การพัฒนาระบบวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคสแบบกึ่งอัตโนมัติโดยใช้ไบโอเซนเซอร์

นายนารเมธ นานานุกูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2537

ISBN 974-584-356-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16844877

DEVELOPMENT OF SEMI-AUTOMATIC GLUCOSE ANALYZING SYSTEM USING A BIOSENSOR

MR. NARAMETH NANANUKUL

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1994

ISBN 974-584-356-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาระบบวัดน้ำตาลกลูโคสแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยใช้ไบโอเซนเซอร์
โดย นายนาเมธ นานานุกูล
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล อันตรเสน)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นารเมธ นานานุกูล : การพัฒนาระบบวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคสแบบกึ่งอัตโนมัติโดยใช้ไบโอเซนเซอร์(DEVELOPMENT OF SEMI-AUTOMATIC GLUCOSE ANALYZING BY USING A BIOSENSOR) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์, 151 หน้า. ISBN 974-584-356-3

ได้ทำการพัฒนาระบบวัดน้ำตาลกลูโคสขึ้น ซึ่งประกอบด้วยหัววัดน้ำตาลกลูโคส, ระบบโฟลว์อินเจ็กชัน และส่วนเก็บวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้คอมพิวเตอร์ หัววัดน้ำตาลกลูโคสเป็นแบบไบโอเซนเซอร์ที่มีส่วนประกอบคือ ทรานส์ดิวเซอร์ที่ทำเป็นฟิลม์บางของทองขาว และชั้นของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ถูกตรึงอยู่บนผิวทรานส์ดิวเซอร์ ในงานวิจัยได้มีการศึกษาการตรึงเอนไซม์ 4 วิธี คือการตรึงเอนไซม์แบบการสร้างพันธะเคมีโดยใช้ไซเลน และ พี-ไนโตรเบนซอยล์คลอไรด์, การตรึงเอนไซม์แบบการสร้างพันธะเคมีโดยใช้ไซเลน และกลูตาอัลดีไฮด์, การตรึงเอนไซม์โดยวิธีอิเล็กโตรโพลีเมอร์ไรเซชั่นของสารไพโรล และการตรึงเอนไซม์ในโครงร่างแหอีพือกซี จากการทดสอบพบว่า เซนเซอร์ที่มีการตรึงเอนไซม์ในโครงร่างแหของอีพือกซี มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานมากที่สุด โดยมีค่าความเป็นเส้นตรงของการวัดน้ำตาลกลูโคสในช่วง 0 ถึง1000 mg/dl เท่ากับ 0.996 และในการวัดมีผลรบกวนจากน้ำตาลมอลโตส, แลกโตส, ซูโครส และจากสารรีดิวซิงค์น้อยมาก สภาวะที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์ที่ดีคือ เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 50 mg, เฟอร์โรซีน 18.6 mg, อีพือกซี 50 mg, เอทธิลแอลกอฮอล์ 0.5 ml และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01M 0.5 ml สัญญาณที่วัดได้จากระบบโฟลว์อินเจ็กชันจะถูกนำมาแสดงผลบนจอมอนิเตอร์แบบเวลาจริง และจะถูกเก็บเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อสามารถนำมาวิเคราะห์ผลภายหลังได้ โดยในการวิเคราะห์สัญญาณจะมีการนำค่ายอดของสัญญาณมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณน้ำตาลกลูโคส ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความเร็วในการวัดน้ำตาลราว 1 ตัวอย่างต่อนาที โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการวัดน้ำตาลกลูโคสในสารชีวภาพ และเลือดเท่ากับ 0.9197 และ 0.977 ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

##C415481 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: Flow-injection analysis, Biosensor, Glucose

NARAMETH NANANUKUL : DEVELOPMENT OF SEMI-AUTOMATIC GLUCOSE ANALYZING SYSTEM BY USING A BIOSENSOR.
THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR MANA SRIYUDTHSAK 151 pp.
ISBN 974-584-356-3

The glucose analyzing system has been developed. It consists of glucose sensor, flow injection system and computerized analyzing system. The glucose biosensor is composed of transducer,which is made of thin film platinum, and a layer of enzyme, which is immobilized at the transducer's surface. In this research, four techniques of enzyme immobilization have been used. The techniques are enzyme immobilization by chemical bonding, using silane and p-nitrobenzoyl chloride, by chemical bonding, using silane and glutaraldehyde, by electropolymerization of pyrrole and enzyme immobilization by enzyme entrapment in epoxy structure. From the tests ,the sensor with enzyme immobilization by enzyme entrapment in epoxy structure gives the best results for applications. The correlation coefficient of the sensor is 0.996 when used to measure glucose concentration range from 0 to 1000 mg/dl. The interference from maltose, lactose, sucrose and reducing agents is very low in the measurement. The best conditions for enzyme immobilization are glucose oxidase 50 mg, ferrocene 18.6 mg, epoxy 50 mg, ethylalcohol 0.5 ml and phosphate buffer solution 0.01M 0.5 ml.The signal from the system is real-time displayed on a monitor and then recorded to computer for further analyzations. In analyzing the signal, the peak values of signals are used to calculate glucose concentration of the samples. The developed system can be measured at a speed of 1 sample per minute. The correlation coefficients of the system are 0.9197 and 0.977 when it is used to measure glucose concen tration in biological samples and human blood plasma, respectively.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำขึ้นที่ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Device Research Laboratory : SDRL) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ และด้านปฏิบัติการ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (SDRL) ซึ่งได้แก่ ศ.ดร.สมศักดิ์ บัญญาแก้ว รศ.ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงมาร ผศ.ดร.ชุมพล อันตรเสน ผศ.ดร.ธารา ชลปราณี และ อ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำที่มีค่า และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาตลอด

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณสุวัฒน์ โสภิตพันธ์ คุณวิโรจน์ บุญโกสุมภ์ คุณศุภโชค ไทยน้อย คุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านเทคนิคต่างๆ ขอขอบคุณ คุณชวัญเรือน ไทยน้อย ที่ให้ความช่วยเหลือด้านธุรการ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่คอยผลักดัน และให้กำลังใจตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่

1. บทนำ..... 1
2. ไบโอเซนเซอร์..... 5
   บทนำ..... 5
   2.1 ส่วนประกอบของไบโอเซนเซอร์..... 5
   2.2 ประเภทของการตรึงเอนไซม์..... 6
   2.3 การวัด และวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคส..... 8
   2.4 การวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสโดยใช้ไบโอเซนเซอร์..... 9
   2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของไบโอเซนเซอร์..... 11
   2.6 ส่วนประกอบของไบโอเซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 14
3. ระบบโฟลว์อินเจ็กชัน..... 23
   บทนำ..... 23
   3.1 ส่วนประกอบของระบบโฟลว์อินเจ็กชัน..... 23
      3.1.1 เซลล์ไหลผ่าน (flow through cell)..... 23
      3.1.2 เพอร์รีสแตลติกปั๊ม (peristaltic pump)..... 26
      3.1.3 หัวฉีด (injector)..... 27
   สรุป..... 29
4. ส่วนเก็บ และวิเคราะห์สัญญาณ..... 30

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	บทนำ	30
	4.1 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากระบบโฟลว์อินเจ็กชัน	31
	4.2 ส่วนประกอบของซอฟต์แวร์	32
	4.2.1 ส่วนเก็บสัญญาณ	33
	4.2.1.1 การแปลงค่าจากสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล	33
	4.4.2 ส่วนวิเคราะห์สัญญาณ	40
	สรุป	41
5.	การตรึงเอนไซม์ลงบนทรานส์ดิวเซอร์	42
	บทนำ	42
	5.1 การตรึงเอนไซม์แบบผัง (entrapment)ในโครงร่างแหของอีพ็อกซี	42
	5.1.1 ผลของปริมาณเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส	44
	5.1.2 ผลของสารส่งผ่านอิเล็กตรอน	47
	5.2 การตรึงเอนไซม์โดยวิธีอิเล็กโตรโพลีเมอร์ไรเซชั่น	51
	5.3 การตรึงเอนไซม์แบบการสร้างพันธะเคมี โดยใช้ไซเลน (silane) และกลูตาอัลดีไฮด์	59
	5.3.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นไซเลน และระยะเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์	61
	5.3.2 การศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ในสารละลายกลูตาอัลดีไฮด์	64
	5.3.3 การศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์	64
	5.4 การตรึงเอนไซม์แบบการสร้างพันธะเคมี โดยใช้ไซเลน (silane) และพีไนโตรเบนซอยล์คลอไรด์ (p-nitrobenzoylchloride)	67
	5.4.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของพีไนโตรเบนซอยล์คลอไรด์และสารละลายโซเดียมไดไทโอไนท์ ต่อปริมาณเอนไซม์ที่ตรึงได้	
	สรุป	75
6.	การทดสอบคุณสมบัติของเซนเซอร์	77

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	บทนำ	77
	6.1 การทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์แบบฝังในโครงร่างแหอีพือกซี	78
	6.2 การทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์แบบการสร้างพันธะเคมีโดยใช้ ไซเลน (silane) และพีไนโตรเบนซอยล์คลอไรด์ (p-nitrobenzoylchloride)	82
	6.3 การทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์แบบการสร้างพันธะเคมีโดยใช้ ไซเลน (silane) และกลูตาอัลดีไฮด์	85
	6.4 การทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์ โดยวิธีอิเล็กโตรโพลีเมอร์ไรเซชั่น	88
	6.5 การศึกษาการกระจายของลักษณะสมบัติของเซนเซอร์	92
	6.6 การศึกษาอายุการใช้งานของเซนเซอร์	94
	6.7 การศึกษาผลของความเร็วสารละลายพาห์ต่อการตอบสนองของเซนเซอร์	97
	สรุป	100
7.	การประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในการวัดสารชีวภาพ และเลือด	102
	บทนำ	102
	7.1 การประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในการวัดสารชีวภาพ	102
	7.2 การประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในการวัดน้ำตาลกลูโคสในเลือด	105
	สรุป	109
8.	สรุปผลการวิจัย	110
เอกสารอ้างอิง		113
ภาคผนวก ก.	โปรแกรมที่ใช้เก็บ และวิเคราะห์สัญญาณ	116
ภาคผนวก ข.	การทำงานของระบบ E-Beam Evaporator	142
ภาคผนวก ค.	การใส่ค่าพารามิเตอร์ของ CRTM Film Thickness Monitor	148
ประวัติผู้เขียน		151

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สภาวะที่ใช้ในการผลิตทรานส์ดิวเซอร์	17
4.1	ค่าต่างๆที่ใช้ในการกำหนดความถี่การแปลงสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณ	38
5.1	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการรีฟลักซ์	72
6.1	ค่าความชัน และค่ากระแสพื้นหลังของกราฟปรับเทียบของเซนเซอร์ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติการวัดซ้ำ	93
6.2	ค่าความไวของเซนเซอร์ ที่มีระยะเวลาในการเก็บก่อนการใช้งาน 1 วัน, 1 เดือน และ2 เดือน	95
6.3	ค่าความชัน และค่ากระแสพื้นหลังของกราฟปรับเทียบของเซนเซอร์ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติการวัดซ้ำ โดยการวัดผลตอบสนองติดต่อกัน 1 อาทิตย์	96
6.4	ผลของความเร็วสารละลายพาห์ ต่อช่วงการวัด ค่าความไว ค่ากระแสพื้นหลัง และค่าความเป็นเส้นตรงในการวัด	100
7.1	ค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดได้จากสารชีวภาพต่างๆ	103
7.2	ค่าความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส ที่วัดได้ในสารตัวอย่างเลือด ที่อยู่ในรูปพลาสมา เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายพาห์เท่ากับ 0.01 M	105
7.3	ค่าความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส ที่วัดได้ในสารตัวอย่างเลือด ที่อยู่ในรูปพลาสมา เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายพาห์เท่ากับ 0.001 M	107
ค.1	ค่า density และ acoustic impedance ของวัสดุชนิดต่างๆ	149

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	รูปเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคส	3
1.2	ส่วนประกอบของระบบวัดน้ำตาลที่จะพัฒนาขึ้น	3
2.1	ส่วนประกอบของไบโอเซนเซอร์	6
2.2	ลักษณะของการตรึงเอนไซม์แบบต่างๆ	7
2.3	ผลของความเข้มข้นของเอนไซม์ต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมี	14
2.4	ขั้นตอนการผลิตทรานส์ดิวเซอร์แบบเก่า และแบบใหม่	15
2.5	ขั้นตอนการทำมาสก์โลหะ	15
2.6	รูปมาสก์โลหะที่ทำขึ้น	16
2.7	ทิทาเนียม และทองขาวที่ใช้ในการประดิษฐ์ทรานส์ดิวเซอร์	17
2.8	เครื่องระเหยโลหะแบบลำอิเล็กตรอน	18
2.9	ลักษณะของทรานส์ดิวเซอร์ที่สมบูรณ์	18
2.10	บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวัดสัญญาณ	20
2.11	วงจรรวมของเครื่องวัดสัญญาณ	21
3.1	โครงสร้างของเซลล์ไหลผ่าน	24
3.2	อิเล็กโทรดที่ใช้ในงานวิจัย	24
3.3	เซลล์ไหลผ่านที่ติดตั้งทรานส์ดิวเซอร์	25
3.4	เซลล์ไหลผ่านที่พร้อมใช้งาน	25
3.5	เพอร์รีสแตลติกปั๊ม	26
3.6	หลักการทำงานของวาล์ว 6 ทาง	27
3.7	หัวฉีดที่ใช้ในงานวิจัย	28
3.8	ระบบโฟล์วอินเจ็กชันที่พัฒนาขึ้น	28
4.1	ลักษณะสัญญาณจากระบบโฟลว์อินเจ็กชัน	30
4.2	วงจรแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล	33
4.3	ขั้นตอนการแปลงสัญญาณโดยการควบคุมการทำงานจากโปรแกรม	34
4.4	การควบคุมการแปลงสัญญาณจากสัญญาณนาฬิการภายนอก	35
4.5	การกำหนดค่าเริ่มต้นของวงจรแปลงสัญญาณ	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	ขั้นตอนการทำงานของการอินเทอรัพท์	36
4.7	ส่วนกำเนิดสัญญาณนาฬิกา 8254	37
5.1	ขั้นตอนการตรึงเอนไซม์แบบฝังในโครงร่างแหอีพอกซี	43
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า กับความเข้มข้นของเอนไซม์	45
5.3	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์ไว้มาก(60 mg/dl) และเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์ไว้น้อย(10 mg/dl)	46
5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเฟอร์โรซีนกับกระแสไฟฟ้า	48
5.5	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเฟอร์โรซีน 25 mM และ100 mM	49
5.6	ลักษณะผิวอิเล็กโทรดก่อน และหลังการตรึงเอนไซม์	51
5.7	โครงสร้างแบบเรโซแนนซ์ของสารโพลีไพโรล เมื่อถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้า	52
5.8	การเกิดพันธะกันระหว่างโมโนเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเรโซแนนซ์	52
5.9	อิเล็กโทรดที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์	53
5.10	ขั้นตอนการตรึงเอนไซม์โดยวิธีโพลีเมอร์ไรเซชั่น	54
5.11	อิเล็กโทรดที่ปรับปรุงรูปร่างใหม่	55
5.12	โครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งอิเล็กโทรด	56
5.13	อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งอิเล็กโทรด	57
5.14	ฟิลม์ที่เกิดขึ้นเมื่อขั้วคาโทดมีพื้นที่มากกว่าขั้วแอโนด	58
5.15	ผลของค่าแรงดันไบแอสต่อปริมาณเอนไซม์ที่ตรึงได้	58
5.16	ขั้นตอนการตรึงเอนไซม์โดยใช้ไซเลน และกลูตาอัลดีไฮด์	60
5.17	ขั้นตอนการศึกษาผลของความเข้มข้นไซเลน และระยะเวลาในการรีฟลักซ์	62
5.18	ผลของความเข้มข้นของไซเลน และระยะเวลาในการรีฟลักซ์ ต่อปริมาณเอนไซม์ที่ตรึงได้	63
5.19	ขั้นตอนการศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ในสารละลายกลูตาอัลดีไฮด์	64
5.20	ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูตาอัลดีไฮด์	65
5.21	ขั้นตอนการศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ในสารละลายเอนไซม์	65
5.22	ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.23	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นกระจกให้มีหมู่ไดอะไทซ์ที่ผิว.....	69
5.24	ผลของความเข้มข้นของพี-ไนโตรเบนซอยล์คลอไรด์ และโซเดียมไดไทรอไนท์	73
6.1	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝัง ต่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 100 ถึง 400 mg/dl.....	78
6.2	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝัง ต่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 400 ถึง 700 mg/dl.....	79
6.3	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 500 mg/dl 11 ครั้ง...	80
6.4	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส, น้ำตาลแลกโตส และน้ำตาลซูโครส.....	81
6.5	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อกรดยูริก และกรดแอสคอบิก.....	81
6.6	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ ที่ตรึงเอนไซม์แบบสร้างพันธะเคมี ต่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 2000 ถึง 10000 mg/dl.....	83
6.7	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบสร้างพันธะเคมีต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 2000 mg/dl.....	83
6.8	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแลกโตส กรดแอสคอบิกและกรดยูริก.....	84
6.9	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์โดยสร้างพันธะเคมี ต่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 1000 ถึง 7500 mg/dl.....	85
6.10	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 2000 mg/dl.....	86
6.11	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแลกโตส กรดแอสคอบิกและกรดยูริก.....	87
6.12	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์โดยวิธีอิเล็กโตรโพลิเมอร์ไรเซชั่นต่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 3000 ถึง 10000 mg/dl.....	88
6.13	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 6000 mg/dl.....	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.14 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ ต่อน้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแลกโตส และกรดแอสคอบิก..... 90

6.15 คุณสมบัติในการทำซ้ำของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝัง..... 93

6.16 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝังที่ตรึงเอนไซม์ไว้ 1 วัน,1เดือน และ 2 เดือน ต่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 500,700 และ 900 mg/dl... 94

6.17 ผลตอลสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝัง ที่วัดผลตอบสนองติดต่อกัน 1 อาทิตย์ ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 500,700 และ 900 mg/dl..... 95

6.18 การตอบสนองของเซนเซอร์ เมื่อความเร็วของสารละลายพาห์เป็น 0.8 ml/min..... 97

6.19 การตอบสนองของเซนเซอร์ เมื่อความเร็วของสารละลายพาห์เป็น 1.0 ml/min 98

6.20 การตอบสนองของเซนเซอร์ เมื่อความเร็วของสารละลายพาห์เป็น 1.3 ml/min 98

6.21 กราฟปรับเทียบที่ได้ เมื่อความเร็วของสารละลายพาห์มีค่าเป็น 0.8,1.0 และ 1.3 ml/min ตามลำดับ..... 99

7.1 กราฟแสดงค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดได้ โดยใช้เซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝัง และค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดโดยวิธีวัดค่าการดูดกลืนของแสง เมื่อทำการวัดน้ำตาลกลูโคสในสารชีวภาพ..... 104

7.2 กราฟแสดงค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดได้ โดยใช้เซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝัง และค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดโดยใช้วิธีวัดค่าการดูดกลืนของแสง เมื่อทำการวัดน้ำตาลกลูโคสในพลาสมา โดยใช้สารละลายพาห์ที่มีความเข้มข้น 0.01 M..... 106

7.3 กราฟแสดงค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดได้ โดยใช้เซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝัง และค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดโดยใช้วิธีวัดค่าการดูดกลืนของแสง เมื่อทำการวัดน้ำตาลกลูโคสในพลาสมา โดยใช้สารละลายพาห์ที่มีความเข้มข้น 0.001 M..... 108

ข.1 แผงควบคุมระบบปั๊ม..... 143

ข.2 ตำแหน่งของวาล์วที่ใช้ควบคุมการทำงานของปั๊ม..... 144