

การพัฒนาระบบวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคส  
แบบกึ่งอัตโนมัติโดยใช้ไบโอเซนเซอร์



นายนารเมธ นานานุกูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2537

ISBN 974-584-356-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16844817

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

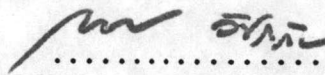
1994

ISBN 974-584-356-3

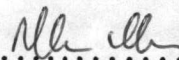
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาระบบวัดน้ำตาลกลูโคสแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยใช้นาโนเซนเซอร์  
โดย นายนารเมธ นานานุกูล  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์

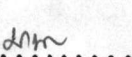


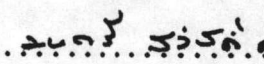
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

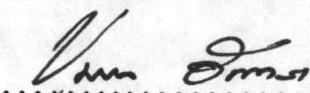
  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชรภักย์)

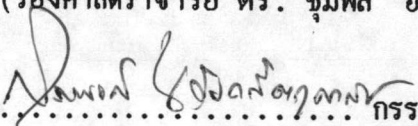
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ บัญญาแก้ว)

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

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

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

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ นวังคส์ตฤศาสน์)



นารเมธ นานานุกูล : การพัฒนาระบบวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคสแบบกึ่งอัตโนมัติโดย  
ใช้ไบโอเซนเซอร์ (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, ระบบ  
โพลีอินเจกชัน และส่วนเก็บวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้คอมพิวเตอร์ หัววัดน้ำตาลกลูโคสเป็นแบบ  
ไบโอเซนเซอร์ที่มีส่วนประกอบคือ ทรานส์ดิวเซอร์ที่ทำเป็นฟิล์มบางของทองขาว และชั้นของ เอน  
ไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ถูกตรึงอยู่บนผิวทรานส์ดิวเซอร์ ในงานวิจัยได้มีการศึกษาการตรึงเอนไซม์  
4 วิธี คือการตรึงเอนไซม์แบบการสร้างพันธะเคมีโดยใช้ไซเลน และ พี-ไนโตรเบนซอิลคลอ  
ไรด์, การตรึงเอนไซม์แบบการสร้างพันธะเคมีโดยใช้ไซเลน และกลูตาอัลดีไฮด์, การตรึงเอน  
ไซม์โดยวิธีอิเล็กโตรพอลิเมอร์ไรเซชันของสารไพโรล และการตรึงเอนไซม์ในโครงร่างแห  
อีพ็อกซี จากการทดสอบพบว่า เซนเซอร์ที่มีการตรึงเอนไซม์ในโครงร่างแหของอีพ็อกซี มีความ  
เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานมากที่สุด โดยมีค่าความเป็นเส้นตรงของการวัดน้ำตาลกลู  
โคสในช่วง 0 ถึง 1000 mg/dl เท่ากับ 0.996 และในการวัดมีผลรบกวนจากน้ำตาลมอลโตส,  
แลกโตส, ซูโครส และจากสารรีดิวซิ่งค่าน้อยมาก สภาวะที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์ที่ดีที่สุดคือ เอนไซม์  
กลูโคสออกซิเดส 50 mg, เฟอร์ไรซีน 18.6 mg, อีพ็อกซี 50 mg, เอทิลแอลกอฮอล์  
0.5 ml และสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.01M 0.5 ml สัญญาณที่วัดได้จากระบบโพลี  
อินเจกชันจะถูกนำมาแสดงผลบนจอมอนิเตอร์แบบเวลาจริง และจะถูกเก็บเข้าสู่คอมพิวเตอร์ เพื่อ  
สามารถนำมาวิเคราะห์ผลภายหลังได้ โดยในการวิเคราะห์สัญญาณจะมีการนำค่ายอดของสัญญาณ  
มาใช้ในการคำนวณหาปริมาณน้ำตาลกลูโคส ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความเร็วในการวัดน้ำตาลราว 1  
ตัวอย่างต่อนาที โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการวัดน้ำตาลกลูโคสในสารชีวภาพ และเลือด  
เท่ากับ 0.9197 และ 0.977 ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2537

ลายมือชื่อนิสิต *นารเมธ นานานุกูล*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *ผศ.ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์*  
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.

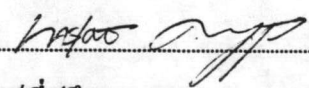
THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR MANA SRIYUDTHSAK 151 pp.  
ISBN 974-584-356-3

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 concentration in biological samples and human blood plasma, respectively.

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ปีการศึกษา..... 2537.....

ลายมือชื่อนิสิต..... .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... .....

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 สวัสดิ์ศฤงฆาร ผศ.ดร.ชุมพล อันตรเสน ผศ.ดร.ชารา ชลปราณี และ อ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำที่มีค่า และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาตลอด

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณสุวัฒน์ โรสิตพันธ์ คุณวิโรจน์ บุญรักสมบูรณ์ คุณสุภาวิช ไทยน้อย คุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านเทคนิคต่างๆ ขอขอบคุณ คุณขวัญเรือน ไทยน้อย ที่ให้ความช่วยเหลือด้านธุรการ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่คอยปล้ำกดัน และให้กำลังใจตลอด

มา

## สารบัญ



หน้า

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

### บทที่

1. บทนำ.....	1
2. ไบโอดีเอ็นเอ.....	5
บทนำ.....	5
2.1 ส่วนประกอบของไบโอดีเอ็นเอ.....	5
2.2 ประเภทของการตรึงเอนไซม์.....	6
2.3 การวัด และวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคส.....	8
2.4 การวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสด้วยไบโอดีเอ็นเอ.....	9
2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของไบโอดีเอ็นเอ.....	11
2.6 ส่วนประกอบของไบโอดีเอ็นเอที่ใช้ในงานวิจัย.....	14
3. ระบบรีฟลูอิดอินเจกชัน.....	23
บทนำ.....	23
3.1 ส่วนประกอบของระบบรีฟลูอิดอินเจกชัน.....	23
3.1.1 เซลล์ไหลผ่าน (flow through cell).....	23
3.1.2 เพอร์ริสแตลติกปั๊ม (peristaltic pump).....	26
3.1.3 หัวฉีด (injector).....	27
สรุป.....	29
4. ส่วนเก็บ และวิเคราะห์สัญญาณ.....	30



สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทนำ.....	30
4.1 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากระบบโรฟลว้อินเจกชัน.....	31
4.2 ส่วนประกอบของซอฟต์แวร์.....	32
4.2.1 ส่วนเก็บสัญญาณ.....	33
4.2.1.1 การแปลงค่าจากสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล	33
4.4.2 ส่วนวิเคราะห์สัญญาณ.....	40
สรุป.....	41
5. การตรึงเอนไซม์ลงบนทรานส์คิวเซอร์.....	42
บทนำ.....	42
5.1 การตรึงเอนไซม์แบบฝัง (entrapment) ในโครงสร้างแหงของอีพ็อกซี	42
5.1.1 ผลของปริมาณเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส.....	44
5.1.2 ผลของสารส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	47
5.2 การตรึงเอนไซม์โดยวิธีอิเล็กโตรโพลีเมอร์ไรเซชัน.....	51
5.3 การตรึงเอนไซม์แบบการสร้างพันธะเคมี โดยใช้ไซเลน (silane) และกลูตาออลดีไฮด์.....	59
5.3.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นไซเลน และระยะเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์.....	61
5.3.2 การศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ในสารละลายกลูตาออลดีไฮด์.....	64
5.3.3 การศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์.....	64
5.4 การตรึงเอนไซม์แบบการสร้างพันธะเคมี โดยใช้ไซเลน (silane) และพีนโตรเบนซอิลคลอไรด์ (p-nitrobenzoylchloride) ..	67
5.4.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของพีนโตรเบนซอิลคลอไรด์และสารละลายโซเดียมไคโทโรไนท์ ต่อปริมาณเอนไซม์ที่ตรึงได้.....	75
สรุป.....	75
6. การทดสอบคุณสมบัติของเซนเซอร์.....	77



สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทนำ.....	77
6.1 การทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์แบบฝังในโครงร่างแห อีพ็อกซี.....	78
6.2 การทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์แบบการสร้างพันธะเคมี โดยใช้ ซิลเลน (silane) และพีไนโตรเบนซอยล์คลอไรด์ (p-nitrobenzoylchloride).....	82
6.3 การทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์แบบการสร้างพันธะเคมี โดยใช้ ซิลเลน (silane) และกลูตาอัลดีไฮด์.....	85
6.4 การทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์ โดยวิธีอิเล็กโตรโพลี เมอร์ไรเซชัน.....	88
6.5 การศึกษาการกระจายของลักษณะสมบัติของเซนเซอร์.....	92
6.6 การศึกษาอายุการใช้งานของเซนเซอร์.....	94
6.7 การศึกษาผลของความเร็วสารละลายพาห้ต่อการตอบสนองของเซน เซอร์.....	97
สรุป.....	100
7. การประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในการวัดสารชีวภาพ และ เลือด.....	102
บทนำ.....	102
7.1 การประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในการวัดสารชีวภาพ.....	102
7.2 การประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในการวัดน้ำตาลกลูโคสในเลือด.....	105
สรุป.....	109
8. สรุปผลการวิจัย.....	110
เอกสารอ้างอิง.....	113
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่เข้าเก็บ และวิเคราะห์สัญญาณ.....	116
ภาคผนวก ข. การทำงานของระบบ E-Beam Evaporator.....	142
ภาคผนวก ค. การใส่ค่าพารามิเตอร์ของ CRTM Film Thickness Monitor...	148
ประวัติผู้เขียน.....	151

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สภาวะที่ใช้ในการผลิตทรานส์ดีวเซอร์.....	17
4.1	ค่าต่างๆที่ใช้ในการกำหนดความถี่การแปลงสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณ.....	38
5.1	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการรีฟลักซ์.....	72
6.1	ค่าความชื้น และค่ากระแสพื้นหลังของกราฟเปรียบเทียบของเซนเซอร์ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติการวัดซ้ำ.....	93
6.2	ค่าความไวของเซนเซอร์ ที่มีระยะเวลาในการเก็บก่อนการใช้งาน 1 วัน, 1 เดือน และ 2 เดือน.....	95
6.3	ค่าความชื้น และค่ากระแสพื้นหลังของกราฟเปรียบเทียบของเซนเซอร์ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติการวัดซ้ำ โดยการวัดผลตอบสนองติดต่อกัน 1 อาทิตย์.....	96
6.4	ผลของความเร็วสารละลายพาห้ ต่อช่วงการวัด ค่าความไว ค่ากระแสพื้นหลัง และค่าความเป็นเส้นตรงในการวัด.....	100
7.1	ค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดได้จากสารชีวภาพต่างๆ.....	103
7.2	ค่าความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส ที่วัดได้ในสารตัวอย่างเลือด ที่อยู่ในรูปพลาสมา เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายพาห้เท่ากับ 0.01 M.....	105
7.3	ค่าความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส ที่วัดได้ในสารตัวอย่างเลือด ที่อยู่ในรูปพลาสมา เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายพาห้เท่ากับ 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	ส่วนประกอบของไบรโอเซนเซอร์.....	6
2.2	ลักษณะของการตรึงเอนไซม์แบบต่างๆ.....	7
2.3	ผลของความเข้มข้นของเอนไซม์ต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมี.....	14
2.4	ขั้นตอนการผลิตทรานส์ดีวเซอร์แบบเก่า และแบบใหม่.....	15
2.5	ขั้นตอนการทำมาส์กโลหะ.....	15
2.6	รูปมาส์กโลหะที่ทำขึ้น.....	16
2.7	ทิทาเนียม และทองขาวที่ใช้ในการประดิษฐ์ทรานส์ดีวเซอร์.....	17
2.8	เครื่องระเหยโลหะแบบลิวอิเล็คตรอน.....	18
2.9	ลักษณะของทรานส์ดีวเซอร์ที่สมบูรณ์.....	18
2.10	บล็อกไอตะแกรงของเครื่องวัดสัญญาณ.....	20
2.11	วงจรรวมของเครื่องวัดสัญญาณ.....	21
3.1	โครงสร้างของเซลล์ไหลผ่าน.....	24
3.2	อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
3.3	เซลล์ไหลผ่านที่ติดตั้งทรานส์ดีวเซอร์.....	25
3.4	เซลล์ไหลผ่านที่พร้อมใช้งาน.....	25
3.5	เพอร์ริสแตลติกบัม.....	26
3.6	หลักการทำงานของวาล์ว 6 ทาง.....	27
3.7	หัวใจที่ใช้ในงานวิจัย.....	28
3.8	ระบบฟลว์อินเจ็คชันที่พัฒนาขึ้น.....	28
4.1	ลักษณะสัญญาณจากระบบฟลว์อินเจ็คชัน.....	30
4.2	วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล.....	33
4.3	ขั้นตอนการแปลงสัญญาณรายการควบคุมการทำงานจากโปรแกรม.....	34
4.4	การควบคุมการแปลงสัญญาณจากสัญญาณนาฬิกาภายนอก.....	35
4.5	การกำหนดค่าเริ่มต้นของวงจรแปลงสัญญาณ.....	36



สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	ขั้นตอนการทำงานของอินเทอร์พาร์ท..... 36
4.7	ส่วนกำเนิดสัญญาณพิก้า 8254..... 37
5.1	ขั้นตอนการตรึงเอนไซม์แบบฝังในโครงร่างแห่อีพอกซี..... 43
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า กับความเข้มข้นของเอนไซม์..... 45
5.3	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์ไว้มาก(60 mg/dl) และเซนเซอร์ ที่ทำการตรึงเอนไซม์ไว้น้อย(10 mg/dl)..... 46
5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเพอร์โรซินกับกระแสไฟฟ้า..... 48
5.5	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเพอร์โรซิน 25 mM และ 100 mM..... 49
5.6	ลักษณะผิวอิเล็กทรอนิกส์ก่อน และหลังการตรึงเอนไซม์..... 51
5.7	โครงสร้างแบบเรโซแนนซ์ของสารโพลีไพโรล เมื่อถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้า..... 52
5.8	การเกิดพันธะกันระหว่างโรมินเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเรโซแนนซ์..... 52
5.9	อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์..... 53
5.10	ขั้นตอนการตรึงเอนไซม์โดยวิธีโพลีเมอร์ไรเซชัน..... 54
5.11	อิเล็กทรอนิกส์ที่ปรับปรุงรูปร่างใหม่..... 55
5.12	โครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์..... 56
5.13	อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์..... 57
5.14	ฟิล์มที่เกิดขึ้นเมื่อขั้วคาร์บอนมีพื้นที่มากกว่าขั้วแอนด..... 58
5.15	ผลของค่าแรงดันไบแอสต่อปริมาณเอนไซม์ที่ตรึงได้..... 58
5.16	ขั้นตอนการตรึงเอนไซม์โดยใช้ไซเลน และกลูตาอัลดีไฮด์..... 60
5.17	ขั้นตอนการศึกษาผลของความเข้มข้นไซเลน และระยะเวลาในการรีฟลักซ์..... 62
5.18	ผลของความเข้มข้นของไซเลน และระยะเวลาในการรีฟลักซ์ ต่อปริมาณ เอนไซม์ที่ตรึงได้..... 63
5.19	ขั้นตอนการศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ในสารละลายกลูตาอัลดีไฮด์.. 64
5.20	ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูตาอัลดีไฮด์..... 65
5.21	ขั้นตอนการศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ในสารละลายเอนไซม์..... 65
5.22	ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์..... 66

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
5.23	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นกระจกให้มีหมู่โคอะไทท์ที่ผิว.....	69
5.24	ผลของความเข้มข้นของพี-ไนโตรเบนซอฮอล์คลอไรด์ และโซเดียมโคไทโธไนท์	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 และน้ำตาล ซูโครส.....	81
6.5	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อกรดยูริก และกรดแอสคอบิก.....	81
6.6	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ ที่ตรึงเอนไซม์แบบสร้างพันธะเคมี ต่อน้ำตาลกลูโคส ความเข้มข้น 2000 ถึง 10000 mg/dl.....	83
6.7	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบสร้างพันธะเคมีต่อน้ำตาลกลูโคส เข้มข้น 2000 mg/dl.....	83
6.8	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแลกโตส กรดแอสคอบิก และกรดยูริก.....	84
6.9	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์โดยสร้างพันธะเคมี ต่อน้ำตาลกลูโคส ความเข้มข้น 1000 ถึง 7500 mg/dl.....	85
6.10	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 2000 mg/dl.....	86
6.11	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแลกโตส กรดแอสคอบิก และกรดยูริก.....	87
6.12	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์โดยวิธีอิเล็กโตรโพลิเมอร์ไรเซชัน ต่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 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, 1 เดือน และ 2 เดือน ต่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 500, 700 และ 900 mg/dl... 94
6.17	ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝัง ที่วัดผลตอบสนองติดต่อกัน 1 อาทิตย์ ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 500, 700 และ 900 mg/dl..... 95
6.18	การตอบสนองของเซนเซอร์ เมื่อความเร็วของสารละลายพาห้เป็น 0.8 ml/min..... 97
6.19	การตอบสนองของเซนเซอร์ เมื่อความเร็วของสารละลายพาห้เป็น 1.0 ml/min ..... 98
6.20	การตอบสนองของเซนเซอร์ เมื่อความเร็วของสารละลายพาห้เป็น 1.3 ml/min ..... 98
6.21	กราฟเปรียบเทียบที่ได้ เมื่อความเร็วของสารละลายพาห้มีค่าเป็น 0.8, 1.0 และ 1.3 ml/min ตามลำดับ..... 99
7.1	กราฟแสดงค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดได้ โดยใช้เซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝัง และค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดโดยวิธีวัดค่าการดูดกลืนของแสง เมื่อทำการวัดน้ำตาลกลูโคสในสารชีวภาพ..... 104
7.2	กราฟแสดงค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดได้ โดยใช้เซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝัง และค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดโดยวิธีวัดค่าการดูดกลืนของแสง เมื่อทำการวัดน้ำตาลกลูโคสในพลาสมา โดยใช้สารละลายพาห้ที่มีความเข้มข้น 0.01 M..... 106
7.3	กราฟแสดงค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดได้ โดยใช้เซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝัง และค่าน้ำตาลกลูโคสที่วัดโดยวิธีวัดค่าการดูดกลืนของแสง เมื่อทำการวัดน้ำตาลกลูโคสในพลาสมา โดยใช้สารละลายพาห้ที่มีความเข้มข้น 0.001 M..... 108
ข.1	แผนควบคุมระบบปั๊ม..... 143
ข.2	ตำแหน่งของวาล์วที่ใช้ควบคุมการทำงานของปั๊ม..... 144