

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายในปลาน้ำจืดเศรษฐกิจ
ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย
(Study on Diffusion Coefficient of Solutes in Economy Fresh Water Fish
in the Northeast of Thailand)



โดย

นายวีระ อวิคุณประเสริฐ
นายเอกสิทธิ์ อ่อนสอาด
นายเฉลียว บุญมั่น

คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

งบประมาณประจำปี 2543

บทคัดย่อ

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นคุณสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่งของอาหาร ซึ่งบอกถึงความสามารถในการแพร่ผ่านของสารตัวหนึ่งในวัสดุ ที่สภาวะหนึ่งๆ ปัจจุบันการแปรรูปปลาน้ำจืดมีการใช้สารเคมีต่างๆ เช่น โซเดียมคลอไรด์ในเตรต เพื่อยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์และเพิ่มสีส้มของผลิตภัณฑ์ปลาน้ำจืด จากการศึกษาการแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในเตรต ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %w/v ผ่านชิ้นเนื้อปลาน้ำจืด ได้แก่ ปลานิล ปลายี่สก ปลาช่อน ปลานวลจันทร์ ปลาช่อน ปลาชะโด ปลากิน ปลาโจก และปลาไน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของในเตรตที่แพร่ผ่านชิ้นเนื้อปลาน้ำจืดทั้ง 9 ชนิด ที่เตรียมจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในเตรต ความเข้มข้น 0.5 %w/v มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง $2.602 \times 10^{-6} - 3.585 \times 10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของในเตรตมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในเตรตเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ $2.349 \times 10^{-6} - 2.991 \times 10^{-6}$, $2.323 \times 10^{-6} - 2.592 \times 10^{-6}$ และ $2.239 \times 10^{-6} - 2.491 \times 10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในเตรต 1.0, 1.5 และ 2.0 %w/v ตามลำดับ

คำสำคัญ: ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ในเครต ปลายน้ำจืด

Abstract

Diffusion coefficient is a property of food, which measure a capability of a solute passing through a material at some conditions. At present, fresh water fish processing uses chemical agents such as potassium nitrate to inhibit microorganism and improve color of products. Study on diffusion of nitrate passed through the meat of fresh water fish which using 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 %w/v potassium nitrate solution and nine fresh water fish were namely *Tilapia nilotica*, *Probarbus jullieni*, *Pangasianodon hypophthalmus*, *Cirrhina microlepis*, *Channa striatus*, *Channa micropeltes*, *Hypophthalmichthys sp.*, *Cyclocheilichthys enoplos* and *Cyprinus carpio*. The result showed that diffusion coefficient of nitrate were prepared from 0.5 %w/v potassium nitrate solution, passed through the meat of nine fresh water fish were not so much difference ranging from 2.602×10^{-6} to $3.585 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$. In addition to diffusion coefficient of nitrate trend to decrease as concentration of potassium nitrate solution increase. Diffusion coefficient of nitrate passed through the meat of nine fresh water fish were $2.349 \times 10^{-6} - 2.991 \times 10^{-6}$, $2.323 \times 10^{-6} - 2.592 \times 10^{-6}$ and $2.239 \times 10^{-6} - 2.491 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$ at 1.0, 1.5 and 2.0 %w/v potassium nitrate solution respectively.

Keyword: Diffusion coefficient, nitrate, fresh water fish

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาคำสันนิษฐานการแพร่ของสารถูกละลายในปลาน้ำจืดเศรษฐกิจในภาคตะวันออก
เฉียงเหนือของประเทศไทย สำเร็จลงได้ด้วยการให้ความช่วยเหลือของทุกฝ่าย ทางคณะผู้ศึกษา
กราบขอขอบพระคุณ ศ.ดร.ศักรินทร์ ภูมิรัตน ที่ปรึกษาอาวุโสศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยี
ชีวภาพแห่งชาติ ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการวิจัยในเบื้องต้น

กราบขอขอบคุณ ผศ.ธีรพล บัณฑิตย์ คณบดีคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกในระหว่างการดำเนินการศึกษาวิจัย และมหาวิทยาลัย
อุบลราชธานี ที่สนับสนุนงบประมาณประจำปี 2543 เพื่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

วีระ อวิคุณประเสริฐ

เอกสิทธิ์ อ่อนสอาด

เจลิยว บุญมัน

30 เมษายน 2544

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ญ
รายการสัญลักษณ์	ท
 บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาของการศึกษา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 การตรวจเอกสาร	3
 บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 การแพร่ระดับ โมเลกุล	8
2.2 แอลจินท	9
2.3 ปลาน้ำจืด	11
2.4 สารประกอบไนไตรต์และไนเตรด	13
2.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่	14
 บทที่ 3 การศึกษาและการดำเนินการ	
3.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี	20
3.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่	22
3.3 การทดสอบความถูกต้องและความแม่นยำในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่	26
3.4 การวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดในปลาน้ำจืด	28

บทที่ 4 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล	
4.1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ฟิวชันเซลล์	30
4.2 การทดสอบอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่	31
4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาน้ำจืด	35
4.4 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลายไนเตรดที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดที่แพร่ผ่านเนื้อปลาน้ำจืด	37
บทที่ 5 การสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 การสรุปผลการศึกษา	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	
ก. อุปกรณ์ฟิวชันเซลล์	53
ข. การหาความเร็วรอบที่เหมาะสม	55
ค. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่	65
ง. การทดสอบความถูกต้อง	67
จ. การวัดค่าปริมาณไนเตรด	71

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาน้ำจืด ที่เตรียมจากสารละลาย โปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v ที่อุณหภูมิห้อง	37
ข.1 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที	56
ข.2 การวิเคราะห์สถิติวิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้น ของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที	56
ข.3 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที	57
ข.4 การวิเคราะห์สถิติวิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้น ของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที	57
ข.5 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที	58
ข.6 การวิเคราะห์สถิติวิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้น ของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที	58
ข.7 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด diskflat-blade turbine ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที	59

ข.8 การวิเคราะห์สถิติวิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้น ของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนทเจล โดยใช้ใบพัดชนิด diskflat-blade turbine ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที	59
ข.9 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนทเจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด diskflat-blade turbine ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที	60
ข.10 การวิเคราะห์สถิติวิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้น ของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนทเจล โดยใช้ใบพัดชนิด diskflat-blade turbine ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที	60
ข.11 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนทเจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด diskflat-blade turbine ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที	61
ข.12 การวิเคราะห์สถิติวิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้น ของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนทเจล โดยใช้ใบพัดชนิด diskflat-blade turbine ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที	61
ข.13 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนทเจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด marine-type propeller ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที	62
ข.14 การวิเคราะห์สถิติวิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้น ของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนทเจล โดยใช้ใบพัดชนิด marine-type propeller ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที	62
ข.15 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนทเจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด marine-type propeller ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที	63

ข.16 การวิเคราะห์สถิติวิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้น ของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แกลเซียมแอลจีเนทเจล โดยใช้ใบพัดชนิด marine-type propeller ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที	63
ข.17 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แกลเซียมแอลจีเนทเจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด marine-type propeller ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที	64
ข.18 การวิเคราะห์สถิติวิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้น ของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แกลเซียมแอลจีเนทเจล โดยใช้ใบพัดชนิด marine-type propeller ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที	64
ค.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1%w/v ผ่าน 2%w/v แกลเซียมแอลจีเนท ชนิดใบพัด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง	66
ง.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1%w/v ผ่าน 2%w/v แกลเซียมแอลจีเนท ที่อุณหภูมิห้อง ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ lag-time กับจากสมการ (2.17)	69

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Teixeira และคณะ	4
1.2 ตัวพยางสำหรับอะการ์เจล	5
1.3 คีฟฟิวชันเซลล์ของ Djelveh และคณะ	5
1.4 ส่วนประกอบคีฟฟิวชันเซลล์ของ Hannoun และ Stephanopoulos	6
1.5 คีฟฟิวชันเซลล์ของ Fox	7
2.1 โครงสร้างของแอลจีเนท	9
2.2 การจับตัวกับแคลเซียมไอออนของแอลจีเนทในการเกิดแคลเซียมแอลจีเนท	10
2.3 แสดงโครงสร้างของกล้ามเนื้อด้านข้างลำตัวของปลา	11
2.4 ภาพแสดงโครงสร้างภาพกล้ามเนื้อภาคตัดตามขวางของปลา	12
2.5 แบบจำลองการแพร่ของสารถูกละลาย	16
2.6 lag-time การแพร่กลูโคสใน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนท	19
3.1 ขนาดของถังกวนและใบกวน	23
3.2 แสดงลักษณะของใบกวนแต่ละชนิด	25
4.1 ลักษณะการใช้งานอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ออกแบบ	31

รูปที่	หน้า
4.2 กราฟมาตรฐานของกลูโคส	32
4.3 ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่เตรียมจากสารละลายกลูโคส 1%w/v ที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ที่อุณหภูมิห้อง	33
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ที่อุณหภูมิห้อง	34
4.5 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลานิลโดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5%w/v ที่อุณหภูมิห้อง	36
4.6 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลานิลโดย ใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v ที่อุณหภูมิห้อง	38
4.7 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลานิล กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด	39
4.8 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลาซวาย โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v	40
4.9 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาซวาย กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด	40
4.10 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลาชี่สก โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v	41
4.11 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาชี่สก กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด	41

รูปที่	หน้า
4.12 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลาโน โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v	42
4.13 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาโน กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด	42
4.14 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลาซ่อน โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v	43
4.15 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาซ่อน กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด	43
4.16 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลาชะโด โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v	44
4.17 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาชะโด กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด	44
4.18 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลาจีน โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v	45
4.19 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาจีน กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด	45
4.20 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลาโจก โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v	46
4.21 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาโจก กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด	46

รูปที่	หน้า
4.22 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลานวลจันทร์ โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v	47
4.23 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลานวลจันทร์ กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด	47
ก.1 ภาพเขียนแบบส่วนบรรจุสารละลาย	54
ข.1 แสดงตำแหน่งการเก็บตัวอย่างสารละลาย	55
จ.1 กราฟมาตรฐานของไนเตรด	71

รายการสัญลักษณ์

C	ความเข้มข้นของสารละลาย (mg/L)
D	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2/sec)
F	อัตราการเคลื่อนที่ของสารต่อหน่วยพื้นที่ ($mg/sec/cm^2$)
Q	ปริมาณสารที่แพร่ผ่านพื้นที่หน้าตัด (mg)
d	เส้นผ่าศูนย์กลางพื้นที่ผิวชั้นตัวอย่าง (cm)
x	ระยะทาง (cm)
l	ความหนาของชั้นตัวอย่าง (cm)
t	เวลา (sec)
t_0	lag-time (sec)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของการศึกษา

ในขณะนี้ได้มีการศึกษากันมากทั้งด้านทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับการหาคุณสมบัติของอาหาร การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทมวลของสารถูกละลายผ่านชั้นอาหารก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาคุณสมบัติของอาหาร โดยกลไกของการถ่ายเทมวลสารชั้นแรกคือ สารถูกละลายที่อยู่ในสารละลายจะแพร่มาสิ้นสุดที่ผิวของอาหาร จากนั้นจะเกิดการแพร่ของโมเลกุลของสารถูกละลายผ่านเข้าไปในชั้นของอาหาร ซึ่งมักจะมีโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous structure) และยากที่จะทำนายทิศทางการแพร่ของสารถูกละลายได้ ดังนั้นการหาค่าสัมประสิทธิ์ปรากฏของการแพร่ (Apparent diffusion coefficient) หรือค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิผลของการแพร่ (Effective diffusion coefficient) จึงเป็นสิ่งสำคัญ ปัจจุบันพบว่าอาหารที่มีการจำหน่ายในท้องตลาดโดยทั่วไป ได้มีการนำอาหารมาผ่านกระบวนการแปรรูปมากขึ้น ซึ่งในกระบวนการแปรรูปอาหารนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของอาหารที่ใช้ เพื่อให้อาหารที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้วเป็นที่พอใจของตลาด ดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องทราบคุณสมบัติของอาหารที่นำมาใช้ในกระบวนการแปรรูป ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งของอาหาร ที่บ่งบอกถึงความยากง่ายในการแพร่ผ่านของสารถูกละลายในชั้นตัวอย่าง โดยที่สารถูกละลายตัวใดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่า แสดงว่าสารนั้นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าสารถูกละลายที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่า

เนื่องจากอาหารเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนไม่แน่นอน และคุณสมบัติต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา แม้ในระหว่างทำการแปรรูป ดังนั้นจึงเป็นเรื่องน่าสนใจศึกษาเกี่ยวกับการแพร่ของสารถูกละลายผ่านชั้นวัสดุอาหาร วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มวลสารที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น การแช่ตัวอย่างในสารละลายเข้มข้น การนำตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่างกันมาสัมผัสกัน แต่วิธีที่กำลังเป็นที่สนใจในการศึกษาคือ การใช้ดิฟฟิวชันเซลล์ (diffusion cell) เนื่องจากวิธีนี้ใช้เวลาน้อยในการทดลอง และมีความแม่นยำสูงเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ อีกทั้งอุปกรณ์มีขนาดเล็กสามารถใช้ได้กับชั้นตัวอย่างอาหารหลายชนิด อุปกรณ์ดิฟฟิวชันเซลล์ประกอบด้วยภาชนะทรงกระบอก 2 ตัว ประกบติดกัน โดยนำตัวอย่างบรรจุไว้ระหว่างภาชนะทรงกระบอกทั้งสอง ภาชนะทรงกระบอกด้านหนึ่งจะบรรจุสารละลายที่ต้องการศึกษาและอีกด้านหนึ่งบรรจุน้ำกลั่น แล้วทำการกวนสารละลายด้วยใบกวนและความเร็วรอบที่เหมาะสม การแพร่ที่เกิดขึ้น เกิดจากการแพร่ของสารถูกละลายเข้าไปในทุกส่วนของชั้นตัวอย่าง

ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากสัตว์น้ำจืดหลายชนิด เช่น ปลาร้า ปลาสาม ปลาตากแห้ง เป็นต้น ซึ่งเป็นแหล่งอาหารโปรตีนสำคัญ โดยเฉพาะปลาส้มและปลาตากแห้งมีการใช้สารเคมีโดยเฉพาะดินประสิว เพื่อใช้ในการเพิ่มสีส้มและยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ แต่การใช้สารเคมีจำพวกนี้ จำเป็นจะต้องมีการควบคุมปริมาณการใช้ในปริมาณที่กฎหมายกำหนด เกลือและน้ำตาลซึ่งเป็นสารปรุงแต่งกลิ่นรส เนื้อสัมผัสและผลต่อจุลินทรีย์ ดังนั้นการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารต่างๆผ่านวัสดุชีวภาพ เช่น เนื้อปลาน้ำจืด จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้ประโยชน์ในการผลิตปลาตากแห้ง ปลาส้ม เพื่อที่จะได้กำหนดเวลาและปริมาณการใช้ได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากระยะเวลาและอุปกรณ์ที่มีอย่างจำกัด การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่การใช้โปแตสเซียมไนเตรดในผลิตภัณฑ์ปลาน้ำจืด

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 สร้างความสามารถทางวิชาการ เกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมและทางกายภาพของวัสดุอาหารของประเทศไทย

1.2.2 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารถูกละลายในปลาน้ำจืดเศรษฐกิจในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

- เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แบบคิวฟิวชันเซลล์
- เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการแพร่ของไนเตรดในเนื้อปลาน้ำจืด
- เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านเนื้อปลาน้ำจืด
- เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของไนเตรดที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การ

แพร่ของไนเตรดในเนื้อปลาน้ำจืด

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แบบคิวฟิวชันเซลล์ หาสภาวะที่เหมาะสมโดยการเลือกใช้ใบกวน และความเร็วรอบในการกวน ที่ทำให้ตัวถูกละลายกระจายตัวในตัวทำละลายได้ดีในทั่วทุกจุดของสารละลาย

1.3.2 ทำการทดสอบความถูกต้องแม่นยำของอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสารที่สร้างขึ้น โดยทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคสผ่าน 2 %w/v แคลเซียม-แอลจีเนตเจล และทำการวิเคราะห์ทางสถิติ t-test เปรียบเทียบค่าที่ได้

1.3.3 ศึกษาการแพร่ของไนเตรดที่เตรียมจากสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %w/v ผ่านตัวอย่างขึ้นปลาน้ำจืด ที่อุณหภูมิห้อง

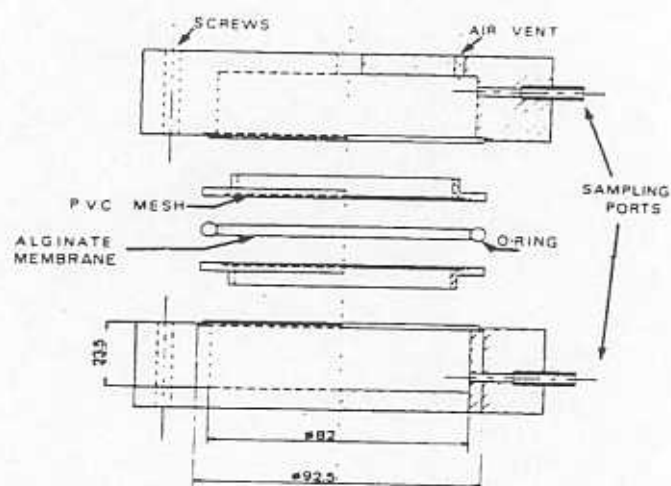
1.4 การตรวจเอกสาร

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารถูกละลายในชั้นตัวอย่างเจลและอาหาร พบว่ามีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่อยู่หลายวิธี เช่น การจุ่มขึ้นตัวอย่างลงในสารละลายที่มีการกวนตลอด การใช้ตัวอย่างสองชั้นที่มีความเข้มข้นต่างกันมาสัมผัสกันตามแนวแกน และการใช้ดิฟฟิวชันเซลล์ เป็นต้น ซึ่งกลไกการแพร่ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่คล้ายกัน

วีระ อวิคุณประเสริฐ [1] ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แบบดิฟฟิวชันเซลล์ขึ้นตามสมมุติฐานวิธี lag-time เพื่อวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลายผ่านตัวกลาง โดยสร้างจากอะคริลิกทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.3 เซนติเมตร ความสูง 11.3 เซนติเมตร สำหรับบรรจุสารละลายและมีช่องใส่ตัวอย่าง เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ใช้ใบกวนความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที ในการทดสอบหาปริมาณของกลูโคสผ่านตัวกลางแคลเซียมแอลจีเนตเจลที่อุณหภูมิ 26 ± 1 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเท่ากับ $6.08 \pm 0.021 \times 10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้กับการทดลองนี้กับค่าที่วัดได้ของ Hannoun และ Stephanopoulos [2] พบว่าค่าทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

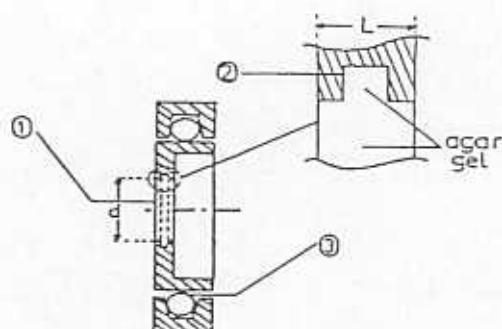
Teixeira, Mota และ Venancio [3] ได้ทำการศึกษาค่าประสมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคสและกรดมาลิกผ่านแคลเซียมแอลจีเนต โดยใช้อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แบบดิฟฟิวชันเซลล์ ซึ่งประกอบด้วยอ่างใส่สารละลาย 2 ส่วน ที่แยกกันด้วยแผ่นเจล อ่างสารละลายแต่ละใบมีปริมาตรเท่ากับ 120 มิลลิลิตร และคอดักกันด้วยสกรู เจลจะถูกพองไว้ด้วยแผ่นตะแกรง พีวีซี (PVC squared mesh) โดยใช้ mesh no. 35 และถูกหุ้มด้วยวงแหวน o-ring ดังรูปที่ 1.1 การกวนในอ่างสารละลายด้านบนใช้ใบกวนความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ส่วนด้านล่างใช้แท่งกวนแม่เหล็กความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเท่ากัน สารละลายในอ่างด้านล่างจะถูกสูมออกมาเพื่อทำการวัดความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส ซึ่งส่วนนี้จะคอดักกับส่วนของคอดักน้ำคาลอรีซึ่งบรรจุสารละลาย ที่จะเข้าไปแทนที่สารละลายที่สูมออกมาโดยที่อุปกรณ์ดิฟฟิวชันเซลล์ จะวางไว้ในอ่างน้ำ ที่อุณหภูมิห้อง และทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยใช้วิธี lag-time พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคสในแผ่นแคลเซียมแอลจีเนต 3%w/v เท่ากับ $6.59 \pm 0.20 \times 10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที สำหรับสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และ $6.72 \pm 0.09 \times 10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที สำหรับ

สารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกรด
มาลิก ความเข้มข้น 10%w/v มีค่าเท่ากับ $4.36 \pm 0.09 \times 10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

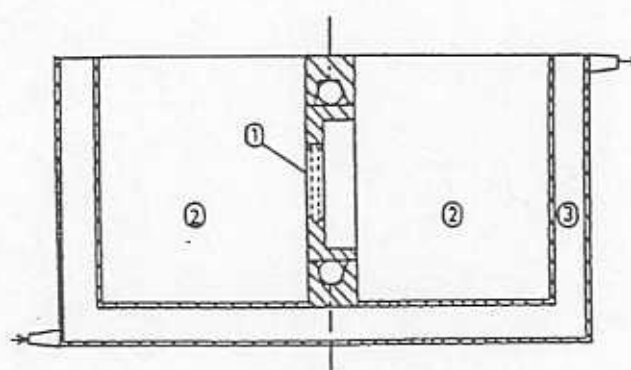


รูปที่ 1.1 อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Teixeira และคณะ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

Djelveh, Gros และ Bories [4] ได้ทำการออกแบบคัพพีวซ์เซลล์เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผ่านชั้นตัวอย่างอะการ์เจล โดยประกอบด้วยอ่างสารละลาย 2 ส่วน ที่มีปริมาตรเท่ากัน ($V_1=V_2=350$ มิลลิลิตร) อ่างสารละลายด้านหนึ่งจะบรรจุด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 10%w/v ถูกกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก ส่วนอีกด้านบรรจุน้ำที่ปราศจากไอออนและถูกกวนด้วยใบกวนสแตนเลส ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อ่างสารละลายทั้งสองจะแยกจากกันด้วยแผ่นพีวีซี ซึ่งใช้บรรจุชั้นตัวอย่าง 3% อะการ์เจล โดยที่ทรงกระบอกพีวีซีมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 44 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร มีช่องเปิดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความหนา 3.25 มิลลิเมตร มีร่องความหนา 2.5 มิลลิเมตร และความลึก 2 มิลลิเมตร สำหรับใส่ตัวอย่าง และใช้วงแหวน (O-ring) ช่วยในการต่อเข้ากับแผ่นพีวีซี ดังรูปที่ 1.2 และ 1.3 ระหว่างทำการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่ 25 ± 0.1 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ในอ่างที่บรรจุน้ำกลั่นจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแพร่ของโซเดียมคลอไรด์ผ่านอะการ์เจล ทำการบันทึกความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้นกับเวลาด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้เท่ากับ 1.30×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที และความแปรปรวนเท่ากับ 0.03×10^{-9} ตารางเมตรต่อวินาที เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีการนำตัวอย่างทรงกระบอก 2 ชิ้น ที่มี ความเข้มข้นสารละลายต่างกันมาชนกัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่หาจากการใช้อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แบบคัพพีวซ์เซลล์ มีความแม่นยำกว่า



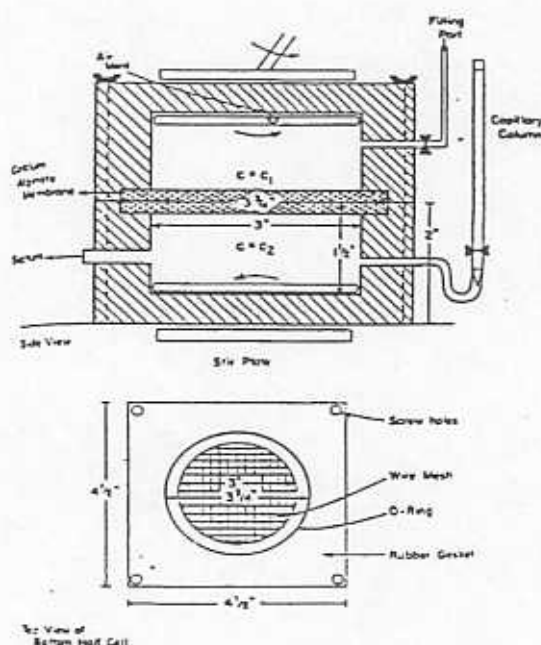
รูปที่ 1.2 ตัวพุงสำหรับอะการ์เจล (1 = ช่องเปิดวงกลม : $L = 3.25$ มม. $d = 2.5$ มม.
2 = ร่องลึก 2 มม. หน้า 2.5 มม. 3 = วงแหวน o-ring)



รูปที่ 1.3 คิวฟิวชั่นเซลล์ของ Djelveh และคณะ (1 = ชี้นอะการ์เจล 2 = อ่างสารละลาย
 $V_1 = V_2 = 350$ มม. 3 = ส่วนแจ็กเก็ต)

Hannoun และ Stephanopoulos [2] ได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส และเอทานอล โดยใช้อุปกรณ์คิวฟิวชั่นเซลล์ ดังรูปที่ 1.4 ซึ่งทำจาก plexiglass ประกอบด้วยอ่างทรงกระบอก 2 ใบ มีปริมาตร 152 มิลลิลิตร ต่อเข้ากันด้วยสกรู และเคลือบเย็บมอลจิเนทที่มีความหนา 4.2 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.9 เซนติเมตร จะถูกพุงไว้ด้วยตะแกรงลาดที่อยู่ระหว่างอ่างสารละลายทั้งสอง และถูกหุ้มด้วยวงแหวน O-ring รอบๆ อ่างสารละลายจะถูกหุ้มด้วยฉนวนยางอีกชั้นหนึ่ง อ่างสารละลายด้านล่างจะบรรจุน้ำที่ปราศจากไอออน และต่อกับคอลัมน์คาร์ปิลารี สารละลายในส่วนนี้จะถูกสู่ออกมาทางช่องรอยต่อ เมื่อสารละลายถูกสู่ออกมา น้ำจากคอลัมน์คาร์ปิลารีจะเข้าไปแทนที่ ส่วนอ่างสารละลายด้านบนจะบรรจุสารละลายที่ต้องการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ ซึ่งสาร

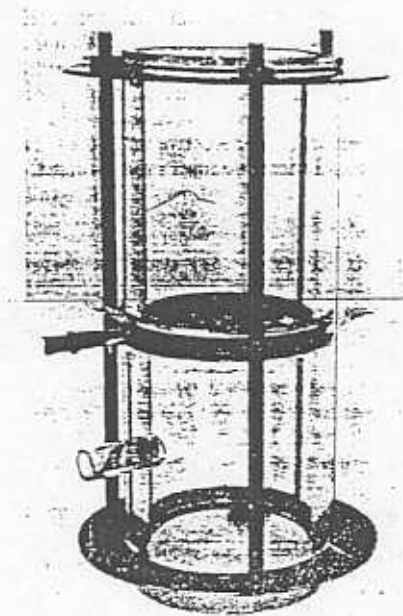
ละลายในอ่างทั้งสองจะถูกกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 22-26 องศาเซลเซียส จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธี lag-time พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำคาลกลูโคส และเอทานอลจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 2-100 กรัมต่อลิตร และเอทานอล 10-80 กรัมต่อลิตร จะไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำคาลกลูโคสและเอทานอลใน 2% แกลเซียมแอลจีเนตเจล มีค่าเท่ากับ 6.1×10^{-6} และ 1.0×10^{-5} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ



รูปที่ 1.4 ส่วนประกอบดีฟิวชันเซลล์ของ Hannoun และ Stephanopoulos

Fox [5] ได้ทำการศึกษาการแพร่ของโซเดียมคลอไรด์ ในไตรดและไนไตรด์ ในเนื้อหมูและเนื้อวัว โดยใช้ porous disc technique เมื่อนำชิ้นเนื้อที่เตรียมไว้มาทำการหั่นเป็นชิ้นความหนา 1 เซนติเมตร โดยทำการตัดขวางกับเส้นไขของชิ้นเนื้อ จากนั้นใช้ใบมีดตัดให้เป็นแผ่นกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.0 เซนติเมตร และความหนา 1.0 เซนติเมตร ใช้ฟิล์มเซลลูโลสหุ้มชิ้นเนื้อให้เรียบตลอดทั้งชิ้น ซึ่งจะวางอยู่กึ่งกลางส่วนบรรจุสารละลายทั้งสอง ดังรูปที่ 1.5 และส่วนล่างของส่วนบรรจุสารละลายจะปิดและมีช่องต่อทางด้านข้าง ใช้สำหรับเป็นช่องบรรจุสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารถูกละลายสูงที่จะใช้ในการทดลอง โดยสามารถบรรจุสารละลายได้ 140 มิลลิลิตร มีแท่งกวนแม่เหล็กวางอยู่ในส่วนบรรจุสารละลายก่อนทำการใส่ชิ้นตัวอย่าง ส่วนบนของส่วนบรรจุสารละลายจะเป็นทรงกระบอกเปิดบรรจุน้ำกลั่น และใช้ใบกวนความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที บริเวณรอบคอส่วนบน

และล่างกับขึ้นตัวอย่างตรงกลาง จะถูกยึดไม่ให้เคลื่อนที่โดยใช้ฟิล์มเซลลูโลส ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียส และทำการสุ่มสารละลายจากส่วนบนมาทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ ในเตรคและในไทรด์ ในเนื้อหมูเท่ากับ 0.19×10^{-5} ถึง 0.22×10^{-5} , 0.12×10^{-5} ถึง 0.13×10^{-5} และ 0.22×10^{-5} ถึง 0.24×10^{-5} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ส่วนในเนื้อวัวเท่ากับ 0.23×10^{-5} ถึง 0.27×10^{-5} , 0.17×10^{-5} ถึง 0.25×10^{-5} และ 0.15×10^{-5} ถึง 0.18×10^{-5} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ



รูปที่ 1.5 คีฟิฟวชันเซลล์ของ Fox

บทที่ 2

ทฤษฎี

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มวลสารเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่มีความสำคัญ ซึ่งในการแพร่นั้นจะเกิดขึ้นได้ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารจากความเข้มข้นสูงกว่าไปยังที่ที่มีความเข้มข้นของสารนั้นต่ำกว่า ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีโดยทั่วไปเกี่ยวกับการแพร่ระดับโมเลกุลของสารผ่านตัวกลางที่มีโครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น แคลเซียมแอลจินเนทเจล และตัวกลางที่มีโครงสร้างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เช่น กล้ามเนื้อปลา รวมทั้งทฤษฎีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยวิธี lag-time

2.1 การแพร่ระดับโมเลกุล (Molecular diffusion) [6]

การถ่ายเทมวลโดยอาศัยการแพร่ของโมเลกุลนั้น เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลผ่านตัวกลางที่ไม่เคลื่อนที่ การแพร่อาจจะเกิดขึ้นจากความแตกต่างของสภาวะดังนี้

2.1.1 การแพร่ระดับโมเลกุลที่เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้น เรียกว่า การแพร่ธรรมดา (ordinary diffusion)

2.1.2 การแพร่ระดับโมเลกุลที่เกิดจากระบบมีความแตกต่างของความดัน ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความดันสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความดันต่ำกว่า เรียกว่า การแพร่เนื่องจากความดัน (pressure diffusion)

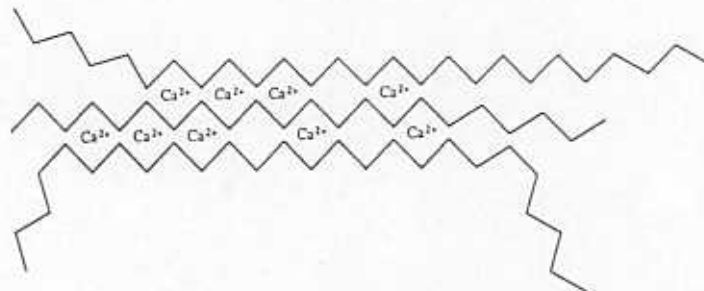
2.1.3 การแพร่ระดับโมเลกุลที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิ เรียกว่า การแพร่เนื่องจากความร้อน (thermal diffusion)

2.1.4 การแพร่ระดับโมเลกุลที่เกิดจากระบบถูกแรงภายนอก เช่น แรงเคลื่อนไฟฟ้า แรงแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น การแยกสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้กระแสไฟฟ้า การแยกของผสมของแร่ธาตุโดยใช้แม่เหล็ก

การแพร่ระดับโมเลกุลอันเป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้น เป็นกลไกที่พบมากกว่าการแพร่แบบอื่นๆ โดยปริมาณที่เป็นที่สนใจคือ มวลต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา และความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ขึ้นกับตำแหน่ง เวลา อุณหภูมิ ความดัน และลักษณะอื่นๆของระบบ

2.2 แอลจีเนต (alginate) [7]

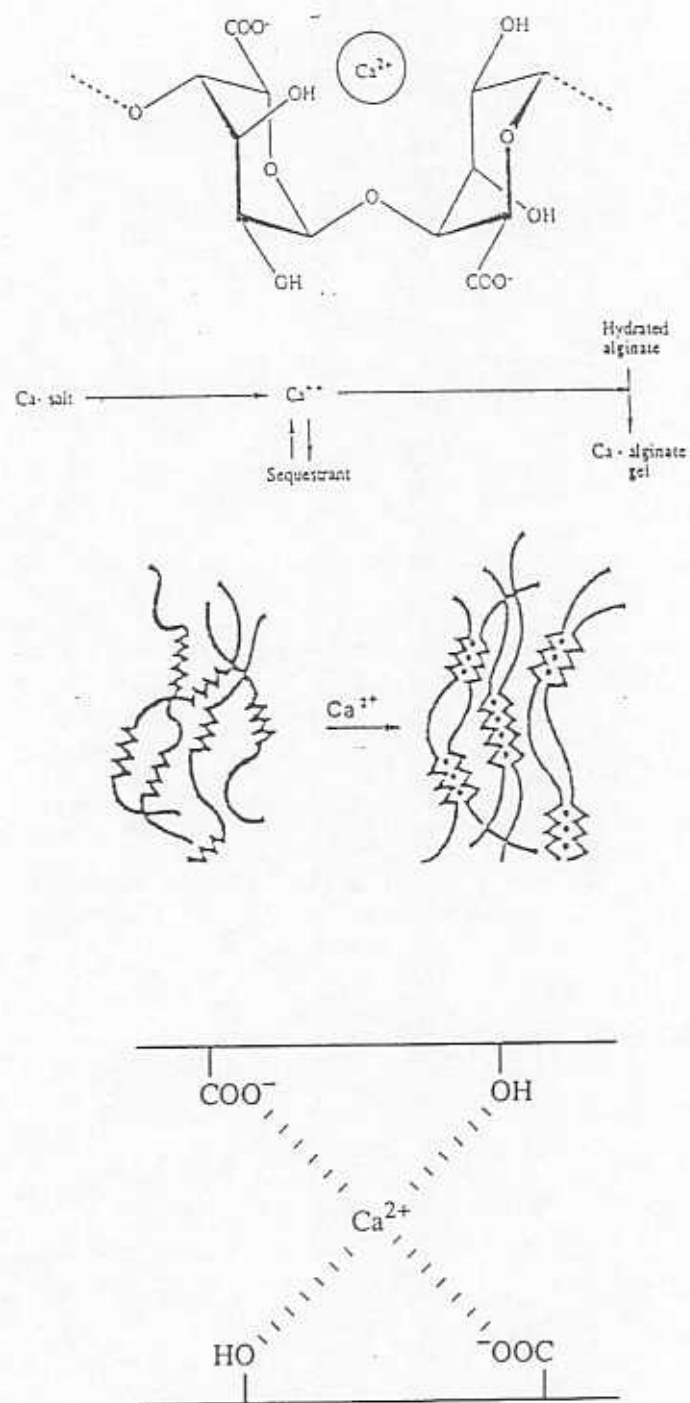
แอลจีเนต (alginate) เป็นส่วนที่อยู่ในผนังเซลล์และช่องว่างระหว่างเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาล (brown algae) โดยโมเลกุลของแอลจีเนตเป็นตัวช่วยให้เกิดความยืดหยุ่นและความแข็งแรงของสาหร่าย โครงสร้างประกอบด้วยการรวมตัวของกรดน้ำตาล คือ β -D-mannuronic acid และ α -L-guluronic acid เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1,4-glycosidic bond การเรียงตัวของโมเลกุลค่อนข้างเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยเกลือของกรดแอลจีนิค มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 20,000-600,000



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแอลจีเนต

คุณสมบัติที่สำคัญของแอลจีเนต คือ สามารถจับตัวกับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เกิดเป็นเจลได้ โดยเจลที่ได้มีความสามารถต่อต้านความร้อนและแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งแคลเซียมไอออนจะไปจับกับส่วนของ α -L-guluronic acid ที่เรียงต่อกันเป็นชุดๆ เรียก polyguluronic acid โดยส่วนของ polyguluronic ในโมเลกุลของแอลจีเนตหนึ่ง จะจับตัวกับส่วนที่เหมือนกันของแอลจีเนตอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ใกล้กัน และมีแคลเซียมไอออนเป็นตัวกลางเชื่อมทั้งสองส่วน ในลักษณะที่คล้ายไขเบรจในกล่องไข่ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ทำให้โครงสร้างของแอลจีเนตเจลมีความคงตัวขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพในการเกิดเจลและความแข็งแรงของเจล ขึ้นอยู่กับความต่อเนื่องของปริมาณและความยาวของ polyguluronic acid ที่อยู่ในโมเลกุลของแอลจีเนต หากว่ามีปริมาณและความยาวของ polyguluronic acid มาก จะสามารถจับตัวกับแคลเซียมไอออนได้ในปริมาณมาก

หากพิจารณาจะพบว่าแอลจีเนตเจลจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นของแข็ง แต่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระภายในโครงตาข่ายของแอลจีเนต (alginate matrix หรือ network)



รูปที่ 2.2 การจับตัวกับแคลเซียมไอออนของแอลจีเนตในการเกิดแคลเซียมแอลจีเนต

2.3 ปลาน้ำจืด (Freshwater fish)

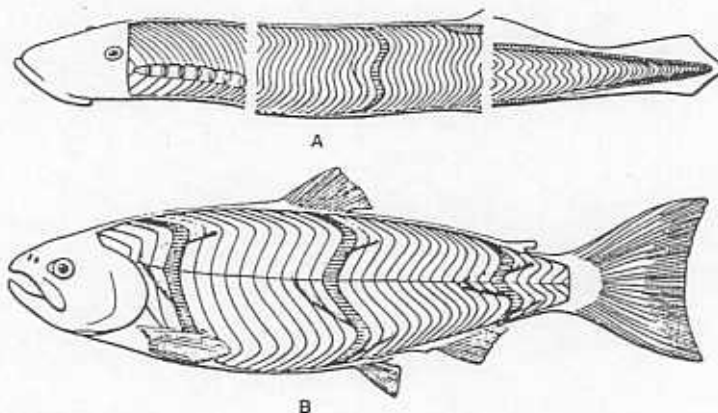
2.3.1 โครงร่างของตัวปลา (framework of form)

โครงร่างของตัวปลาประกอบด้วย โครงกระดูกและกล้ามเนื้อที่ทำให้ทรงรูปร่างได้อย่างมั่นคงและทั้งยังมีความสำคัญในเรื่องการว่ายน้ำและเคลื่อนไหวอื่นๆ อีกด้วย กล้ามเนื้อ (muscle) ของปลาแบ่งเป็นพวกใหญ่ ๆ ได้ 3 พวก คือ

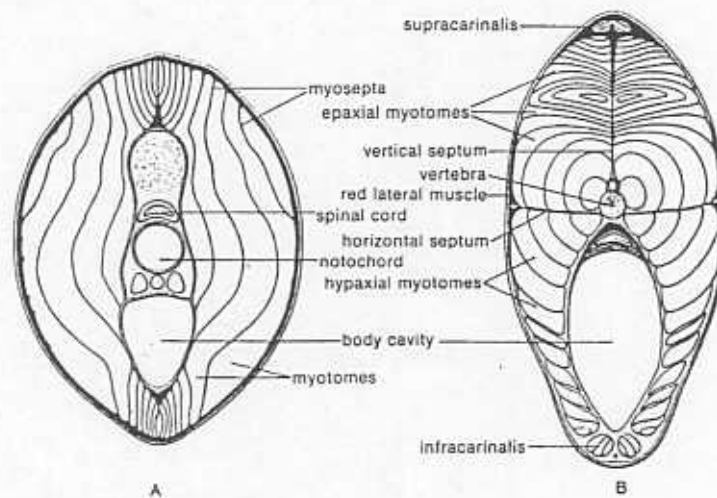
- Smooth muscle ได้แก่ กล้ามเนื้อของลำไส้ (gut)
- Cardiac muscle ได้แก่ กล้ามเนื้อหัวใจ
- Skeletal muscle ได้แก่ กล้ามเนื้อลาย ทั่วๆ ไป

กล้ามเนื้อของลำไส้หรือของทางเดินอาหารและกล้ามเนื้อของหัวใจ เป็นกล้ามเนื้อชนิดที่ไม่อยู่ในอำนาจจิต (involuntary) แต่กล้ามเนื้อลายเป็นชนิดที่ไม่อยู่ในอำนาจจิต (voluntary) กล้ามเนื้อที่สำคัญตามร่างกายแบ่งได้ดังนี้

กล้ามเนื้อของลำตัวเป็นกล้ามเนื้อลายที่เรียงกันเป็นตอนๆ เรียก Myomere ซึ่งจะเรียงซ้อนกันในลักษณะรูปกรวย (cone) แต่ส่วนที่ปรากฏให้เห็นด้านข้างของตัวปลานั้น เป็นแผ่นเล็กเรียวยาวรูปซิกแซกเรียงต่อกันจากหัวไปหาง โดยมีเยื่อเรียงต่อกันระหว่าง myosepta กล้ามเนื้อด้านข้างลำตัวนี้ถูกแบ่งเป็นด้านบนและด้านล่างด้วยเยื่อที่เรียก Horizontal skeletogeneous septum เนื้อของส่วนบนเรียก Epaxial muscle mass และเนื้อส่วนล่างเรียก Hypaxial muscle mass กล้ามเนื้อของลำตัวนี้มีหน้าที่สำคัญในการว่ายน้ำอีกด้วย เหนือกล้ามเนื้อ epaxial อาจมีเยื่อแบ่งมัดกล้ามเนื้อมัดอยู่ด้านบนเป็นเส้นตามยาวลำตัวเรียก Dorsal skeletogeneous septum ดังในรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของกล้ามเนื้อด้านข้างลำตัวของปลา



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงโครงสร้างภาพกล้ามเนื้อภาคตัดตามขวางของปลา

กล้ามเนื้อด้านข้างตัวมี 2 ระดับ ชั้นนอกเป็นชั้นของ Epaxial และ Hypaxial ชั้นลึกลงไปเรียก Deep trunk muscle เป็นมัดเล็กๆ มี 2 มัด คือ supracarinales เริ่มจาก scapular region ของ pectoral girdle ไปถึงครึ่งทางใช้ข้อตัวด้านบน อีกมัดหนึ่งคือ Infracarinales อยู่ด้านล่างแนวกลางตัว เป็นมัดยาวจากคอหอยไปถึงหางใช้ข้อตัวด้านล่าง ใช้เคลื่อนไหวครึ่งทางและครึ่งท้อง

2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของปลา [8]

ปลามีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับสัตว์เลือดอุ่น เช่น หมู วัว เป็นต้น โดยมีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้ น้ำ 66-84 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 11-25 เปอร์เซ็นต์ สารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน (NPN) 2.3 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 0.1-20 เปอร์เซ็นต์ เกลือแร่ 0.8-2 เปอร์เซ็นต์ และไกลโคเจน 0-0.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสาเหตุของความแปรปรวนเกิดจากความแตกต่างของชนิดและพันธุ์ แหล่งน้ำ ความอุดมสมบูรณ์ของอาหาร อายุ และขนาดของสัตว์น้ำ

สารประกอบที่เป็นโปรตีนในสัตว์น้ำ จำแนกตามลักษณะการละลายได้ดังนี้คือ

2.3.2.1 โปรตีนที่ละลายได้ในน้ำหรือเรียกว่า ซาร์โคพลาสมิกโปรตีน (Sarcoplasmic Protein) หรือ myogen มีอยู่ประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ของโปรตีนทั้งหมด ได้แก่ น้ำย่อยชนิดต่างๆ เม็ดสีในเนื้อ และ Cytochrome C

2.3.2.2 โปรตีนที่ไม่ละลายน้ำแต่ละลายในสารละลายเกลือเจือจาง ซึ่งมี ionic strength ประมาณ 0.15 เช่น โปรตีนในเลือดและน้ำย่อยบางชนิด เรียกว่า globulin-x พบว่ามีอยู่ในปลา 8-22 เปอร์เซ็นต์ของโปรตีนทั้งหมด

2.3.2.3 โปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือที่มี ionic strength ประมาณ 0.5 ได้แก่ โปรตีนกล้ามเนื้อ (myofibrillar protein) เช่น actin, myosin, actinmyosin เป็นต้น พวกนี้มีประมาณ 65-75 เปอร์เซ็นต์ของโปรตีนทั้งหมด

2.3.2.4 โปรตีนพวกที่ไม่ละลายน้ำหรือสารละลายเกลือแต่ละลายในกรดและเบสเข้มข้น เรียกว่า stromal protein ได้แก่ โปรตีนในเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน collagen, elastin, reticulin พบอยู่ประมาณ 3-10 เปอร์เซ็นต์ของโปรตีนทั้งหมด

2.4 สารประกอบไนไตรต์และไนเตรด (nitrite and nitrate) [9]

การใช้สารประกอบไนไตรต์และไนเตรดในอาหารนั้น ส่วนใหญ่ช่วยให้มีการเกิดสีในผลิตภัณฑ์เนื้อ แต่พบว่าการใช้สารประกอบดังกล่าว สามารถช่วยชะลอการเจริญเติบโตของ *Clostridium botulinum* และการสร้างสารพิษของเชื้อดังกล่าวในผลิตภัณฑ์เนื้อและปลาได้ แต่ไม่สามารถป้องกันการงอกของสปอร์ได้ ประสิทธิภาพของการงอกของสารประกอบนี้ จะดีที่สุดภาวะเป็นกรด-ด่างต่ำ เพราะประสิทธิภาพจะขึ้นกับปริมาณไนไตรต์ที่มีอยู่ สารประกอบไนไตรต์และไนเตรดนอกจากจะช่วยยืดอายุการเก็บแล้ว ยังมีส่วนช่วยให้สีของผลิตภัณฑ์สวขึ้นด้วยกลไกการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ โดยไนไตรต์จะทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโน ซึ่งมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่ผนังเซลล์และเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส (dehydrogenase) ของจุลินทรีย์ การทำงานของระบบไซโตโครม (cytochrome system) จะผิดปกติไปด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาของไนไตรต์กับรงควัตถุในฮีม (heme pigment) และประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์จะขึ้นที่ความเป็นกรด-ด่างต่ำ สารประกอบไนไตรต์นั้นนอกจากจะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์อื่นๆ ได้แล้ว ยังสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Clostridium botulinum* ได้ด้วย

การเปลี่ยนแปลงของสีในผลิตภัณฑ์เนื้อที่เกิดขึ้น เนื่องจากการใช้สารประกอบไนไตรต์และไนเตรด ในธรรมชาติจะมีไมโอโกลบิน (myoglobin) ซึ่งเป็นเม็ดสีที่มีสีม่วงแดง (purple) การใช้สารประกอบไนไตรต์และไนเตรดนั้น เมื่อสารดังกล่าวถูกรีดิวซ์จะให้ไนไตรต์และไนตริกออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งไนตริกออกไซด์ที่เกิดขึ้น จะเข้าทำปฏิกิริยาที่ไมโอโกลบินเกิดเป็นสารไนตริกออกไซด์ ไมโอโกลบินสีแดงเมื่อได้รับความร้อนระหว่างการแปรรูปไนตริกออกไซด์ ไมโอโกลบินจะเปลี่ยนเป็นไนโตรโซฮีโมโครมที่สีชมพู ซึ่งสีที่กล่าวนี้จะค่อนข้างคงตัวต่อปฏิกิริยารีดักชันหรือออกซิเดชัน แต่จะซีดจางลงหากกระทบกับแสงมาก ๆ

2.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นปริมาณที่แสดงถึงอัตราการแพร่ที่เกิดขึ้น ถ้าพิจารณาการแพร่ที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะหมายถึงอัตราการเคลื่อนที่ของสารผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยหารด้วยความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงต่อระยะทางที่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของสารนั้น ดังนั้นถ้าให้อัตราการเคลื่อนที่ของสารต่อหน่วยพื้นที่มีค่าเท่ากับ F และให้ C แทนความเข้มข้นของสารที่เกิดการแพร่ โดย x เป็นสัญลักษณ์แทนระยะทางที่มีความเข้มข้นต่างกัน สามารถเขียนนิยามในรูปสมการดังนี้

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.1)$$

โดย D เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สามารถหาค่าได้จากหลายวิธี ซึ่งวิธีการวัดแบบเดิมมักจะสมมุติให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และปริมาตรของสารละลายในการทดลองมีค่าคงที่ ตลอดระยะเวลาที่อยู่ในการทดลอง แต่เมื่อนำวิธีการเหล่านี้ไปปฏิบัติพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะไม่เป็นไปตามสมมุติฐาน อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากวิธีการที่สะดวกกว่าแบบอื่นๆ

Crank [10] หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในระบบที่มีการเคลื่อนที่ของสารแบบคงตัวผ่านเยื่อแผ่นโดยวิธี lag-time แล้วแสดงการวิเคราะห์ช่วงเวลา lag-time เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงที่ตลอดช่วงของการเปลี่ยนแปลง และได้ค่าความสัมพันธ์ของเวลากับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ดังนี้

$$t_o = \frac{l^2}{6D} \quad (2.2)$$

โดยที่ t_o = lag-time

l = ความหนาของเยื่อแผ่น

D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

การประยุกต์ใช้เทคนิค lag-time กับระบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของระบบ แต่ยังไม่มีการแก้สมการให้อยู่ในรูปคำตอบที่เหมาะสมเริ่มจากการพิจารณาให้

$$\begin{aligned} C &= C_0 \quad \text{ที่} \quad x = 0 \\ C &= 0 \quad \text{ที่} \quad x = l, \quad t \geq 0 \\ C &= 0 \quad \text{ที่} \quad 0 < x < l, \quad t = 0 \end{aligned}$$

ถ้าให้อัตราการเคลื่อนที่ของสารอยู่ในภาวะการเคลื่อนที่ไม่คงตัว และให้การเคลื่อนที่ของสารเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดหนึ่งหน่วย และ $x = l$ โดย x คือระยะทางการเคลื่อนที่ จะได้ว่า

$$F(t) = - \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=l} \quad (2.3)$$

ดังนั้นการเคลื่อนที่ของสารทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดในเวลา t เท่ากับ

$$Q(t) = \int_0^t F(t) dt \quad (2.4)$$

สำหรับการแพร่ของสารถูกละลายในทิศทางเดียว

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.5)$$

อินทิเกรต (2.5) ในระยะทางการแพร่จาก x ถึง l จะได้

$$\int_x^l \frac{\partial C}{\partial t} (z, t) dz + F(t) + Dc \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (2.6)$$

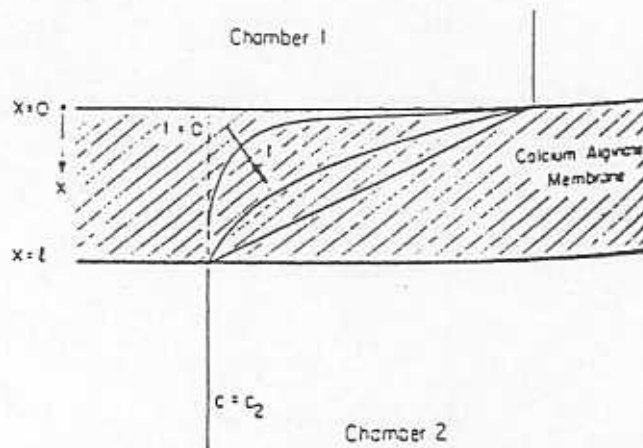
อินทิเกรต (2.6) ในค่า x จาก 0 ถึง l และจัดเรียงใหม่

$$F(t) = \frac{1}{l} \left[\int_0^{C_0} D(u) du - \int_0^l \int_x^l \frac{\partial C}{\partial t} (z, t) dz dx \right] \quad (2.7)$$

อินทิเกรตเทียบกับเวลา จะได้

$$Q(t) = \frac{1}{l} \left[t \int_0^{C_0} D(u) du - \int_0^l \int_0^t C(z, t) dz dx \right] \quad (2.8)$$

ในการทดลองให้ชั้นตัวอย่างความหนา l อยู่ระหว่างอ่างสารละลายทั้งสองที่มีความเข้มข้น C_1 และ C_2 ที่มีการกวนที่สมบูรณ์ ดังรูป 2.5 สมมติว่าไม่เกิดความต้านทานของฟิล์มระหว่างสารละลายทั้งสองข้างในอ่างสารละลายกับชั้นตัวอย่าง กระบวนการแพร่แบบ transient จะเกิดขึ้นภายในชั้นตัวอย่าง ซึ่งเป็นไปตามสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ดังกฎข้อที่สองของฟิค [2] และ [3]



รูปที่ 2.5 แบบจำลองการแพร่ของสารถูกละลาย

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.9)$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นของสารถูกละลายในตัวอย่าง

D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

t = เวลา

x = ระยะทางที่สารถูกละลายเคลื่อนที่

สภาวะเริ่มต้น

$$C = 0, \quad 0 < x < l \quad \text{ที่ } t = 0 \quad (2.10)$$

สภาวะขอบเขต

$$\begin{aligned} C &= C_1 \quad \text{ที่ } x = 0 \\ C &= C_2 \quad \text{ที่ } x = l \end{aligned} \quad (2.11)$$

โดยที่ l = ความหนาของชิ้นตัวอย่าง

แก้สมการ (2.9) ที่สภาวะเริ่มต้น (2.10) และสภาวะขอบเขต (2.11) จะได้

$$C = C_1 + (C_2 - C_1) \frac{x}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_2 \cos n\pi - C_1}{n} \sin \frac{n\pi x}{l} \exp - \frac{Dn^2 \pi^2 t}{l^2} \quad (2.12)$$

ระหว่างทำการทดลองสารถูกละลายจะแพร่จากอ่างสารละลายที่ $C = C_1$ ผ่านชิ้นตัวอย่างไปยังอ่างสารละลายที่ $C = C_2$ ดังนั้นความเข้มข้นในอ่างสารละลายทั้งสองจะไม่คงที่และสมมติว่าอ่างสารละลายทั้งสองใหญ่เพียงพอ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมีค่าน้อยมากและ C_2 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

สมการ (2.12) ทำให้อยู่ในรูปอย่างง่าย โดยให้ $C_2 = 0$ จะได้

$$C = C_1 \frac{l-x}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-C_1}{n} \sin \frac{n\pi x}{l} \exp - \frac{Dn^2 \pi^2 t}{l^2} \quad (2.13)$$

เพื่อสะดวกในการวัดค่าความเข้มข้นของสารถูกละลายที่แพร่ผ่าน เป็นฟังก์ชันของเวลาในอ่างสารละลาย เมื่อ C_2 สมมติว่ามีค่าเท่ากับศูนย์

ทำการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย สมการ (2.13) สามารถหาค่าฟลักซ์ในอ่างสารละลายได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} F_{x=l} &= -D \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=l} \\ F_{x=l} &= \frac{DC_1}{l} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp - \frac{Dn^2 \pi^2 t}{l^2} \right] \end{aligned} \quad (2.14)$$

อินทิเกรต สมการ (2.14) ที่ $t = 0$ ถึง $t = t_s$ และคูณด้วยพื้นที่ผิวสัมผัสของจันทวอย่าง(4) จะได้ค่าปริมาณสารที่ถูกละลายทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นจันทวอย่างที่เวลาในการสุ่ม (Q_{is}) ซึ่งเท่ากับค่าความเข้มข้นของสารที่ถูกละลายในอ่างสารละลายที่ C_2 คูณปริมาตรของสารละลายอ่างสารละลาย

เพราะฉะนั้น

$$Q_{is} = \frac{ADC_1 t_s}{l} + \frac{2IA}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_1 (-1)^n}{n^2} (1 - \exp \frac{-Dn^2 \pi^2 t_s}{l^2}) = V \cdot C_2 \quad (2.15)$$

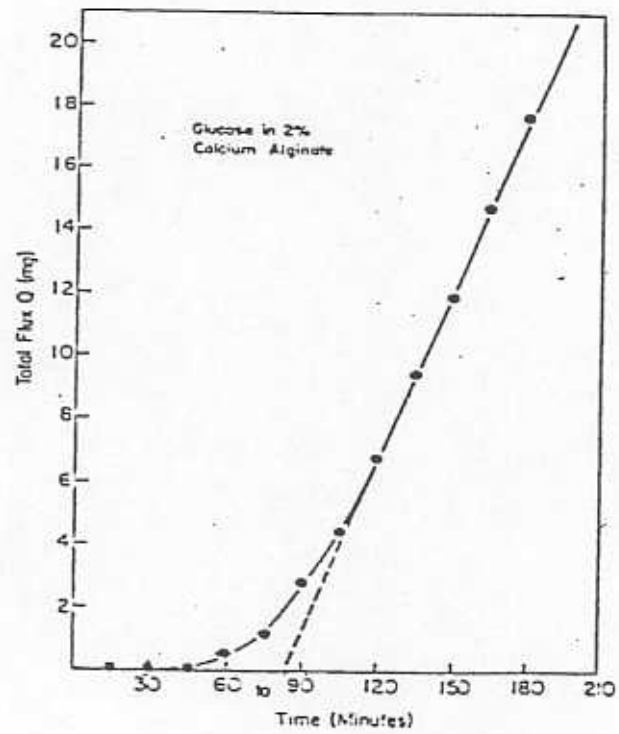
จะได้

$$Q_{is} = ADt_s \frac{C_1}{l} - \frac{AC_1 l}{6} - \frac{A2lC_1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp \frac{-Dn^2 \pi^2 t_s}{l^2} \quad (2.16)$$

สำหรับที่เวลาที่ยาวเพียงพอ เทอมผลรวมทางด้านขวามือของสมการ (2.16) จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ในกรณีนี้ปริมาณสารที่ถูกละลายทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นจันทวอย่างจะเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเวลา

$$Q_{is} = \frac{ADC_1}{l} (t_s - \frac{l^2}{6D}) \quad (2.17)$$

กราฟที่ได้จากการพลอตค่า Q กับ t จะมีลักษณะเข้าหาเส้นตรง โดยมีจุดตัดกับแกนของเวลา (t) ที่ $t = l^2/6D$ จุดตัดของส่วนของเส้นตรงนี้จะเป็นเวลาที่เรียกว่า lag-time, t_0 ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสารได้



รูปที่ 2.6 lag-time ของการแพร่กลูโคสใน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล

บทที่ 3

การศึกษาและการดำเนินการ

สำหรับการศึกษานี้จะทำการพัฒนาอุปกรณ์คัพฟิวชันเซลล์ เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารถูกละลายผ่านชั้นตัวอย่างอาหาร โดยทำการออกแบบและสร้างคัพฟิวชันเซลล์ซึ่งจะดัดแปลงจากเอกสารอ้างอิง [2] และ [3] เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ในการศึกษาวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุ อุปกรณ์ และ สารเคมีที่จะใช้ในการทดสอบ สมมุติฐานในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ การออกแบบและสร้างคัพฟิวชันเซลล์ วิธีการทดสอบความถูกต้องและความแม่นยำของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นโดยทดสอบการแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนทเจล โดยเลือกชนิดใบพัดและความเร็วรอบที่เหมาะสม อีกทั้งทำการศึกษากการแพร่ของโปแตสเซียมไนเตรดในชั้นตัวอย่างปลาน้ำจืด

3.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุสำหรับการสร้างอุปกรณ์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

- 1) อะคริลิกทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.0 เซนติเมตร
- 2) แผ่นอะคริลิกขนาด ความหนา 2.0, 2.5 และ 4.0 มิลลิเมตร
- 3) น้ำยาเชื่อมแผ่นอะคริลิก หรือ Dichloromethane
- 4) ซิลิโคน
- 5) มอเตอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า 12 โวลต์ ความเร็วรอบสูงสุด 240 รอบต่อนาที
- 6) สแตนเลสสำหรับทำใบกวนชนิด Pitched-blade turbine, Disk flat-blade turbine,

Marine-type propellers

- 7) เครื่องแปลงกระแสตรง (EPS regulated DC. Power Supply 0-30 V, 5 A.)
- 8) เครื่องปรับความเร็วรอบ

3.1.2 อุปกรณ์

- 1) อุปกรณ์ในการเตรียมตัวอย่าง
 - ก. ชุดเครื่องแก้วทดลอง
 - ข. กระชกแผ่นเรียบ
 - ค. เครื่องตัดตัวอย่าง
 - ง. เตาไฟฟ้า

- จ. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
 - ฉ. ภาชนะพลาสติก
 - ช. แท่งกวนแม่เหล็ก
 - ซ. กระดาษกรอง เบอร์ 5
 - ณ. เวอร์เนียร์ไมเตอร์
- 2) อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซิง (reducing)
- ก. ชุดเครื่องแก้วทดลอง
 - ข. เครื่อง UV spectrophotometer (UV 2101 PC)
 - ค. เตาไฟฟ้า
 - ง. Micro pipet
- 3) อุปกรณ์ในการวิเคราะห์การแพร่ผ่านของไนเตรดผ่านชั้นปลา
- ก. pH meter
 - ข. Nitrate Electrodes
 - ค. ชุดเครื่องแก้วทดลอง

3.1.3 สารเคมี

- 1) แอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium molybdate)
- 2) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. Sulfuric acid)
- 3) โซเดียมไฮโดรเจนอาร์ซีเนต (Sodium hydrogen arsenate)
- 4) โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate, anhydrous)
- 5) โพแทสเซียมโซเดียมทาร์เทรต (Potassium sodium tartate)
- 6) โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate)
- 7) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Sodium hydrogen carbonate)
- 8) คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulfate)
- 9) กลูโคสมาตรฐาน (Standard glucose)
- 10) แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride)
- 11) โพแทสเซียมไนเตรด (Potassium nitrate)
- 12) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
- 13) วาสลิน หรือ Stopcock grease

3.1.4 ตัวอย่างปลาน้ำจืดที่ใช้ทดสอบ

- 1) ปลานิล (*Tilapia nilotica*)
- 2) ปลาซีก (*Probarbus jullieni*)
- 3) ปลานวลจันทร์ (*Cirrhina microlepis*)
- 4) ปลาสร้อย (*Pangasianodon hypophthalmus*)
- 5) ปลาช่อน (*Channa striatus*)
- 6) ปลาชะโด (*Channa micropeltes*)
- 7) ปลาจีน (*Hypophthalmichthys sp.*)
- 8) ปลาโกล (*Cyclocheilichthys enoplos*)
- 9) ปลาไน (*Cyprinus carpio*)

3.2 การออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ฟิวชันเซลล์

ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ฟิวชันเซลล์วัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ จำเป็นจะต้องพิจารณาคุณสมบัติประกอบ เพื่อให้สอดคล้องกับวิธีการทดลอง โดยตั้งสมมุติฐานสำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ด้วยวิธี lag-time ดังนี้

- 1) การแพร่ของสารถูกละลายเกิดที่สภาวะไม่คงตัว
- 2) การแพร่ของสารถูกละลายผ่านชั้นตัวอย่างเป็นไปในทิศทางเดียวกัน
- 3) สารละลายที่ใช้มีการกระจายตัวของสารถูกละลายสม่ำเสมอ
- 4) ชั้นตัวอย่างมีรูปทรงที่แน่นอน
- 5) ไม่มีการถูกสะสมของสารถูกละลายและความต้านทานของฟิล์ม ที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายกับชั้นตัวอย่าง
- 6) ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารถูกละลายและชั้นตัวอย่าง
- 7) ค่าสัมประสิทธิ์ของสารถูกละลายมีค่าคงที่

จากสมมุติฐานข้างต้น สามารถอธิบายในทางทฤษฎีดังสมการ (2.9) ถึง (2.17) ตามที่ตามทีกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.5

3.2.2 ขนาดชิ้นตัวอย่าง

เนื่องจากวัสดุอาหารของไทย โดยเฉพาะปลาที่จะใช้ในการทดลองมีขนาดไม่แน่นอน สามารถเกิดการเน่าเสียได้ และคุณสมบัติต่างๆเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา จึงจำเป็นต้อง กำหนดขนาดของชิ้นตัวอย่างให้เหมาะสม เพื่อที่จะได้ใช้เวลาในการทดลองไม่เกิน 2 ชั่วโมง

จากสมการ (2.17)

$$Q_{is} = \frac{ADC_l}{l} \left(t_s - \frac{l^2}{6D} \right)$$

และจากการศึกษาในเอกสารอ้างอิง [2] ได้ทำการทดสอบการแพร่ของสารละลาย กลูโคสผ่าน 2% w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ชิ้นตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 7.5 เซนติเมตร ความหนา 0.42 เซนติเมตร และได้เวลา lag-time ประมาณ 85 นาที นอกจากนี้พบว่าความเข้มข้นของกลูโคสระหว่าง 0.2-1.0 %w/v ไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ดังนั้นหากทำการทดลองในสภาวะเดียวกันนี้ เมื่อค่า Q และ D ควรจะมีค่าเท่ากัน ในช่วงความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (3.1)

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{l_1}{l_2} \left\{ \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 + \frac{l_1}{l_2} \right\} \quad (3.1)$$

โดยที่

t = เวลา lag-time

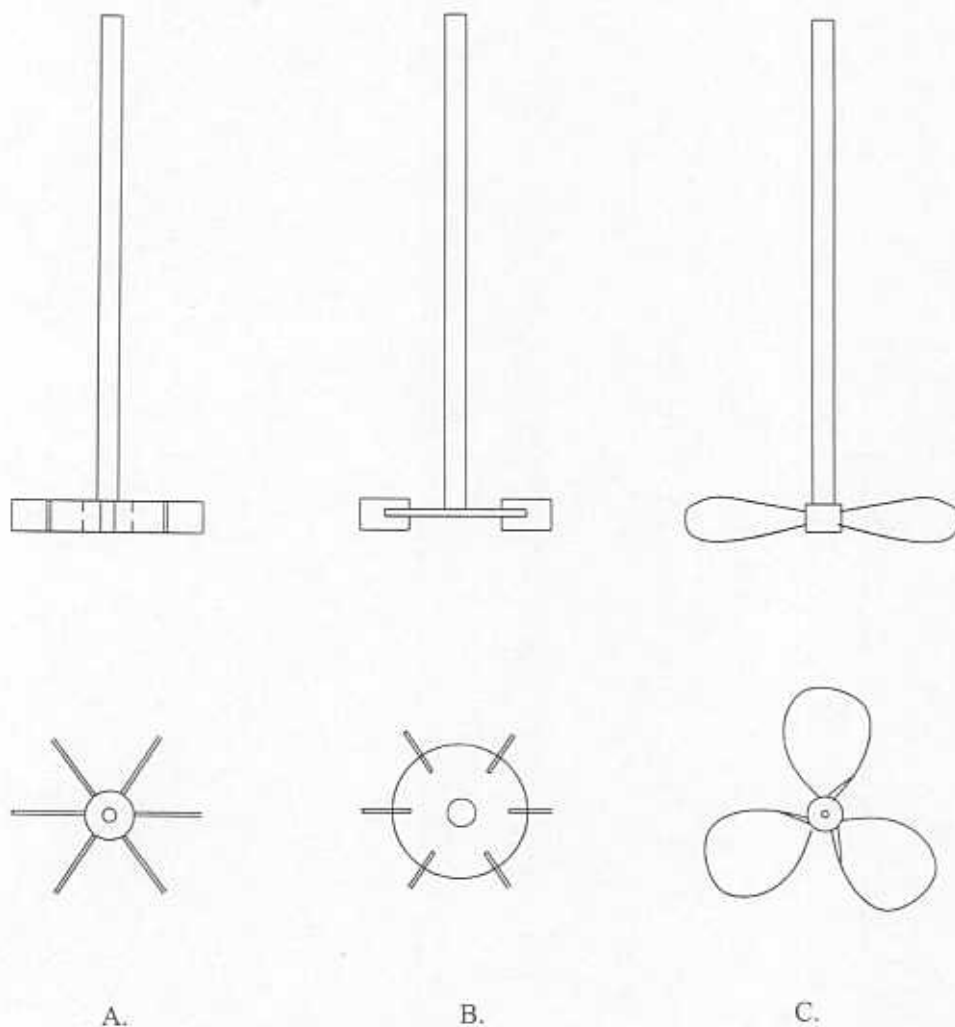
l = ความหนาของชิ้นตัวอย่าง

d = เส้นผ่าศูนย์กลางพื้นที่ผิวชิ้นตัวอย่าง

3.2.3 หลักในการสร้าง

- 1) เลือกใช้วัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายและชิ้นตัวอย่างในการทดลอง
- 2) เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายตามท้องตลาด
- 3) อุปกรณ์มีขนาดที่พอเหมาะสมควรกับตัวอย่างชิ้นเนื้อปลาน้ำจืด

จากนั้นทำการหาความเร็วรอบในการกวนและเลือกชนิดใบกวนที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาการแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล และสัณฐานตัวอย่างอย่างสารละลาย ณ ตำแหน่งต่างๆ 3 ตำแหน่ง ที่เวลา 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที โดยทำการทดสอบที่ความเร็วรอบ 3 ระดับ คือ ความเร็วรอบ 180, 200 และ 220 รอบต่อนาที และใช้ใบกวนที่ต่างกัน 3 ชนิด คือ pitched-blade turbine, disk flat-blade turbine และ marine type propellers ดังรูปที่ 3.2 จากนั้นนำสารละลายที่สุ่มที่เวลาต่างๆ มาวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคส โดยใช้วิธีของ Somogi-Nelson



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของใบกวนแต่ละชนิด

- A. pitched-blade turbine
- B. disk flat-blade turbine
- C. marine-type propeller

3.3 การทดสอบความถูกต้องและความแม่นยำในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

3.3.1 การเตรียมแคลเซียมแอลจีเนตเจล

- 1) ชั่งน้ำหนักโซเดียมแอลจีเนต 1.0000 กรัม ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
- 2) ผสมลงในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากัน
- 3) นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กวนแม่เหล็กไฟฟ้า ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็น
- 4) เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 2%w/v โดยชั่งแคลเซียมคลอไรด์มา 20 กรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร
- 5) เตรียมแผ่นกระดาษกรอง เบอร์ 5 จำนวน 2 แผ่น จุ่มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 2%w/v ปริมาตร 200 มิลลิลิตร แล้ววางบนกระจกแผ่นเรียบ
- 6) นำโซเดียมแอลจีเนตที่เตรียมไว้ เทลงในแผ่นอะคริลิกซึ่งเจาะช่องวงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 4.0 เซนติเมตร ที่วางบนแผ่นกระดาษกรองในข้อ 5
- 7) เอากระดาษกรองอีกแผ่นวางไว้บน แล้ววางทับด้วยแผ่นกระจกแผ่นเรียบอีกชั้นหนึ่ง จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 2%w/v
- 8) หลังจากนั้น 30 นาที นำแผ่นกระจกทั้งสองออก แช่ไว้จนครบ 3 ชั่วโมง จะได้แคลเซียมแอลจีเนตเจลที่ต้องการ

3.3.2 การทดสอบความถูกต้องและความแม่นยำ

- 1) นำเจลที่เตรียมได้ประกอบในอุปกรณ์วัดฟิวชันเซลล์
- 2) เทสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 1%w/v ปริมาตร 180 มิลลิลิตร ลงในภาชนะบรรจุสารละลายด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งบรรจุน้ำกลั่นปริมาตรเท่ากัน โดยสารละลายทั้งสองควรเทลงพร้อมๆกัน
- 3) ทำการกวนสารละลายทั้งสองด้านด้วยใบกวน pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที พร้อมกับเริ่มจับเวลา
- 4) ทำการสุ่มสารละลายทั้งสองปริมาตรด้านละ 1.0 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ที่ตำแหน่งหน้าเจล ด้านข้างของภาชนะ และด้านตรงข้ามเจล ที่เวลา 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที ลงในหลอดทดลองฝาเกลียว

- 5) นำสารละลายค้ำน้ำกลั่นเดิม มาวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซิงโดยใช้วิธีของ Somogyi-Nelson จากนั้นทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กลูโคส โดยวิธี lag-time
- 6) ทำการทดลองซ้ำ
- 7) ทำการเปลี่ยนใบกวนในข้อ 3 เป็นแบบ disk flat-blade turbine และ marine-type propeller และความเร็วรอบเป็น 200 และ 220 รอบต่อนาที ตามลำดับ
- 8) ทดสอบความแม่นยำ และเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการทดลองนี้ด้วยวิธีทางสถิติ t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซิง โดยวิธี Somogyi-Nelson

A) การเตรียมสารละลาย Nelson

- ละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 100 กรัม ในน้ำกลั่น 1800 มิลลิลิตร
- เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 84 มิลลิลิตร
- เติมโซเดียมไฮโดรเจนอาร์ซีเนต 12 กรัม ที่ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
- เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา แล้วตั้งที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้

B) การเตรียมสารละลาย Somogyi-I

- ละลายโซเดียมซัลเฟต 280 กรัม ในน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มเดือดปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
- เติมโปแทสเซียมโซเดียมทาร์เตรต 24 กรัม
- เติมโซเดียมคาร์บอเนต 32 กรัม
- ปรับปริมาตรให้ได้ 1600 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มเดือดแล้ว

C) การเตรียมสารละลาย Somogyi-II

- ละลายโซเดียมซัลเฟต 72 กรัม ในน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มเดือดปริมาตร 300 มิลลิลิตร
- เติมคอปเปอร์ซัลเฟต 8 กรัม
- ปรับปริมาตรให้ได้ 400 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มเดือดแล้ว

หมายเหตุ ผสม Somogyi-I กับ Somogyi-II ในอัตราส่วน 4:1 โดยปริมาตรก่อนใช้ในการวิเคราะห์แต่ละครั้ง

D) วิธีการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซิง

- นำสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ 1.0 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่มีฝาเกลียว
- ผสม Somogyi-I 40 มิลลิลิตร กับ Somogyi-II 10 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากัน
- เติมน้ำกลั่นผสมระหว่างระหว่าง Somogyi-I กับ Somogyi-II 2.0 มิลลิลิตร
- ปิดฝา คมให้เดือด 20 นาที แล้วทำให้เย็น
- เติมน้ำกลั่น Nelson 2.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน
- เติมน้ำกลั่น 4.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน
- นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร โดยเทียบกับ blank ซึ่งใช้น้ำกลั่นแทนสารละลายตัวอย่าง บันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่ได้
- สร้างกราฟมาตรฐานของกลูโคส ที่ความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการทดลองมาอ่านมาทำการคำนวณหาความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร โดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้กับกราฟมาตรฐานของกลูโคส

3.4 การวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรตในปลาน้ำจืด

- 1) นำตัวอย่างปลาน้ำจืดสดมาเถียนตามแนวยาวด้วยเครื่องตัดชิ้นเนื้อ ที่ตั้งค่าความหนาไว้ที่ 2.0 มิลลิเมตร หลังจากนั้น ทำการเจาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ให้เป็นวงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร
- 2) นำชิ้นตัวอย่างที่ได้มาประกอบเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าชั้นเซลล์
- 3) เทสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดความเข้มข้น 0.5 %w/v ลงในภาชนะบรรจุสารละลายด้านหนึ่ง ปริมาตร 180 มิลลิลิตร อีกด้านหนึ่งบรรจุน้ำกลั่นปริมาตร 176 มิลลิลิตร ผสมกับ ISA (Internal standard ammonium sulfate) 4 มิลลิลิตร โดยสารละลายทั้งสองควรเคลงพร้อมๆกัน
- 4) ทำการกวนสารละลายทั้งสองด้านด้วยใบกวน pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที พร้อมกับเริ่มจับเวลา
- 5) วัดปริมาณไนเตรตที่แพร่ผ่านชิ้นตัวอย่าง โดยการจุ่ม Nitrate Electrode ลงในสารละลายด้านน้ำกลั่น ที่เวลา 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที โดยทำการจุ่มก่อนถึงเวลาจริง 1 นาที
- 6) ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 8 การทดลอง

- 7) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านตัวอย่างขึ้นปลาน้ำจืด
- 8) ทำการทดลองซ้ำข้อ1-7 โดยทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดเป็น 1, 1.5 และ 2%w/v ตามลำดับ
- 9) ทำการทดลองซ้ำ ข้อ1-8 โดยเปลี่ยนชนิดปลาน้ำจืด

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ดีฟิวชันเซลล์เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และทำการทดสอบการแพร่ของน้ำตาลกลูโคสผ่านชั้นแคลเซียมแอลจิเนทเจล และการแพร่ของสารละลายไนเตรดผ่านชั้นตัวอย่างปลาน้ำจืด โดยวิธีการที่ใช้ทดสอบใช้วิธีตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการทดสอบอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ การค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคสผ่านชั้นตัวอย่างแคลเซียมแอลจิเนทเจล การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านตัวอย่างชั้นปลาน้ำจืด และความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นเนื้อปลาน้ำจืด กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด

4.1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ดีฟิวชันเซลล์

อุปกรณ์ดีฟิวชันเซลล์ที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้น สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารถูกละลายผ่านชั้นตัวอย่าง ใช้หลักการออกแบบระบบถึงกวนมาตรฐานมาประยุกต์ โดยกำหนดขนาดความหนาของตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบจากความหนาของแผ่นอะครีลิกที่กำหนดตามท้องตลาด พื้นที่สำหรับการแพร่ผ่านของสารถูกละลาย 3.0 เซนติเมตร และเวลาที่ใช้ในการทดสอบไม่เกิน 2 ชั่วโมง สร้างจากอะครีลิกทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.3 เซนติเมตร ความสูง 12.0 เซนติเมตร สำหรับบรรจุสารละลายจำนวน 2 ชุด เพื่อประกบอะครีลิกซึ่งเจาะช่องใส่ตัวอย่าง เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร และด้านในของทรงกระบอกจะติดแผ่นกั้น baffle จำนวน 4 อัน เพื่อป้องกันการเกิดลักษณะ vortex ของสารละลายในขณะกวน รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก โดยในการกวนสารละลายในอ่างบรรจุสารละลายทั้งสองด้าน จะต้องมีความเหมาะสมเพื่อให้สารถูกละลายมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่เกิดการสะสมของสารถูกละลายและความต้านทานของฟิล์มที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายกับชั้นตัวอย่าง โดยอุปกรณ์ดีฟิวชันเซลล์ที่ใช้ศึกษา จะประกอบเข้ากับชุดใบกวนซึ่งได้ออกแบบไว้ 3 ชนิด คือ pitched-blade turbine, diskflat-blade turbine และ marine-type propeller เพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารละลายที่ใช้ในการทดสอบพร้อมติดตั้งซึ่งติดตั้งใบกวนให้อยู่กึ่งกลางของส่วนบรรจุสารละลายแต่ละด้าน และต่อมอเตอร์ใบกวนเข้ากับเครื่องปรับความเร็วรอบ ซึ่งต่อเชื่อมกับเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง ดังในรูปที่ 4.1

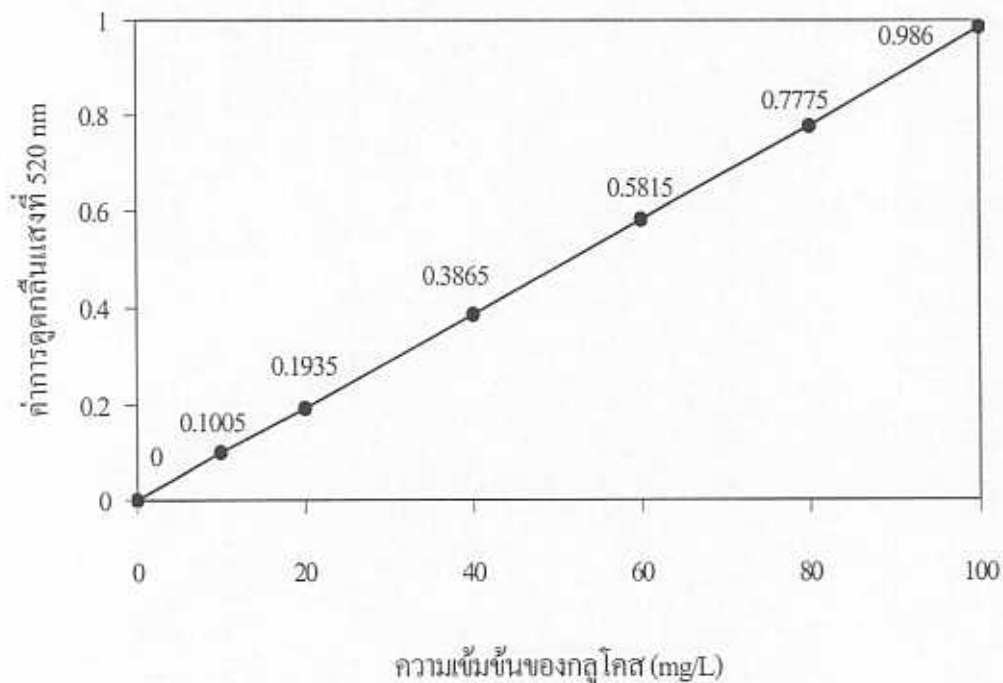


รูปที่ 4.1 ลักษณะการใช้งานอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ออกแบบ

4.2 การทดสอบอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

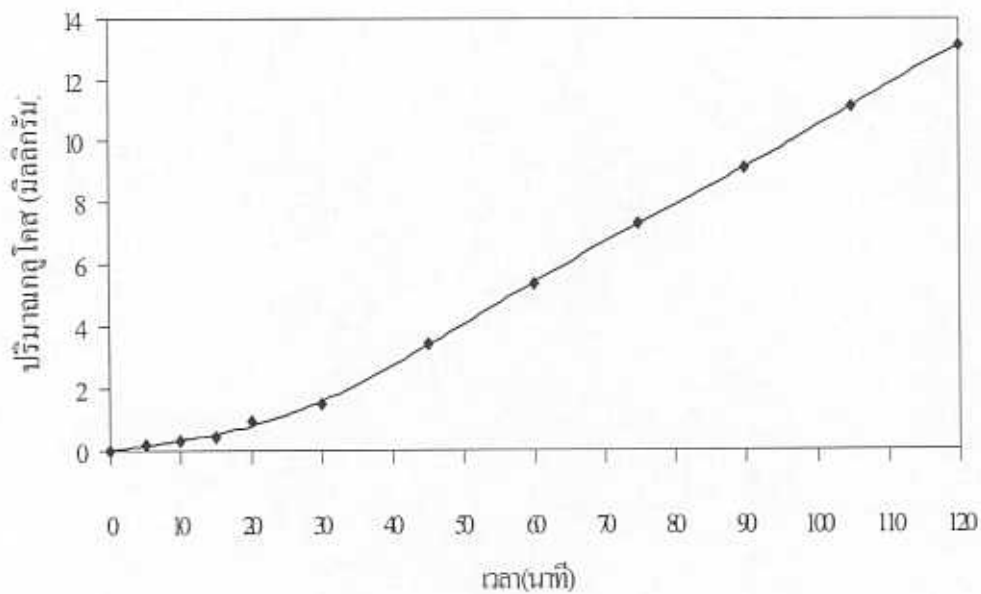
ทำการสร้างกราฟมาตรฐานของกลูโคส โดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกลูโคส (มิลลิกรัม/ลิตร) และค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้จากเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร โดยใช้วิธีของ Somogyi-Nelson กราฟมาตรฐานแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และศึกษาความเร็วรอบและชนิดของใบกวนที่เหมาะสม เพื่อให้ตัวถูกละลายในละลายแต่ละด้านมีความเป็นเนื้อเดียวกันทุกส่วน และไม่เกิดฟิล์มด้านระหว่างผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างทั้งสองด้านกับสารละลาย

การทดสอบการแพร่ของสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 1 % w/v ผ่าน 2 % w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล โดยใช้อุปกรณ์ดีฟิวชันเซลล์ที่สร้างขึ้น และทำการสุ่มสารละลายเพื่อหาปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2 % w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ณ ตำแหน่งต่างๆ 3 ตำแหน่ง ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที โดยใช้ใบกวนชนิด Pitched-blade turbine, Diskflat-blade turbine และ Marine-type propellers ที่ระดับความเร็วรอบในการกวน 180, 200 และ 220 รอบต่อนาที รายละเอียดความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่ตำแหน่งต่างๆ และการวิเคราะห์การกระจายตัวของกลูโคสทางสถิติโดยวิธี Single-Factor Repeated Measures Design ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 แสดงในภาคผนวก ข พบว่าการใช้ใบกวนชนิด Pitched-blade turbine ที่ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที จะไม่ทำให้เกิดการสะสมของสารถูกละลายที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นตัวอย่าง และทำให้สารถูกละลายมีการกระจายตัวทั่วทุกส่วนของสารละลายอย่างสม่ำเสมอ ในการใช้งานที่สภาวะการบรรจุสารละลายปริมาตร 180 มิลลิลิตร อุณหภูมิห้อง



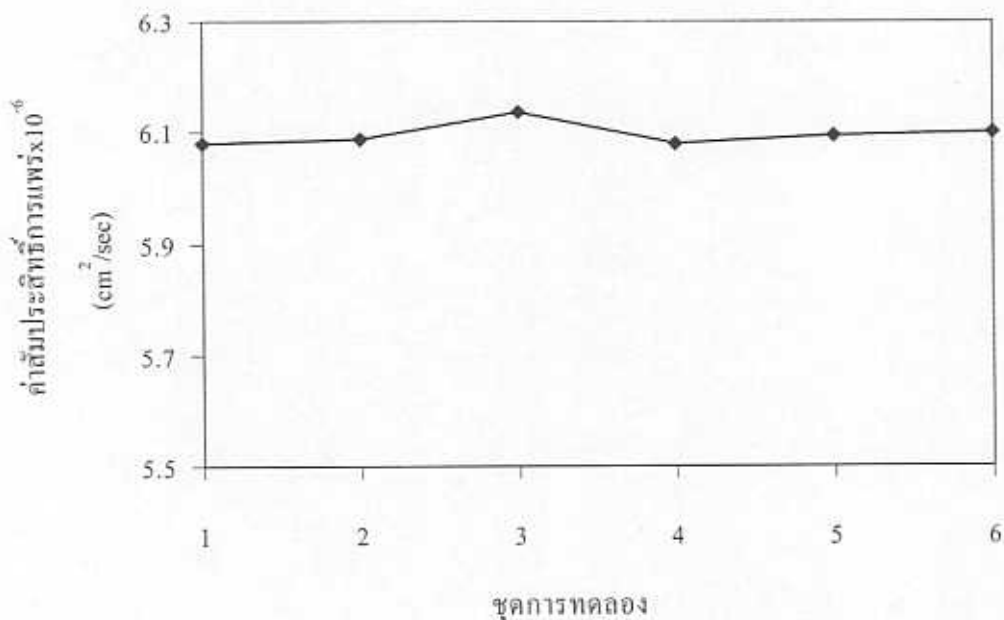
รูปที่ 4.2 กราฟมาตรฐานของกลูโคส

เมื่อทราบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้อุปกรณ์คิฟฟิชั่นเซลล์ จึงทำการทดสอบความถูกต้องและความแม่นยำ โดยทดสอบการแพร่ของสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 1 % w/v ผ่าน 2 % w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล พบว่าในช่วงเวลาดังแต่เริ่มทดสอบจนถึงนาที่ที่ 30 ปริมาณการแพร่ของน้ำตาลกลูโคสผ่านชั้นแคลเซียมแอลจีเนตจะค่อยๆเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นปริมาณการแพร่ผ่านของน้ำตาลกลูโคสจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สาเหตุที่การเพิ่มของปริมาณกลูโคสไม่คงที่ในช่วงแรก เพราะว่าในช่วงนี้ น้ำตาลกลูโคสจะแพร่ผ่านผิวสัมผัสของแคลเซียมแอลจีเนต ซึ่งมีขนาดของรูพรุนที่เล็กกว่าขนาดของรูพรุนที่อยู่ภายในชั้นเจล และมีน้ำตาลกลูโคสบางส่วนจะแพร่ไปยังส่วนต่างๆภายในชั้นเจล เพื่อให้เกิดสมดุลของน้ำตาลกลูโคสในชั้นเจล หลังจากนั้นน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ต่อมาจึงสามารถแพร่ผ่านเข้าและออกจากชั้นแคลเซียมแอลจีเนตได้ในอัตราเพิ่มขึ้นอย่างคงที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.3 ปริมาณน้ำดูดกลืนโคสที่เตรียมจากสารละลายกลูโคส 1%w/v ที่แพร่ผ่าน 2 %w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ที่อุณหภูมิห้อง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำดูดกลืนโคสที่เตรียมจากสารละลายกลูโคส 1%w/v ที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ที่เวลาต่างๆ เมื่อทำการลากเส้นตรงสัมผัสกับส่วนของเส้นกราฟ ในช่วงที่อัตราการเพิ่มของปริมาณน้ำดูดกลืนโคสคงที่มาตัดกับเส้นแกนของเวลา จะได้ค่าของเวลาที่เรียกว่า lag-time ซึ่งเวลาที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ โดยเวลา lag-time ถือได้ว่าเป็นเวลาที่เริ่มต้นของการเกิดการแพร่ของน้ำดูดกลืนโคสผ่าน 2% w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจลที่อัตราคงที่ การทดสอบในครั้งนี้ได้ทำการทดลอง 6 ชุดการทดลอง สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำดูดกลืนโคสความเข้มข้น 1% w/v ผ่าน 2% w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ที่อุณหภูมิห้อง ได้ค่าต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.4 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $6.096 \pm 0.021 \times 10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที โดยรายละเอียดการคำนวณกล่าวไว้ในภาคผนวก ค



รูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 1% w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ที่อุณหภูมิห้อง

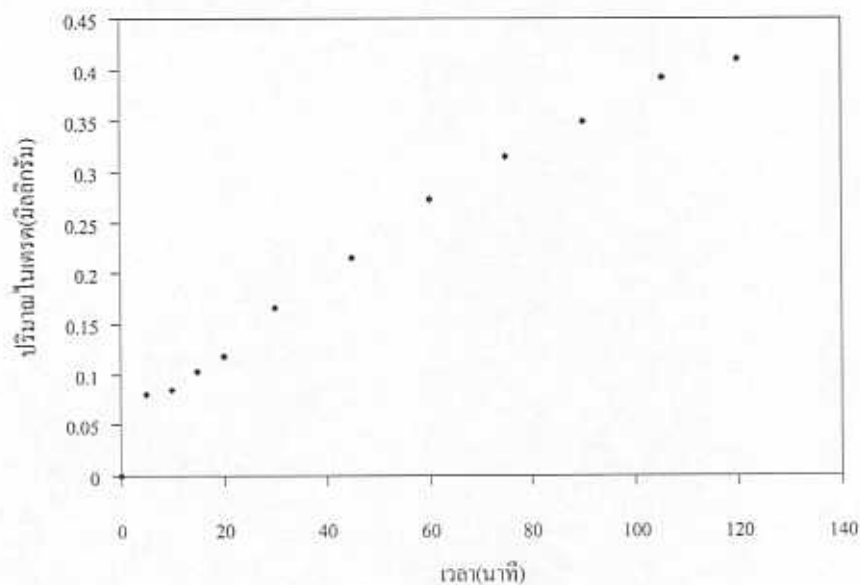
การทดสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ไฟฟ้าชั้นเซลล์ เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สร้างขึ้น โดยนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ที่อุณหภูมิห้อง ที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี t-test เปรียบเทียบกับค่าของ Hannoun และ Stepphanopoulos 6.1×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที [2] พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทั้งสองไม่มีค่าแตกต่างกันทางด้านสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 รายละเอียดการทดสอบทางสถิติกล่าวไว้ในภาคผนวก ง ซึ่งแสดงว่าอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือ จากวิธีการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้น จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆในหลายขั้นตอน เช่น การเตรียมตัวอย่าง การใช้อุปกรณ์เครื่องแก้ว เป็นต้น โดยในแต่ละขั้นตอนอาจเกิดความผิดพลาดที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้

4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาน้ำจืด

การศึกษาการแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาน้ำจืดชนิดต่างๆ จำนวน 9 ชนิด โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรดความเข้มข้นต่างกัน 4 ความเข้มข้น คือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %w/v เป็นแหล่งของไนเตรด ซึ่งจะบรรจุสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดไว้ที่ดิฟฟิวชันเซลล์ด้านหนึ่ง ส่วนอีกด้านหนึ่งของดิฟฟิวชันเซลล์จะบรรจุน้ำกลั่น โดยการแพร่จะเกิดในทิศทางของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังส่วนที่มีความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดต่ำกว่า คือจะเกิดการแพร่ของไนเตรดจากสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดผ่านชั้นปลาแล้วแพร่ต่อมายังส่วนที่เป็นน้ำกลั่น ซึ่งการแพร่ปริมาณการแพร่ของไนเตรดที่ผ่านออกมาจากชั้นปลาจะถูกวัดโดยใช้ NO_3^- electrode ที่จุ่มลงในสารละลายด้านความเข้มข้นต่ำ(น้ำกลั่น) ที่เวลาต่างๆตามที่กำหนด โดยไนเตรดที่ผ่านชั้นเนื้อปลาน้ำจืดจะทำปฏิกิริยากับ Internal standard ammonium sulfate (ISA) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของไอออน และอิเล็กโทรดสามารถอ่านค่าที่ชัดเจน ซึ่งค่าที่อ่านได้จาก NO_3^- electrode ที่ต่อเข้ากับ pH meter จะอ่านค่าออกมาในหน่วยมิลลิโวลต์ และนำค่าที่ได้มาแปลงกลับในรูปของความเข้มข้น รายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการพล็อตกราฟระหว่างปริมาณไนเตรดที่แพร่ออกมาจากชั้นปลาน้ำจืดที่ใช้ในการทดสอบทุกชนิดกับเวลา มีแนวโน้มของการแพร่ผ่านของไนเตรด ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าปริมาณไนเตรดที่เตรียมจากสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด 1%w/v ที่แพร่ผ่านชั้นเนื้อปลานิลในช่วง 5 นาทีแรก มีอัตราการแพร่ผ่านของไนเตรดที่สูงจากด้านสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดมายังด้านน้ำกลั่นเนื่องจากโมเลกุลของไนเตรดในช่วงนี้ จะเคลื่อนที่ผ่านไปตามช่องว่างระหว่างเส้นใยกล้ามเนื้อปลานิลซึ่งเปิดออกได้ทั้งสองด้านของชั้นเนื้อปลา จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ไนเตรดบางส่วนจะเริ่มมีการแพร่กระจายไปทั่วทั้งชั้นเนื้อปลานิล ทำให้อัตราการแพร่ผ่านของไนเตรดลดลง จนกระทั่งถึงเวลานาทีที่ 30 จากนั้นอัตราการแพร่ผ่านของไนเตรดจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ หลังจากเวลา 30 นาที ในช่วงที่อัตราการแพร่ผ่านของไนเตรดคงที่นี้ สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลานิลได้เท่ากับ $2.419 \pm 0.085 \times 10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นเนื้อปลานิลและปลาน้ำจืดชนิดอื่น ที่ความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v ที่อุณหภูมิห้อง แสดงในตารางที่ 4.1

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดที่เตรียมจากสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด 0.5 %w/v ที่แพร่ผ่านชั้นปลาน้ำจืดทั้ง 9 ชนิดที่ใช้ทดสอบ ที่อุณหภูมิห้อง ของปลาซิว ปลาช่อน ปลาขี้สาก ปลานิล ปลานวลจันทร์ ปลาชะโด ปลาโงก และปลากิน มีค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 2.804×10^{-6} ถึง 3.109×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ในขณะที่ปลานิลมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดต่ำกว่าปลาชนิดอื่น

คือมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดเท่ากับ 2.602×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ส่วนปลาไนมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดสูงที่สุด เท่ากับ 3.585×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดเป็น 1.0 %w/v พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลาน้ำจืดทั้ง 9 ชนิด มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 2.349×10^{-6} ถึง 2.991×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที โดยที่ปลาช่อนมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดสูงที่สุด และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดเพิ่มเป็น 1.5, และ 2.0 %w/v ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลาน้ำจืดทั้ง 9 ชนิด มีค่าลดลงตามลำดับ แต่แนวโน้มที่ลดลงจะค่อยๆ น้อยลง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดอยู่ในช่วง 2.323×10^{-6} ถึง 2.592×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และ 2.239×10^{-6} ถึง 2.491×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดในเนื้อปลาน้ำจืดแต่ละชนิดนั้น ขึ้นอยู่กับความแตกต่างขององค์ประกอบในเนื้อปลา อายุของปลา อาหารที่ใช้เลี้ยง ฤดูกาล รวมทั้งวิธีการเก็บรักษาปลาสด ซึ่งทำการควบคุมได้ยาก



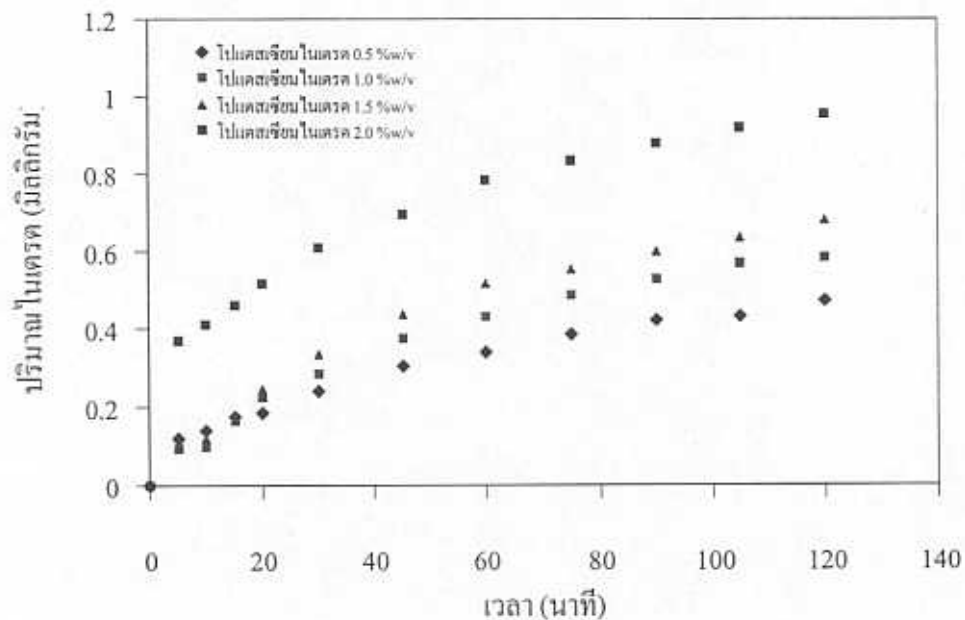
รูปที่ 4.5 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลานิล โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรดความเข้มข้น 0.5%w/v อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาน้ำจืด ที่เตรียมจากสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 ,1.5 และ 2%w/v ที่อุณหภูมิห้อง

ชนิดปลา	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไนเตรด $\times 10^6$ (ตารางเซนติเมตร/วินาที)			
	0.5 %w/v KNO ₃	1.0 %w/v KNO ₃	1.5 %w/v KNO ₃	2.0 %w/v KNO ₃
ปลาสาหร่าย(<i>Pangasianodon hypophthalmus</i>)	2.840±0.147	2.349±0.101	2.341±0.098	2.317±0.094
ปลาชี่สก(<i>Probarbus jullieni</i>)	2.804±0.178	2.560±0.100	2.358±0.086	2.343±0.104
ปลาไน(<i>Cyprinus carpio</i>)	3.585±0.296	2.724±0.207	2.497±0.148	2.491±0.135
ปลานิล(<i>Tilapia nilotica</i>)	2.602±0.112	2.419±0.085	2.323±0.057	2.239±0.116
ปลาช่อน(<i>Channa striatus</i>)	2.991±0.038	2.991±0.023	2.468±0.077	2.365±0.107
ปลานวลจันทร์(<i>Cirrhina microlepis</i>)	3.109±0.234	2.659±0.104	2.497±0.050	2.239±0.061
ปลาชะโด(<i>Chana micropeltes</i>)	2.950±0.193	2.597±0.128	2.411±0.053	2.473±0.366
ปลาโกล(<i>Cyclocheilichthys enoplos</i>)	2.977±0.206	2.826±0.181	2.570±0.311	2.392±0.044
ปลาจีน(<i>Hypophthalmichthys sp.</i>)	2.944±0.512	2.613±0.079	2.592±0.131	2.389±0.167

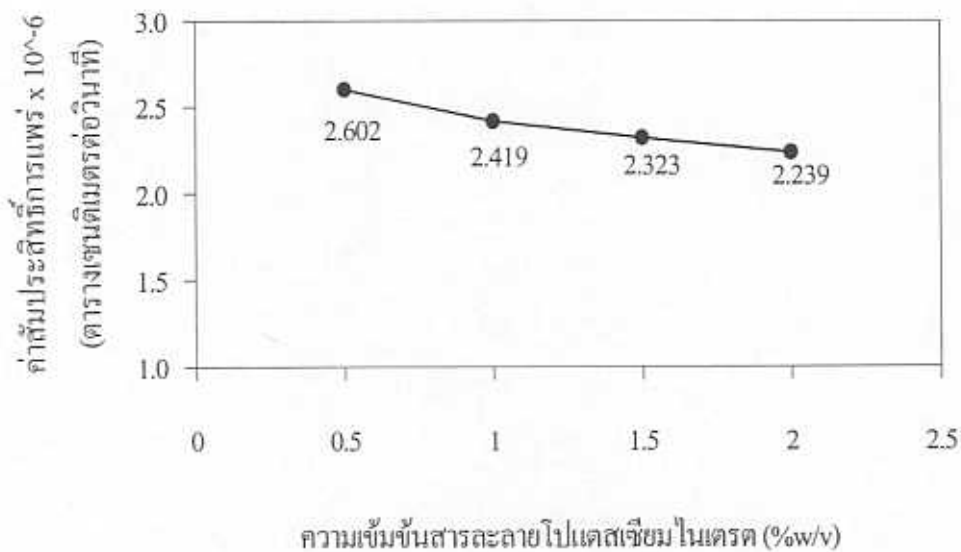
4.4 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลายไนเตรดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดที่แพร่ผ่านเนื้อปลาน้ำจืด

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดที่เตรียมจากสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %w/v ที่แพร่ผ่านชั้นเนื้อปลาน้ำจืดทั้ง 9 ชนิดที่ทดสอบ ที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังในตารางที่ 4.1 โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นเนื้อปลาน้ำจืดทั้ง 9 ชนิด มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือโปแตสเซียมไนเตรดที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้โปรตีนที่อยู่ในเนื้อปลาเกิดการหดตัวเกาะกันแน่นขึ้น ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยกล้ามเนื้อลดลง [12] ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของไนเตรดจึงลดลงเช่นกัน



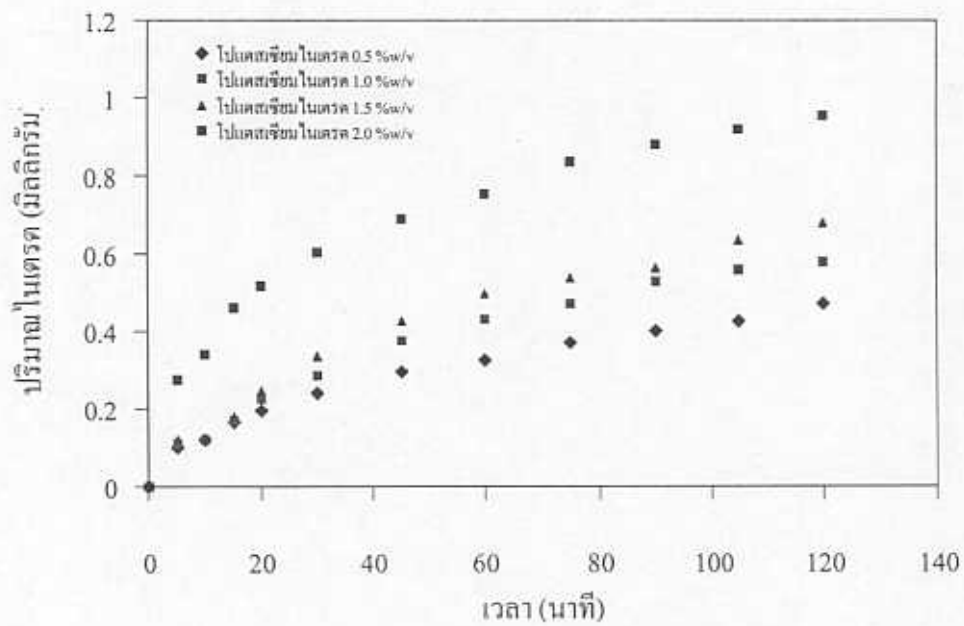
รูปที่ 4.6 ปริมาณอินซูลินที่แพร่ผ่านชั้นปาลานิล โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.0 %w/v อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ปริมาณอินซูลินที่แพร่ผ่านชั้นเนื้อปาลานิลในช่วงแรกจะมีอัตราการแพร่ผ่านที่สูง ที่ทุกระดับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด เนื่องจากโมเลกุลของอินซูลินเคลื่อนที่ผ่านไปตามช่องว่างระหว่างเส้นใยกล้ามเนื้อปาลานิล ซึ่งเปิดออกได้ทั้งสองด้านของชั้นเนื้อ ทำให้ปริมาณอินซูลินที่เตรียมจากสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดที่มีความเข้มข้น 2 %w/v มีค่าสูงกว่าสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นในช่วง 40-60 นาทีแรก หลังจากนั้นอัตราการแพร่ผ่านของอินซูลินจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ แต่ลดลงเมื่อเทียบกับในช่วงแรก โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินซูลินที่เตรียมจากสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.0 %w/v ผ่านชั้นเนื้อปาลานิล มีค่าเท่ากับ 2.602×10^{-6} , 2.419×10^{-6} , 2.323×10^{-6} และ 2.239×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินซูลินผ่านปาลานิลชนิดอื่นก็มีแนวโน้มเดียวกัน

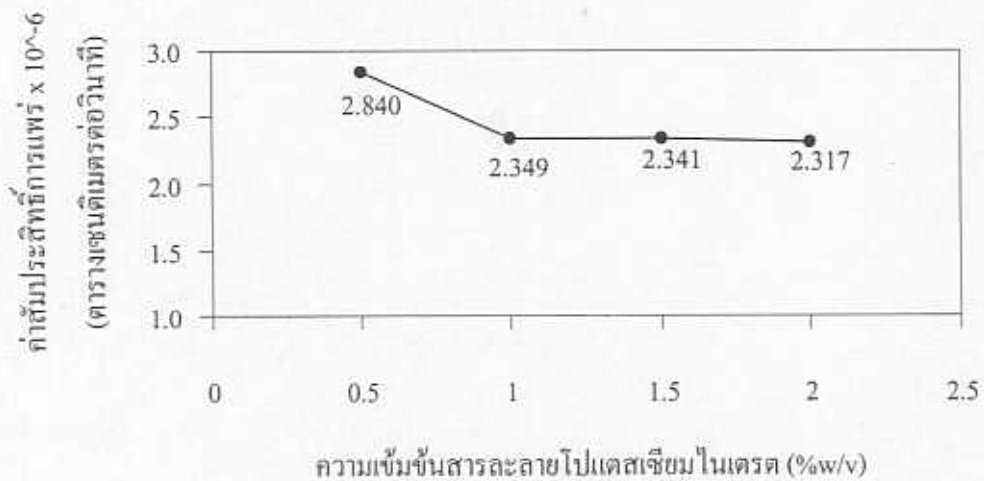


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นพลาโนล
กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด

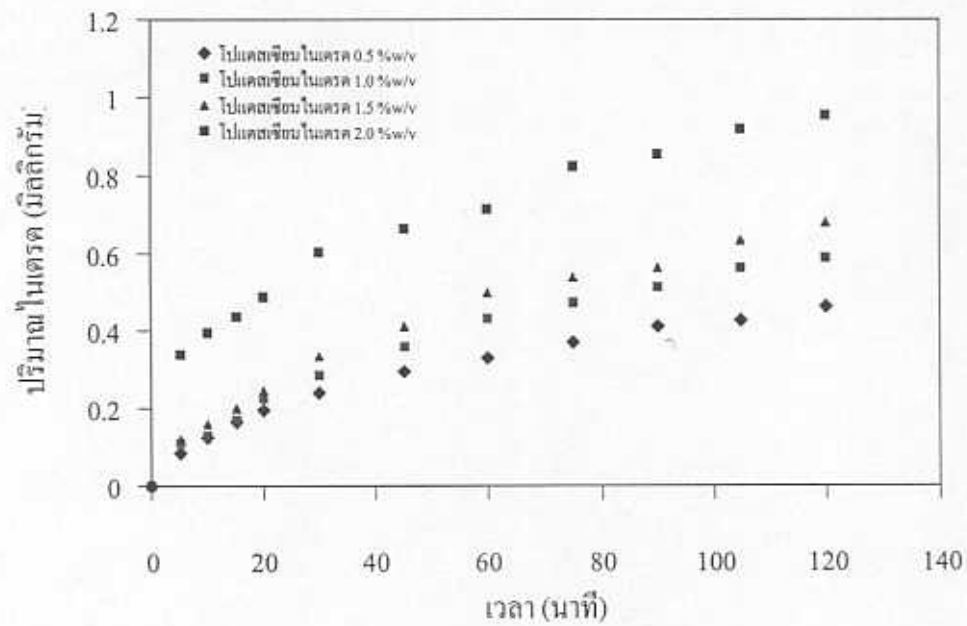
ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นพลาโนลน้ำจืดชนิดอื่นๆ ที่ใช้ทดสอบ โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.0 %w/v อุณหภูมิห้อง และความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดกับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด แสดงในรูปที่ 4.8-4.23



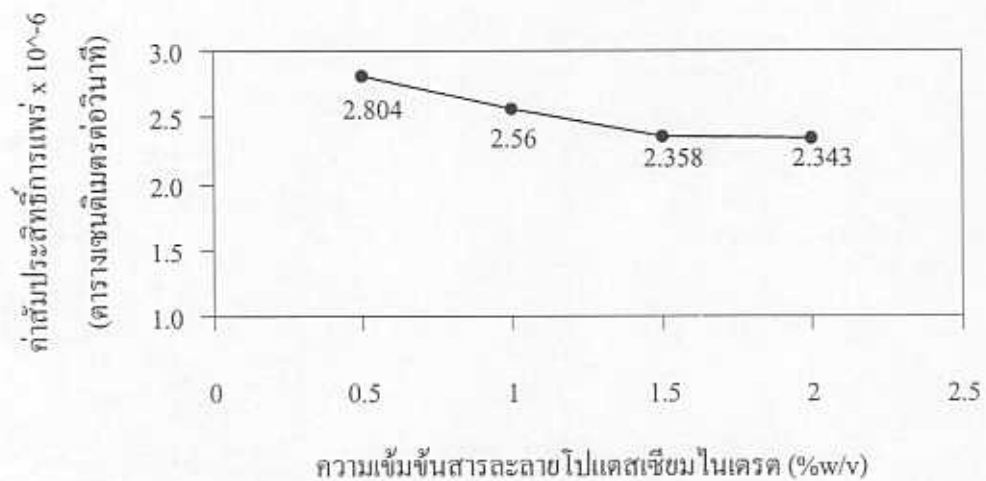
รูปที่ 4.8 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นพลาสติก โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.0 %w/v อุณหภูมิห้อง



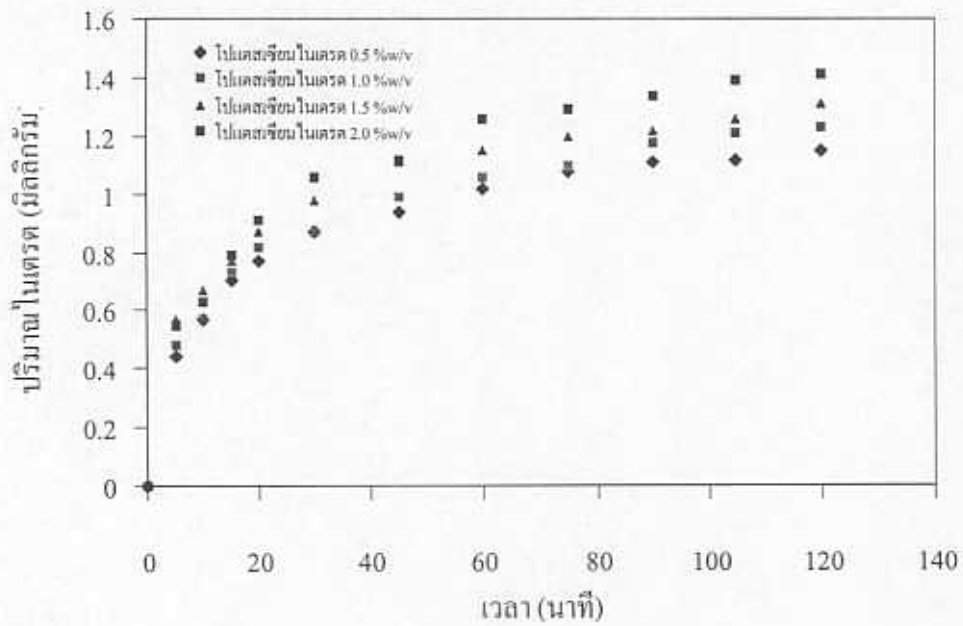
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นพลาสติก กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด



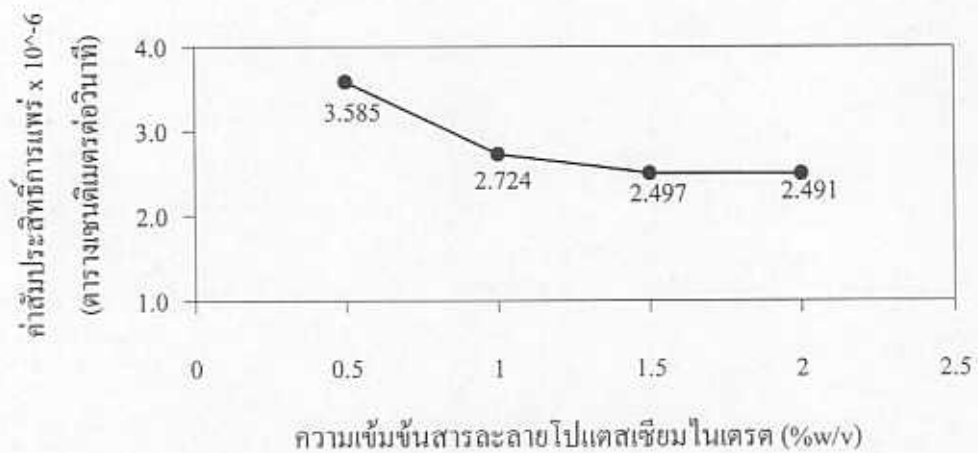
รูปที่ 4.10 ปริมาณอินซูลินที่แพร่ผ่านชั้นปลายี่สก โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมอินซูลิน ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.0 %w/v อุณหภูมิห้อง



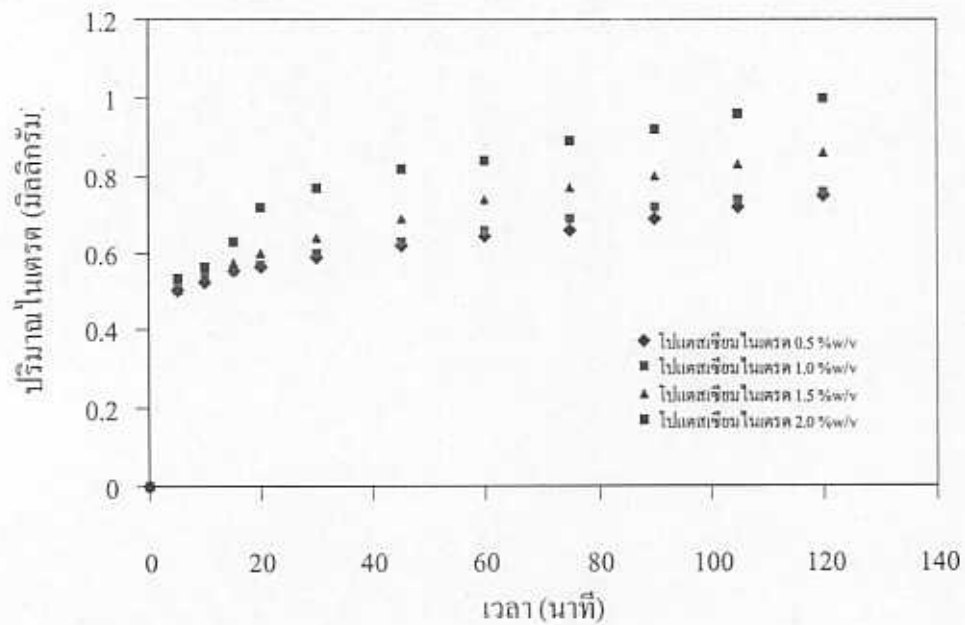
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินซูลินผ่านชั้นปลายี่สก กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมอินซูลิน



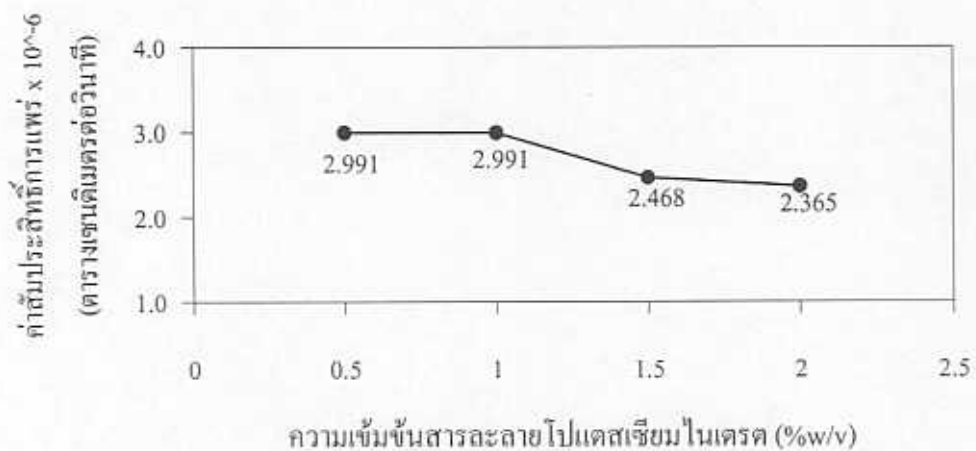
รูปที่ 4.12 ปริมาณอินซูลินที่แพร่ผ่านชั้นปลาไน โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมอินซูลิน ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.0 %w/v อุณหภูมิห้อง



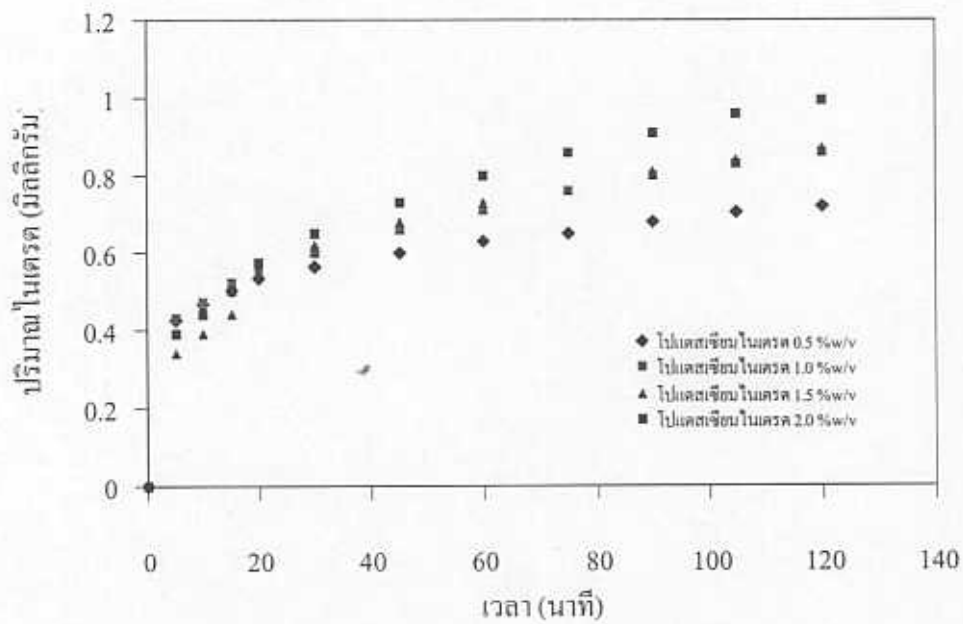
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินซูลินผ่านชั้นปลาไน กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมอินซูลิน



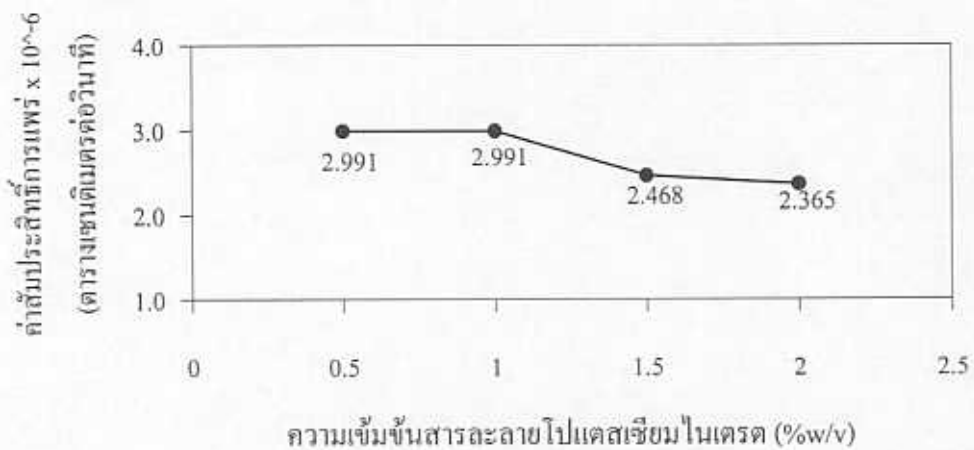
รูปที่ 4.14 ปริมาณอินซูลินที่แพร่ผ่านชั้นปลาช่อน โดยใช้สารละลายโปรตีนอินซูลิน ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 %w/v อุณหภูมิห้อง



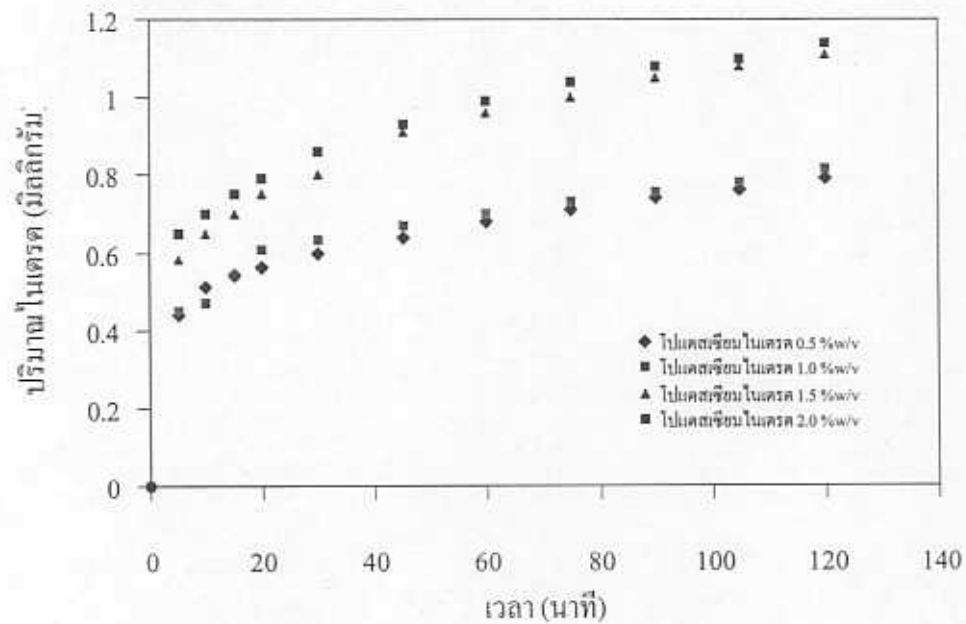
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินซูลินผ่านชั้นปลาช่อน กับความเข้มข้นของสารละลายโปรตีนอินซูลิน



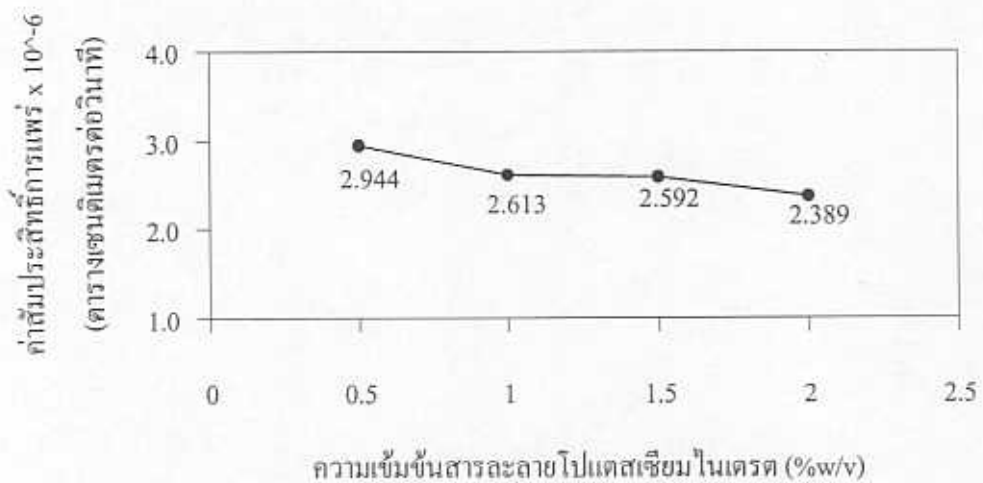
รูปที่ 4.16 ปริมาณอินซูลินที่แพร่ผ่านชั้นปลาชะโด โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมอินซูลิน ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.0 %w/v อุณหภูมิห้อง



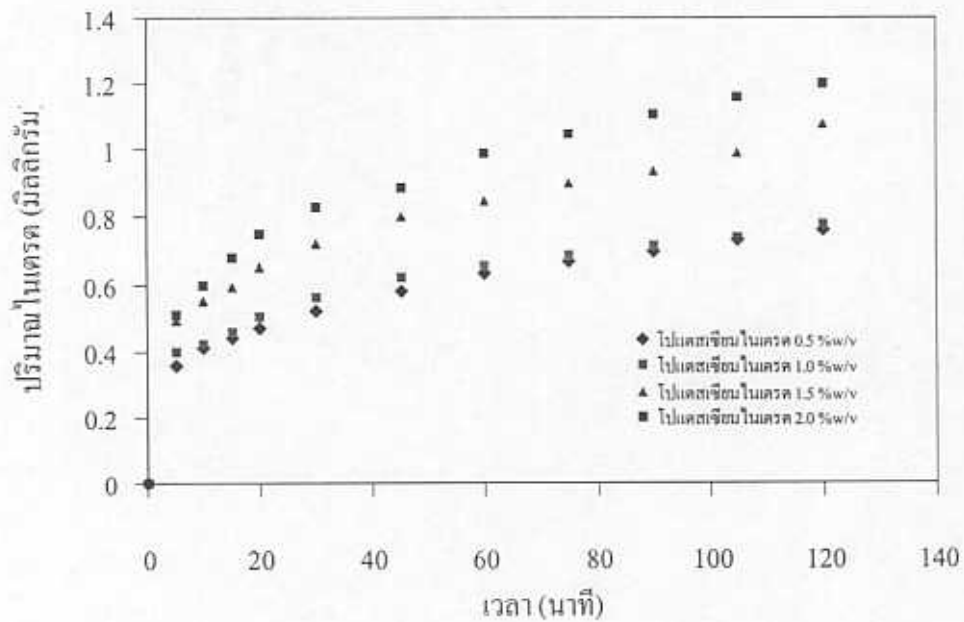
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินซูลินผ่านชั้นปลาชะโด กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมอินซูลิน



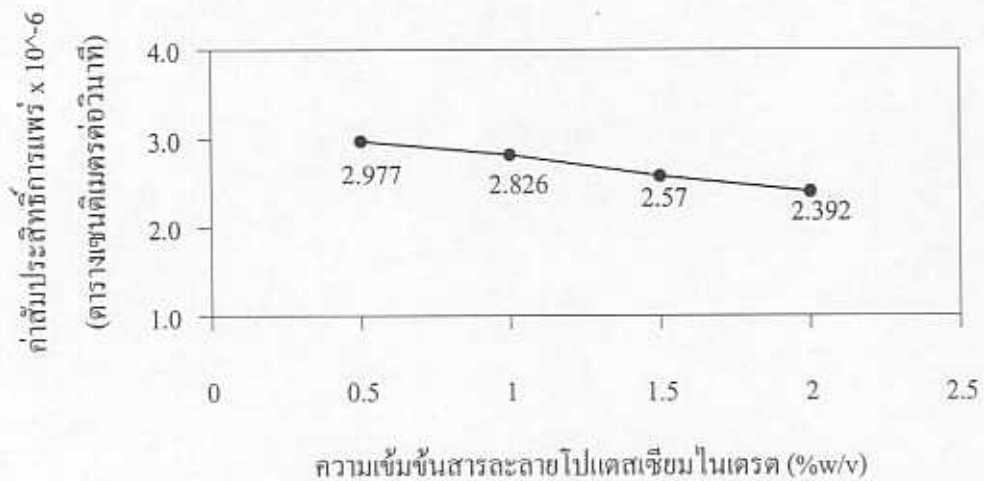
รูปที่ 4.18 ปริมาณอินซูลินที่แพร่ผ่านชั้นปลาจีน โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.0 %w/v อุณหภูมิห้อง



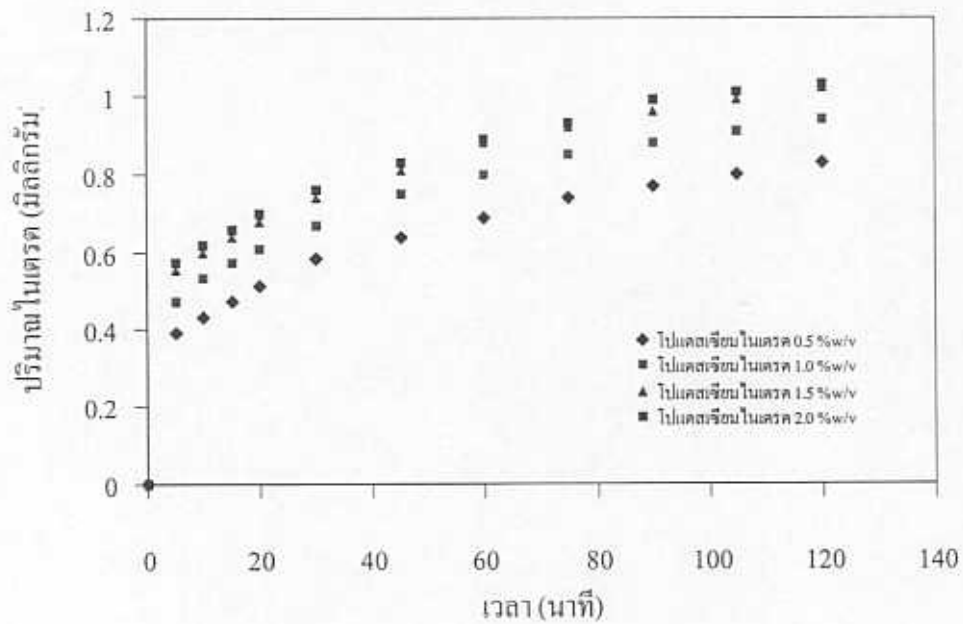
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลาจีน กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด



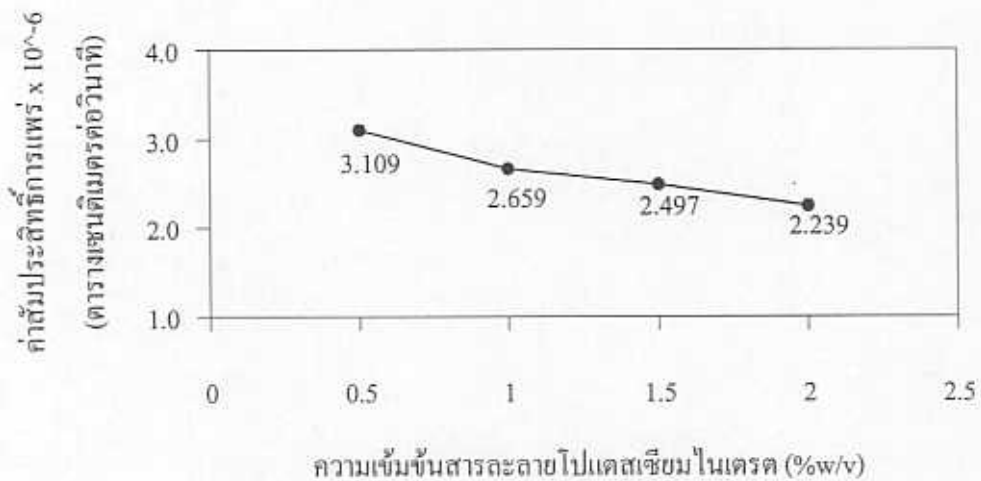
รูปที่ 4.20 ปริมาณอินซูลินที่แพร่ผ่านชั้นปลาโจก โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมอินเตรด ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.0 %w/v อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินเตรดผ่านชั้นปลาโจก กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมอินเตรด



รูปที่ 4.22 ปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นปลานวลจันทร์ โดยใช้สารละลายโปแตสเซียมไนเตรด ความเข้มข้น 0.5 1.0 , 1.5 และ 2.0 %w/v อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นปลานวลจันทร์ กับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด

บทที่ 5

การสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 การสรุปผลการศึกษา

5.1.1 อุปกรณ์ไฟฟ้าชั้นเซลล์ที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ทำจากอะคริลิก ประกอบด้วยส่วนบรรจุสารละลายทรงกระบอก 2 อัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.0 เซนติเมตร ความสูง 12.0 เซนติเมตร ระหว่างทรงกระบอกทั้งสองเจาะช่องสำหรับกำหนดพื้นที่ในการแพร่ผ่านของสารที่จะศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 เซนติเมตร และช่องใส่ชั้นตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 เซนติเมตร สามารถกำหนดความเร็วรอบในการกวนโดยชุดเครื่องความเร็วรอบและเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า และกำหนดความหนาของตัวอย่างได้จากความหนาของแผ่นอะคริลิก

5.1.2 การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าชั้นเซลล์ที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้น เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยทำการศึกษากการแพร่ผ่านของน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษาคือ ที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วรอบในการกวน 220 รอบต่อนาที ใช้ใบกวนชนิด Pitched-blade turbine จากการศึกษาเพื่อทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล โดยวิธี lag-time มีค่าเท่ากับ $6.096 \pm 0.021 \times 10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และเมื่อทดสอบความถูกต้องโดยนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้มาทำการทดสอบทางสถิติด้วยวิธี t-test เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองของ Hannoun และ Stephanopoulos [2] พบว่าค่าทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

5.1.3 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรด ที่เตรียมจากสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v ผ่านชั้นเนื้อปลาน้ำจืดที่ตัดตามแนวยาวหรือขนาดกบกับลำตัวพบว่าปริมาณไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นเนื้อปลาในช่วง 5 นาทีแรก จะมีอัตราการแพร่ผ่านที่สูง เนื่องจากโมเลกุลของไนเตรดเคลื่อนที่ผ่านไปตามช่องว่างระหว่างเส้นใยกล้ามเนื้อปลา ซึ่งเปิดออกได้ทั้งสองด้านของชั้นเนื้อปลา จากนั้นไนเตรดบางส่วนจะเริ่มมีการแพร่กระจายไปทั่วทั้งชั้นเนื้อปลา ทำให้อัตราการแพร่ผ่านของไนเตรดลดลง จากนั้นอัตราการแพร่ผ่านของไนเตรดจะเริ่มคงที่ หลังจากเวลา 30 นาที ในช่วงที่อัตราการแพร่ผ่านของไนเตรดคงที่นี้ สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ได้ โดยค่า

สัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นเนื้อปลาน้ำจืดทั้ง 9 ชนิด ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0%w/v ที่อุณหภูมิห้อง แสดงในตารางที่ 4.1

5.1.4 ความเข้มข้นของไนเตรดที่เตรียมจากสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดที่ความเข้มข้นต่างกัน มีผลต่อการแพร่การศึกษาการแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นเนื้อปลาน้ำจืด พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดที่แพร่ผ่านชั้นเนื้อปลาน้ำจืดทั้ง 9 ชนิด มีค่าอยู่ในช่วง 2.317×10^{-6} ถึง 3.585×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นเนื้อปลาทุกชนิด มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรดเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือที่เพิ่มขึ้น ทำให้โปรตีนที่อยู่ในเนื้อปลาเกิดการหดตัวเกาะกันแน่นขึ้น ส่งผลให้ช่องว่างเส้นใยกล้ามเนื้อลดลง

5.1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไนเตรดผ่านชั้นเนื้อปลาน้ำจืดที่ได้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการแปรูปผลิตภัณฑ์ปลาน้ำจืด เพื่อกำหนดเวลาและความเข้มข้นของสารโปแตสเซียมไนเตรดที่ใช้ในผลิตภัณฑ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อพึงระวังในการใช้อุปกรณ์คัพฟิวชันเซลล์นี้

- ในการประกอบอุปกรณ์คัพฟิวชันเซลล์เพื่อทำการศึกษา ควรทำด้วยความรวดเร็วและหาสารกันรั่วซึมระหว่างอุปกรณ์แต่ละชิ้น และต้องระวังไม่ให้สารกันรั่วซึมสัมผัสกับชิ้นตัวอย่างเพราะจะมีผลต่อพื้นที่ในการแพร่ของสารละลายในชิ้นตัวอย่าง

- การบรรจุสารละลายและน้ำกลั่นลงไปในคัพฟิวชันเซลล์ จะต้องเทลงในอ่างบรรจุสารละลายทั้งสองด้านพร้อมๆกัน และทำการจับเวลาทันทีหลังการเติมสารละลายเรียบร้อยแล้ว

- ควรทำการติดตั้งใบกวน เครื่องแปลงไฟฟ้า และเครื่องปรับความเร็วรอบที่ต้องการให้พร้อมก่อนทำการทดสอบสารละลาย เพื่อให้สามารถทำการกวนได้ทันทีพร้อมกับการจับเวลา

5.2.2 ข้อเสนอแนะทั่วไป

- อุปกรณ์คัพฟิวชันเซลล์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น สามารถนำไปใช้ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารอาหารได้หลายชนิด แต่จะต้องสอดคล้องกับทฤษฎีและสมมติฐานที่กำหนด

- การศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารถูกละลายผ่านเนื้อปลาน้ำจืด โดยทำการออกแบบอุปกรณ์เพิ่มเติม เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิและป้องกันการระเหยของสารละลาย

- ควรทำการศึกษาค่าการแพร่ของสารถูกละลายชนิดอื่นๆ เช่น น้ำตาล เกลือชนิดต่างๆ เช่น เกลือสินเธาว์ เกลือไอโอดีน เกลือทะเล ซึ่งเป็นสารที่ใช้มากในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ปลาน้ำจืด

- ควรทำการศึกษาค่าการแพร่ของสารถูกละลายในปลาน้ำจืดชนิดอื่นๆเพิ่มเติม พร้อมทั้งองค์ประกอบของวัตถุดิบว่ามีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่อย่างไร

เอกสารอ้างอิง

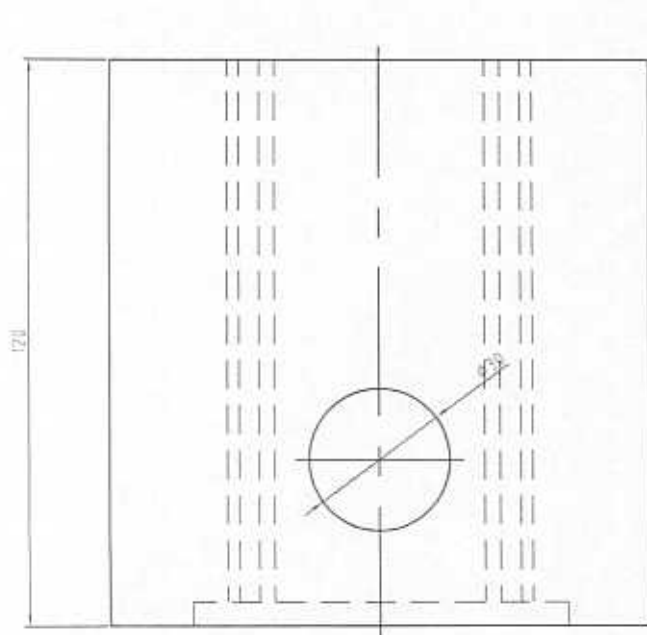
1. วีระ อวิคุณประเสริฐ, 2540, การพัฒนาอุปกรณ์ดีฟิวชันเซลล์เพื่อวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ ของ สารอาหาร, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , 68 หน้า.
2. Hannoun, B.J.M. and Stephanopoulos, G., 1986, "Diffusion Coefficients of Glucose and Ethanol in Cell-free and Cell-occupied Calcium Alginate Membranes," **Biotechnology and Bioengineering**, Vol. 28, No. 6, pp. 829-835.
3. Teixeira, J.A., Mota, M. and Venancio, A., 1994, "Model Identification and Diffusion Coefficients Determination of Glucose and Malic Acid in Calcium Alginate Membranes," **The Chemical Engineering Journal**, Vol. 56, No.1, pp. B9-B14.
4. Djelveh, G., Gros, J.B. and Bories, B., 1989, "An Improvement of Cell Diffusion Method for the Rapid Determination of Diffusion Constants in Gels or Foods," **Journal of Food Science**, Vol.54, No. 1, pp. 166-169.
5. Fox, J.B., JR., 1980, "Diffusion of chloride, Nitrite and Nitrate in Beef and Pork," **Journal of Food Science**, Vol.45, No.6, pp. 1740-1744.
6. รัตนา จิระรัตนานนท์, 2538, การถ่ายเทมวลสาร, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 26-28.
7. Imerson, A., 1992, Thickening and Gelling Agents For Food, Cambridge, Blackie Academic & Professional, pp. 1-24.
8. คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, 2543, วิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 282-283.

9. สีวพร สีวเวช, 2535, วัตถุเจือปนอาหารในผลิตภัณฑ์อาหาร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม, หน้า 193-195.
10. Crank, J., 1975, The Mathematics Of Diffusion, 2nd ed., Oxford, Clarendon, 414 p.
11. Geankoplis, C.J., 1993, Transport Process and Unit Operations, 3rd ed., New Jersey, Prentice-Hall, 921p.
12. Pomeraz, Y., 1986, Functional Properties of Food components, Academic Press, San Diego, 560 p.

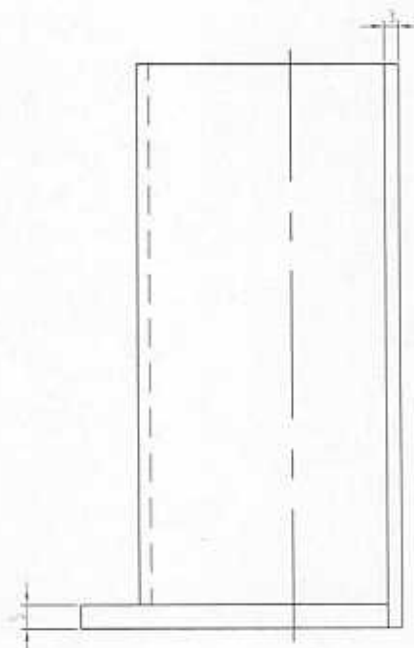
ภาคผนวก ก
อุปกรณ์ไฟฟ้าชั้นเซลล์

การออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าชั้นเซลล์ที่ใช้ในการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ซึ่งทำจากอะครี
ลิก ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

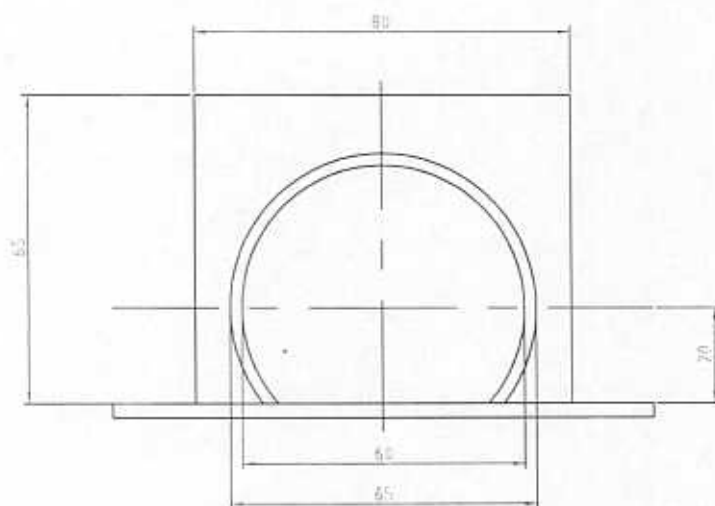
1. ส่วนบรรจุสารละลาย รายละเอียดในรูปที่ ก.1
2. แผ่นสำหรับใส่ชิ้นตัวอย่าง
3. ชุดใบกวน
4. ชุดควบคุมความเร็วรอบ
5. เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง



FRONT VIEW



SIDE VIEW

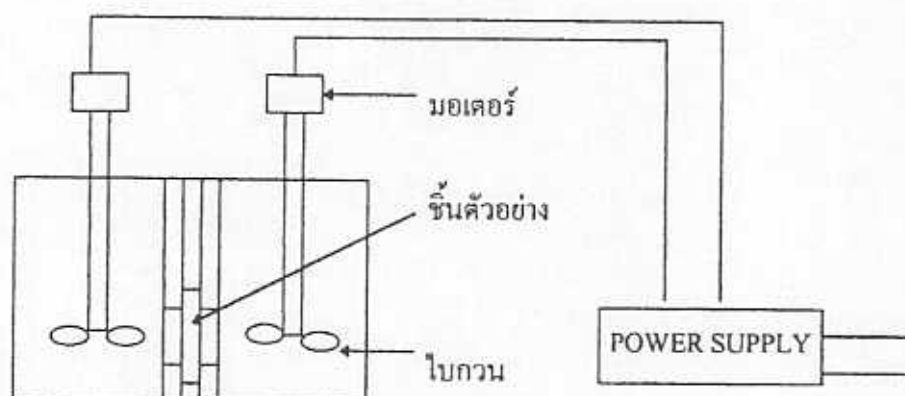


TOP VIEW

รูปที่ ก.1 ภาพเขียนแบบส่วนบรรจุสารละลาย

ภาคผนวก ข
การหาความเร็วรอบที่เหมาะสม

หลังจากได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ได้ทำการหาความเร็วรอบที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยทำการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลกลูโคส 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ที่สภาวะสารละลายปริมาตร 180 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิห้อง และทำการเก็บตัวอย่างสารละลายบริเวณต่างๆ 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แสดงตำแหน่งการเก็บตัวอย่างสารละลาย

ตำแหน่งที่สุ่มตัวอย่าง

- ตำแหน่งที่ 1 บริเวณผิวหน้าชิ้นตัวอย่างกับสารละลาย
- ตำแหน่งที่ 2 บริเวณส่วนบนของสารละลาย
- ตำแหน่งที่ 3 บริเวณส่วนล่างของสารละลาย

ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60 นาที โดยใช้ความเร็วรอบของการกวนในอัตรา 180 , 200 และ 220 รอบต่อนาที ซึ่งข้อมูลที่ได้ในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ ข.1 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2% w/v แกลเซียมแอลจีเนต เจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
5	1.24	1.04	0.88
10	2.07	1.56	1.23
15	2.81	2.06	2.16
20	6.27	5.23	5.04
30	10.12	8.32	7.89
45	29.41	21.48	20.12
60	40.16	28.32	30.19

ตารางที่ ข.2 การวิเคราะห์สถิติ วิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แกลเซียมแอลจีเนต โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

Source of variation	SS	df	MS	F
ระหว่างตำแหน่ง	56.34761	2	28.1738	4.254927*
ภายในตำแหน่ง	2888.726	18	160.4848	24.23708*
เวลา	2809.268	6	468.2113	70.71125*
ความผิดพลาด	79.45746	12	6.621455	
รวม	2945.073	20		

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ ข.3 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2% w/v แคลเซียมแอลจีเนต ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
5	1.22	1.16	0.98
10	2.34	1.92	1.92
15	2.98	2.17	2.41
20	5.34	5.12	4.89
30	10.26	7.69	8.42
45	25.13	22.16	20.16
60	35.49	30.11	31.02

ตารางที่ ข.4 การวิเคราะห์สถิติวิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนต โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

Source of variation	SS	df	MS	F
ระหว่างตำแหน่ง	15.36892	2	7.684462	5.172726*
ภายในตำแหน่ง	2626.302	18	145.9057	98.21508*
เวลา	2608.475	6	434.7459	292.6452*
ความผิดพลาด	17.82688	12	1.485573	
รวม	2641.671	20		

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ ข.5 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2% w/v แคลเซียมแอลจีเนต เจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
5	1.12	0.92	1.12
10	1.63	1.73	1.74
15	2.83	2.65	2.37
20	5.20	5.46	5.31
30	8.98	8.57	8.61
45	21.12	20.76	20.64
60	31.84	32.42	31.02

ตารางที่ ข.6 การวิเคราะห์สถิติ วิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนต โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched-blade turbine ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที

Source of variation	SS	df	MS	F
ระหว่างตำแหน่ง	0.303581	2	0.15179	1.703991
ภายในตำแหน่ง	2453.977	18	136.3321	1530.456*
เวลา	2452.908	6	408.8181	4589.369*
ความผิดพลาด	1.068952	12	0.089079	-
รวม	2454.281	20	-	-

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ ข.7 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2% w/v แกลเซียมแอลจีเนต เจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด diskflat-blade turbine ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
5	1.34	1.02	0.86
10	2.16	1.67	1.83
15	3.34	2.68	2.15
20	5.78	6.18	5.13
30	10.87	8.38	7.96
45	28.43	22.04	19.48
60	43.45	32.42	31.41

ตารางที่ ข.8 การวิเคราะห์สถิติ วิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แกลเซียมแอลจีเนต โดยใช้ใบพัดชนิด diskflat-blade turbine ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

Source of variation	SS	df	MS	F
ระหว่างตำแหน่ง	56.00418	2	28.00209	4.089332*
ภายในตำแหน่ง	3219.544	18	178.8635	26.12063*
เวลา	3137.373	6	522.8954	76.3619*
ความผิดพลาด	82.17115	12	6.847595	
รวม	3275.548	20		

* แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ ข.9 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2% w/v แคลเซียมแอลจีเนต ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด diskflat-blade turbine ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
5	0.76	1.34	1.11
10	2.35	1.75	1.56
15	2.77	2.43	2.19
20	5.61	4.78	5.14
30	11.62	8.76	8.19
45	24.32	22.13	20.98
60	36.17	30.62	30.09

ตารางที่ ข.10 การวิเคราะห์สถิติ วิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนต โดยใช้ใบพัดชนิด diskflat-blade turbine ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

Source of variation	SS	df	MS	F
ระหว่างตำแหน่ง	16.72106	2	8.360529	5.143953*
ภายในตำแหน่ง	2644.828	18	146.9349	90.40412*
เวลา	2625.324	6	437.554	269.2124*
ความผิดพลาด	19.50374	12	1.625312	-
รวม	2661.549	20	-	-

* แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ ข.11 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2% w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด diskflat-blade turbine ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
5	1.32	0.98	1.08
10	1.76	2.03	1.54
15	2.56	2.86	1.99
20	5.74	6.08	5.17
30	10.67	9.71	8.69
45	22.33	20.16	20.32
60	34.15	32.92	30.28

ตารางที่ ข.12 การวิเคราะห์สถิติ วิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนต โดยใช้ใบพัดชนิด diskflat-blade turbine ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที

Source of variation	SS	df	MS	F
ระหว่างตำแหน่ง	6.142638	2	3.071319	4.871869*
ภายในตำแหน่ง	2539.722	18	141.0957	223.8125*
เวลา	2532.157	6	422.0262	669.4375*
ความผิดพลาด	7.565029	12	0.630419	
รวม	2545.865	20		

* แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ ข.13 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2% w/v แกลเซียมแอลจีเนท เจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด Marine-type propeller ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
5	1.81	1.04	0.98
10	1.93	1.16	1.32
15	3.05	2.37	2.13
20	5.01	6.03	4.04
30	14.27	12.01	10.12
45	30.16	23.4	20.08
60	39.87	30.16	24.36

ตารางที่ ข.14 การวิเคราะห์สถิติ วิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แกลเซียมแอลจีเนท โดยใช้ใบพัดชนิด Marine-type propeller ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

Source of variation	SS	df	MS	Fo
ระหว่างตำแหน่ง	79.21378	2	39.60689	4.391883*
ภายในตำแหน่ง	2797.007	18	155.3893	17.23063*
เวลา	2688.789	6	448.1315	149.69189*
ความผิดพลาด	108.2184	12	9.018202	
รวม	2876.221	20		

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ ข.15 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2% w/v แกลเซียมแอลจีเนทเจล ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด Marine-type propeller ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
5	1.28	1.1	0.88
10	1.68	1.47	1.13
15	2.51	2.42	1.79
20	6.13	4.26	5.62
30	12.13	9.56	9.12
45	30.12	24.72	20.64
60	40.36	34.24	36.06

ตารางที่ ข.16 การวิเคราะห์สถิติ วิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แกลเซียมแอลจีเนท โดยใช้ใบพัดชนิด Marine-type propeller ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

Source of variation	SS	df	MS	F
ระหว่างตำแหน่ง	30.31121	2	15.1566	4.292982*
ภายในตำแหน่ง	3539.511	18	196.6395	55.70017*
เวลา	3497.148	6	582.8579	165.1005*
ความผิดพลาด	42.36386	12	3.53031	
รวม	3569.823	20		

* แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ ข.17 ความเข้มข้นของกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2% w/v แกลเซียมแอลจีเนท ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิด Marine-type propeller ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
5	1.18	1.02	0.8
10	1.34	1.52	1.06
15	2.71	2.16	2.55
20	5.79	4.91	4.38
30	10.31	9.07	8.29
45	20.49	21.13	19.67
60	33.36	30.89	31.01

ตารางที่ ข.18 การวิเคราะห์สถิติ วิธี Single-Factor Repeated Measures Design ของความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่แพร่ผ่าน 2%w/v แกลเซียมแอลจีเนท โดยใช้ใบพัดชนิด Marine-type propeller ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

Source of variation	SS	df	MS	F
ระหว่างตำแหน่ง	3.965752	2	01.982876	5.074993*
ภายในตำแหน่ง	24669.423	18	137.1901	351.1258*
เวลา	2464.734	6	410.789	1051.377*
ความผิดพลาด	4.688581	12	0.390715	
รวม	2473.388	20		

* แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ภาคผนวก ค
การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ก.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคสผ่านแคลเซียมแอลจีเนต

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยวิธี lag-time ได้จาก
สมการ 2.17

$$Q = \frac{ACD}{l} \left(t_0 - \frac{l^2}{6D} \right)$$

เมื่อ

$$Q = 0$$

$$t_0 = \frac{l^2}{6D}$$

จะได้

$$D = \frac{l^2}{6t_0}$$

โดยที่

D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)

l = ความหนาของชั้นตัวอย่าง (เซนติเมตร)

t_0 = lag-time (วินาที)

ก.2 ตัวอย่างการคำนวณ

ชุดการทดลองที่ 1

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1 % w/v ผ่าน 2 % w/v แคลเซียมแอลจีเนต ที่อุณหภูมิห้อง

ชนิดใบกวน pitched-blade turbine

ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที

ความหนาของแคลเซียมแอลจีเนต = 0.20 เซนติเมตร

lag-time จากรูปที่ 4.3 = 18.209 นาที

= 1092.54 วินาที

$$\begin{aligned}\text{ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่} &= (0.2)^2 / (6 \times 1092.54) \\ &= 6.102 \times 10^{-6} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที}\end{aligned}$$

แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1 % w/v ผ่าน 2 % w/v แคลเซียมแอลจีเนต ที่อุณหภูมิห้อง เท่ากับ 6.102×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

จากการคำนวณโดยวิธีเดียวกัน สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคสผ่าน 2 % w/v แคลเซียมแอลจีเนต ของชุดทดลองอื่นๆ ได้ดังตาราง ก.1

ตารางที่ ก.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล ชนิดใบกวน pitch-blade turbine ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

ชุดการทดลอง	ความหนา Ca alginate gel (cm)	lag-time (min)	D (cm ² /sec)
1	0.20	18.209	6.102×10^{-6}
2	0.20	18.203	6.087×10^{-6}
3	0.20	18.279	6.079×10^{-6}
4	0.20	18.277	6.079×10^{-6}
5	0.20	18.234	6.094×10^{-6}
6	0.20	18.109	6.136×10^{-6}

ภาคผนวก ง
การทดสอบความถูกต้อง

ง.1 การทดสอบความถูกต้องในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1%w/v ผ่าน 2% w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจล

จากวิธีการทดสอบที่กล่าวไว้ในข้อ 3.3.2 โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1% w/v ผ่าน 2% w/v แคลเซียมแอลจีเนตเจลที่มีความถูกต้องเพียงใด และนำค่าที่ได้มาทดสอบทางสถิติโดยใช้วิธี t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

$$\mu = X \pm Z_{\alpha/2} (S / \sqrt{n}) \quad (ง-1)$$

$$S^2 = \sum (X_i - \bar{X})^2 / (n-1) \quad (ง-2)$$

โดยที่

- μ = ช่วงปริมาณค่าเฉลี่ย
- X = ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ
- X_i = ค่าที่ได้จากการทดสอบ
- S^2 = ความแปรปรวน
- n = จำนวนครั้งที่ทดสอบ

ในที่นี้

$$\alpha = 0.05$$

$$\alpha/2 = 0.025$$

เมื่อทำการทดสอบ 6 ครั้ง เปิดตาราง t ที่

$$df = n-1$$

$$df = 6-1 = 5$$

$$t_{\alpha/2} = 2.228$$

ทำการทดสอบสมมติฐานค่าที่ได้กับค่าอ้างอิง

$$H_0 : \mu = \mu_0$$

$$H_1 : \mu \neq \mu_0$$

โดยที่

μ_0 = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยอ้างอิง

μ = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยที่ทดสอบได้

ทำการทดสอบ t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

$$t = (X - \mu_0) / (S / \sqrt{n}) \quad (\text{ง-3})$$

$$df = n - 1$$

การทดสอบทางสถิติ t-test

1. สมมติฐานการทดสอบ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนต ที่ได้จากการทดสอบน่าจะมีค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของ Hannoun และ Stephanopoulos [2]

2. สมมติฐานทางสถิติ

$$H_0 : \mu = 6.1 \times 10^{-6} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที}$$

$$H_1 : \mu \neq 6.1 \times 10^{-6} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที}$$

3. ระดับนัยสำคัญหรือโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาด ซึ่งเกิดจากการปฏิเสธ H_0 เมื่อ H_0 ที่แท้จริงคือ 0.05

4. เปิดตารางสถิติ t ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ที่ชั้นของความเป็นอิสระเท่ากับ 5 ได้ค่า $t = 2.228$

5. คำนวณค่า t จากค่าที่ได้จากการทดสอบ

$$t = (6.096 \times 10^{-6} - 6.1 \times 10^{-6}) / \sqrt{6 / 2.114 \times 10^{-8}} \\ = -2.015$$

6. ค่า t ที่ได้จากการคำนวณมีค่าอยู่ระหว่างค่า t จากตาราง (-2.228 ถึง 2.228) ดังนั้นจึงยอมรับ H_0

สรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1 % w/v ผ่าน 2% w/v แคลเซียมแอลจีเนตที่ได้จากการทดสอบไม่มีความแตกต่างจากค่าอ้างอิง [2] ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ง.2 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1 % w/v ผ่าน 2% w/v แคลเซียมแอลจิเนต ที่ไดจากการคำนวณโดยใช้ lag-time กับจากสมการ (2.17)

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจิเนต ที่อุณหภูมิห้อง ที่ไดจากการคำนวณโดยใช้ lag-time กับจากสมการ (2.17) ได้ค่าดังในตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจิเนต ที่อุณหภูมิห้อง ที่ไดจากการคำนวณโดยใช้ lag-time กับจากสมการ (2.17)

ชุดการทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (cm ² /sec)	
	โดยใช้ lag-time	สมการ (2.17)
1	6.102 x 10 ⁻⁶	6.090 x 10 ⁻⁶
2	6.087 x 10 ⁻⁶	6.066 x 10 ⁻⁶
3	6.079 x 10 ⁻⁶	6.071 x 10 ⁻⁶
4	6.079 x 10 ⁻⁶	6.068 x 10 ⁻⁶
5	6.094 x 10 ⁻⁶	6.056 x 10 ⁻⁶
6	6.136 x 10 ⁻⁶	6.103 x 10 ⁻⁶
Mean	6.096 x 10 ⁻⁶	6.076 x 10 ⁻⁶
SD	2.144 x 10 ⁻⁸	1.728 x 10 ⁻⁸

เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจิเนต ที่อุณหภูมิห้อง ที่ไดจากการคำนวณโดยใช้ lag-time กับจากสมการ (2.17) โดยใช้ t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

$$t_0 = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{Sp \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (ง-4)$$

$$Sp^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (ง-5)$$

แทนค่าในสมการ (จ-5)

$$\begin{aligned} Sp^2 &= \frac{(6-1)(1.728 \times 10^{-8})^2 + (6-1)(2.144 \times 10^{-8})^2}{6+6-2} \\ &= 1.493 \times 10^{-15} + 2.298 \times 10^{-15} \\ &= 3.771 \times 10^{-14} \\ Sp &= 1.974 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

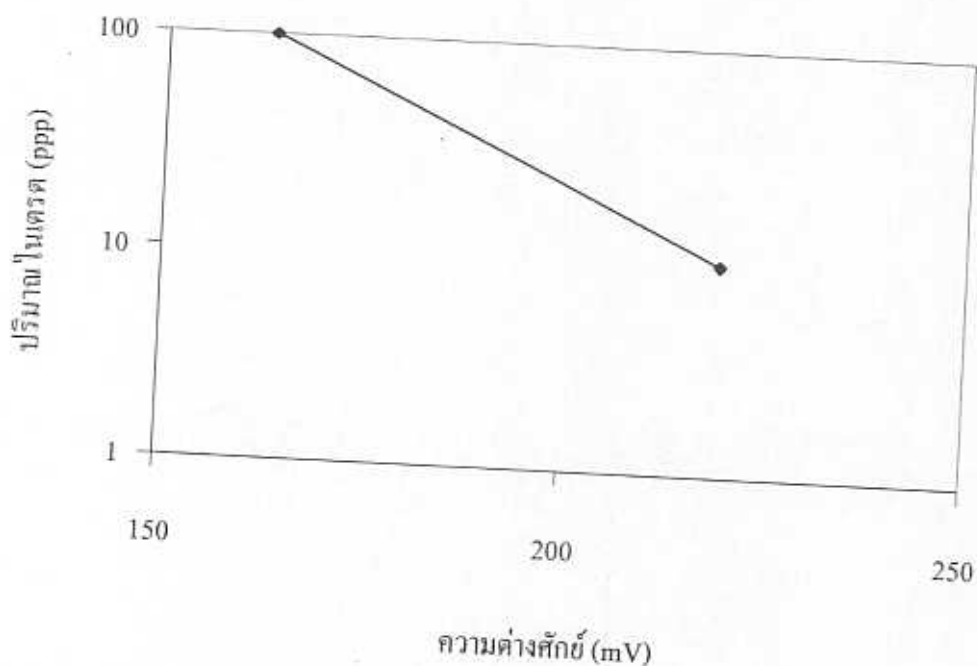
แทนค่าในสมการ (จ-4)

$$\begin{aligned} t_0 &= \frac{(6.067 \times 10^{-6}) - (6.096 \times 10^{-6})}{1.974 \times 10^{-7} \times \left[\sqrt{\frac{1}{6} + \frac{1}{6}} \right]} \\ &= -0.1779 \end{aligned}$$

แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกลูโคส 1%w/v ผ่าน 2%w/v แคลเซียมแอลจีเนต ที่อุณหภูมิห้อง ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ lag-time กับจากสมการ (2.17) ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ภาคผนวก จ
การวัดค่าปริมาณไนเตรด

ปริมาณไนเตรดที่ผ่านชั้นปลาน้ำจืด ถูกวัดด้วย Nitrate electrode ซึ่งต่อกับ pH meter ค่าที่อ่านได้จะเป็นมิลลิโวลต์ และทำการเทียบกับกราฟมาตรฐานของไนเตรดที่พล็อตใน semilog paper ดังในรูปที่ จ.1 เพื่ออ่านค่าปริมาณไนเตรด



รูปที่ จ.1 กราฟมาตรฐานของไนเตรด