBptr,*NSFDDBptr,*ZEFDBptr,*PSFDDBptr,
                *PMFDDBptr,*PBFDBptr,*SmFDDBptr,*MeFDDBptr,*BiFDDBptr,
                *SFDDBptr,*MFDDBptr,*BFDBptr,*PriceFDDBptr,*wkFDDBptr,
                *FDBarray[8];
    VDB          *VDBptr;
    FSV          *FSVptr;
    char          *Pgmid="fshpol1";
    int          i, FDBcnt, status, Index, Idxpos, Rulecnt, thisCorrMethod, thisDefuzzMethod;
    float        fsetheight;
    double       Price, NoPrice=0, PremiseTruth1, PremiseTruth2, PremiseTruth, Domain[2];
    FILE         *mdlout;

    *statusPtr=0;

    prcPDBptr=XSYSctl.XSYScurrPDBptr;
    mdlout=MtsGetSystemFile(SYSMODFILE);

```

```

fprintf(mdlout,"%s\n","Feed Estimation Policy Begins....");
VDBptr=MdlFindVDB("FEED",prcPDBptr,statusPtr);
FzyInitFZYctl(statusPtr);
if(!FzyAddFZYctl(VDBptr,&PriceFDBptr,&FSVptr,statusPtr))
    { *statusPtr=1;
      MtsSendError(12,Pgmlid,"FEED");
      return(NoPrice); }
thisCorrMethod =FSVptr->FzySVimplMethod;
thisDefuzzMethod=FSVptr->FzySVdefuzzMethod;
//--Find the fuzzy sets in the policy dictionary
NBFDBptr=MdlFindFDB("NB", prcPDBptr,statusPtr);
NMFDBptr=MdlFindFDB("NM", prcPDBptr,statusPtr);
NSFDBptr=MdlFindFDB("NS", prcPDBptr,statusPtr);
ZEFDBptr=MdlFindFDB("ZE", prcPDBptr,statusPtr);
PSFDBptr=MdlFindFDB("PS", prcPDBptr,statusPtr);
PMFDBptr=MdlFindFDB("PM", prcPDBptr,statusPtr);
PBFDBptr=MdlFindFDB("PB", prcPDBptr,statusPtr);
SmFDBptr=MdlFindFDB("SMALL", prcPDBptr,statusPtr);
MeFDBptr=MdlFindFDB("MEDIUM", prcPDBptr,statusPtr);
BiFDBptr=MdlFindFDB("BIG", prcPDBptr,statusPtr);
SFDBptr=MdlFindFDB("S", prcPDBptr,statusPtr);
MFDBptr=MdlFindFDB("M", prcPDBptr,statusPtr);
BFDBptr=MdlFindFDB("B", prcPDBptr,statusPtr);
wkFDBptr=MdlFindFDB("NULL", prcPDBptr,statusPtr);
//-----BEGIN MODEL PROCESSING-----//
Rulecnt=0;
fprintf(mdlout,"%s\n","Rule Execution....");
//--Rule 1. If Glu is Small and Eth is S ,Then Feed is PM.
fprintf(mdlout,"%s\n",Rules[Rulecnt]);
PremiseTruth1=FzyGetMembership(SmFDBptr,Glucose,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth1=",PremiseTruth1);
PremiseTruth2=FzyGetMembership(SFDBptr,Ethanol,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth2=",PremiseTruth2);

```

```

PremiseTruth=FzyAND(PremiseTruth1,PremiseTruth2);
//-----Perform consequent proposition-----//
FzyCondProposition(PMFDBptr,FSVptr,thisCorrMethod,PremiseTruth,statusPtr);
// FzyDrawSet(PriceFDBptr,SYSMODFILE,statusPtr);
//--Rule 2. If Glu is Medium and Eth is S ,Then Feed is PS.
fprintf(mdlout,"%s\n",Rules[Rulecnt]);
PremiseTruth1=FzyGetMembership(MeFDBptr,Glucose,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth1= ",PremiseTruth1);
PremiseTruth2=FzyGetMembership(SFDBptr,Ethanol,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth2= ",PremiseTruth2);
PremiseTruth=FzyAND(PremiseTruth1,PremiseTruth2);
//-----Perform consequent proposition-----//
FDBcnt=2;
FDBarray[0]=PSFDBptr; FDBarray[1]=PriceFDBptr;
// FzyPlotVar("",FDBarray,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
FzyCondProposition(
    PSFDBptr,FSVptr,thisCorrMethod,PremiseTruth,statusPtr);
// FzyDrawSet(PriceFDBptr,SYSMODFILE,statusPtr);
//--Rule 3. If Glu is Big and Eth is S ,Then Feed is NS.
fprintf(mdlout,"%s\n",Rules[Rulecnt]);
PremiseTruth1=FzyGetMembership(BiFDBptr,Glucose,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth1= ",PremiseTruth1);
PremiseTruth2=FzyGetMembership(SFDBptr,Ethanol,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth2= ",PremiseTruth2);
PremiseTruth=FzyAND(PremiseTruth1,PremiseTruth2);
//-----Perform consequent proposition-----//
FDBcnt=2;
FDBarray[0]=NSFDBptr;
FDBarray[1]=PriceFDBptr;
// FzyPlotVar("",FDBarray,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
FzyCondProposition( NSFDBptr,FSVptr,thisCorrMethod,PremiseTruth,statusPtr);
// FzyDrawSet(PriceFDBptr,SYSMODFILE,statusPtr);
//--Rule 4. If Glu is Small and Eth is M ,Then Feed is PS.

```

```

fprintf(mdlout,"%s\n",Rules[Rulecnt]);
PremiseTruth1=FzyGetMembership(SmFDBptr,Glucose,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth1= ",PremiseTruth1);
PremiseTruth2=FzyGetMembership(MFDBptr,Ethanol,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth2= ",PremiseTruth2);
PremiseTruth=FzyAND(PremiseTruth1,PremiseTruth2);
//-----Perform consequent proposition-----//
FDBcnt=2;
FDBarray[0]=PSFDBptr;
FDBarray[1]=PriceFDBptr;
// FzyPlotVar(*,FDBarray,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
FzyCondProposition( PSFDBptr,FSVptr,thisCorrMethod,PremiseTruth,statusPtr);
// FzyDrawSet(PriceFDBptr,SYSMODFILE,statusPtr);
//--Rule 5. If Glu is Medium and Eth is M ,Then Feed is ZE.
fprintf(mdlout,"%s\n",Rules[Rulecnt]);
PremiseTruth1=FzyGetMembership(MeFDBptr,Glucose,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth1= ",PremiseTruth1);
PremiseTruth2=FzyGetMembership(MFDBptr,Ethanol,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth2= ",PremiseTruth2);
PremiseTruth=FzyAND(PremiseTruth1,PremiseTruth2);
//-----Perform consequent proposition-----//
FDBcnt=2;
FDBarray[0]=ZEFDBptr;
FDBarray[1]=PriceFDBptr;
// FzyPlotVar(*,FDBarray,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
FzyCondProposition(ZEFDBptr,FSVptr,thisCorrMethod,PremiseTruth,statusPtr);
// FzyDrawSet(PriceFDBptr,SYSMODFILE,statusPtr);
//--Rule 6. If Glu is Big and Eth is M ,Then Feed is NM.
fprintf(mdlout,"%s\n",Rules[Rulecnt]);
PremiseTruth1=FzyGetMembership(BiFDBptr,Glucose,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth1= ",PremiseTruth1);
PremiseTruth2=FzyGetMembership(MFDBptr,Ethanol,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth2= ",PremiseTruth2);

```

```

PremiseTruth=FzyAND(PremiseTruth1,PremiseTruth2);
//-----Perform consequent proposition-----//
FDBcnt=2;
FDBarray[0]=NMFDBptr;
FDBarray[1]=PriceFDBptr;
// FzyPlotVar("",FDBarray,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
FzyCondProposition(NMFDBptr,FSVptr,thisCorrMethod,PremiseTruth,statusPtr);
// FzyDrawSet(PriceFDBptr,SYSMODFILE,statusPtr);
/--Rule 7. If Glu is Small and Eth is S ,Then Feed is NS.
fprintf(mdlout,"%s\n",Rules[Rulecnt]);
PremiseTruth1=FzyGetMembership(SmFDBptr,Glucose,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth1= ",PremiseTruth1);
PremiseTruth2=FzyGetMembership(SFDBptr,Ethanol,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth2= ",PremiseTruth2);
PremiseTruth=FzyAND(PremiseTruth1,PremiseTruth2);
//-----Perform consequent proposition-----//
FDBcnt=2;
FDBarray[0]=NSFDBptr;
FDBarray[1]=PriceFDBptr;
// FzyPlotVar("",FDBarray,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
FzyCondProposition(NSFDBptr,FSVptr,thisCorrMethod,PremiseTruth,statusPtr);
// FzyDrawSet(PriceFDBptr,SYSMODFILE,statusPtr);
/--Rule 8. If Glu is Small and Eth is M ,Then Feed is NM.
fprintf(mdlout,"%s\n",Rules[Rulecnt]);
PremiseTruth1=FzyGetMembership(SmFDBptr,Glucose,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth1= ",PremiseTruth1);
PremiseTruth2=FzyGetMembership(MFDBptr,Ethanol,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth2= ",PremiseTruth2);
PremiseTruth=FzyAND(PremiseTruth1,PremiseTruth2);
//-----Perform consequent proposition-----//
FDBcnt=2;
FDBarray[0]=NMFDBptr;
FDBarray[1]=PriceFDBptr;

```

```

// FzyPlotVar("",FDBarray,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
FzyCondProposition( NMFDBptr,FSVptr,thisCorrMethod,PremiseTruth,statusPtr);
// FzyDrawSet(PriceFDBptr,SYSMODFILE,statusPtr);
/--Rule 9. If Glu is Big and Eth is B ,Then Feed is NB.
fprintf(mdlout,"%s\n",Rules[Rulecnt]);
PremiseTruth1=FzyGetMembership(BiFDBptr,Glucose,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth1= ",PremiseTruth1);
PremiseTruth2=FzyGetMembership(BFDBptr,Ethanol,&Idxpos,statusPtr);
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n","PremiseTruth2= ",PremiseTruth2);
PremiseTruth=FzyAND(PremiseTruth1,PremiseTruth2);
//-----Perform consequent proposition-----//
FDBcnt=2;
FDBarray[0]=NBFDBptr;
FDBarray[1]=PriceFDBptr;
// FzyPlotVar("",FDBarray,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
FzyCondProposition( NBFDBptr,FSVptr,thisCorrMethod,PremiseTruth,statusPtr);
// FzyDrawSet(PriceFDBptr,SYSMODFILE,statusPtr);
/--Defuzzify to find expected value for price
Price=FzyDefuzzify(PriceFDBptr,thisDefuzzMethod,Compldxptr,statusPtr);
fsetheight=FzyGetHeight(PriceFDBptr);
fprintf(mdlout,"%s\n","Model Solution:");
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n"," Price = ",Price );
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n"," Compldx = ",*Compldxptr );
fprintf(mdlout,"%s%10.2f\n"," SurfaceHght = ",fsetheight );
FzyCloseFZYctl(statusPtr);
return(Price);
}

```

```

//-----//
//          ANNARUMON PHOONSIRI 'S FUZZY LOGIC PROGRAM          //
//-----//

#include <iostream.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <share.h>
#include <fcntl.h>
#include <sys/stat.h>
#include <io.h>
#include <math.h>
#include <dos.h>
#include <time.h>
#include "PDB.hpp"
#include "FDB.hpp"
#include "SFZYctl.hpp"
#include "SSYSctl.hpp"
#include "fuzzy.hpp"
#include "mtypes.hpp"
#include "mtsptype.hpp"
static const char *Rules[]=
{
    "R1  glucose is S and ethanol is S then F is PM",
    "R2  glucose is M and ethanol is S then F is PS",
    "R3  glucose is B and ethanol is S then F is NS",
    "R4  glucose is S and ethanol is M then F is PS",
    "R5  glucose is M and ethanol is M then F is ZE",
    "R6  glucose is B and ethanol is M then F is NM",
    "R7  glucose is S and ethanol is B then F is NS",
    "R8  glucose is M and ethanol is B then F is NM",
    "R9  glucose is B and ethanol is B then F is NB" };
static const Rulemax=9;

```



```

extern unsigned _stklen=50000;
char *FeFDBnames[]=
{
    "NM",
    "NS",
    "ZE",
    "PS",
    "PM" };
const int FzyFeMax=5;
double FePoint[]={-1,-0.66,-0.33,0,1,2,3};
char *GIFDBnames[]=
{
    "SMALL",
    "MEDIUM",
    "BIG" };
const int FzyGiMax=3;
double GiPoint[]={0,0.1,0.2,0.3,0.4};
char *EtFDBnames[]=
{
    "S",
    "M",
    "B" };
const int FzyEtMax=3;
double EtPoint[]={0,1,2,3,4};
double fshpr1policy(consti char**,double,double,float*,int*);
//-----start main-----//
void main(void)
{ PDB          *prcPDBptr;
  FDB          *FDBptr[FDBvecmax], *FeFDBptr[FzyFeMax], *GIFDBptr[FzyGiMax],
              *EtFDBptr[FzyEtMax];
  VDB          *VDBptr;
  int          i,status,FDBcnt,Hdgcnt,TryCnt[2];
  double       Domain[2],Parms[4];
  float        compidx;
  FILE         *mdlout,*outp;
  int          hand,handle;

```

```

float      a_buf[50],r_buf[50];
float      FF, //feed forward (L/hr)      u, //specific growth rate (hr^-1)
           x, //cell concentration (g/L)    Y; //cell yield/sugar consume (g/g)

int        p;

float      bg,bc,ag,ac;

float      Feed,FB,glucose,ethanol,F;

unsigned   value;

int        port = 632;

float      v=1; //medium volume (L) 1 L

float      S=50; //feed concentration (g/L) 120 g/L

clock_t    start,end;

    MdlConnecttoFMS(&status);

    prcPDBptr=MdlCreatePolicy("FEEDING",MODELADD,&status);

    XSYScti.XSYScurrPDBptr=prcPDBptr;

    MdlInsertHedges(prcPDBptr,&Hdgcnt,&status);

    mdlout=MtsGetSystemFile(SYSMODFILE);

    Domain[0]=FePoint[0];   Domain[1]=FePoint[6];

    VDBptr=VarCreateScalar("FEED",REAL,Domain,"0",&status);

    MdlLinkVDB(VDBptr,prcPDBptr,&status);

    Domain[2]=FePoint[5];

    FeFDBptr[0]=FzyCreateSet("PB",INCREASE,Domain,Parms,0,&status);

    strcpy(FeFDBptr[0]->FDBdesc,"PB for Feed");

    MdlLinkFDB(FeFDBptr[0],prcPDBptr,&status);

    Domain[2]=FePoint[1];

    FeFDBptr[1]=FzyCreateSet("NB", DECREASE,Domain,Parms,0,&status);

    strcpy(FeFDBptr[1]->FDBdesc,"NB for Feed");

    MdlLinkFDB(FeFDBptr[1],prcPDBptr,&status);

    for(i=0;i<FzyFeMax;i++)

    {

        FeFDBptr[i+2]=new FDB;

        FzyInitFDB(FeFDBptr[i+2]);

        strcpy(FeFDBptr[i+2]->FDBid,FeFDBnames[i]);

        FeFDBptr[i+2]->FDBdomain[0]=Domain[0];

```

```

FeFDBptr[i+2]->FDBdomain[1]=Domain[1];
MdlLinkFDB(FeFDBptr[i+2],prcPDBptr,&status);
myFzyTriangleCurve(FeFDBptr[i+2],Domain,FePoint[i],FePoint[i+1],
FePoint[i+2],&status);}
//FDBcnt=7;
//FzyPlotVar("Feed",FeFDBptr,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
for(i=0;i<FzyGIMax;i++)
{
GIFDBptr[i]=new FDB;
FzyInitFDB(GIFDBptr[i]);
strcpy(GIFDBptr[i]->FDBid,GIFDBnames[i]);
GIFDBptr[i]->FDBdomain[0]=GIPoint[i];
GIFDBptr[i]->FDBdomain[1]=GIPoint[i+2];
MdlLinkFDB(GIFDBptr[i],prcPDBptr,&status);}
FzyShoulderedCurve(GIFDBptr[0],LEFTSHOULDER,GIPoint[1],GIPoint[2],&status);
for(i=1;i<2;i++)
{
FzyTriangleCurve(GIFDBptr[i],GIPoint[i],GIPoint[i+1],
GIPoint[i+2],&status); }
FzyShoulderedCurve(GIFDBptr[2],RITESHOULDER,GIPoint[3],GIPoint[2],&status);
// FDBcnt=3;
// FzyPlotVar("Glucose",GIFDBptr,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
//--Create the basic fuzzy sets (Ethanol)
for(i=0;i<FzyEtMax;i++)
{
EtFDBptr[i]=new FDB;
FzyInitFDB(EtFDBptr[i]);
strcpy(EtFDBptr[i]->FDBid,EtFDBnames[i]);
EtFDBptr[i]->FDBdomain[0]=EtPoint[i];
EtFDBptr[i]->FDBdomain[1]=EtPoint[i+2];
MdlLinkFDB(EtFDBptr[i],prcPDBptr,&status);}
FzyShoulderedCurve(EtFDBptr[0],LEFTSHOULDER,EtPoint[1],EtPoint[2],&status);
for(i=1;i<2;i++)

```

```

{
    FzyTriangleCurve(EtFDBptr[i],EtPoint[i],EtPoint[i+1],
    EtPoint[i+2],&status);    }
FzyShoulderedCurve(EtFDBptr[2],RITESHOUlder,EtPoint[3],EtPoint[2],&status);
// FDBcnt=3;
// FzyPlotVar("Ethanol",EtFDBptr,FDBcnt,SYSMODFILE,&status);
//--Create an empty fuzzy set as a working area
FDBptr[0]=FzyCreateSet("NULL",EMPTYSET,Domain,Parms,0,&status);
MdlLinkFDB(FDBptr[0],prcPDBptr,&status);

//initialize
u=.5;   Y=.2;
//initialize feed=0;
handle = fopen("c:\\eu\\rke.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
r_buf[0]=0;
write(handle,r_buf,10*sizeof(float));
close(handle);
cout<<"\nEnter password to start control : ";
cin>>p;
// clear port
// outport(632+6,0);
// outport(632+7,0);
for(;;){
    hand = fopen("c:\\eu\\stoi.fil",O_RDONLY, SH_DENYWR, S_IREAD);
    lseek(hand, 0L, SEEK_SET);
    read(hand,a_buf,10*sizeof(float));
    cout<<"\n\n-----start calculate u,Y every 20 minutes----- ";
    cout<<"\nglucose concentration   : "<<a_buf[0]; //glucose
    cout<<"\ncell concentration     : "<<a_buf[4]; //cell
    cout<<"\n\ncalculate feed every 10 minutes";
    cout<<"\n-----";
    bg=a_buf[0];
    bc=a_buf[4];
    close(hand);
}

```

```

start=clock();
for(;;) {
    delay(5000);
    hand = sopen("c:\\eu\\stoi.fil",O_RDONLY,SH_DENYWR,S_IREAD);
    lseek(hand, 0L, SEEK_SET);
    read(hand,a_buf,10*sizeof(float));
    glucose=a_buf[0]; // g/L
    ethanol=a_buf[1]; // g/L
    x=a_buf[4]; // g/L
    close(hand);
    cout<<"\nglucose = "<<a_buf[0];
    cout<<"\nethanol = "<<a_buf[1];
    cout<<"\ncell = "<<a_buf[4];
    FF=u*x*v/Y/S; //feed forward
    cout<<"\n\nfeed forward : "<<FF;
    F=fshpr1policy(Rules,glucose,ethanol,&compidx,&status);
    FB=F*FF;
    cout<<"\nfuzzy feedback : "<<FB;
    Feed=FF+FB; // l/h
    handle=sopen
    ("c:\\eu\\rke.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
    r_buf[0]=Feed;
    write(handle,r_buf,10*sizeof(float));
    close(handle);
    value=Feed*3790.7-12.442;
    cout<<"\nvalue = "<<value;
    cout<<"\n\nreal feed : "<<Feed;
    cout<<"\n-----";
        output(632+6,value & 0x00ff);
        output(632+7,(value & 0x0f00)>> 8);
        if (( outp=fopen("c:\\eu\\outp.fil","a+")== NULL)
            {
                printf("Cannot open input file.\n"); }
}

```

```

fprintf(outp, "\nfeed : %f", Feed);
fclose(outp);
end=clock();
cout<< "\nstart = " << start;
cout<< "\nend = " << end;
cout<< "\nend-start = " << end-start;
if(end-start >= 1200000)
{
hand = sopen("c:\\eu\\stoi.fil", O_RDONLY, SH_DENYWR,
S_IREAD);
lseek(hand, 0L, SEEK_SET);
read(hand, a_buf, 10 * sizeof(float));
cout<< "\n----- 20 minutes ----- ";
cout<< "\nglucose concentration : " << a_buf[0]; //glucose
cout<< "\ncell concentration : " << a_buf[4]; //cell
ag=a_buf[0]; ac=a_buf[4];
u=(ac-bc)*60/20/ac; //specific growth rate
Y=(ac-bc)/(bg-ag); //yield coefficient
cout<< "\ncalculate specific growth and yield";
cout<< "\nu : " << u; cout<< "\nY : " << Y;
close(hand);}
if(end-start >= 1200000) break; } //end for(;;) } //end for(;;)

return;
} //end main program

```

```
//-----ANNARUMON PHOONSIRI-----//
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <io.h>
#include <dos.h>
#include <share.h>
#include <fcntl.h>
#include <sys/stat.h>
#include <time.h>
void main ()
{
    float    **allocate_real_matrix(int, int, int, int);
    void     free_real_matrix(float **, int, int, int);
    void     decsol(float **, int, float [], float []);
    int      i,j;
    float    **a,b[8],aux[4],d,x,o,O2,CO2,xx,xxx;
    int      handle,hand,P0;
    float    a_buf[10],r_buf[10],gl,et,v,t,pt,deglu,g,e;
    FILE     *inp;
    printf("\nEnter password to start stoichiometry : ");
    scanf("%d",&P0);
    if (P0==0){
        printf("\nEnter initial glucose concentration (g/L): ");
        scanf("%f",&gl);
        printf("\nEnter initial ethanol concentration (g/L): ");
        scanf("%f",&et);
        a_buf[2]=gl; a_buf[3]=et;
        for (;;) { delay(5000);
            printf("\nEnter time : "); scanf("%f",&t);
            printf("\nEnter period time : "); scanf("%f",&pt);
            printf("Enter volume (mL) : ");scanf("%f",&v);
            printf("\nEnter O2 concentration (%) : ");scanf("%f",&O2);
            printf("Enter CO2 concentration (%) : ");scanf("%f",&CO2);
            printf("Enter cell concentration (derivative) :");scanf("%f",&xx);
```

```

printf("Enter cell concentration (g/L) : ");scanf("%f",&xxx);
pt=15; v=1000;x=xx*v/160/1000;
d=pt*(20.9-O2)/100/22.4; o=pt*CO2/100/22.4;
printf("\nO2(mole) = %f",d);
printf("\nCO2(mole) = %f",o);
printf("\ncell(mole) = %f",x);
a=allocate_real_matrix(1,7,1,7);
for (i=1; i<=7; i++) {
for (j=1; j<=7; j++) {
a[1][1]=-6;    a[1][2]=0;    a[1][3]=0;    a[1][4]=6;
a[1][5]=0;    a[1][6]=1;    a[1][7]=2;    a[2][1]=-12;
a[2][2]=0;    a[2][3]=-3;   a[2][4]=10.9; a[2][5]=2;
a[2][6]=0;    a[2][7]=6;    a[3][1]=-6;   a[3][2]=-2;
a[3][3]=0;    a[3][4]=3;    a[3][5]=1;   a[3][6]=2;
a[3][7]=1;    a[4][1]=0;    a[4][2]=0;   a[4][3]=-1;
a[4][4]=1;    a[4][5]=0;    a[4][6]=0;   a[4][7]=0;
a[5][1]=0;    a[5][2]=1;    a[5][3]=0;   a[5][4]=0;
a[5][5]=0;    a[5][6]=0;    a[5][7]=0;   a[6][1]=0;
a[6][2]=0;    a[6][3]=0;    a[6][4]=1;   a[6][5]=0;
a[6][6]=0;    a[6][7]=0;    a[7][1]=0;   a[7][2]=0;
a[7][3]=0;    a[7][4]=0;    a[7][5]=0;   a[7][6]=1;
a[7][7]=0;    }          }
b[1]=0; b[2]=0; b[3]=0; b[4]=0;b[5]=d; b[6]=x; b[7]=o;
aux[2]=1.0e-5;
decsol(a,7,aux,b);
hand = sopen("c:\\eu\\rke.fil",O_RDONLY,SH_DENYWR,S_IREAD);
lseek(hand, 0L, SEEK_SET);
read(hand,r_buf,10*sizeof(float));
deglu=r_buf[0]*pt*50/60; // g/L
printf("\nFeed (L/hr)= %3.4f",r_buf[0]);
printf("\ndeglu (g/L) = %3.4f",deglu);
close(hand);
g=b[1]*180*1000/v;e=b[7]*46*1000/v;

```



```

printf("\nglucose from stoi' = %3.4f",g);
printf("\nethanol from stoi' = %3.4f",e);
printf("\na_buf[2] = %3.4f",a_buf[2]);
printf("\na_buf[3] = %3.4f",a_buf[3]);
handle =
sopen("c:\\eu\\stoi.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
a_buf[0]=a_buf[2]-g+deglu;
a_buf[1]=a_buf[3]+e;
a_buf[4]=xxx;
write(handle,a_buf,10*sizeof(float));
close(handle);
if (( inp=fopen("c:\\eu\\inp.fil","a+")
== NULL)
{printf("Cannot open input file.\n"); }
fprintf(inp, "\ntime : %2.2f\nglucose : %5.4f\nethanol : %5.4f"
,t,a_buf[0],a_buf[1]);
fprintf(inp, "\ncell : %5.4f\nO2 : %2.2f\nCO2 : %2.2f\nFeed : %2.5f"
,a_buf[4],O2,CO2,r_buf[0]);
fclose(inp);
printf("\nSolution (mole) : ");
printf("\nglucose : %3.4f",b[1]);
printf("\nethanol : %3.4f",b[7]);
printf("\nglucose (total) : %3.4f",a_buf[0]);
printf("\nethanol (total) : %3.4f",a_buf[1]);
printf("\ncell : %3.4f",a_buf[4]);
handle =
sopen("c:\\eu\\stoi.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
a_buf[2]=a_buf[0]; a_buf[3]=a_buf[1];
write(handle,a_buf,10*sizeof(float));
close(handle);
free_real_matrix(a,1,7,1); }}} //end main

```

```
//-----ANNARUMON PHOONSIRI-----//
#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include <share.h>
#include <fcntl.h>
#include <sys/stat.h>
#include <io.h>
#include <dos.h>
#include <time.h>

void rhs(int n, float t, float y[])
{
    double AA,BB,CC,DD,EE;
    double k=0.0023,k2=0.007,ks=0.025,m=.5, Y=0.2,um=0.2,Yxe=.48,Yes=1.2;
    double pi,u,ve,F S0=200;
    int hand,A12;
    float r_buf[10],a_12[10],a1,a2;
    A12 = sopen("c:\\eu\\a12.fil",O_RDONLY,SH_DENYWR,S_IREAD);
    lseek(A12, 0L, SEEK_SET);
    read(A12,a_12,10*sizeof(float));
    close(A12);
    pi=a_12[3]; ve=a_12[2]; a1=a_12[0]; a2=a_12[1];
    if(pi<0)pi=0; if(ve<0)ve=0;
    hand = sopen("c:\\eu\\feed.fil",O_RDONLY,SH_DENYWR,S_IREAD);
    lseek(hand, 0L, SEEK_SET);
    read(hand,r_buf,10*sizeof(float));
    close(hand);
    F=r_buf[0];
    AA=y[1]; BB=y[2]; CC=y[3]; DD=y[4]; EE=y[5];
    u=um*BB/(ks+BB)/(1+DD*DD);
    y[1]=(u*AA*EE+a1*Yxe*ve*AA*EE-AA*F)/EE;
    y[2]=(F*S0-u*AA*EE/Y-m*AA*EE-a2*pi/Yes*AA*EE-BB*F)/EE;
    y[3]=(a2*pi*AA*EE-a1*ve*AA*EE-CC*F)/EE;
    y[4]=(k*AA*EE+k2*u*AA*EE-DD*F)/EE;
    y[5]=F; }

```

```

void info(int n, float t, float te, float y[])
{}
void main ()
{
    void rke(float *, float *, int, float [],void*)(int, float, float[], float [], int, void (*)(int, float,
        float, float []));
    float t,te,y[30],data[7];
    float a_buf[10],a_12[10],r_buf[10],p_buf[10],f_buf[10];
    int A12,hand,pp,handle,ff;
    float F;
    double mu=0.1,Yxs=0.1;
    FILE *inp;
    t=0; te=0.1;
    y[1]=0.4; //cell
    y[2]=0.5; //glucose
    y[3]=0.87; //ethanol
    y[4]=0; //inhibiting
    y[5]=1; //volume
    while (1) {
        data[1]=data[2]=1.0e-5;
        delay(300);
        if(y[2] == 0.28)
        {
            a_12[0]=0; a_12[1]=1;
            a_12[2]=0.138-0.062*y[4];
            a_12[3]=0.155+log10(y[2])*0.123;
            A12 = sopen("c:\\eu\\a12.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
            write(A12,a_12,10*sizeof(float));
            close(A12); }
        if(y[2] < 0.28)
        {
            a_12[0]=1; a_12[1]=0;
            a_12[2]=0.138-0.062*y[4]+0.0028/(y[2]-0.28);
            a_12[3]=0;
            A12 = sopen("c:\\eu\\a12.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
            write(A12,a_12,10*sizeof(float));
            close(A12); }
    }
}

```

```

if(y[2] > 0.28)
{
    a_12[0]=0; a_12[1]=1;
    a_12[2]=0.138-0.062*y[4]+0.0028/(y[2]-0.28);
    a_12[3]=0.155+log10(y[2])*0.123;
    A12 = sopen("c:\\eu\\a12.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
    write(A12,a_12,10*sizeof(float));
    close(A12);
}

if(y[3]<=0)
{
    a_12[2]=0; y[3]=0;
    A12 = sopen("c:\\eu\\a12.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
    write(A12,a_12,10*sizeof(float));
    close(A12);
}

printf("\n\t = %2.2f X = %3.3f S = %3.3f *nCe = %3.3f P = %3.3f V = %3.3f",
    t,y[1],y[2],y[3],y[4],y[5]);
a_buf[0]=y[2]; a_buf[1]=y[3]; a_buf[4]=y[1]; a_buf[5]=y[5];
handle = sopen("c:\\eu\\rk.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
write(handle,a_buf,10*sizeof(float));
close(handle);
if(y[2]<=.2)
{
    pp = sopen("c:\\eu\\pp.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
    p_buf[0]=1;
    write(pp,p_buf,10*sizeof(float));
    close(pp);
}
y[10]=y[1]; y[20]=y[2];
rke(&t,&te,5,y,rhs,data,0,info);
mu=(y[1]-y[10])/y[1].1;
if (mu<0) mu=0;
Yxs=(y[1]-y[10])/(y[20]-y[2]);
if (Yxs<0) Yxs=0.1;
r_buf[0]=mu;
r_buf[1]=Yxs;
hand = sopen("c:\\eu\\mu.fil",O_RDWR|O_CREAT,SH_DENYRD,S_IREAD);
write(hand,r_buf,10*sizeof(float));

```

```

close(hand);
printf("\nmu = %3.3f",mu);
printf("\nYxs = %3.3f",Yxs);
ff = fopen("c:\\eu\\feed.fil",O_RDONLY,SH_DENYWR,S_IREAD);
lseek(ff, 0L, SEEK_SET);
read(ff,f_buf,10*sizeof(float));
close(ff);
F=f_buf[0];
printf("\nFeed = %3.3f",F);
if (( inp=fopen("c:\\eu\\para.fil","a+"))
    == NULL)
    { printf("Cannot open input file.\n"); }
fprintf(inp,"\n\ntime: %2.2f X: %3.3f S: %3.3f Ce: %3.3f * P: %3.3f V: %3.3f F:
        %3.3f",t,y[1],y[2],y[3],y[4],y[5],F);
fclose(inp);
t=te;
te=t+.1;
if (t >= 15) break;
}
} //end main

```

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวอรรณมล พูลศิริ

วัน เดือน ปี เกิด 7 กุมภาพันธ์ 2517

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (อุตสาหกรรม)	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2536