38

การติดตามพฤติกรรมแบบออนไลน์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ชีวเคมีแบบแบตช์

นาย จำเริญ เลี่ยวศรีสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2538

ISBN 974-631-196-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16746761

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 เลี่ยวศรีสุข
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. วีรพจน์ ลือประสิทธิ์สกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. วีรพจน์ ลือประสิทธิ์สกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

..... กรรมการ

(ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

จำเริญ เลี่ยวศรีสุข : การติดตามพฤติกรรมแบบออนไลน์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ชีวเคมีแบบแบตช์ (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 และทำนายค่าของตัวแปรสถานะของกระบวนการหมักแบบออนไลน์ โดยตัวแปรสถานะที่สนใจติดตามประกอบด้วย อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก

คอมพิวเตอร์จะเก็บข้อมูลค่าของตัวแปรสถานะดังกล่าวจากเครื่องมือวัดอันประกอบด้วย เทอร์มอคัปเปิล เครื่องควบคุมความเป็นกรด-ด่าง และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ตามลำดับ ผ่านทางอุปกรณ์อินเตอร์เฟซ การทำงานของระบบจะถูกควบคุมโดยโปรแกรมที่สร้างขึ้น จากนั้น ข้อมูลความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่วัดได้ จะนำมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของชีวมวลเฉพาะที่มีชีวิต และค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหลือในถังหมัก โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมการการหมัก แล้วแสดงผลข้อมูลทั้งหมดที่ได้ออกมาพร้อมกันทางหน้าจอภาพ

จากการทดสอบระบบติดตามพฤติกรรมแบบออนไลน์ที่สร้างขึ้นพบว่า สำหรับการติดตามค่าของอุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่างนั้น ค่าที่ได้จากระบบการติดตามพฤติกรรมแบบออนไลน์มีความเบี่ยงเบนไปจากค่าที่วัดได้จริงเท่ากับ $\pm$0.5 ^{o}C และ $\pm$0.07 หน่วย ตามลำดับ สำหรับการหาค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหลือในถังหมัก ณ เวลาต่าง ๆ ค่าที่ได้จากระบบการติดตามพฤติกรรมแบบออนไลน์มีความเบี่ยงเบนไปจากค่าที่วัดได้จริงประมาณ 4%

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต จำเริญ เลี่ยวศรีสุข

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 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.Ing. 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 interfecing 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 $\pm 0.5^{o}C$ and ± 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 ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ดร. วีรพจน์ ลือประสิทธิ์สกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ศาสตราจารย์ ดร. ปิยสาร ประเสริฐธรรม และ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาด้วยดีตลอด ขอขอบคุณเพื่อนๆที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และกำลังใจแก่ผู้วิจัย

เนื่องจากทุนวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากมูลนิธิกระจกอาซาฮี ทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัยและภาควิชาวิศวกรรมเคมี จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญภาพ ..... ณ

คำอธิบายสัญญลักษณ์และคำย่อ ..... ฏ

บทที่

1 บทนำ 1

ความเป็นมาของงานวิจัย 1

วัตถุประสงค์ 3

ขอบเขตการวิจัย 3

ประโยชน์ที่จะได้รับ 4

2 หลักการ 5

กลไกปฏิกิริยาของกระบวนการหมักของ บิวไทริก-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 บิวไทริก-แอซิดแบคทีเรีย..... 6
2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 24
3 ภาพของเครื่องควบคุมความเป็นกรด-ด่าง..... 26
4 ภาพด้านข้างของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ..... 27
5 ภาพด้านหน้าของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ..... 28
6 ผังของระบบกระบวนการหมัก..... 33
7 แผนภูมิสายงานของโปรแกรมหลัก..... 36
8 แผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อยการแสดงผังของระบบกระบวนการหมัก..... 38
9 แผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อยการติดตามตัวแปรสถานะแบบออนไลน์..... 39
10 แผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อย GCANAL..... 42
11 แผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อยการทำนายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะจากแบบ..... 43
จำลองทางคณิตศาสตร์
12 แผนภูมิสายงานของโปรแกรมย่อยการเก็บค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลงแฟ้ม..... 44
ข้อมูล
13 เมนูหลัก..... 47
14 ผังของระบบกระบวนการหมัก..... 48
15 การติดตามตัวแปรสถานะแบบออนไลน์..... 48
16 ผลของข้อมูลที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ..... 49
17 ผลการทำนายการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ในรูปตาราง..... 49
18 ผลการทำนายการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ในรูปกราฟ..... 50
19 ภาพกระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่องของเดคโตสที่ pH 5.5..... 53
20 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการติดตามตัวแปรสถานะแบบออนไลน์..... 54
21 กราฟเปรียบเทียบค่าความเป็นกรด-ด่างที่ได้จากระบบออนไลน์กับค่าที่อ่านได้จากเครื่อง..... 55
ควบคุมความเป็นกรด-ด่าง
22 กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากระบบออนไลน์กับค่าที่อ่านได้จากเครื่องอังน้ำ..... 56

รูปที่ หน้า

23 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 58
โดยจิรกานต์ และคณะ
24 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของบิวทานอลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 58
โดยจิรกานต์ และคณะ
25 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของอะซีโตนที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 59
โดยจิรกานต์ และคณะ
26 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 59
โดยจิรกานต์ และคณะ
27 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกรดบิวไทริกที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 60
โดยจิรกานต์ และคณะ
28 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกรดอะซีติกที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 60
โดยจิรกานต์ และคณะ
29 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของชีวมวลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 61
โดยจิรกานต์ และคณะ
30 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 64
โดยจิรกานต์ และคณะ
31 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของบิวทานอลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 64
โดยจิรกานต์ และคณะ
32 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของอะซีโตนที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 65
โดยจิรกานต์ และคณะ
33 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 65
โดยจิรกานต์ และคณะ
34 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกรดบิวไทริกที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 66
โดยจิรกานต์ และคณะ
35 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกรดอะซีติกที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 66
โดยจิรกานต์ และคณะ

รูปที่ หน้า

36 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของชีวมวลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงาน..... 67
โดยจิรกานต์ และคณะ

37 เปรียบเทียบผลการใช้ค่าชีวมวลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าชีวมวลที่รายงานโดย..... 68
จิรกานต์และคณะในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของกลูโคสด้วยสมการสำหรับหาค่าของ
ตัวแปรที่วัดไม่ได้

คำอธิบายสัญญลักษณ์และคำย่อ

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
$ATP^{\bullet}_{ex}$	โมล ATP ที่เกินพอต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวในถังหมัก
$ATP^{\bullet}_{bt}$	โมล ATP ที่ถูกผลิตขึ้นทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวในถังหมัก
B	ความเข้มข้นของบิวทานอล (กรัม/ลิตร)
BA	ความเข้มข้นของกรดบิวไทริก (กรัม/ลิตร)
$C_{Ace}, C_{Aci}, C_{Aco}, C_b$	ความเข้มข้นของกรดอะซีติก อะซีโตอิน อะซีโตน และชีวมวล ในสมการ (25) (27) (24) และ (21)-(22) ตามลำดับ (โมล/ลิตร)
C_{Bl}, C_{Bt}, C_{Glu}	ความเข้มข้นของบิวทานอล บิวไทริก และกลูโคสในสมการ (26) (28) และ(29) ตามลำดับ (โมล/ลิตร)

$C_{Glu,in}$ ความเข้มข้นของกลูโคส ณ เวลาเริ่มต้น ในสมการ (29) (โมล/ลิตร)

C_{CO2}, C_{Hy} ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกผลิตขึ้น ในสมการ (35) และ (36) ตามลำดับ (โมล/ลิตร)

E ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัม/ลิตร)

FdH_2 รูปรีดิวซ์ของเฟร์รีดอกซิน (ferredoxin)

g(S) ฟังก์ชั่นตัวอย่าง (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)

$(MW)_b$ น้ำหนักโมเลกุลของชีวมวล

NfF^* โมล NAD ที่ถูกรีดิวซ์โดย FdH_2 ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวในถังหมัก

OD_{600} ค่าความทึบแสงของชีวมวล ณ 600 นาโนเมตร

RNA_{min} ความเข้มข้นของ RNA ในเซลล์ ณ อัตราการเติบโตจำเพาะ เท่ากับ ศูนย์

S ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (กรัม/ลิตร)

X ความเข้มข้นของชีวมวล (กรัม/ลิตร)

y	ตัวแปรไร้มิติที่แสดงแทนความเข้มข้นของ RNA
Y_{ATP}	ผลได้ ATP (กรัมชีวมวลต่อโมล ATP ที่ถูกใช้ในการสังเคราะห์ชีวมวล)
Y^{c}_{ATP}	ผลได้ ATP ที่เกิดจริงของกระบวนการหมัก ในสมการ(16)
Y_{s}	ผลได้ชีวมวล (กรัมชีวมวลต่อกรัมกลูโคสที่ถูกใช้ไปในการหมัก)
ε	สัมประสิทธิ์เอกซ์ทินชั่น (extinction coefficient) (L/g cm) ในสมการ (21)
γ_{b}	ดีกรีรีดักแทน (reductance degrees) ของชีวมวล
λ	ค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแบคทีเรีย
σ_{b}	เศษส่วนมวลของคาร์บอน (carbon mass fraction) ในชีวมวล
μ	อัตราการเติบโตจำเพาะ (h^{-1})