

การติดตามพฤติกรรมแบบออนไลน์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ชีวเคมีแบบแบดซ์



นาย จำเริญ เลี้ยวศรีสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2538

ISBN 974-631-196-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ON-LINE MONITORING OF A BATCH-TYPE BIOREACTOR

Mr. Jamroen Leowseesuk

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

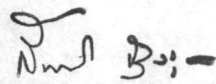
1995

ISBN 974-631-196-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การติดตามพฤติกรรมแบบออนไลน์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ชีวเคมีแบบแบตช์  
โดย                              นาย จำเริญ เลี้ยวศรีสุข  
ภาควิชา                            วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ดร. วีรพจน์ ลือประสิทธิ์สกุล  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม        รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์

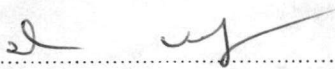


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

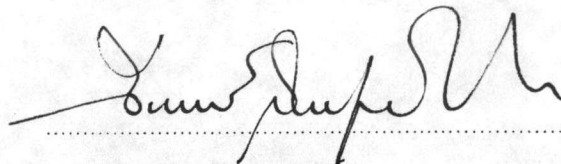


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ฤงสูววรรณ)

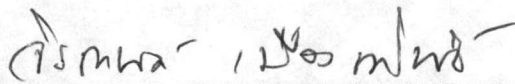
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



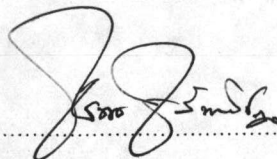
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร. วีรพจน์ ลือประสิทธิ์สกุล)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)



..... กรรมการ  
(ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล)

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิจัยวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว



จำเรียม เลี้ยวศรีสุข : การติดตามพฤติกรรมแบบออนไลน์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ชีวเคมีแบบ  
แบตช์ (ON-LINE MONITORING OF A BATCH-TYPE BIOREACTOR) อ.ที่ปรึกษา :  
ดร.วีรพจน์ ลือประสิทธิ์สกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์, 119 หน้า  
ISBN 974-631-196-4

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำคอมพิวเตอร์เข้ามาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด ติดตาม และ  
ทำนายค่าของตัวแปรสถานะของกระบวนการหมักแบบออนไลน์ โดยตัวแปรสถานะที่สนใจติดตามประกอบด้วย  
อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก

คอมพิวเตอร์จะเก็บข้อมูลค่าของตัวแปรสถานะดังกล่าวจากเครื่องมือวัดอันประกอบด้วย  
เทอร์มอคัปเปิล เครื่องควบคุมความเป็นกรด-ด่าง และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ตามลำดับ ผ่านทาง  
อุปกรณ์อินเตอร์เฟซ การทำงานของระบบจะถูกควบคุมโดยโปรแกรมที่สร้างขึ้น จากนั้น ข้อมูลความ  
เข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่วัดได้ จะนำมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของชีวมวล เฉพาะที่มีชีวิต และค่าความ  
เข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหลือในถังหมัก โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมการการหมัก แล้ว  
แสดงผลข้อมูลทั้งหมดที่ได้ออกมาพร้อมกันทางหน้าจอภาพ

จากการทดสอบระบบติดตามพฤติกรรมแบบออนไลน์ที่สร้างขึ้นพบว่า สำหรับการติดตามค่า  
ของอุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่างนั้น ค่าที่ได้จากระบบการติดตามพฤติกรรมแบบออนไลน์มีความเบี่ยง  
เบนไปจากค่าที่วัดได้จริงเท่ากับ  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  และ  $\pm 0.07$  หน่วย ตามลำดับ สำหรับการหาค่าความ  
เข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหลือในถังหมัก ณ เวลาต่าง ๆ ค่าที่ได้จากระบบการติดตามพฤติกรรมแบบ  
ออนไลน์มีความ เบี่ยงเบนไปจากค่าที่วัดได้จริงประมาณ 4%

ภาควิชา ..... วิศวกรรม เคมี  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรม เคมี  
ปีการศึกษา ..... 2537

ลายมือชื่อนิสิต ..... จำเรียม เลี้ยวศรีสุข  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... ดร.วีรพจน์ ลือประสิทธิ์สกุล  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... รศ.ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์



## C316568 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: ON-LINE MONITORING/ BATCH-TYPE BIOREACTOR/ ACETONE-BUTANOL  
FERMENTATION

JAMROEN LEOWSEESUK : ON-LINE MONITORING OF A BATCH-TYPE BIOREACTOR,  
THESIS ADVISOR : VEERAPOT LUEPRASITSAKUL, Dr.Eng, THESIS CO-ADVISOR  
: ASSO.PROF.CHIRAKARN MUANGNAPOH, Dr.Eng. 119 pp.  
ISBN 974-631-196-4

Computer application as a tool for on-line measuring and estimating state variables of fermentation process is a major objective of this research. These state variables are temperature, pH and concentration of any products in the process.

The microcomputer, which was controlled by a program developed in this work, got all values of the state variables detected by measuring devices via interfacing devices. The measuring devices used in this research were thermocouple, pH-controller and gas chromatograph. According to a mathematical model and fermentation equations, the measured values of product concentration were used to obtain values of active biomass concentration and residual substrate concentration. The results were shown on the screen of the microcomputer.

Tests of the on-line monitoring system developed in this work have shown that the deviations of the measured temperature and pH value were  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  and  $\pm 0.07$ , respectively, compared with reference value. The residual substrate concentration calculated by the mathematical model of the system at various time interval was also compared with the reference value. It was found that the deviation was not larger than 4%.

ภาควิชา..... วิศวกรรมเคมี  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา..... 2537

ลายมือชื่อนิสิต..... จิรากร เลี้ยว  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... Veerapot Lueprasitsakul  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... Chirakarn Muangnapoh

กิตติกรรมประกาศ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ ดร. วีรพจน์ ลือประสิทธิ์สกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ศาสตราจารย์ ดร. ปิยสาร ประเสริฐธรรม และ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและ ข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาด้วยดีตลอด ขอขอบคุณเพื่อนๆที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และกำลังใจ แก่ผู้วิจัย

เนื่องจากทุนวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากมูลนิธิกระจกเงาชาฮี ทุนอุดหนุนการวิจัยของ บัณฑิตวิทยาลัยและภาควิชาวิศวกรรมเคมี จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
ขอบเขตการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	4
2 หลักการ.....	5
กลไกปฏิบัติการของกระบวนการหมักของ บิวโทริก-แอซิดแบคทีเรีย.....	5
สมการสำหรับการประมาณค่าของตัวแปรที่วัดไม่ได้.....	7
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการหมักอะซีโตน-บิวทานอล.....	18
3 อุปกรณ์และโปรแกรม.....	24
เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
โครงสร้างของโปรแกรมที่ใช้งาน.....	32
4 การทดสอบโปรแกรมและวิเคราะห์.....	51
5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
รายการอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก.....	75
ประวัติผู้เขียน.....	119

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1	เปรียบเทียบค่าคงที่ ( $k_1-k_{14}$ ) ที่รายงานโดย Votruba และคณะ กับค่าที่ปรับใหม่.....	62
---	---	----



สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1 แสดงลำดับขั้นปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการหมักกลูโคสโดย บิวโทริก-แอซิดแบคทีเรีย.....	6
2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
3 ภาพของเครื่องควบคุมความเป็นกรด-ด่าง.....	26
4 ภาพด้านข้างของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	27
5 ภาพด้านหน้าของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	28
6 ผังของระบบกระบวนการหมัก.....	33
7 แผนภูมิสายงานของโปรแกรมหลัก.....	36
8 แผนภูมิสายงานของโปรแกรมน้อยการแสดงผลของระบบกระบวนการหมัก.....	38
9 แผนภูมิสายงานของโปรแกรมน้อยการติดตามตัวแปรสถานะแบบออนไลน์.....	39
10 แผนภูมิสายงานของโปรแกรมน้อย GCANAL.....	42
11 แผนภูมิสายงานของโปรแกรมน้อยการทำนายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	43
12 แผนภูมิสายงานของโปรแกรมน้อยการเก็บค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลงแฟ้มข้อมูล	44
13 เมนูหลัก.....	47
14 ผังของระบบกระบวนการหมัก.....	48
15 การติดตามตัวแปรสถานะแบบออนไลน์.....	48
16 ผลของข้อมูลที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	49
17 ผลการทำนายการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ในรูปตาราง.....	49
18 ผลการทำนายการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ในรูปกราฟ.....	50
19 ภาพกระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่องของเดคโตสที่ pH 5.5.....	53
20 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการติดตามตัวแปรสถานะแบบออนไลน์.....	54
21 กราฟเปรียบเทียบค่าความเป็นกรด-ด่างที่ได้จากระบบออนไลน์กับค่าที่อ่านได้จากเครื่องควบคุมความเป็นกรด-ด่าง	55
22 กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากระบบออนไลน์กับค่าที่อ่านได้จากเครื่องอ่านน้ำ.....	56



- 36 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของชีวมวลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 67  
โดยจिरกานต์ และคณะ
- 37 เปรียบเทียบผลการใช้ค่าชีวมวลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าชีวมวลที่รายงานโดย..... 68  
จिरกานต์และคณะในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของกลูโคสด้วยสมการสำหรับหาค่าของ  
ตัวแปรที่วัดไม่ได้



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k,l	สัมประสิทธิ์ปริมาณสัมพันธ์หรือตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการ (15)-(20) และ (22)-(36)
A	ความเข้มข้นของอะซีโตน ( กรัม/ลิตร )
AA	ความเข้มข้นของกรดอะซีติก ( กรัม/ลิตร )
AcCoA	อะซีทิล-โคเอ
ATP <sub>ax</sub>	โมล ATP ที่เกิดพอดีหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวในถังหมัก
ATP <sub>br</sub>	โมล ATP ที่ถูกผลิตขึ้นทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวในถังหมัก
B	ความเข้มข้นของบิวทานอล ( กรัม/ลิตร )
BA	ความเข้มข้นของกรดบิวไทริก ( กรัม/ลิตร )
C <sub>Acb</sub> , C <sub>Act</sub> , C <sub>Acob</sub> , C <sub>b</sub>	ความเข้มข้นของกรดอะซีติก อะซีโตนิน อะซีโตน และซีวมวล ในสมการ (25) (27) (24) และ (21)-(22) ตามลำดับ ( โมล/ลิตร )
C <sub>Br</sub> , C <sub>Br</sub> , C <sub>Glu</sub>	ความเข้มข้นของบิวทานอล บิวไทริก และกลูโคสในสมการ (26) (28) และ(29) ตามลำดับ ( โมล/ลิตร )



$C_{\text{Glu.in}}$	ความเข้มข้นของกลูโคส ณ เวลาเริ่มต้น ในสมการ (29) ( โมล/ลิตร )
$C_{\text{CO}_2}, C_{\text{Hy}}$	ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกผลิตขึ้น ในสมการ (35) และ (36) ตามลำดับ ( โมล/ลิตร )
E	ความเข้มข้นของเอทานอล ( กรัม/ลิตร )
$\text{FdH}_2$	รูปรีดิวซ์ของเฟร์รีดอกซิน ( ferredoxin )
$g(S)$	ฟังก์ชันตัวอย่าง ( sample function )
$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9, k_{10}, k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{14}, K_{AA}, K_{BA}, K_I, K_S$	ค่าคงที่ในสมการ (44)-(53)
L	ความยาวของเซลล์ในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ( ซม. ) ในสมการ (21)
$(MW)_0$	น้ำหนักโมเลกุลของซีวมวล
$\text{NfF}^{\cdot}$	โมล NAD ที่ถูกรีดิวซ์โดย $\text{FdH}_2$ ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวในถังหมัก
$\text{OD}_{600}$	ค่าความทึบแสงของซีวมวล ณ 600 นาโนเมตร
$\text{RNA}_{\text{min}}$	ความเข้มข้นของ RNA ในเซลล์ ณ อัตราการเติบโตจำเพาะ เท่ากับ ศูนย์
S	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ( กรัม/ลิตร )
X	ความเข้มข้นของซีวมวล ( กรัม/ลิตร )

$Y$	ตัวแปรไร้มิติที่แสดงแทนความเข้มข้นของ RNA
$Y_{ATP}$	ผลได้ ATP ( กรัมชีวมวลต่อโมล ATP ที่ถูกใช้ในการสังเคราะห์ชีวมวล )
$Y_{ATP}^c$	ผลได้ ATP ที่เกิดขึ้นจริงของกระบวนการหมัก ในสมการ(16)
$Y_s$	ผลได้ชีวมวล ( กรัมชีวมวลต่อกรัมกลูโคสที่ถูกใช้ไปในการหมัก )
$\epsilon$	สัมประสิทธิ์เอกซ์ทินชัน ( extinction coefficient ) (L/g cm) ในสมการ (21)
$\gamma_b$	ดีกรีรีดักแทน ( reductance degrees ) ของชีวมวล
$\lambda$	ค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแบคทีเรีย
$\sigma_s$	เศษส่วนมวลของคาร์บอน ( carbon mass fraction ) ในชีวมวล
$\mu$	อัตราการเติบโตจำเพาะ ( $h^{-1}$ )