บทที่ 6

การทดสอบคุณสมบัติของเซนเซอร์

บทนำ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แตกต่างกันทั้ง 4 แบบ ดังได้แสดงขั้นตอนการประดิษฐ์ไว้ในบทที่ 5 การทดสอบจะทำการทดสอบคุณสมบัติเหล่านี้ คือ

1. ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อดูช่วงความกว้างของความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส ที่เซนเซอร์สามารถวัดได้ และคุณสมบัติการวัดซ้ำของเซนเซอร์ (repeatability)

2. ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลชนิดอื่นๆ เช่น น้ำตาลมอลโตส,น้ำตาลแลกโตส และน้ำตาลซูโครส เพื่อดูความจำเพาะในการตอบสนองของเซนเซอร์ เนื่องจากในสารตัวอย่างที่ต้องการวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคส ถ้าเป็นสารตัวอย่างที่ได้จากอุตสาหกรรมอาหาร มักจะมีน้ำตาลชนิดอื่นๆ เช่น น้ำตาลมอลโตส,น้ำตาลแลกโตส และน้ำตาลซูโครสปะปนอยู่เสมอ

ในการทดสอบการรบกวนของน้ำตาลชนิดอื่นๆ จะใช้ปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลมอลโตส,น้ำตาลแลกโตส และน้ำตาลซูโครส สูงถึง 4000 mg/dl ในการทดสอบ เพื่อให้แน่ใจว่าเซนเซอร์ที่ทำขึ้น จะไม่มีผลรบกวนจากน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดขณะทำการวัดสารตัวอย่างที่ได้มาจากอุตสาหกรรมอาหาร

3. ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อกรดยูริก และกรดแอสคอบิก เพื่อดูผลการรบกวนของสารรีดิวซิงค์ เนื่องจากสารตัวอย่างที่ได้มาจากทางการแพทย์ เช่น เลือดของคนไข้ที่ป่วยเป็นโรคเบาหวาน ซึ่งจะต้องทำการวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคส มักจะมีสารรีดิวซิงค์เช่น กรดยูริก และกรดแอสคอบิกปนอยู่ในเลือด

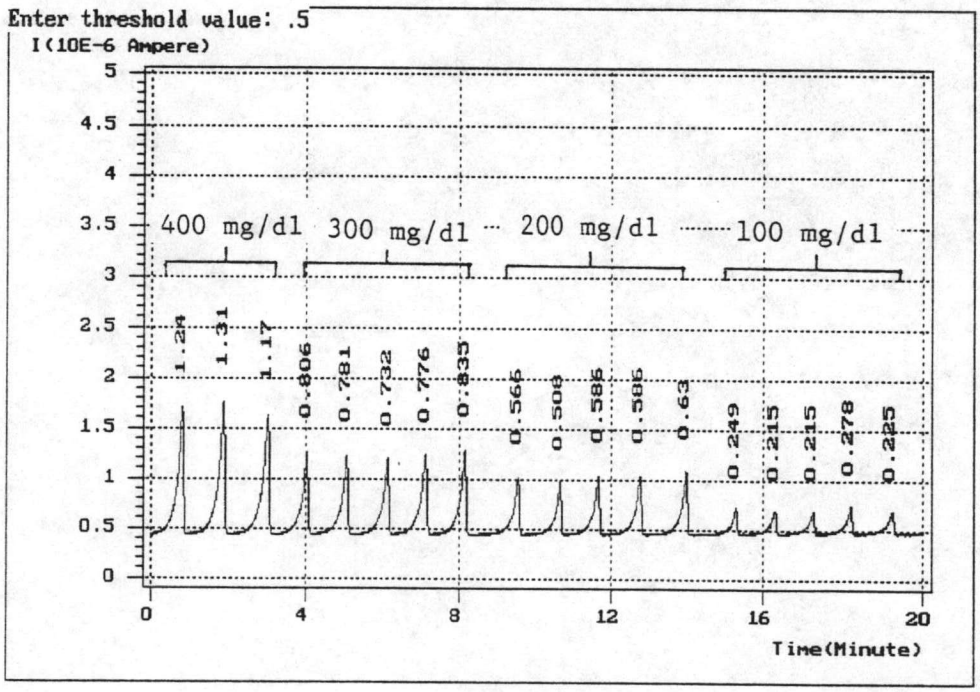
ในการทดสอบการรบกวนของสารรีดิวซิงค์ จะใช้ปริมาณความเข้มข้นของกรดยูริก และกรดแอสคอบิก 0.01 M ในการทดสอบ เพื่อให้แน่ใจว่าเซนเซอร์ที่ทำขึ้น จะไม่มีผลตอบสนองต่อสารรีดิวซิงค์ทั้ง 2 ขณะทำการวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสในเลือด

6.1 การทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์แบบฝัง (entrapment) ในโครงร่างแหของอีพ็อกซี

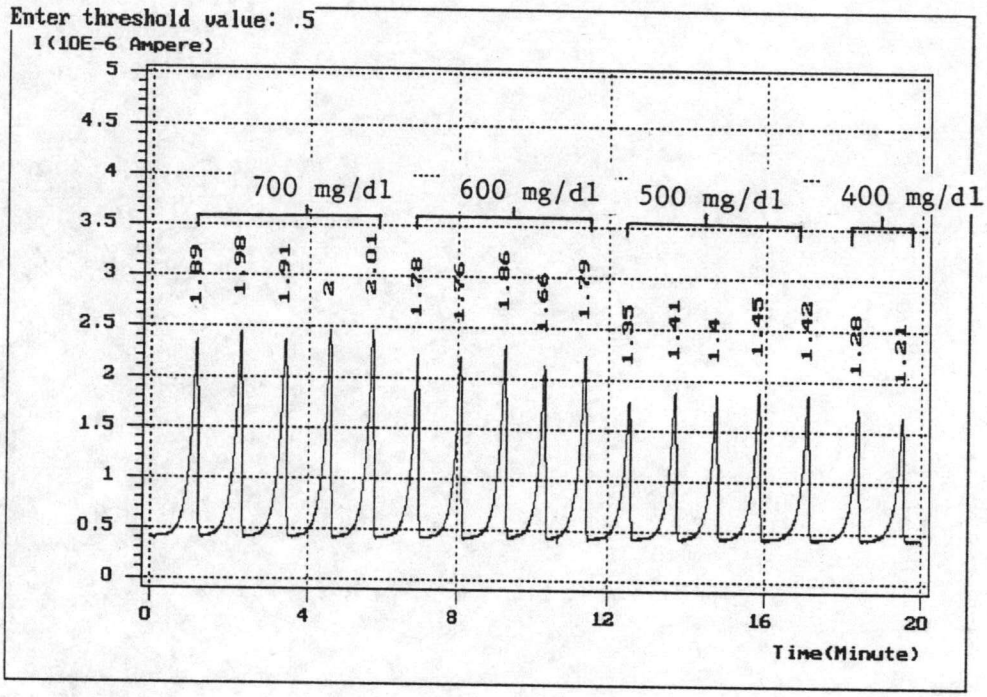
ในการทดสอบ จะทดสอบเซนเซอร์ในระบบโฟลว์อินเจ็กชันที่ทำขึ้น โดยจะใช้แรงดันไบแอสเซนเซอร์ 0.2 โวลต์ ความเร็วของสารละลายพาห์ 1.0 ml/min สภาวะที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 5

1. ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้นต่างๆ

ในการทดลอง ได้ใช้สารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 100 ถึง 700 mg/dl ในการทดสอบ ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 6.1 และ 6.2



รูปที่ 6.1 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝังต่อน้ำตาลกลูโคส ความเข้มข้น 100 ถึง 400 mg/dl



รูปที่ 6.2 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบฝังต่อน้ำตาลกลูโคส ความเข้มข้น 400 ถึง 700 mg/dl

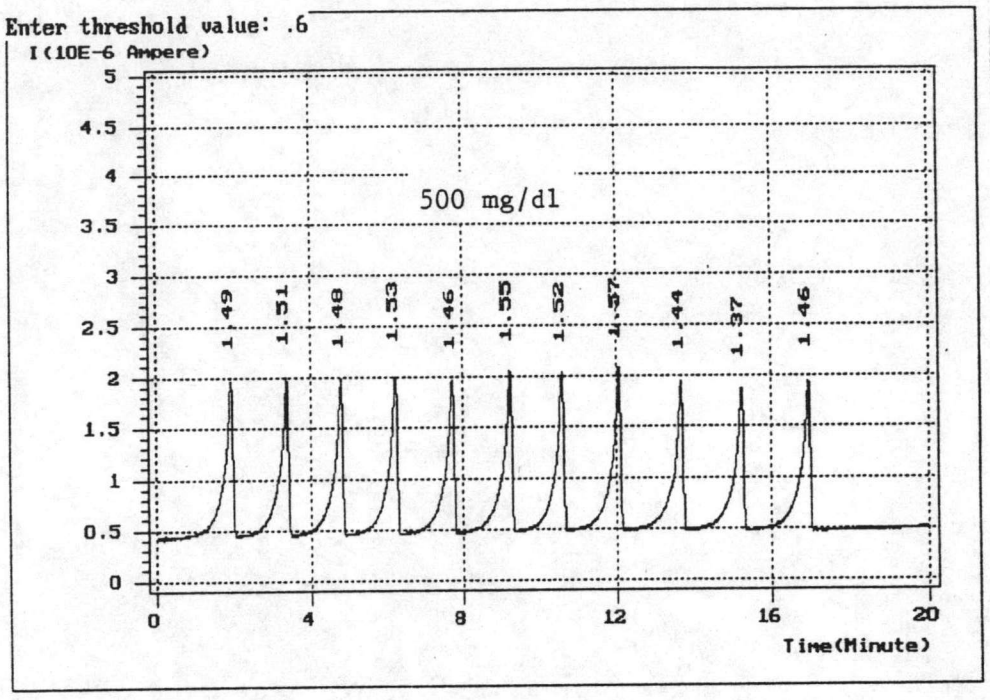
จากผลการทดลองในรูป 6.1 และ 6.2 จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองของเซนเซอร์จะมีความไวและความเป็นเส้นตรงในการวัดน้ำตาลกลูโคสตามสมการที่ (6.1)และ(6.2)

ความไว $y = 2.922 * 10^{-3}(x) - 0.03$ (6.1)

ความเป็นเส้นตรง $r = 0.996$ (6.2)

โดยที่ y คือ ค่าการตอบสนองที่ได้จากเซนเซอร์ (uA)
x คือ ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (mg/dl)
r คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรง

การทดสอบคุณสมบัติการวัดซ้ำของเซนเซอร์ ทำโดยวัดค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส 500 mg/dl 11 ครั้ง ผลการวัดแสดงดังรูปที่ 6.3



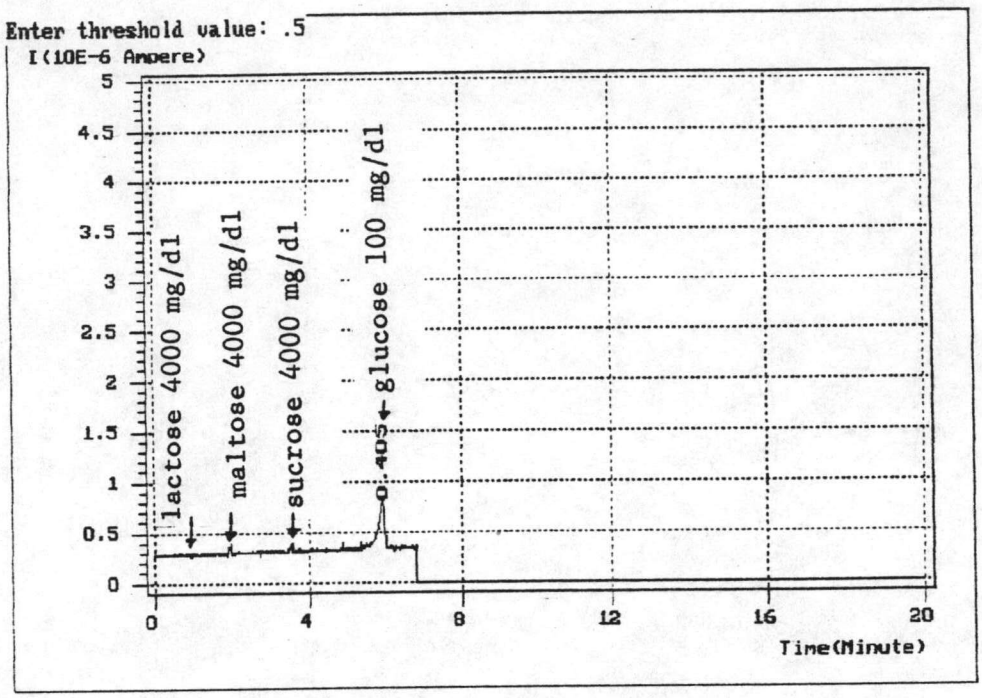
รูปที่ 6.3 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 500 mg/dl 11 ครั้ง

จากรูปที่ 6.3 เมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแปรเปลี่ยน ของผลตอบสนองที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 3.78%

2. การทดสอบความจำเพาะของเซนเซอร์

รูปที่ 6.4 แสดงผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อ น้ำตาลมอลโตส,น้ำตาลแลกโตสและน้ำตาลซูโครส

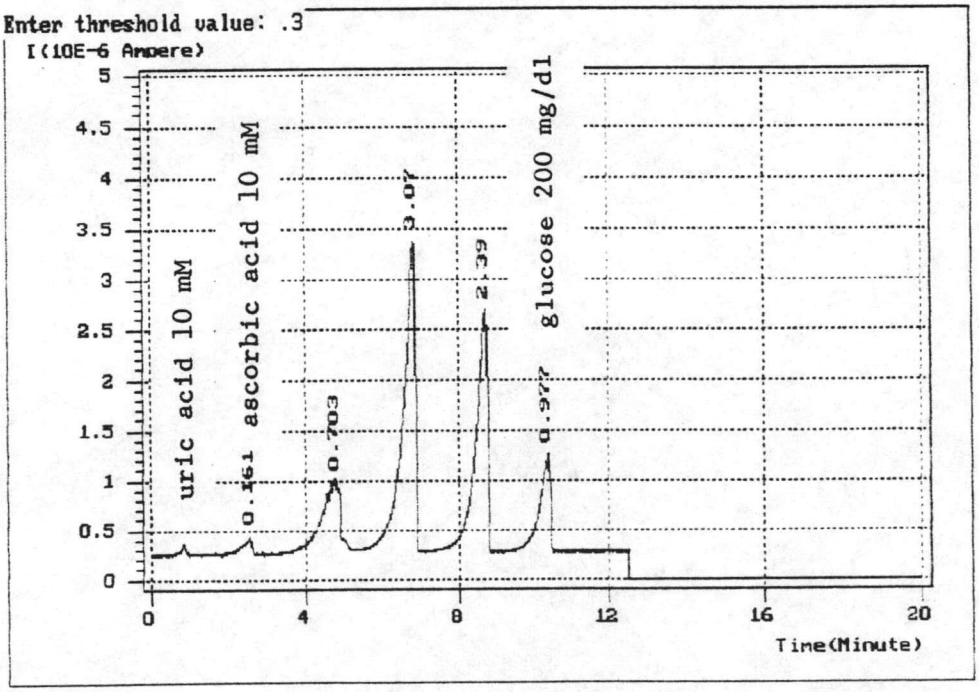
จะเห็นได้ว่าเซนเซอร์ที่ทำขึ้น มีความจำเพาะในการวัดน้ำตาลกลูโคสสูง โดยไม่มีผลรบกวนจากน้ำตาลแลกโตส ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 4000 mg/dl และตอบสนองต่อน้ำตาลซูโครส และมอลโตสที่ความเข้มข้น 4000 mg/dl ต่ำกว่า 1/5 เท่าของน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้น 100 mg/dl



รูปที่ 6.4 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส,น้ำตาลแลกโตส และน้ำตาลซูโครส

3. การทดสอบผลของสารรีดิวซิงค์ต่อการตอบสนองของเซนเซอร์

รูปที่ 6.5 แสดงผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อกรดยูริก และกรดแอสคอบิก



รูปที่ 6.5 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อกรดยูริก และกรดแอสคอบิก

จากรูป จะเห็นได้ว่าเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น ตอบสนองต่อกรดยูริก และกรดแอสคอบิกที่มีความเข้มข้นสูงถึง 10 mM น้อยมาก เนื่องจากในการวัดใช้ศักย์ไฟฟ้าในการไบแอสเซนเซอร์เพียง 0.2 โวลต์ ซึ่งมีค่าไม่สูงเพียงพอที่จะไปออกซิไดซ์สารในกลุ่มรีดิวซิงค์ได้ จึงทำให้ในการวัดมีผลรบกวนจากสารรีดิวซิงค์น้อยมาก

6.2 การทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์โดยพันธะเคมี โดยใช้ไซเลน และ พี-ไนโตรเบนซอยล์คลอไรด์

ในการทดสอบ จะทดสอบเซนเซอร์ในระบบโฟลว์อินเจ็กชันที่ทำขึ้น โดยจะใช้แรงดันไบแอสเซนเซอร์ 0.6 โวลต์ เนื่องจากไม่มีส่วนผสมของเพอร์โรซีนในส่วนทำปฏิกิริยา ความเร็วของสารละลายพาห์เท่ากับ 1.0 ml/min สภาวะที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5

1. ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้นต่างๆ

ในการทดสอบพบว่าผลตอบสนองต่อน้ำตาลกลูโคสที่มีความเข้มข้น 100 ถึง 900 mg/dl มีค่าน้อยมากจนทำการวัดไม่ได้ จึงได้เพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส ที่ใช้ในการทดสอบเป็น 2000 ถึง 10000 mg/dl ผลการตอบสนองของเซนเซอร์แสดงไว้ในรูปที่ 6.6

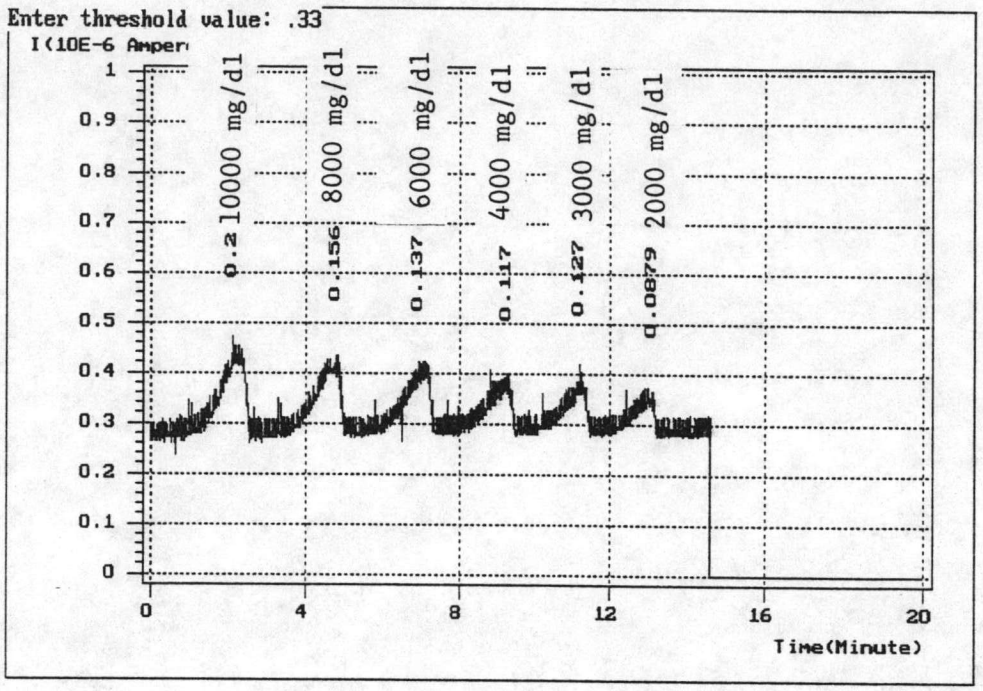
จากผลการทดลองในรูป 6.6 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของเซนเซอร์จะมีความไวและความเป็นเส้นตรงในการวัดน้ำตาลกลูโคสตามสมการที่ (6.3)และ(6.4)

ความไว $$y = 1.17 * 10^{-5}(x) + 0.07 \qquad (6.3)$$

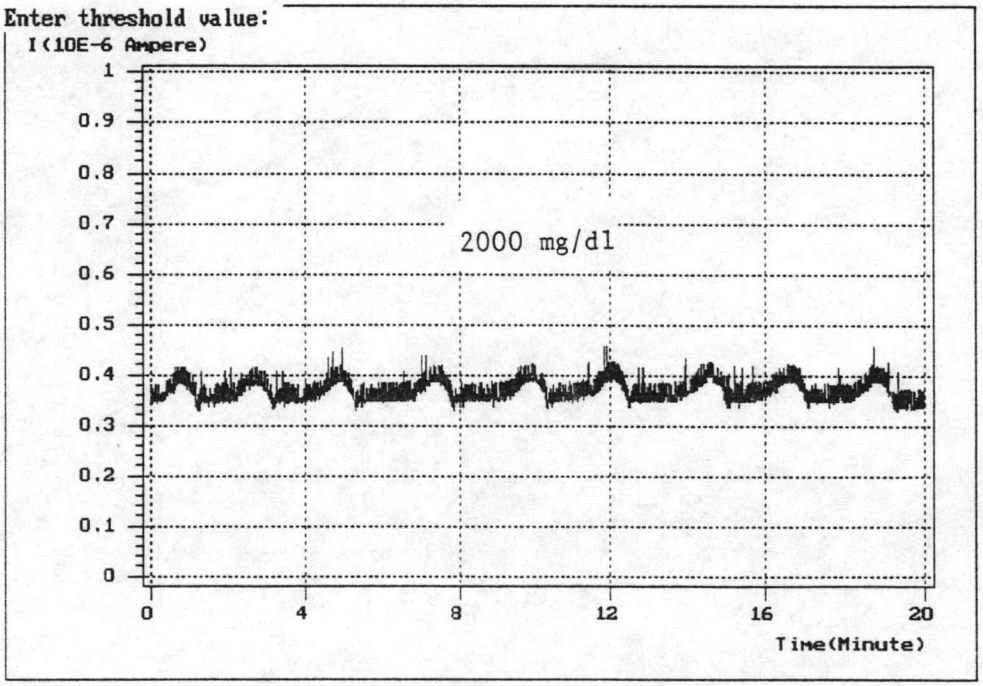
ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรง $$r = 0.95 \qquad (6.4)$$

โดยที่ y คือ ค่าการตอบสนองที่ได้จากเซนเซอร์ (uA)
x คือ ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (mg/dl)

การทดสอบคุณสมบัติการวัดซ้ำของเซนเซอร์ทำโดยหาผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 2000 mg/dl ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.7 จากรูปจะเห็นได้ว่า



รูปที่ 6.6 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบสร้างพันธะเคมี ต่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 2000 ถึง 10000 mg/dl

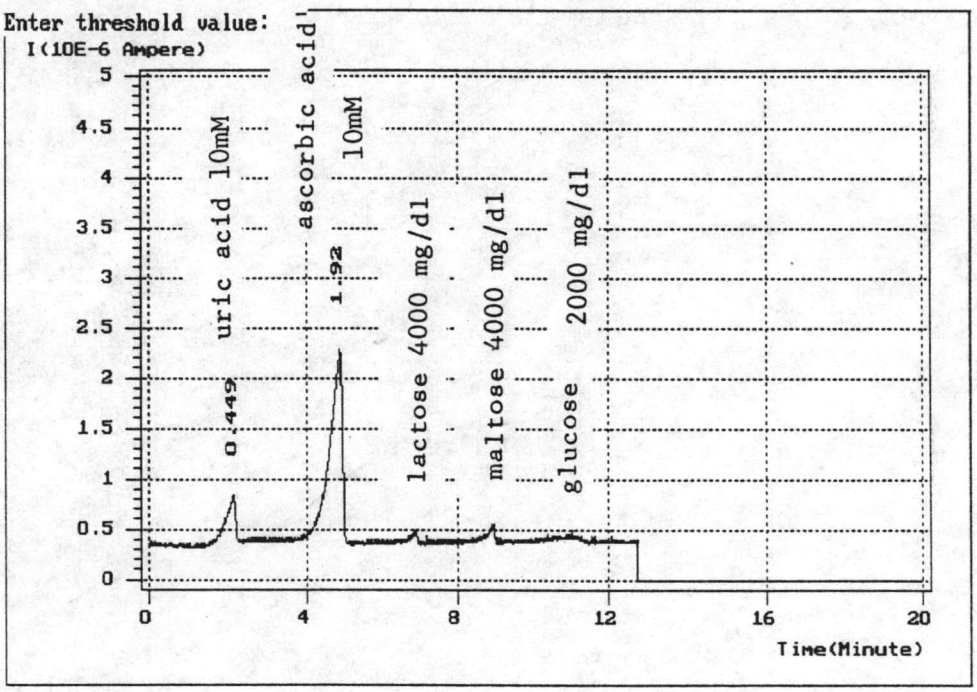


รูปที่ 6.7 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 2000 mg/dl

เซนเซอร์มีแนวโน้มที่จะมีคุณสมบัติการวัดซ้ำที่ดี แต่เนื่องจากค่าการตอบสนองของเซนเซอร์มีค่าที่ต่ำมาก จึงไม่สามารถคำนวณค่ายอดของผลตอบสนองออกมาได้

2. การทดสอบความจำเพาะของเซนเซอร์ และผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อสารรีดิวซิงค์

รูปที่ 6.8 แสดงผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแลกโตส กรดแอสคอบิก และกรดยูริก



รูปที่ 6.8 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแลกโตส กรดแอสคอบิก และกรดยูริก

จากรูป จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของน้ำตาลมอลโตส และน้ำตาลแลกโตสมีค่าต่ำ คือมีค่าประมาณ 0.1 uA แต่เนื่องจาก ผลตอบสนองของเซนเซอร์ ต่อน้ำตาลกลูโคสมีค่าราว 0.08 - 0.2 uA ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งาน จึงอาจมีผลรบกวนจากน้ำตาลมอลโตส และน้ำตาลแลกโตสได้

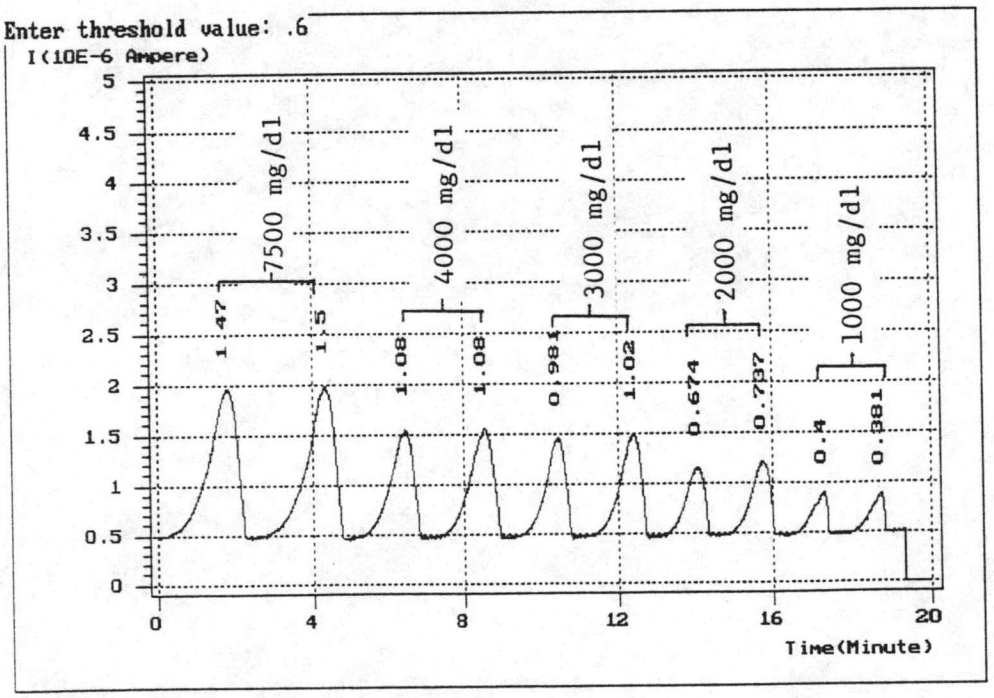
จากรูปที่ 6.8 จะเห็นได้ว่าเซนเซอร์มีผลตอบสนองต่อกรดแอสคอบิก และกรดยูริกมาก ซึ่งมีสาเหตุมาจากในการวัด ใช้แรงดันไบแอสเซนเซอร์ 0.6 โวลต์ ซึ่งมีค่าสูงเพียงพอที่จะออกซิไดซ์สารรีดิวซิงค์ได้

6.3 การทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์โดยพันธะเคมีโดยใช้ ไซเลน และกลูตาอัลดีไฮด์

ในการทดสอบ จะทดสอบเซนเซอร์ที่ทำขึ้นในระบบโฟลว์อินเจ็กชันที่ทำขึ้น โดยจะใช้แรงดันไบแอสเซนเซอร์ 0.6 โวลต์ เนื่องจากไม่มีส่วนผสมของเฟอร์โรซีน ซึ่งใช้เป็นสารส่งผ่านอิเล็กตรอน ความเร็วของสารละลายพาห์มีค่าเท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที สภาวะที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์ ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 5

1. ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้นต่างๆ

ในการทดลอง ได้ใช้สารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 1000 ถึง 7500 mg/dl ในการทดสอบ ผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์โดยสร้างพันธะเคมีต่อน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 1000 ถึง 7500 mg/dl

จากผลการทดลองในรูป 6.9 จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองของเซนเซอร์จะมีความไว และความเป็นเส้นตรงในการวัดน้ำตาลกลูโคส ตามสมการที่ (6.5) และ (6.6)

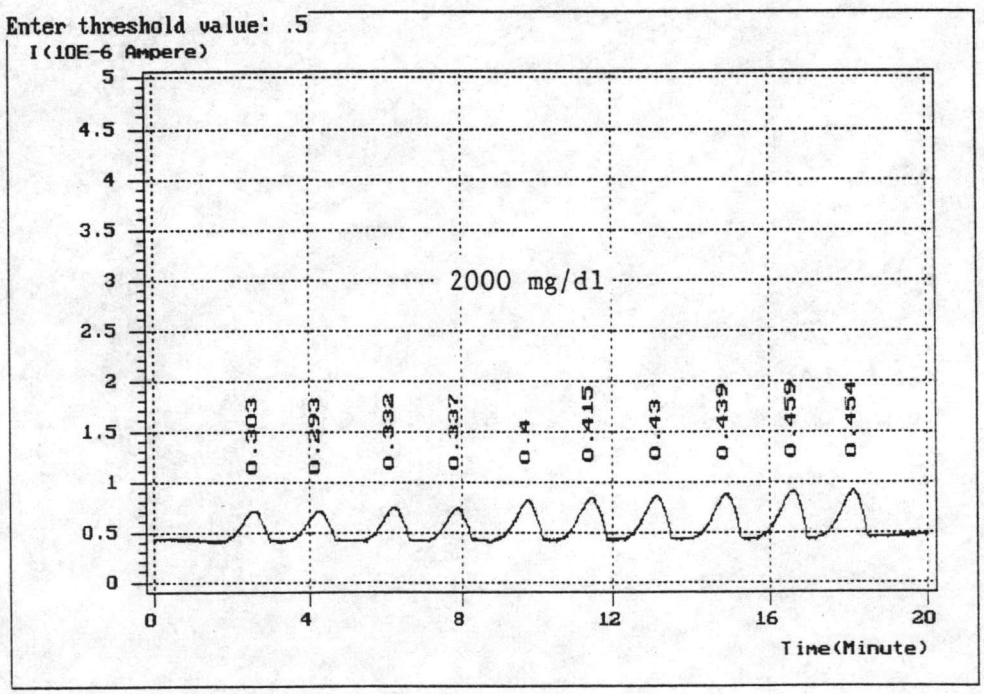
ความไว $y = 1.584 * 10^{-4}(x) + 0.38$ (6.5)

ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรง $r = 0.96$ (6.6)

โดยที่ y คือ ค่าการตอบสนองที่ได้จากเซนเซอร์ (uA)

x คือ ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (mg/dl)

การทดสอบคุณสมบัติการวัดซ้ำของเซนเซอร์ทำโดยหาผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 2000 mg/dl ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.10

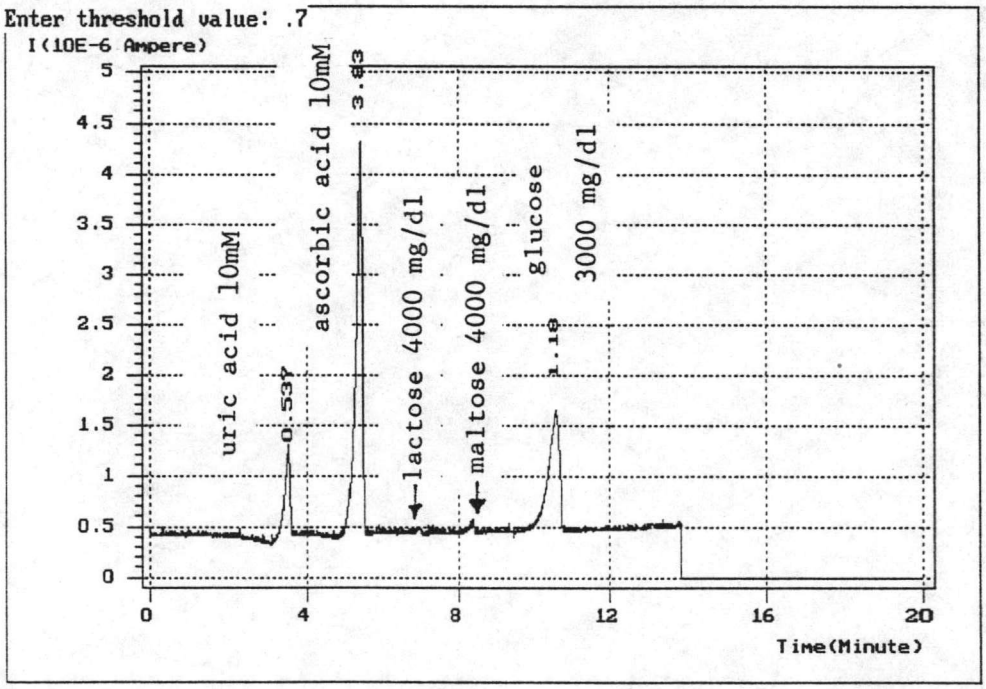


รูปที่ 6.10 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 2000 mg/dl

จากรูปที่ 6.10 จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองของเซนเซอร์มีค่าลดลง เมื่อทำการวัดมากครั้งยิ่งขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก การที่มีเอนไซม์บางส่วนหลุดไปในระหว่างทำการวัดสารตัวอย่าง หรือเป็นผลมาจากการที่เอนไซม์เกิดการเสื่อมสภาพ หลังจากการสร้างพันธะเคมี ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 16.51%

2. การทดสอบความจำเพาะของเซนเซอร์ และผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อสารรีดิวซิงค์

รูปที่ 6.11 แสดงผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแลกโตส กรดแอสคอบิก และกรดยูริก



รูปที่ 6.11 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแลกโตส กรดแอสคอบิก และกรดยูริก

จากรูปที่ 6.11 จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส และน้ำตาลแลกโตสมีค่าต่ำมาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 uA ในขณะที่ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำ

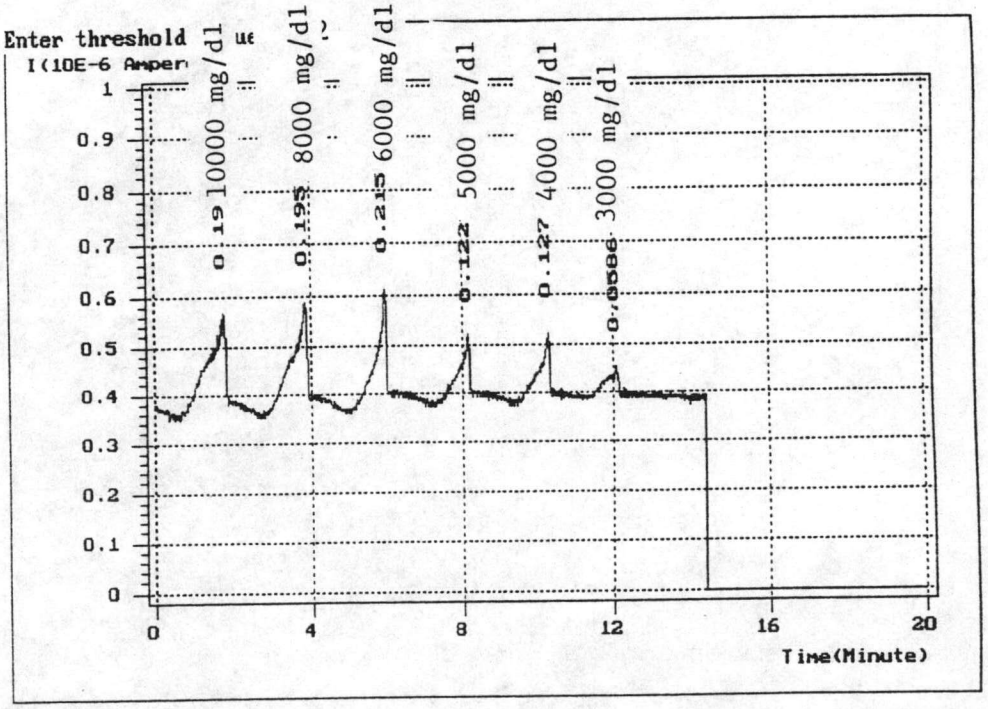
ตาลกลูโคสเข้มข้น 3000 mg/dl มีค่าประมาณ 1.18 uA ซึ่งมีค่ามากกว่าผลตอบสนองต่อน้ำตาลมอลโตส และแลกโตสถึง 10 เท่า ส่วนผลตอบสนองของเซนเซอร์ ต่อกรดแอสคอบิก และกรดยูริกมีค่าสูงเมื่อเทียบกับผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคส 3000 mg/dl เนื่องจากในการวัดใช้แรงดันไบแอสทรานส์ดิวเซอร์ 0.6 โวลต์ ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะไปออกซิไดซ์สารรีดิวซิงค์ได้ จึงทำให้ในการวัดยังมีผลรบกวนจากสารรีดิวซิงค์อยู่

6.4 การทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์โดยวิธีอิเล็กโตรโพลิเมอร์ไรเซชั่นของสารโพลีไพโรล

ในการทดสอบ จะทำการทดสอบเซนเซอร์ที่ทำขึ้นในระบบโฟลว์อินเจ็กชันที่ทำขึ้น โดยจะใช้แรงดันไบแอสเซนเซอร์ 0.6 โวลต์ ความเร็วของสารละลายพาห์มีค่าเท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที สภาวะที่ใช้ในการตรึงเอนไซม์ ทำตามดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 5

1. ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้นต่างๆ

ในการทดลอง ได้ใช้สารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 3000 ถึง 10000 mg/dl ในการทดสอบ ผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์โดยวิธีอิเล็กโตรโพลีเมอร์ไรเซชั่นต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 3000 ถึง 10000 mg/dl

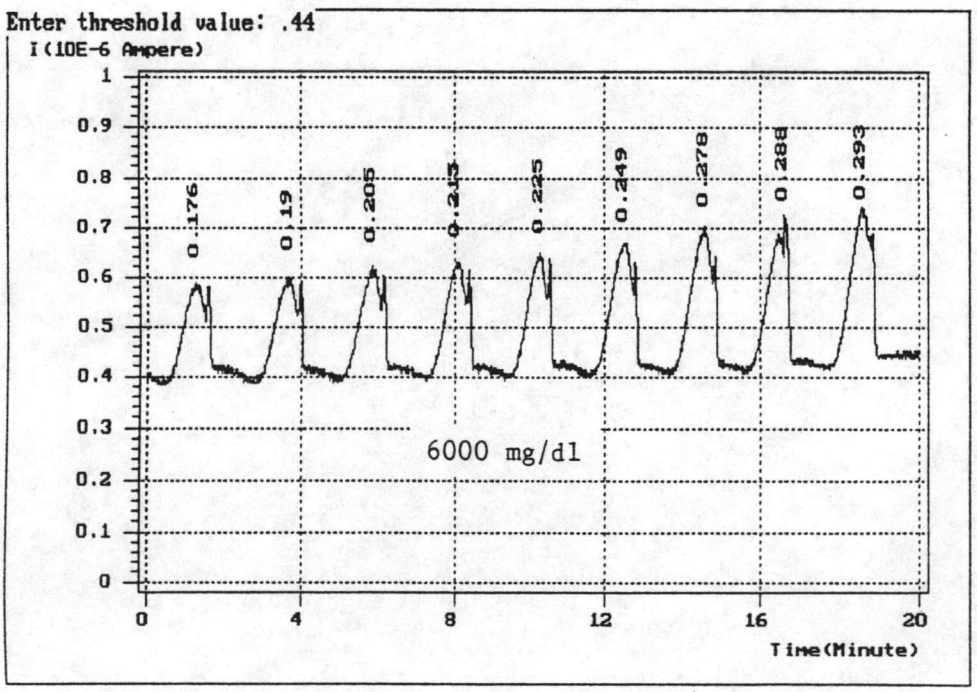
จากผลการทดลองในรูป 6.12 จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองของเซนเซอร์จะมีความไว และความเป็นเส้นตรงในการวัดน้ำตาลกลูโคส ตามสมการที่ (6.7) และ (6.8)

ความไว $y = 4.63 * 10^{-5}(x) - 0.078$ (6.7)

ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรง $r = 0.932$ (6.8)

โดยที่ y คือ ค่าการตอบสนองที่ได้จากเซนเซอร์ (uA)
x คือ ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (mg/dl)

การทดสอบคุณสมบัติการวัดซ้ำของเซนเซอร์ทำโดยหาผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 6000 mg/dl ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.13

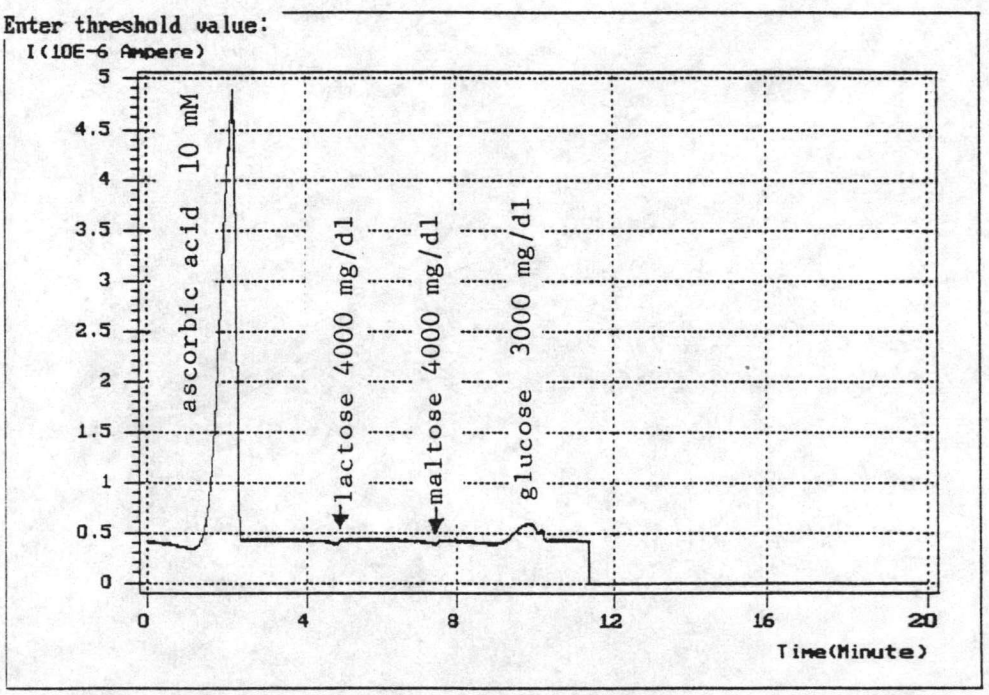


รูปที่ 6.13 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 6000 mg/dl

จากรูปที่ 6.13 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของเซนเซอร์ มีค่าลดลงเมื่อทำการวัดมากครั้งยิ่งขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก การที่เอนไซม์บางส่วนหลุดออกไปจากอิเล็กโทรดในระหว่างการวัด เนื่องจากการตรึงเอนไซม์วิธีนี้ ไม่ได้อาศัยปฏิกิริยาเคมีในการตรึงเอนไซม์ ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของการวัดซ้ำมีค่าเท่ากับ 18.5%

2. การทดสอบความจำเพาะของเซนเซอร์ และผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อสารรีดิวซิงค์

รูปที่ 6.14 แสดงผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแลกโตส และกรดแอสคอบิก



รูปที่ 6.14 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลมอลโตส น้ำตาลแลกโตส และกรดแอสคอบิก

จากรูปที่ 6.14 จะเห็นได้ว่า เซนเซอร์มีความจำเพาะในการวัดน้ำตาลกลูโคสโดยมีผลตอบสนองต่อน้ำตาลมอลโตส และน้ำตาลแลกโตสน้อยมากจนวัดค่าไม่ได้ ในขณะที่ผลตอบสนองต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 3000 mg/dl มีค่าเท่ากับ 0.2 uA

จากรูปที่ 6.14 จะเห็นได้ว่าเซนเซอร์มีผลตอลสนองต่อกรดแอสคอบิกสูง ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจาก ในการวัดใช้ศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูงถึง 0.6 โวลต์ ซึ่งมีค่าสูงเพียงพอที่จะออกซิไดซ์สารรีดิวซิงค์ได้

จากการทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์แตกต่างกัน 4 วิธี สามารถสรุปคุณสมบัติของเซนเซอร์ได้ดังนี้

ประเภท การตรึงเอนไซม์	ค่าความไวในการวัด (sensitivity)	ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรง (r)
1. การตรึงเอนไซม์แบบฝังในโครงร่างแหอีพ็อกซี	$2.922*10^{-3}$	0.996
2. การตรึงเอนไซม์โดยใช้ไซเลน และ พี-ไนโตรเบนซอยล์คลอไรด์	$1.17*10^{-5}$	0.95
3. การตรึงเอนไซม์โดยใช้ไซเลน และ กลูตาอัลดีไฮด์	$1.584*10^{-4}$	0.96
4. การตรึงเอนไซม์โดยวิธีอิเล็กโตรโพลีเมอร์ไรเซชั่น	$4.63*10^{-5}$	0.932

จะเห็นได้ว่า เซนเซอร์ที่มีแนวโน้มที่ดีในการนำไปประยุกต์ใช้วัดปริมาณน้ำตาลกลูโคส ได้แก่ เซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์แบบฝัง(entrapment) ในโครงร่างแหอีพ็อกซี ส่วนเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์โดยวิธีอื่นๆ เนื่องจากมีผลตอบสนองต่อน้ำตาลกลูโคสในช่วงความเข้มข้น 100 ถึง 900 mg/dl ต่ำมาก และยังมีผลตอบสนองต่อสารรีดิวซิงค์ด้วย จึงยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานจริงๆ อยู่

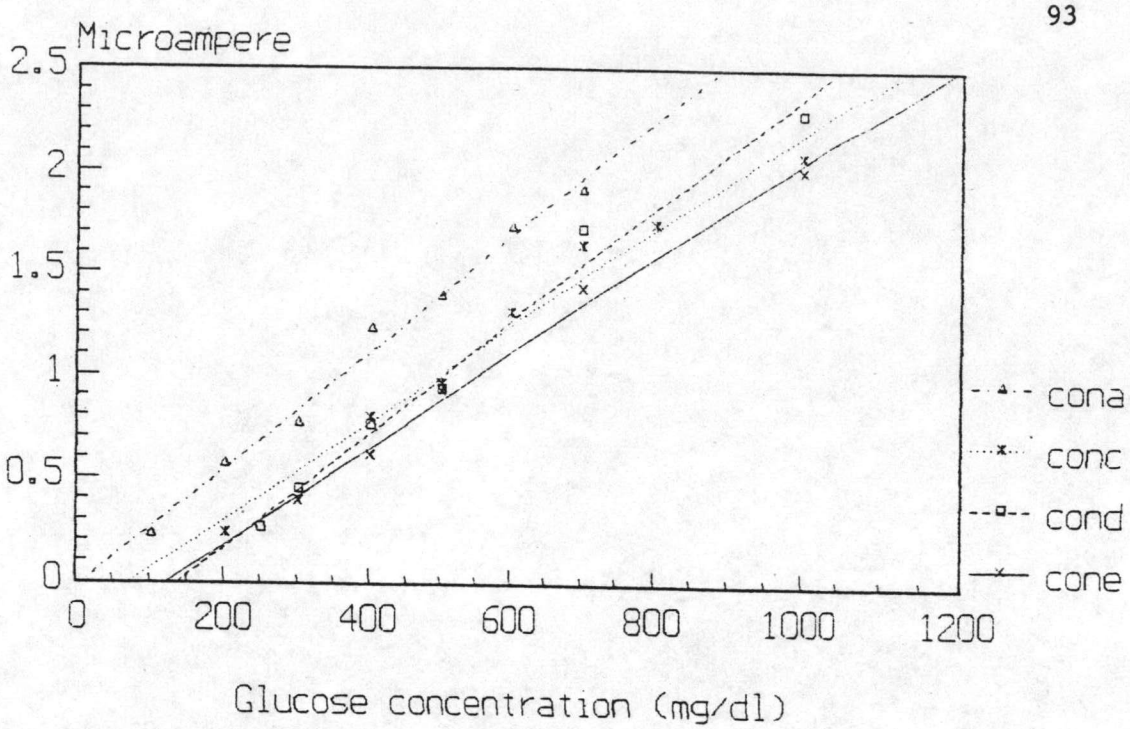
เนื่องจากเซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์แบบฝัง (entrapment) มีแนวโน้มในการนำมาใช้งานได้ดี จึงได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติเพิ่มเติมดังนี้

6.5 การศึกษาการกระจายของลักษณะสมบัติของเซนเซอร์

การทดสอบทำโดยนำเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์โดยใช้สภาวะเดียวกันมา 4 ตัว จากนั้นนำเซนเซอร์ดังกล่าวมาวัดค่าการตอบสนองต่อปริมาณน้ำตาลกลูโคสในช่วง 100-900 mg/dl ผลการทดสอบแสดงดังรูป 6.15

จะเห็นได้ว่ากราฟปรับเทียบ (calibration curve) ของเซนเซอร์แต่ละตัวมีแนวโน้มที่จะมีความชันใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความชัน และค่ากระแสพื้นหลังของเซนเซอร์ทั้ง 4 ตัว ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1

ค่าเฉลี่ยของความชันมีค่าเท่ากับ $2.58*10^{-3}$ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนมีค่าเท่ากับ 10%



รูปที่ 6.15 คุณสมบัติในการทำซ้ำของเซนเซอร์

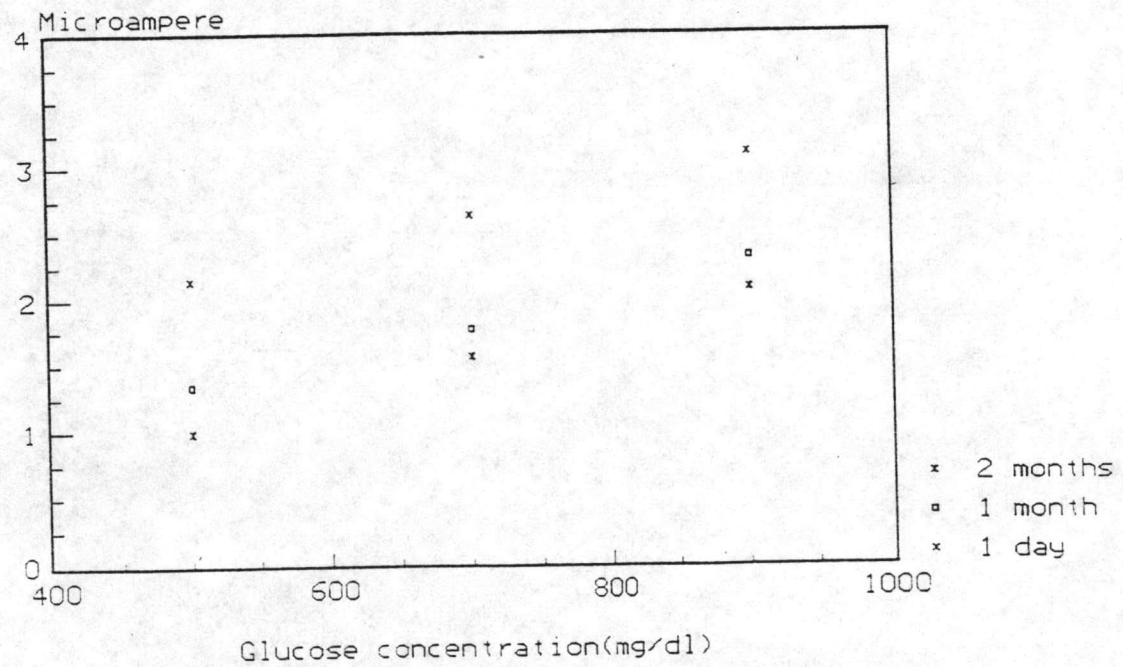
เซนเซอร์ที่	ค่าความชัน ($x10^{-3}$)	ค่ากระแสพื้นหลัง (uA)	ค่าความเป็นเส้นตรง (r)
1	2.34	-0.29	0.997
2	2.75	-0.39	0.993
3	2.37	-0.18	0.99
4	2.85	-0.03	0.995

ตารางที่ 6.1 ค่าความชัน และค่ากระแสพื้นหลังของกราฟปรับเทียบของเซนเซอร์ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติการทำซ้ำ

6.6 การศึกษาอายุการใช้งานของเซนเซอร์

ในการทดสอบอายุการใช้งานได้ทำการวัดผลตอบสนอง 2 ลักษณะ คือ

1. วัดผลตอบสนองของเซนเซอร์หลังการตรึงเอนไซม์ 1วัน, 1เดือน และ2เดือน ตามลำดับ โดยที่เซนเซอร์แต่ละตัวที่ใช้ เป็นเซนเซอร์ที่ถูกใช้งานเป็นครั้งแรกทั้ง 3 ตัว การทดสอบได้ทำโดย หาผลตอบสนองของเซนเซอร์ ต่อน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้น 500, 700 และ 900 mg/dl ผลการทดสอบแสดงดังรูป 6.16



รูปที่ 6.16 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้น 500, 700 และ900 mg/dl

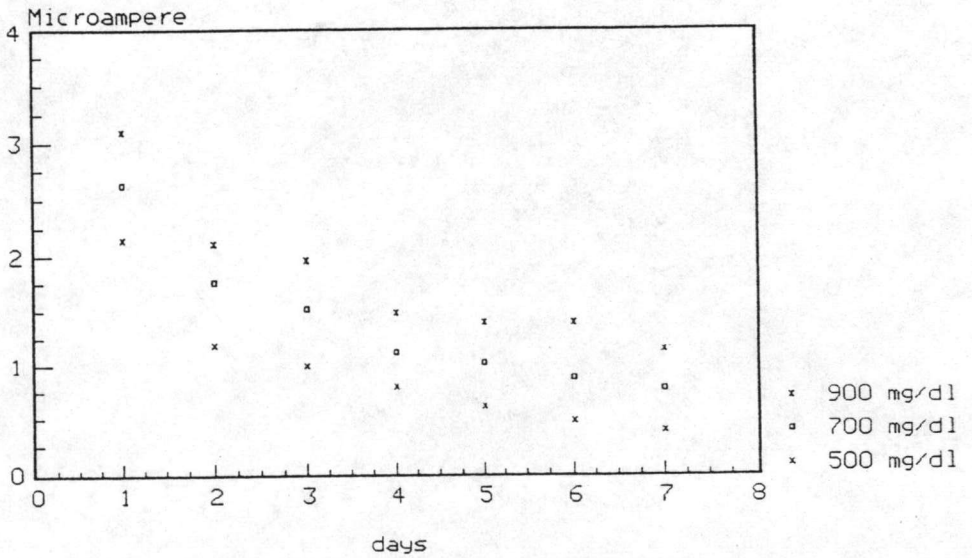
จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาในการเก็บเซนเซอร์ก่อนการใช้งาน มีผลทำให้กระแสพื้นหลังของเซนเซอร์มีค่าลดลง แต่ค่าความไว (sensitivity)ในการวัดมีค่าไม่เปลี่ยนไปมากนัก ค่าความไวของเซนเซอร์ที่มีระยะเวลาในการเก็บก่อนการใช้งาน 1 วัน,1 เดือน และ 2

เดือน แสดงในตารางที่ 6.2

ระยะเวลาในการเก็บก่อนการใช้งาน	ค่าความไวในการวัด ($x10^{-3}$)	ค่ากระแสพื้นหลัง (uA)	ค่าความเป็นเส้นตรง (r)
1 วัน	2.4	0.94	1.0
1 เดือน	2.43	0.11	0.998
2 เดือน	2.7	-0.35	1.0

ตารางที่ 6.2 ค่าความไวของเซนเซอร์ที่มีระยะเวลาในการเก็บก่อนการใช้งาน 1 วัน,1 เดือน และ 2 เดือน

2. วัดผลตอบสนองของเซนเซอร์ตัวเดียวกันเป็นเวลา 1อาทิตย์ โดยจะทำการวัดผลตอบสนองของเซนเซอร์ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 500, 700 และ900 mg/dl ผลการทดลองแสดงดังรูป 6.17



รูป 6.17 ผลตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรึงเอนไซม์แบบผังที่วัดผลตอบสนองติดต่อกัน 1 อาทิตย์ ต่อน้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 500, 700 และ 900 mg/dl

จากรูปจะเห็นได้ว่า ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์มีค่าลดลงเร็วมากในวันที่ 2 ของการวัด และหลังจากนั้นค่าการตอบสนองมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างช้าๆ จากผลที่ได้เมื่อนำมาคำนวณหาค่ากระแสพื้นหลัง และค่าความไวในการตอบสนอง สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 6.3

วันที่	ค่าความไว ($x10^{-3}$)	ค่ากระแสพื้นหลัง (uA)	ค่าความเป็นเส้นตรง (r)
1	2.4	0.94	1.0
2	2.3	0.08	0.989
3	2.42	-0.21	0.999
4	1.72	-0.07	0.999
5	1.95	-0.35	1.0
6	2.3	-0.69	0.997
7	1.89	-0.55	1.0

ตารางที่ 6.3 ค่าความชัน และค่ากระแสพื้นหลังของกราฟปรับเทียบของเซนเซอร์ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติการทำซ้ำ โดยการวัดผลตอบสนองติดต่อกัน 1 อาทิตย์

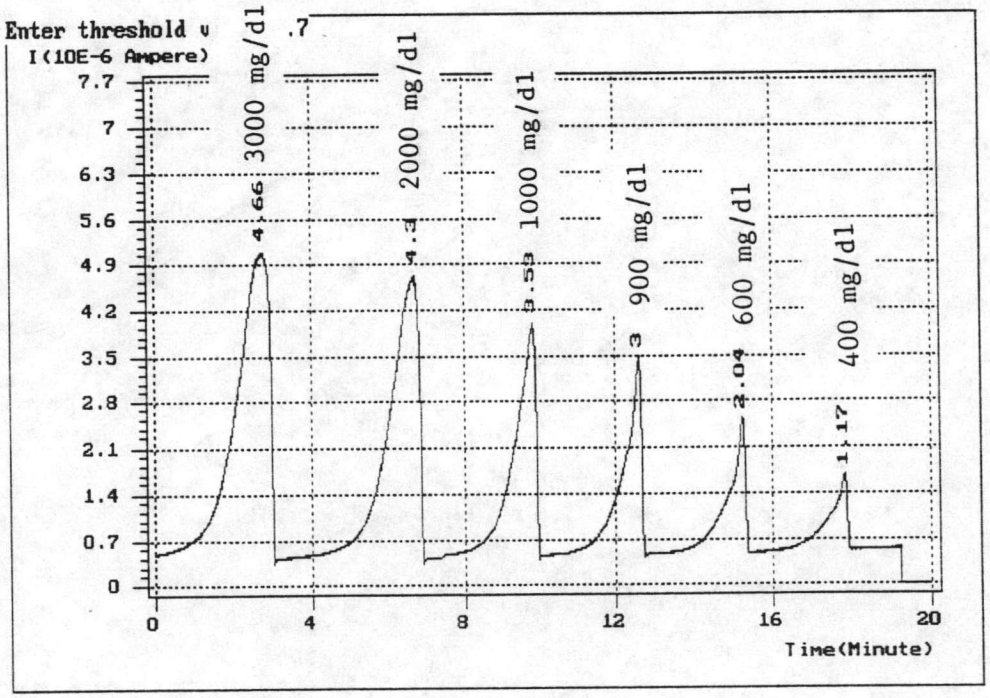
จากตารางที่ 6.3 สามารถสรุปได้ว่า ค่าความไวในการวัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.14×10^{-3} และค่าความไวมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนเท่ากับ 13% ในขณะที่ค่ากระแสพื้นหลังมีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงเมื่อทำการวัดมากวันยิ่งขึ้น

จากรูปที่ 6.17 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของเซนเซอร์ในวันที่ 7 ยังมีค่าสูงอยู่ ยังสามารถใช้ในการวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสในสารตัวอย่างได้ด้วย

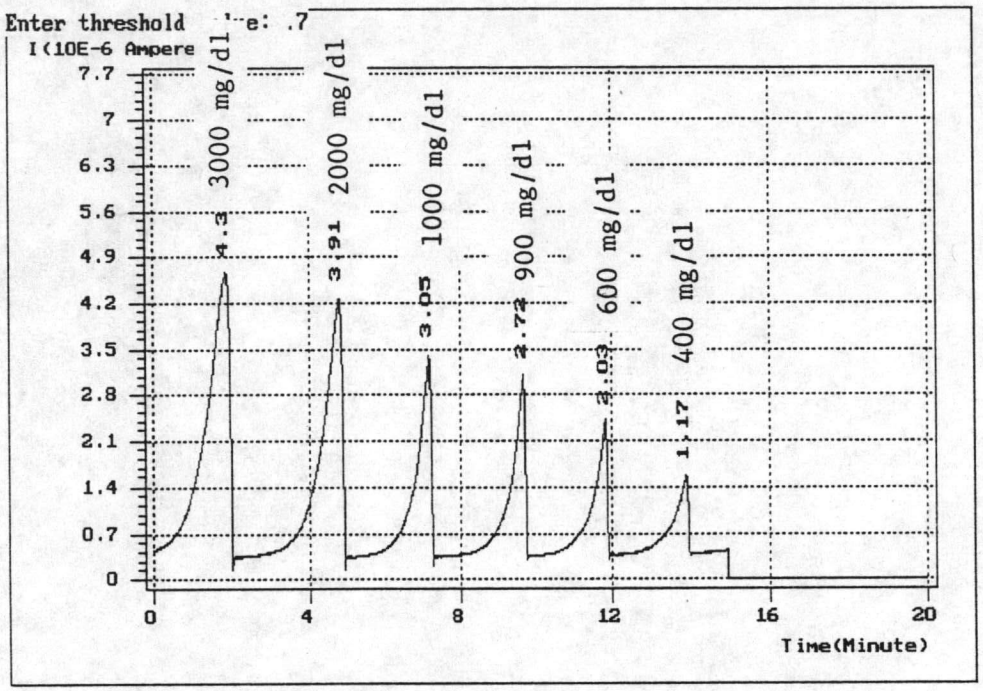
6.7 การศึกษาผลของความเร็วสารละลายพาห์ต่อการตอบสนองของเซนเซอร์

ในการศึกษาผลของความเร็วสารละลายพาห์ จะใช้เซนเซอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์ 2 ครั้งด้วยกัน เพื่อให้มีปริมาณเอนไซม์ในส่วนทำปฏิกิริยามากขึ้น และทำให้เห็นผลตอบสนองต่อน้ำตาลกลูโคสที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

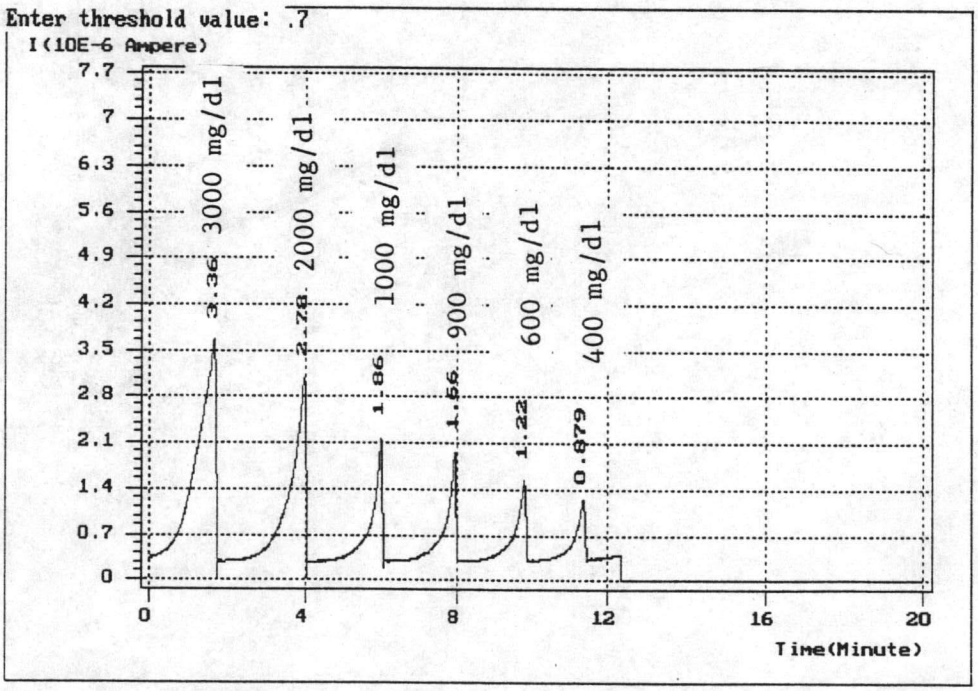
ในการทดสอบ จะทำการทดสอบผลของความเร็วสารละลายพาห์ ต่อช่วงกว้างการวัดของเซนเซอร์ โดยในการทดลอง จะใช้น้ำตาลกลูโคสเข้มข้น 400 - 3000 mg/dlในการทดสอบช่วงกว้างของการวัดของเซนเซอร์ โดยจะทำการเปลี่ยนความเร็วของสารละลายพาห์เป็น 0.8 ml/min, 1.0 ml/min และ 1.3 ml/min ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.18 - 6.20



รูปที่ 6.18 การตอบสนองของเซนเซอร์เมื่อความเร็วของสารละลายพาห์เป็น 0.8 ml/min

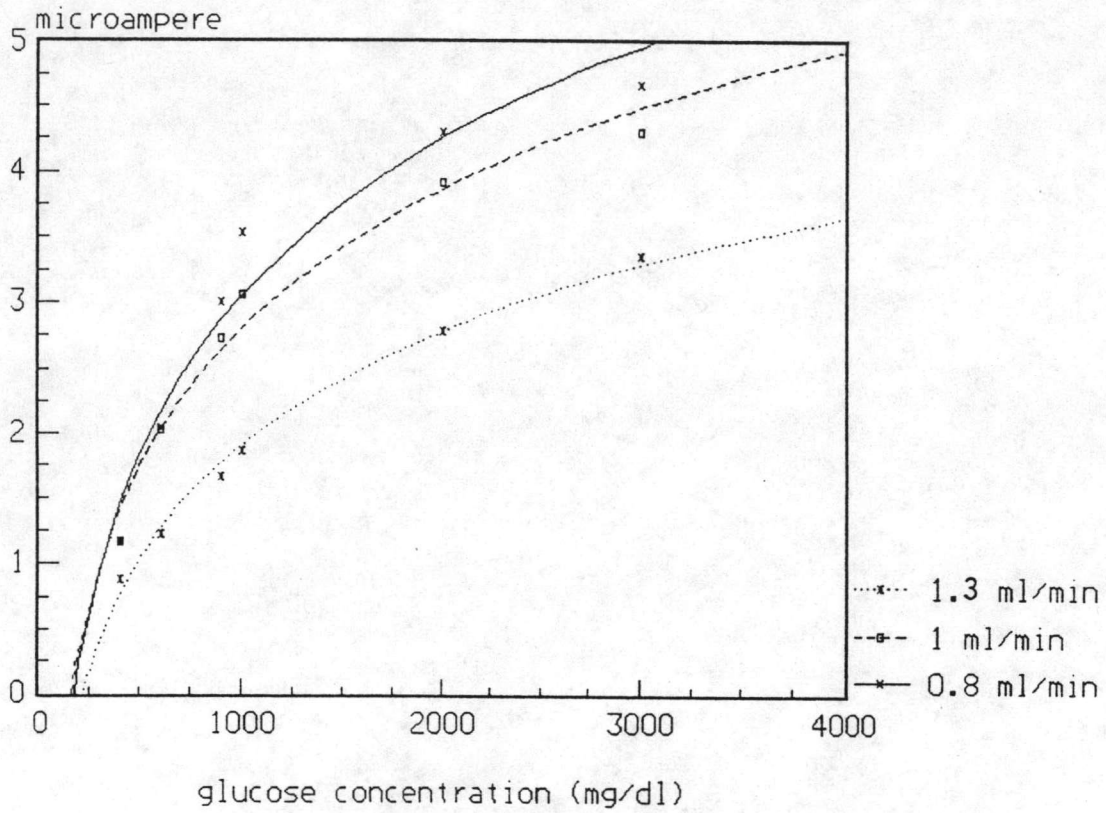


รูปที่ 6.19 การตอบสนองของเซนเซอร์เมื่อความเร็วของสารละลายพาห์เป็น 1 ml/min



รูปที่ 6.20 การตอบสนองของเซนเซอร์เมื่อความเร็วของสารละลายพาห์เป็น 1.3 ml/min

จากรูปที่ 6.18 - 6.20 เมื่อนำค่ายอดของผลตอบสนองที่ได้ มาทำกราฟปรับเทียบ จะได้ผลแสดงในรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.21 กราฟปรับเทียบที่ได้เมื่อความเร็วของสารละลายพาห์มีค่าเป็น 0.8, 1.0 และ 1.1 ml/min ตามลำดับ

จากรูปที่ 6.18-6.21 สามารถสรุปผลของความเร็วสารละลายพาห์ต่อผลตอบสนองของเซนเซอร์ได้ดังตารางที่ 6.4

จากตารางที่ 6.4 เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของเซนเซอร์ในช่วงความเข้มข้น 400 -3000 mg/dl จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความเร็วของสารละลายพาห์ จะเป็นผลให้ค่าความไวในการวัดลดลง ในขณะที่ช่วงกว้างของน้ำตาลกลูโคสที่ให้ผลการวัดเป็นเส้นตรง จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหมายความว่าหากต้องการวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสในช่วงกว้าง สามารถเพิ่มความเร็วของสารละลายพาห์ เพื่อที่จะได้ความถูกต้องในการวัดมาก

ช่วงการวัด (mg/dl)	ความเร็ว(ml/min) สารละลาย	ค่าความไว ($x10^{-3}$)	ค่ากระแสพื้นหลัง (uA)	ค่าความเป็นเส้นตรง(r)
400-3000	0.8	1.19	1.55	0.877
	1.0	1.07	1.45	0.914
	1.3	0.93	0.732	0.98
400-900	0.8	3.62	-0.225	1.0
	1.0	3.04	0.05	0.98
	1.3	1.55	0.27	1.0

ตารางที่ 6.4 ผลของความเร็วสารละลายพาห์ต่อช่วงการวัด ค่าความไว ค่ากระแสพื้นหลัง และค่าความเป็นเส้นตรงในการวัด

สรุป

ในบทนี้สามารถสรุปลักษณะของเซนเซอร์ ที่มีการตรึงเอนไซม์แบบต่างๆ ได้ดังนี้

1. เซนเซอร์ที่มีการตรึงเอนไซม์แบบฝังในโครงร่างแหอีพ็อกซี มีการตอบสนองที่ดีต่อน้ำตาลกลูโคสในช่วงความเข้มข้น 100 - 700 mg/dl โดยมีค่าความเป็นเส้นตรงในการวัดเท่ากับ 0.996 และมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในการวัดซ้ำเท่ากับ 3.78% ในการวัดมีผลรบกวนจากน้ำตาลมอลโตส, แลกโตส, ซูโครส และจากสารรีดิวซิงค์ น้อยมาก

2. เซนเซอร์ที่มีการตรึงเอนไซม์โดยพันธะเคมี โดยใช้ไซเลน และพี-ไนโตรเบนซอยล์คลอไรด์ มีการตอบสนองที่ดีต่อน้ำตาลกลูโคสในช่วงความเข้มข้น 2000 - 10000 mg/dl โดยมีค่าความเป็นเส้นตรงในการวัดเท่ากับ 0.95 ในการวัดจะมีผลรบกวนจากน้ำตาลมอลโตส และน้ำตาลแลกโตส และมีผลรบกวนจากสารรีดิวซิงค์

3. เซนเซอร์ที่มีการตรึงเอนไซม์โดยใช้พันธะเคมีโดยใช้ไซเลน และกลูตาอัลดีไฮด์ มีการตอบสนองที่ดีต่อน้ำตาลกลูโคสในช่วงความเข้มข้น 1000 - 7500 mg/dl โดยมีค่าความเป็นเส้นตรงในการวัดเท่ากับ 0.96 และมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในการวัดซ้ำเท่ากับ 16.51% ในการวัดน้ำตาลกลูโคสในช่วงความเข้มข้น 1000 - 7500 mg/dl จะมีผลรบกวนจากน้ำตาลมอลโตส และน้ำตาลแลกโตสน้อยมาก แต่มีผลรบกวนจากสารรีดิวซิงค์มาก

4. เซนเซอร์ที่มีการตรึงเอนไซม์โดยวิธีอิเล็กโตรโพลิเมอร์ไรเซชั่นของสารโพลีไพโรล มีการตอบสนองที่ดีต่อน้ำตาลกลูโคสในช่วงความเข้มข้น 3000 - 10000 mg/dl โดยมีค่าความเป็นเส้นตรงในการวัดเท่ากับ 0.932 และมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในการวัดซ้ำเท่ากับ 18.5% ในการวัดน้ำตาลกลูโคสในช่วงความเข้มข้น 3000 - 1000 mg/dl จะมีผลรบกวนจากน้ำตาลมอลโตส และแลกโตสน้อยมาก แต่มีผลรบกวนจากสารรีดิวซิงค์มาก

5. เซนเซอร์ที่มีการตรึงเอนไซม์แบบฝังในโครงร่างแหอีพ็อกซี มีคุณสมบัติในการทำซ้ำที่ดี โดยเซนเซอร์มีค่าเฉลี่ยของความไวในการวัดเท่ากับ $2.58*10^{-3}$ และมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนเท่ากับ 10% การตรึงเอนไซม์โดยวิธีนี้ ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 5

6. เซนเซอร์ที่มีการตรึงเอนไซม์แบบฝังในโครงร่างแหอีพ็อกซี มีอายุการใช้งานที่ดี โดยมีระยะเวลาในการเก็บก่อนการใช้งาน 2 เดือน

7. ความเร็วของสารละลายพาห์ที่ใช้มีผลต่อช่วงการวัดของเซนเซอร์ โดยเมื่อเพิ่มความเร็วของสารละลายพาห์ จะเป็นผลให้ช่วงการวัดของเซนเซอร์กว้างขึ้น และเมื่อลดความเร็วของสารละลายพาห์ จะเป็นผลให้ช่วงการวัดของเซนเซอร์แคบลง