

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แคปิลลารีอิเล็กทรอนิกส์



๑/พ.  
๗๖๗๒๕๑  
๒๕๓๕

นางสาวนุชนาท แก้วขิม  
นายฉัตรเจต พันพาไพร

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....

วัน เดือน ปี.....

L1255473X

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Capillary Electrophoresis

Miss Nuchanat Kaewsim  
Mr. Thirajed Panpaprai

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the  
Requirement for the Degree of Bachelor of Science  
Department of Applied Physics  
Faculty of Science  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
1992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

Capillary Electrophoresis

โดย

นางสาวนุชนาท แก้วขี้ม  
นายฉัตรเจต พันพาไพโร

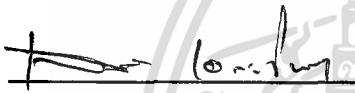
ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

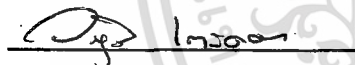
ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย  
อ.วิชิต ศิริโชติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
(ดร.เสนห์ เอกะวิภาต)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

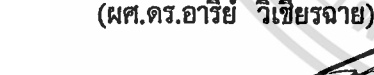
คณะกรรมการโครงการพิเศษ

  
(ดร.วราวุฒิ เถาสัตตดา)

ประธานกรรมการ

  
(ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

  
(อ.วิชิต ศิริโชติ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

  
(ผศ.เครีอวัลย์ ศีตะจิตต์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

Capillary Electrophoresis

นักศึกษา

นางสาวนุชนาท แก้วซิ้ม  
นายฉัตรเจต พันพาไพโร

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย  
อ.วิจิต ศรีโชติ

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

ปีการศึกษา

2534

บทคัดย่อ

Capillary Electrophoresis เป็นเครื่องมือวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของประจุภายในสนามไฟฟ้า การแยกโมเลกุลของสารผสมออกจากกันได้ เนื่องจากความแตกต่างของขนาดและประจุของโมเลกุลนั้น ซึ่งทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลต่างกันด้วย เครื่องมือ Capillary Electrophoresis ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ แหล่งจ่ายไฟ, ส่วนวิเคราะห์สาร, ส่วนของการวัดค่าและแสดงผล แหล่งจ่ายไฟจะให้ศักย์ไฟฟ้ากับส่วนวิเคราะห์สาร เพื่อทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในหลอดแคปิลลารี และทำให้ประจุของสารตัวอย่างที่อยู่ภายในหลอดแคปิลลารีวิ่งไปยังปลายอีกด้าน ที่มีแหล่งกำเนิดแสงอุลตราไวโอเลตและวงจรถอดค่าการดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเลตของสารแต่ละชนิดที่ถูกแยกออกมาจากสารตัวอย่าง

การใช้งานของเครื่องมือ Capillary Electrophoresis ในปัจจุบัน ได้แก่ การวิเคราะห์สารต่างๆ เช่น โปรตีน กรดอะมิโน นิวคลีโอไทด์ ยาต่างๆ เป็นต้น



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องด้วยความอนุเคราะห์จากหลายๆท่าน ในการให้ความรู้ และแนะแนวทางในการทำโครงการนี้อันได้แก่

ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉายและอ.วิชิต ศิริโชติ ให้คำปรึกษาในการทำงานพร้อมทั้งตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษให้สมบูรณ์ถูกต้อง

อ.ธนิต คุณสำราญ ให้คำแนะนำในเรื่องอิเล็กทรอนิกส์และเอื้อเพื่อให้เข้าชมเครื่องแคปิลลารีอิเล็กทรอนิกส์

กองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ให้ความรู้ในการเตรียมสารเพื่อใช้ในการทดลอง

คุณปรีชญา เถาสวรรณ ให้รายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องอิเล็กทรอนิกส์รวมทั้งแนวทางในการทดลอง

บริษัทสิทธิพรเอสโซซิเอต จำกัด เอื้อเพื่อในการเข้าชมเครื่องอิเล็กทรอนิกส์เพื่อน ๆ ทุกคน สำหรับกำลังใจ

คณะกรรมการโครงการพิเศษทุกท่าน ในการสอบโครงการพิเศษและตรวจทานแก้ไขรายงานฉบับนี้ให้ถูกต้อง

ขอขอบคุณเป็นพิเศษสำหรับคุณพ่อและคุณแม่ ผู้เป็นครูคนแรกของเรา

ผู้จัดทำ

มีนาคม 2535

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าสัมบูรณ์ของ limiting ionic mobility ที่อุณหภูมิ 298 K

หน้า  
6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	ส่วนประกอบพื้นฐานของ capillary electrophoresis	2
รูปที่ 2.1	แรงที่เกิดกับอนุภาค เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า	4
รูปที่ 2.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า electrophoretic mobility ของแคทไอออนของโซเดียมกับค่า ionic strength	6
รูปที่ 2.3	แผนภาพแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของไอออนในสนามไฟฟ้า	7
รูปที่ 2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของ effective mobility กับค่า pH	9
รูปที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง effective mobility ของ-alanine กับค่า pH $pK_1 = 3.8$ ; $pK_2 = 9.6$ ; ค่า ionic mobility ของแคทไอออนและแอนไอออนเท่ากับ $36 \times 10^{-9}$ และ $-31 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ	10
รูปที่ 2.6	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า effective mobility ของโปรตีนกับค่า pH	11
รูปที่ 2.7	ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ $A^+R^-$ และ $B^+R^-$ ในระหว่างที่เกิด electrophoretic migration ภายในท่อ ( $u_B < u_A$ )	15
รูปที่ 2.8	ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ $A^+R^-$ และ $B^+R^-$ ( $u_B < u_A$ ) กับความเร็วขององค์ประกอบที่เป็นไอออนและ moving boundary 2-1 ในระหว่างที่เกิด steady-state electromigration (สมการ 35-39)	16
รูปที่ 2.9	ความเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ $A^+R^-$ และ $B^+R^-$ ( $u_A > u_B$ ) ในระหว่างที่เกิด unsteady-state electromigration	19
รูปที่ 2.10	แสดงการกระจายค่าของรัศมีกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น $T-T_0$ คือค่า Joule heat ที่เกิดขึ้นในแคปิลลารีที่มีรัศมีภายใน $R = 0.4 \text{ mm}$ $P_1 = 3.3 \text{ Js}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ; $Q = 1.36 \text{ KmsJ}^{-1}$	23
รูปที่ 2.11	แผนภาพแสดง electric double layer	24
รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ electroosmotic mobility $v(r)/v_{CO}$ กับอัตราส่วนของระยะห่าง $r/R$ ของท่อ	25
รูปที่ 2.13	การเปลี่ยนแปลงของการกระจายค่าความเข้มข้นกับเวลา $t_1 < t_2 < t_3$	27
รูปที่ 2.14	Mobility ของสารภายใน Fused Silica	28
รูปที่ 2.15	การเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในหลอดแคปิลลารี	29
รูปที่ 3.1	แสดงหลอดแคปิลลารี	33
รูปที่ 3.2	แสดงหลอดพลาสติกที่ใช้เป็นอิเล็กโตรด	33
รูปที่ 3.3	ภาพแสดงขดบรรจุสารขนาดเล็ก (ซ้าย) และขนาดใหญ่ (ขวา)	34
รูปที่ 3.4	แบบด้านบนของฝาปิด	34

		หน้า
รูปที่ 3.5	ภาพแสดงฝาปิดที่สมบูรณ์แล้ว	35
รูปที่ 3.6	แบบด้านบนของพลาสติกแผ่นบน	35
รูปที่ 3.7	ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่เลือกขวดบรรจุสาร	35
รูปที่ 3.8	แบบด้านบนของกล่องวงกลม	36
รูปที่ 3.9	ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของกล่องใส่ขวดบรรจุสาร	36
รูปที่ 3.10	แสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่ใส่ขวดบรรจุสารขนาดเล็ก	37
รูปที่ 3.11	แบบด้านบนของพลาสติกที่เจาะรูตามจำนวนขวดบรรจุสาร	38
รูปที่ 3.12	ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่ใส่ขวดบรรจุสารขนาดใหญ่	38
รูปที่ 3.13	แบบด้านข้างของชั้นแรก	39
รูปที่ 3.14	แบบด้านบนของชั้นที่สอง	39
รูปที่ 3.15	ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่ยึดที่ใส่ขวดบรรจุสาร	40
รูปที่ 3.16	แบบด้านบนและด้านข้างของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 1	40
รูปที่ 3.17	แบบด้านบนและด้านข้างของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 2	41
รูปที่ 3.18	แบบด้านบนของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 3	41
รูปที่ 3.19	ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่ยับยึดอิเล็กทรอนิกส์ด้านนำสารเข้าสู่หลอดแคปิลลารี	42
รูปที่ 3.20	แบบด้านบนของพลาสติกชั้นที่ 1	42
รูปที่ 3.21	แบบด้านบนและด้านข้างของพลาสติกชั้นที่ 2	43
รูปที่ 3.22	แบบด้านบนของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 3	43
รูปที่ 3.23	แบบด้านข้างของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 4 และ 5	44
รูปที่ 3.24	แบบแสดงตำแหน่งที่เจาะรูของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 4 และ 5	44
รูปที่ 3.25	ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่ยับยึดอิเล็กทรอนิกส์ด้านรับสารออกจากหลอดแคปิลลารี	45
รูปที่ 3.26	แบบด้านบนของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 1 และ 2	45
รูปที่ 3.27	แบบด้านบนของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 4	46
รูปที่ 3.28	แบบด้านบนของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 5	46
รูปที่ 3.29	ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่พันหลอดแคปิลลารี	46
รูปที่ 3.30	แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 5 แบบแรก	47
รูปที่ 3.31	แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 3 และ 4 แบบแรก	47
รูปที่ 3.32	แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 1 แบบแรก	48
รูปที่ 3.33	ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วน ของส่วนที่ทำหน้าที่เป็น slit ของที่ยับยึดหลอดแคปิลลารีแบบแรก	48
รูปที่ 3.34	แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 1, 2 และ 4 แบบที่สอง	48
รูปที่ 3.35	ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วน ของส่วนที่ทำหน้าที่เป็น slit ของที่ยับยึดแคปิลลารีแบบที่สอง	49

	หน้า	
รูปที่ 3.36	แบบด้านบนของที่วางหลอดอุลตราไวโอเลต	49
รูปที่ 3.37	ภาพแสดงที่วางหลอดอุลตราไวโอเลต	50
รูปที่ 3.38	แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 1	50
รูปที่ 3.39	แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 2	50
รูปที่ 3.40	แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 3 และ 4	51
รูปที่ 3.41	แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 5	51
รูปที่ 3.42	ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่ยึด slit	51
รูปที่ 3.43	แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 1	52
รูปที่ 3.44	แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 2	52
รูปที่ 3.45	แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 3	52
รูปที่ 3.46	แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 4	53
รูปที่ 3.47	ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของฝาครอบตัวตรวจจับแสงอุลตราไวโอเลต	53
รูปที่ 3.48	ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่ยึดแคปิลลารี	53
รูปที่ 3.49	แบบของโครงตู้ใส่อุปกรณ์	54
รูปที่ 3.50	ภาพแสดงตู้ใส่อุปกรณ์	54
รูปที่ 4.1	ภาพแสดงเครื่อง Capillary Electrophoresis ที่สร้างขึ้น	56
รูปที่ 4.2	ภาพแสดงส่วนประกอบที่สำคัญของ Capillary Electrophoresis	57

## สารบัญ

บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นของ electrophoresis	3
2.1 Electrophoretic mobility	3
2.2 Electric current and mass transfer	11
2.2.1 Regulating function	13
2.2.2 Steady-state migration	15
2.2.3 Unsteady-state migration	18
2.3 Effects accompanying electrophoresis	22
2.3.1 Joule heat	22
2.3.2 Electroosmotic	23
2.3.3 Diffusion	25
2.4 วิธีการแยกสารด้วยวิธี electrophoresis	27
2.5 ความเร็วสัมพัทธ์ของโมเลกุล	28
2.5.1 Electrophoretic mobility ( $\mu_m$ )	28
2.5.2 Electroosmotic mobility ( $\mu_o$ )	29
2.6 การพิจารณาค่าความเร็วสัมพัทธ์	30
2.6.1 ความเร็วของอนุภาค (Analyte velocity)	30
2.6.2 ความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาค (Analyte mobility)	30
2.6.3 เวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Migration time)	31
2.6.4 elution time มีค่าเป็น	31
บทที่ 3 การดำเนินงานและการวิจัย	32
3.1 องค์ประกอบหลักของเครื่อง Capillary Electrophoresis	32
3.1.1 หลอดแคปิลลารี	32
3.1.2 อิเล็กโตรด	33
3.1.3 ขวดบรรจุสาร	33
3.1.4 ที่ใส่ขวดบรรจุสารขนาดเล็ก	34
3.1.5 ที่ใส่ขวดบรรจุสารขนาดใหญ่	37

3.1.6	ที่ยึดที่ใส่ขวดบรรจุสาร	39
3.1.7	ที่จับยึดอิเล็กโตรดด้านนำสารเข้าสู่หลอดแคปิลลารี	40
3.1.8	ที่จับยึดอิเล็กโตรดด้านรับสารออกจากหลอดแคปิลลารี	42
3.1.9	ที่พันหลอดแคปิลลารี	45
3.1.10	ที่จับยึดแคปิลลารี	47
3.1.11	ตู้ใส่อุปกรณ์	53
3.2	การนำสารเข้าสู่ระบบ	55
3.2.1	Hydrostatic injection	55
3.2.2	Electrokinetic injection	55
บทที่ 4	ผลการวิจัย	56
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย	58
ภาคผนวก		60
บรรณานุกรม		62
ประวัติผู้เขียน		63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

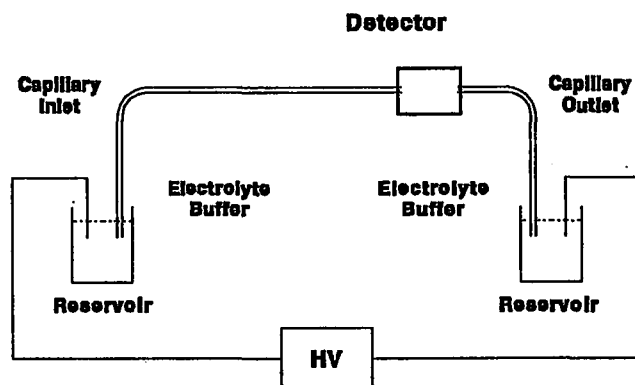
## บทที่ 1

### บทนำ

เครื่องมือที่ใช้ในการแยกหรือวิเคราะห์สาร (ที่เป็นของเหลว) มีอยู่หลายชนิด แบบหนึ่งที่ยังรู้จักกันทั่วไปคือ โครมาโตกราฟี ซึ่งเป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการดูดซับในการแยกสาร ต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีการขึ้นใหม่โดยใช้ระบบไฟฟ้าเข้ามาช่วยในการแยกสาร เรียกว่าวิธี electrophoresis เครื่องมือ electrophoresis มีอยู่หลายแบบ โดยมักจะเรียกชื่อตามตัวกลางที่สารเคลื่อนที่ผ่าน เช่น paper electrophoresis ตัวกลางทำมาจากกระดาษ, cellulose acetate electrophoresis ตัวกลางทำมาจากสารจำพวกเซลลูโลส และ starch gel electrophoresis มีตัวกลางที่เป็นสารพวกเจล เป็นต้น การพัฒนาเครื่องมือ electrophoresis ในช่วงแรก ส่วนใหญ่จะเป็นการหาตัวกลางที่สารเคลื่อนที่ผ่านที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องมากขึ้น และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในเครื่องมือแบบก่อนๆ ต่อมาเมื่อมีเครื่องมือ HPLC (High Performance Liquid Chromatography) ซึ่งเป็นเครื่องมือแยกสารที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน จึงมีการนำแนวคิดที่ใช้ใน HPLC มาพัฒนาเครื่องมือ electrophoresis โดยการใช้แคปิลลารีมาแทนที่ตัวกลางที่สารเคลื่อนที่ผ่าน และมีชื่อว่า capillary electrophoresis (CE)

หลักสำคัญของ capillary electrophoresis คือการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่มีประจุในสนามไฟฟ้า และการแยกของโมเลกุลภายในหลอดแคปิลลารีที่บรรจุสารอิเล็กโตรไลต์ (สารบัฟเฟอร์) การแยกตัวของโมเลกุลต่างชนิดในสารชนิดหนึ่งเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างขนาดและประจุของโมเลกุลแต่ละชนิด

ระบบของ CE ประกอบไปด้วยหลอดแคปิลลารีที่ทำจาก fused silica มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในตั้งแต่ 20-200 ไมครอน และยาวตั้งแต่ 10 ซม.จนถึงมากกว่า 100 ซม. ปลายทั้งสองข้างของหลอดจุ่มอยู่ในภาชนะที่บรรจุสารละลายอิเล็กโตรไลต์ และมีอิเล็กโตรดจุ่มอยู่ด้วย อิเล็กโตรดทั้งสองด้านต่อกับแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงมีค่าระหว่าง 20-30 กิโลโวลต์ และมีส่วนตรวจวัดทำการตรวจวัดโมเลกุลที่แยกตัวและเคลื่อนที่มายังส่วนปลายขาออกของหลอดแคปิลลารี ส่วนตรวจวัดนี้จะถูกต่อเข้ากับส่วนแสดงผลซึ่งอาจจะเป็น x-t recorder หรือคอมพิวเตอร์ ส่วนประกอบของ capillary electrophoresis แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของ capillary electrophoresis

สำหรับในประเทศไทย capillary electrophoresis เป็นเทคนิคที่ค่อนข้างใหม่ เนื่องจากมีเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สารที่ให้ผลเป็นที่น่าพอใจอยู่แล้ว คือเครื่อง HPLC นอกจากนี้เครื่องมือ CE ยังมีราคาสูงมาก และมีการเตรียมการในการทดสอบค่อนข้างยุ่งยาก แต่ก็ยังเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง ให้ผลที่แม่นยำและละเอียดมาก ปริมาณสารที่ทดสอบมีค่าน้อย (อยู่ในหน่วยพิโคลิตร) นอกจากนั้นยังใช้เวลาในการทดสอบน้อยกว่าการทดสอบด้วยเครื่อง HPLC

#### วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ

- เพื่อเข้าใจถึงการทำงานของเครื่อง Capillary Electrophoresis
- เพื่อสร้างเครื่องมือ Capillary Electrophoresis มาใช้ในการทดลอง
- เพื่อแสดงให้เห็นข้อได้เปรียบเสียเปรียบของเครื่อง Capillary Electrophoresis เมื่อเทียบกับเครื่องมือชนิดอื่นในการทำงานอย่างเดียวกัน

#### วิธีดำเนินงาน

- ศึกษาหลักพื้นฐานและการทำงานของ Capillary Electrophoresis
- สร้างเครื่องมือเพื่อนำมาใช้ในการทดลอง
- ทำการแยกสารตามเงื่อนไขที่เหมาะสม
- ศึกษาผลของการทดลองที่ได้

#### ประโยชน์ที่ได้รับ

- เข้าใจถึงการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการแยกและวิเคราะห์สาร
- เข้าใจถึงหลักพื้นฐานและการทำงานของเครื่อง Capillary Electrophoresis
- ทราบถึงสาเหตุของข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีเบื้องต้นของ electrophoresis

#### หลักการพื้นฐาน

#### 2.1 Electrophoretic mobility

เมื่อนำไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุ  $i$  มีประจุเป็น  $z_i$  เท่าของอิเล็กตรอน ( $e$ ) (ประจุของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) ไปวางในสนามไฟฟ้าที่ homogenous ขนาด  $E$  จะทำให้มันถูกเร่งด้วยแรง

$$F_e = z_i e E \quad (1)$$

ให้ความเข้มสนามไฟฟ้า  $E$  ( $\text{Vm}^{-1}$ ) ถูกกำหนดเป็น gradient ของศักย์ไฟฟ้า  $\phi$  (V) ในรูปของ

$$E = -\frac{d\phi}{dx} \quad (2)$$

ในทาง electrophoresis แล้ว จะใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วง  $1 \text{ KVm}^{-1}$  ถึง  $50 \text{ KVm}^{-1}$  ป้อนให้ capillary

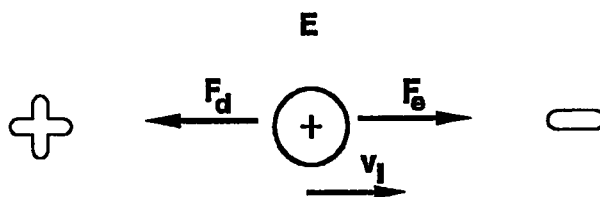
ในตัวกลางที่เป็นของเหลวมีความหนืด ค่า drag force  $F_d$  ที่ใช้ในการเคลื่อนที่อนุภาคนั้นแปรผันกับความเร็วในการเคลื่อนที่  $v$  และค่าความหนืดนิวโตเนียน  $\eta$  ของตัวกลาง

$$F_d = k\eta v \quad (3)$$

เมื่อความแรงของอนุภาคมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งทำให้แรง  $F_e$  มีค่าเท่ากับ drag force  $F_d$  แล้ว จะทำให้อนุภาค  $i$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่  $v_i$  โดยที่

$$v_i = \frac{z_i e}{k\eta} E \quad (4)$$

ดั่งรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แรงที่เกิดกับอนุภาค เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า

ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเคลื่อนที่  $v_i$  และความเข้มสนามไฟฟ้า  $E$  เรียกว่า Electrophoretic mobility  $u_i$  โดยที่  $u_i$  จะมีค่าเป็นบวกหรือลบขึ้นอยู่กับชนิดของประจุ  $i$  (ความเป็นบวกหรือลบของ  $z_i$ ) ด้วยเหตุนี้แคทไอออนจะมี mobility เป็นบวกและแอนไอออนมี mobility เป็นลบ

พิจารณาให้การเคลื่อนที่ของแคทไอออนไปยังคาโทดมีค่าเป็นบวก สำหรับอนุภาคเป็นทรงกลมและภายใต้เงื่อนไข laminar flow ที่ต่อเนื่อง drag force  $F_d$  ในรูปของ Stokes'law

$$F_d = 6\pi\eta r_i v_i \quad (5)$$

โดยที่  $r_i$  เป็นรัศมีของอนุภาค (ในการทดลอง electrophoresis ส่วนมาก ใช้สารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย จึงใช้ค่าความหนืดของน้ำแทนค่าความหนืดของตัวกลาง  $\eta_{\text{H}_2\text{O}} = 1002 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  ที่อุณหภูมิ 293 K) จากแรง  $F_e$  (สมการ 1) และ  $F_d$  เมื่ออนุภาคเป็นทรงกลมจะได้

$$v_i = u_i E = \frac{z_i e}{6\pi\eta r_i} E \quad (6)$$

เพราะฉะนั้น electrophoretic mobility  $u_i$  คือ

$$u_i = \frac{z_i e}{6\pi\eta r_i} \quad (7)$$

ค่าตัวเลข 6 ในสมการ 5-7 นั้นเป็นจริงสำหรับอนุภาคทรงกลม ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าค่าความเร็วของของเหลวซึ่งมีความสัมพันธ์กับอนุภาคจะหายไปทีผิวของอนุภาค

การเปลี่ยนแปลงของ electrophoretic mobility กับอุณหภูมิ ดูได้จากสมการ 8 ซึ่งเป็นการคำนวณสำหรับการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของตัวทำละลายกับอุณหภูมิ การเพิ่มขึ้นของ electrophoretic mobility กับอุณหภูมิ สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$u_{T_2} = u_{T_1}(1 + \alpha\Delta T) \quad (8)$$

เมื่อ  $\Delta T = T_2 - T_1$  และสัมประสิทธิ์  $\alpha$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.02 \text{ K}^{-1}$  สำหรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ความคล่องตัวของไอออนจะเพิ่มขึ้น 2% สำหรับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแต่ละองศาเคลวิน

ไอออนตัวหนึ่งในสารละลายจะถูกล้อมรอบด้วยไอออนตัวอื่นที่มีประจุออกไป โดยที่ electrostatic interaction ระหว่างไอออนตัวหนึ่งและไอออนข้างเคียงที่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกันจะมีผลต่อความคล่องตัวของ former ดังนั้นความคล่องตัวจะลดลงเมื่อมีการเพิ่ม ionic strength นิยาม ionic strength  $\nu$  ของสารละลายได้ว่า

$$\nu = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n c_i z_i^2$$

ใช้สมการ Onsager อธิบายความสัมพันธ์ของ electrophoretic mobility ที่ขึ้นกับ ionic strength ได้ว่า

$$|u_i| = |u_i^0| - (0.23 |u_i^0 z_i z_r| + 3143 \cdot 10^{-9} |z_i|) \frac{\nu^{1/2}}{1 + \nu^{1/2}} \quad (9)$$

เมื่อ  $u_i^0$  คือ ขอบเขตของ electrophoretic mobility ที่ความเข้มข้นเป็นศูนย์

$z_R$  คือ เลขประจุของ counterion

ค่าสัมบูรณ์ของความคล่องตัวของไอออนของสารต่างชนิดกันแสดงดังตารางที่ 1

สมการความสัมพันธ์  $u_i = f(\nu)$  จะอธิบายได้โดยใช้อุณหภูมิของไอออนที่ใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิง สำหรับไอออนชนิดอื่น ค่า mobility ที่เกี่ยวข้องจะถูกลำมาไว้โดยไม่ขึ้นกับค่า  $\nu$  ตัวอย่างของความสัมพันธ์ของสมการ  $u_{Na} = f(\nu)$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$  แสดงดังสมการ

$$u_{Na} = 51.92 - 42.88\nu^{1/2} + 52.25\nu - 30.24\nu^{3/2} \quad (10)$$

ตารางที่ 1 ค่าสัมบูรณ์ของ limiting ionic mobility ที่อุณหภูมิ 298 K

ด้วยชื่อ: Tris = Tris(hydroxymethyl)aminomethane

HEPES = 4-(2-hydroxyethyl)-1-piperazine-ethanesulphonic acid

MOPS = 4-morpholinepropanesulphonic acid

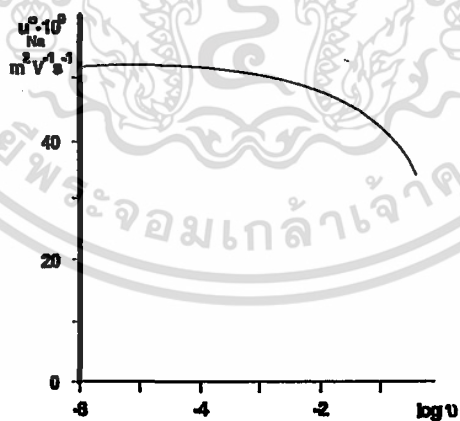
MES = 4-morpholinethanesulphonic acid

AMP = adenosine monophosphate

Caion	$ \mu^0  \times 10^9$ ( $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	Anion	$ \mu^0  \times 10^9$ ( $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\text{H}_3\text{O}^+$	362.5	$\text{OH}^-$	205.5
$\text{Li}^+$	40.1	$\text{F}^-$	57.4
$\text{Na}^+$	51.9	$\text{Cl}^-$	79.1
$\text{K}^+$	76.2	$\text{NO}_3^-$	74.1
Ammediol	29.5	$\text{SO}_4^{2-}$	82.9
Tris	29.5	HEPES	21.8
b-alanine	36.7	MOPS	24.4
Ethanolamine	44.3	MES	26.8
Imidazole	52.0	AMP	22.6

ที่มา : J. Chromatogr. 569 (1991)

รูปที่ 2.2 เป็นกราฟที่ได้จากสมการนี้



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า electrophoretic mobility ของแคทไอออนของโซเดียมกับค่า ionic strength (จากสมการ 10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่แบบ electrophoresis ของไอออนในสารละลายแสดงตัวเหมือนกับการนำไฟฟ้าด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ กฎของ Kohlrausch สำหรับการเคลื่อนที่อย่างอิสระของไอออน กล่าวว่า ทั้งแคทไอออนและแอนไอออนก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุทั้งหมด ซึ่งก็คือกระแสที่แท้จริงซึ่งสามารถวัดได้ด้วยแอมมิเตอร์ มีลักษณะดังรูปที่ 2.3 และแสดงค่า current density  $i(\text{Am}^{-2})$  เป็น

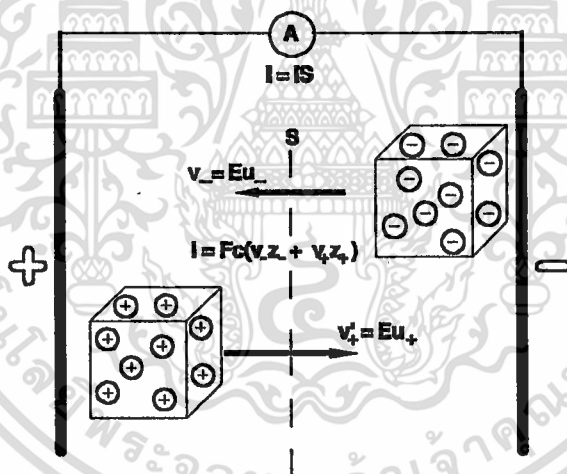
$$i = FE \sum_{j=1}^n c_j z_j u_j \quad (11)$$

เมื่อ  $c_j$  คือ ความเข้มข้นของไอออน  $j$  ในหน่วย  $\text{kmol m}^{-3}$  หรือเท่ากับ  $\text{mol l}^{-1}$

$F$  คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ  $96487 \text{ C mol}^{-1}$

สำหรับค่าความนำจำเพาะ

$$\chi = \frac{i}{E} = F \sum_{j=1}^n c_j z_j u_j \quad (12)$$



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของไอออนในสนามไฟฟ้า

การพิจารณาเหล่านี้ล้วนมีความสัมพันธ์กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์แก่ แม้ว่าในทางปฏิบัติจะมีอิเล็กโทรไลต์อ่อนอยู่ในสารละลายมากกว่า ในสารละลายเหล่านี้ หลักการของ effective electrophoretic mobility  $\bar{u}$  มีความสำคัญมาก จากนิยามของ Tiselius ที่ว่า สาร A อยู่ในสารละลายในรูปของ  $(A_1, A_2, \dots, A_n)$  ที่มี molar fraction เป็น  $x_1, x_2, \dots, x_n$  และ mobility เป็น  $u_1, u_2, \dots, u_n$  เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าเหมือนกับสารชนิดเดียวที่มีค่า effective mobility ค่าหนึ่ง เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{u}_A = \frac{1}{c_A} \sum_{i=1}^n c_i u_i = \sum_{i=1}^n x_i u_i \quad (13)$$

เมื่อ  $\bar{c}_A = \sum_{i=1}^n c_i$  เป็นค่าความเข้มข้นของ A โดยรวม (หรือของแต่ละชนิด)

ตัวอย่างของ effective mobility ในสารละลาย สำหรับ effective mobility ของ ออกซาเลตไอออน

$$\bar{u}_{(\text{COOH})_2} = x_{\text{COO}^-}^{\text{COOH}} \cdot u_{\text{COO}^-}^{\text{COOH}} + x_{\text{COO}^-}^{\text{COO}^-} \cdot u_{\text{COO}^-}^{\text{COO}^-}$$

ส่วนที่ไม่แตกตัวของกรดออกซาลิกซึ่งมี mobility เป็นศูนย์จะไม่มีส่วนในค่า effective mobility ขนาดที่แท้จริงของ molar fraction ขององค์ประกอบไอออนิกจะได้รับผลจากการเปลี่ยนค่า pH ของ สารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเลื่อนไปของจุดสมดุลงของปฏิกิริยา ดังนั้นการควบคุมค่า pH จะทำให้ค่า effective mobility และค่าเวลาในการเคลื่อนที่ของสารที่วิเคราะห์ถูกควบคุมไว้ด้วยความสัมพันธ์ของ effective mobility  $\bar{u}$  ของกรดอ่อนและเบสอ่อนกับค่า pH จะมีกราฟแสดงลักษณะตรงกับ dissociation curve ของกรดอ่อนและ protonation curve ของเบสอ่อน

สำหรับ effective mobility  $\bar{u}_B$  ของเบส B ที่มี ionic mobility  $u_{\text{BH}^+}$  อยู่ในรูป  $\text{BH}^+$

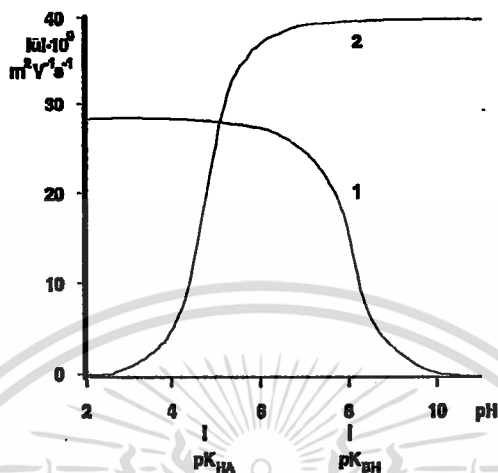
$$\bar{u}_B = \frac{[\text{H}^+]}{K_{\text{BH}^+} + [\text{H}^+]} u_{\text{BH}^+} \quad (14)$$

เมื่อ  $K_{\text{BH}^+} = [\text{H}^+].[B]/[\text{BH}^+]$  เป็นค่าคงที่ของสมดุลงกรด-เบสที่เกี่ยวข้อง ในรูปที่ 2.4 (curve 1) แสดงถึงฟังก์ชัน  $\bar{u}_B = f(\text{pH})$  คือ mobility curve ของ tris(hydroxymethyl)aminomethane (Tris) ซึ่งมีค่า ionic mobility ของ  $u_{\text{Tris}} = 28 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  และค่าคงที่ในการรวมตัวของ protonated (acid) form มีค่า  $\text{PK}_{\text{Tris}} = 8.0$

สำหรับกรดอ่อน HA

$$\bar{u}_A = \frac{K_{\text{HA}}}{K_{\text{HA}} + [\text{H}^+]} u_A \quad (15)$$

เมื่อ  $K_{HA} = [H^+][A^-]/[HA]$  เป็นค่าคงที่ในการรวมตัวของกรด HA ในรูปที่ 2.4 (curve 2) แสดง mobility ของอะซิเตด ที่มี ionic mobility  $u_{AC} = -40 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  และ  $pK_{HAc} = 4.76$



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของ effective mobility กับค่า pH  
 1 = TRIS ;  $pK_{TRIS} = 8.0$  ;  $u_{TRIS} = 28 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$   
 2 = acetic acid ;  $pK_{HAc} = 4.76$  ;  $u_{HAc} = -40 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$

ampholyte มีคุณสมบัติพิเศษในเรื่อง electrophoretic separation ampholyte เหล่านี้มีความสำคัญในทางยา, ชีววิทยา และชีวเคมี รวมทั้ง กรดอะมิโน, นิวคลีโอไทด์, โปรตีน และสารผสมอื่นๆ ที่มีอยู่ในสภาพเป็นแคทไอออนหรือแอนไอออน ตามความเป็นกรดของสิ่งแวดลอมนั้น กรดอะมิโนเป็นตัวอย่างของ zwitterionic behaviour เช่น zwitterionic ของ  $\alpha$ -alanine คือ



คุณลักษณะทาง ampholyte ของกรดอะมิโนจะแสดงได้โดยค่าคงที่ในการรวมตัว, จำนวนจากบริเวณที่เป็นกรดสู่บริเวณพื้นฐาน คือจะแสดงให้เห็นว่าค่า  $pK_1$  แสดงลักษณะการ protonate ของ carboxyl group ในบริเวณที่เป็นกรด คือกระบวนการที่ zwitterion เป็นแคทไอออน

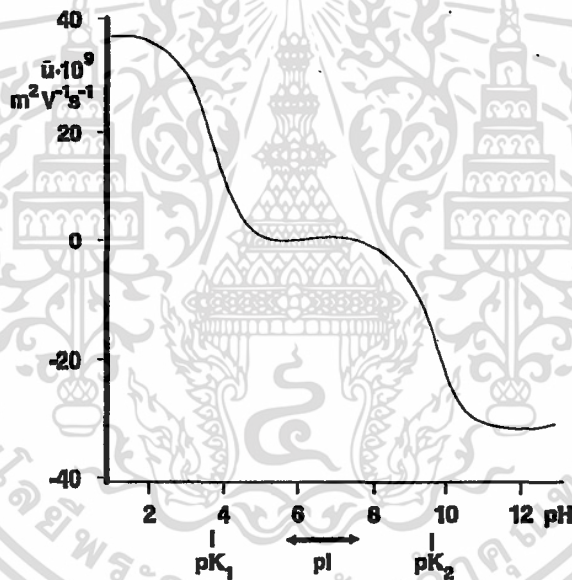
$$K_1 = \frac{[H^+][NH_3^+RCOO^-]}{[NH_3^+RCOOH]} \quad (16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ของการรวมตัวอันดับสอง แสดงลักษณะการรวมตัวของกลุ่มอะมิโน เมื่อ zwitterion เป็น แอนไอออน

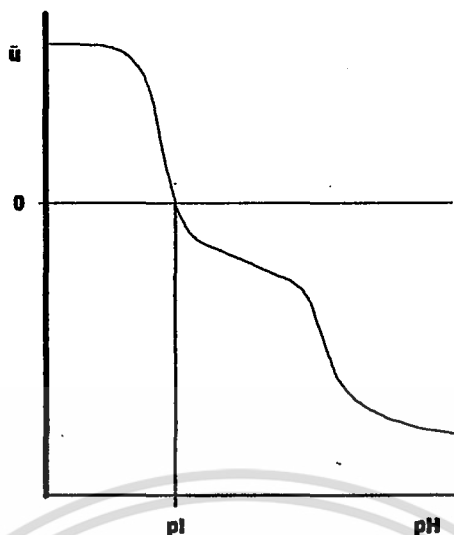
$$K_2 = \frac{[H^+][NH_2RCOO^-]}{[NH_3^+RCOO^-]} \quad (17)$$

สำหรับ  $\beta$ -alanine มีค่า  $pK_1 = 3.8$  และ  $pK_2 = 9.6$  ค่า ionic mobility ของ แคลทไอออนเท่ากับ  $36 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ของแอนไอออนเท่ากับ  $-31 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของค่า effective mobility กับค่า pH จะเห็นว่ากรดอะมิโนของ mono-amino-mono-carboxy type เคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับแคลทไอออนในตัวกลางที่เป็นกรดและลักษณะเดียวกับแอนไอออนในตัวกลางที่เป็นเบส จะสังเกตได้ว่าค่า mobility ที่เป็นศูนย์จะอยู่ในช่วงค่า pH ที่แน่นอน เรียกว่า isoelectric region ในบริเวณนี้จะพิจารณาให้สารมีสภาพเป็นกลาง



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง effective mobility ของ  $\beta$ -alanine กับค่า pH  $pK_1 = 3.8$  ;  $pK_2 = 9.6$  ; ค่า ionic mobility ของแคลทไอออนและแอนไอออนเท่ากับ  $36 \times 10^{-9}$  และ  $-31 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ตามลำดับ

ในรูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง effective mobility กับค่า pH ของโปรตีน ค่า mobility ที่เป็นศูนย์เกิดขึ้นที่ค่า pH ค่าหนึ่ง เรียกจุดนี้ว่า isoelectric point pI เนื่องจากการใช้ free acidic and basic group ในจำนวนมากที่ค่าเดียวกัน



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า effective mobility ของโปรตีนกับค่า pH

## 2.2 Electric current and mass transfer

หลักพื้นฐานของวิธีการแยกตัวคือ การเคลื่อนย้ายมวลขององค์ประกอบของสารผสมที่เราวิเคราะห์ การเคลื่อนย้ายมวลขององค์ประกอบ  $i$  สามารถอธิบายในรูปของ mass current density หรือ mass flux  $J_i$  ถ้าอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาค  $i$  โดยใช้ single macroscopic velocity  $v_i$  จะได้ว่า

$$J_i = c_i v_i \quad (18)$$

เมื่อความเร็วเป็นปริมาณโดยสุ่ม จะใช้นิยามของ diffusional flux

เมื่อรวมค่าต่างๆที่เป็นผลต่อ net flux ในการทดลอง electrophoresis สำหรับกรณี 1 มิติ จะได้ว่า

$$J_i = c_i(u_i E + v_{\infty} + v_r) - D_i \left( \frac{dc_i}{dx} \right) \quad (19)$$

เมื่อความเร็วในวงเล็บของเทอมแรกทางขวามือเป็น electromigration velocity (ดูสมการ 6) คือ local bulk velocity ของของเหลวเนื่องจาก electroosmosis และ local bulk velocity เนื่องจาก hydrodynamic flow

สมการต่อเนื่องสำหรับอนุภาค  $i$  (ตัวอย่างเช่น อีออน  $i$ ) สามารถเขียนอยู่ในรูป

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} J_i + R_i \quad (20)$$

เมื่อ  $t$  คือ เวลา

$J_i$  คือ mass flux กำหนดโดยสมการ 18 และ  $R_i = f(x,t)$  เป็นผลจากอนุภาค  $i$  โดยปฏิกิริยาเคมีต่อหน่วยปริมาตรและหน่วยเวลา ข้อสำคัญคือจะต้องรักษามวลของระบบที่เกิดปฏิกิริยาให้คงที่ มิฉะนั้นจำนวนโมลอาจจะเปลี่ยนไปอย่างมาก

ในการหาคำตอบของสมการ 20 จำเป็นต้องมีวิธีเฉพาะจึงจะได้คำตอบที่ต้องการระบบของอิเล็กโทรไลต์แก่ สามารถพิจารณาเช่นเดียวกับระบบที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี โดยจะไม่สนใจการพาความร้อนใดๆ และกำหนดว่า mass transport เกิดจาก electromigration และการแพร่ จากสมการ 19 จะได้ว่า

$$J_i = Ec_i u_i - D_i \frac{dc_i}{dx} \quad (21)$$

การอธิบายเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรไลต์อ่อนนั้นมีความสำคัญ แม้ว่าสารละลายที่กล่าวถึงจะใช้สำหรับระบบของ uni-univalent weak-electrolyte โดยไม่สนใจถึงการแพร่ ดังนั้นสมการต่อเนื่อง (สมการ 20) มีรูปเป็น

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (Ec_i u_i) + R_i \quad (22)$$

โดยการรวมหลาย ๆ สมการสำหรับทุกอนุภาค  $i$  ของสาร A เทอมของปฏิกิริยาจะถูกตัดทิ้งเพราะว่า

$$\sum_{i=1}^n R_i = R_A = 0 \quad (23)$$

นั่นหมายความว่า ปริมาณรวมของสาร A ในรูปโมลจะไม่เปลี่ยนแปลง สมการการเคลื่อนที่แบบ electromigration ของสาร A เขียนได้เป็น

$$\frac{\partial \bar{c}_A}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (E \bar{c}_A \bar{u}_A) \quad (24)$$

กำหนดให้ค่า current density  $i$  คงที่ผ่านไปทั่วความยาวของ column ที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่  $S$  จะแทนค่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าโดยใช้สมการ 12

$$\frac{\partial \bar{c}_A}{\partial t} = -\frac{I}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\bar{c}_A \bar{u}_A}{\chi} \right) \quad (25)$$

เมื่อ  $I$  คือกระแสไฟฟ้า เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ในระบบอิเล็กโทรไลต์ จำนวนของสมการการเคลื่อนที่จะเท่ากับจำนวนชนิดของสาร A,B,C,... ที่อยู่ในระบบ

สิ่งสำคัญเพื่อความเข้าใจที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในเรื่อง electromigration คือค่า อินทิกรัลของสมการการเคลื่อนที่ ค่าอินทิกรัลอันดับแรกสามารถใช้พิสูจน์เพื่ออธิบายระบบของ uni-univalent strong electrolyte โดยกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ ค่าความคล่องตัวของไอออนคงที่ (โดยไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของไอออน) และไม่สนใจการแพร่ ความแตกต่างนี้มีสาเหตุมาจากเงื่อนไขเริ่มต้นและชนิดของอิเล็กโทรไลต์

### 2.2.1 Regulating function

regulating function เป็นรูปหนึ่งของค่าอินทิกรัลอันดับแรกของสมการการเคลื่อนที่ เมื่อไม่สนใจการแพร่และกำหนดให้ electrophoretic mobility คงที่ ฟังก์ชันนี้ถูกพิสูจน์ในปี 1897 สำหรับระบบ uni-univalent strong electrolyte ต่อมา regulating function ก็ถูกพิสูจน์สำหรับระบบของ uni-univalent weak electrolyte

ความสำคัญของ regulating function มีสาเหตุมาจากความสามารถแสดงลักษณะของระบบได้ซึ่งจะมีประโยชน์สำหรับระบบอิเล็กโทรไลต์แก่ ตรงข้ามกับสมการ moving boundary (ซึ่งเป็นค่าอินทิกรัลอันดับแรกของสมการการเคลื่อนที่เช่นกัน) regulating function จะถูกต้องถ้าองค์ประกอบของไอออนในช่วงที่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคไม่คงที่ พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ในสมการ 25 ใช้ได้สำหรับ strong หรือ weak uni-univalent electrolyte เมื่อ  $\bar{c}_i \bar{u}_i = c_i u_i$  ในกรณีนี้ตัว  $i$  สำหรับ ionic form สามารถเปลี่ยนแปลงได้กับ subscript A,B,C,...(ชนิดของสาร) หลังจากคูณสมการ 25 โดยแฟกเตอร์  $z_i/u_i$  จะได้สมการ

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{c_i z_i}{u_i} \right) + \frac{I}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{c_i z_i}{\chi} \right) = 0 \quad (26)$$

รวมทุกสมการสำหรับทุกไอออนของสารที่อยู่ในสารละลาย  $i = 1, 2, \dots$  และกำหนดให้ electroneutrality เป็น

$$\sum_{i=1}^n c_i z_i = 0 \quad (27)$$

เราจะได้

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^n \frac{c_i z_i}{u_i} = 0 \quad (28)$$

ดังนั้น

$$\omega(x) = \sum_{i=1}^n \frac{c_i z_i}{u_i} \quad (29)$$

$\omega(x)$  คือ ฟังก์ชันของ  $x$  และไม่ขึ้นกับเวลา

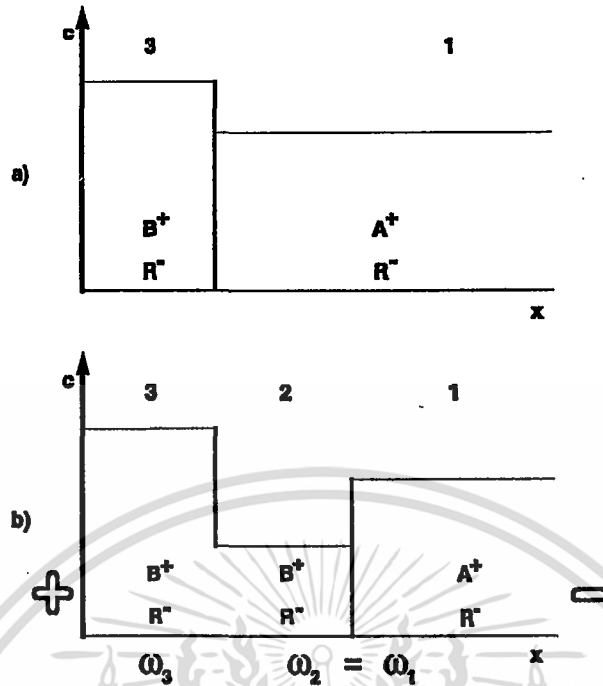
ถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่าน column ที่บรรจุอิเล็กโทรไลต์  $A^+ R^-$  และ  $B^+ R^-$  ที่มาจาก 2 โชน (1,3) แยกจากกันโดย sharp boundary (ดังรูป 2.7a) ผลจาก electromigration จะทำให้เกิด โชนที่ 3 (2) ขึ้น ดังรูป 2.7 b

ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์  $B^+ R^-$  ในโชนที่ 2 จะมีค่าไม่แน่นอนแต่จะมีค่าที่เป็นไปตามเงื่อนไข (สมการ 29)  $\omega_1 = \omega_2$  นั่นก็คือ โชน 2 ปรับสภาพไปเป็นโชน 1 นี่เป็นกลไกทั่วไปที่กล่าวได้ว่าบางส่วนของ migration zone ใน column เกิดมาจากความเข้มข้นที่ก่อดำใน column ก่อนเริ่ม electromigration ถ้า column บรรจุสาร discontinuous electrolyte ก่อนที่การทดลองจะเริ่ม ต้น ค่า regulating function ใน column จะมีหลายค่าตามค่า electrolyte phase และค่าเหล่านี้ไม่ขึ้นกับเวลา เมื่อเริ่มกระบวนการเคลื่อนที่ของอนุภาค migration zone จะเลียนแบบทั้งความไม่สม่ำเสมอและระดับความเข้มข้น ณ ตำแหน่งที่มันสร้างอยู่ก่อนแล้วเมื่อต่อกับแรงดันคร่อม column

เป็นสิ่งจำเป็นที่จะกล่าวถึงรูปอื่นๆ ของ regulating function เมื่อคุณสมการ 29 ด้วยค่าคงที่  $u_R/z_R$  สมการ regulating function ที่ได้คือ

$$\omega' = \omega \frac{u_R}{z_R} \quad (30)$$

ซึ่งจะมีขนาดของความเข้มข้นอยู่ด้วย ตัวห้อย  $R$  เป็นชนิดของไอออน regulating function ในรูปนี้มีประโยชน์มากในการอธิบายเรื่อง unsteady-state migration

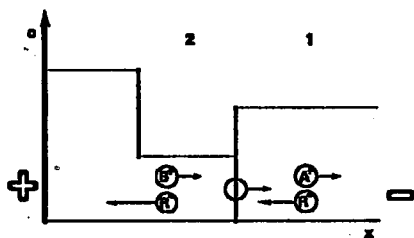


รูปที่ 2.7 ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์  $A^+R^-$  และ  $B^+R^-$  ในระหว่างที่เกิด electrophoretic migration ภายในท่อ ( $u_B < u_A$ )

- (a) ที่สภาวะเริ่มต้น
- (b) ผลจากการเกิด electromigration จะมีโซน 2 เกิดขึ้น

### 2.2.2 Steady-state migration

คำตอบของสมการการเคลื่อนที่แบบ electrophoresis ตรงกับสมการ steady-state migration ที่จะกล่าวถึงนี้ พิจารณาอิเล็กโตรไลต์แก่ 2 ชนิดที่มีไอออนเป็น  $A^+ R^-$ ,  $B^+ R^-$  แยกตัวออกจากกันที่ sharp zone boundary ก่อนจะเกิด electromigration ดังรูปที่ 2.7 a เราทราบจากการทดลองว่า ถ้าโซน A อยู่หน้าโซน B ในทิศทางของ electrophoretic migration และคงสภาพอยู่ตลอดระบบแสดงว่า  $u_B < u_A$  ดังนั้นเมื่อป้อนสนามไฟฟ้า ผลที่ได้คือ steady-state migration ซึ่งสามารถแสดงลักษณะได้โดยการสร้างตัวของโซน 2 และ moving boundary  $2 \rightarrow 1$  เมื่อความเข้มข้นของ A และ B คงที่ ดังรูปที่ 2.8 พิจารณาความหนาแน่นของกระแสค่าหนึ่ง ความเข้มข้นขององค์ประกอบไอออนิก A, B และ zone boundary  $2 \rightarrow 1$  เคลื่อนที่โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ความเร็วคงที่  $v_{1,2}$  ที่จุดเริ่มต้น boundary ระหว่างโซน 3 และ 1 (รูปที่ 2.7 a) ซึ่งไม่สม่าเสมอจะไม่เคลื่อนที่และเรียกว่า stationary boundary นั่นคือบริเวณ 3,2



รูปที่ 2.8 ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์  $A^+R^-$  และ  $B^+R^-$  ( $u_B < u_A$ ) กับความเร็วขององค์ประกอบที่เป็นไอออนและ moving boundary 2-1 ในระหว่างที่เกิด steady-state electromigration (สมการ 35-39)

การเปลี่ยนแปลงกับเวลาของความเข้มข้นขององค์ประกอบไอออนิก  $i$  ที่จุดหนึ่ง จะคงที่โดยเกี่ยวข้องกับระบบภายนอกที่สัมพันธ์กัน สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการ 20 เมื่อค่า mass flux  $J_i$  ถูกแทนค่าด้วยสมการ 18 และกำหนดให้  $v$  คงที่ สำหรับสภาวะ steady-state

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -v_{12} \frac{\partial c_i}{\partial x} \quad (31)$$

คำตอบเฉพาะของสมการนี้คือ

$$c_i = f_i(x - v_{12}t) \quad (32)$$

เมื่อ  $f_i$  คือ ฟังก์ชันที่ได้จาก concentration distribution หลังสภาวะ steady-state และไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

เมื่อหาค่า concentration distribution ขององค์ประกอบ  $i$  และความเร็ว  $v_{12}$  ด้านขวาของสมการต่อเนื่อง(สมการ 25) (ตัวห้อย  $i$  สามารถเปลี่ยนเป็นตัวห้อย A,B,C... สำหรับอิเล็กโทรไลต์แก่) จะถูกทำให้เท่ากับด้านขวาของสมการต่อเนื่องของ steady migration (สมการ 31)

$$\frac{I}{S} \frac{d}{dx} \left( \frac{c_i u_i}{\chi} \right) = v_{12} \frac{dc_i}{dx} \quad (33)$$

อินทิเกรตสมการ 33 จะได้สมการ moving boundary อยู่ในรูป

$$\frac{I}{S} \left( \frac{c_{i1} u_{i1}}{\chi_1} - \frac{c_{i2} u_{i2}}{\chi_2} \right) = v_{12} (c_{i1} - c_{i2}) \quad (34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวห้อย 1,2 คือ โชน 1 และ 2

ผลที่ได้แสดงเงื่อนไขสำหรับ steady-state electrophoresis migration รวมทั้งความสัมพันธ์เพื่อการคำนวณความเข้มข้นและความเร็วขององค์ประกอบ

Zone 2

Boundary 1,2

Zone 1

เงื่อนไขที่กำหนดให้

$$u_{B,2}(\text{const}) < u_{A,1}(\text{const})$$

$$u_{i,2} \neq u_{i,1}(\text{generally})$$

$$i_2 = i_1$$

$$\chi_2 < \chi_1$$

$$E_2 > E_1$$

ความเร็ว

$$v_{12} = \frac{I/S \left( \frac{c_{i1}u_{i1}}{\chi_1} - \frac{c_{i2}u_{i2}}{\chi_2} \right)}{c_{i1} - c_{i2}} \quad (35)$$

$$v_{R2} = E_2 u_{R2} = \frac{I}{S} \frac{u_{R2}}{\chi_2} \neq v_{R1} = E_1 u_{R1} = \frac{I}{S} \frac{u_{R1}}{\chi_1} \quad (36)$$

$$v_{12} = \frac{c_{R1}v_{R1} - c_{R2}v_{R2}}{c_{R1} - c_{R2}} \quad (37)$$

$$v_{B2} = E_2 u_{B2} = \frac{I}{S} \frac{u_{B2}}{\chi_2} = v_{12} = v_{A1} = E_1 u_{A1} = \frac{I}{S} \frac{u_{A1}}{\chi_1} \quad (38)$$

ความเข้มข้น

$$c_{B2} = \frac{u_{B2}}{u_{B2} + |u_{R2}|} \cdot \frac{u_{A1} + |u_{R1}|}{u_{A1}} \cdot c_{A1} \quad (39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c_{A,2} = 0$$

$$c_{B,1} = 0$$

ความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณ moving boundary velocity  $v_{1,2}$  (สมการ 35) พิสูจน์มาจากสมการ moving boundary (สมการ 34) ความเร็วในการแพร่ของ องค์ประกอบ A,B,R (สมการ 38) พิสูจน์จากนิยามของ electrophoretic mobility (สมการ 6) และสมการ 12 อย่างไรก็ตาม สมการ 38 อาจได้มาจากสมการ 35 เพื่อใช้สำหรับไอออน A หรือ B จะได้ว่า องค์ประกอบที่สร้าง steady-state zone บนด้านหนึ่งของ moving boundary แพร่ไปด้วยความเร็ว  $v_{1,2}$  ดังนั้น สมการ 38 จึงเป็นนิยามของ electrophoretic mobility ซึ่งแสดงถึงวิธีการวัดค่าของตัวมันเอง

องค์ประกอบ R ที่สร้างความเข้มข้นที่สภาวะคงตัวในโซนทั้งสอง (1,2) จะไม่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วของ boundary และ  $v_{R,1}$  แตกต่างกับ  $v_{R,2}$  หลังจากแทนสมการ 36 ลงในสมการ 35 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง boundary velocity  $v_{1,2}$  ความเร็ว และความเข้มข้นขององค์ประกอบ R ในโซน 1 และ 2 ในสมการ 37

ความเข้มข้น  $c_{B,2}$  และ  $c_{A,1}$  ไม่แน่นอน แต่จะปรับตัวโดยอาศัยความคล่องตัวของทั้ง 2 องค์ประกอบ ดังสมการ 39 สมการนี้ได้จากสมการ 38 โดยการแทนค่าความนำจำเพาะ (สมการ 12) เมื่อใช้เงื่อนไข electroneutrality  $c_{A,1} = c_{R,1}$  และ  $c_{B,2} = c_{R,2}$  ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการ 39 ได้ใหม่ในรูปของความเข้มข้น  $c_{R,1}$  และ  $c_{R,2}$

moving boundary 2  $\rightarrow$  1 แสดงคุณลักษณะอย่างหนึ่งที่เรียกว่า self-sharpening effect สมมุติให้  $x_2 < x_1$  ตามสมการ 12 จะได้ว่า  $E_2 > E_1$  ดังนั้นถ้า  $B^+$  ถูกผลักจากโซน 2 ไปโซน 1 ด้วยการแพร่ ความเร็วของมันจะลดลงเนื่องจากความแข็งแรงของสนามไฟฟ้าต่ำลงในโซนนี้ และไอออนจะกลับไปยังโซน 2 อย่างรวดเร็ว ในทางกลับกัน  $A^+$  จะแทรกไปยังโซน 2 ความแรงของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าในโซนนี้จะผลักมันกลับไปยังโซน 1 ด้วยเหตุนี้ self-sharpening effect จึงเป็นการรักษาสมดุลย์ของกระบวนการแพร่สาร

### 2.2.3 Unsteady-state migration

unsteady-state migration ของโซนเป็นปรากฏการณ์ที่มักเกิดขึ้นในช่วงหนึ่งของ boundary ที่ไม่มี self-sharpening effect ในช่วงของ unsteady-state migration sharp boundary เริ่มต้นของโซนถูกทำให้กระจายไปด้วยการแพร่และelectromigration อิทธิพลข้อหลังนี้เรียกว่า electromigration dispersion มันจะแสดงตัวมันเองโดยสังเกตจากโซนที่กว้างขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าผลที่ได้จากการแพร่ธรรมดา จะกล่าวถึงตัวอย่างหนึ่งที่สามารถอธิบายเกี่ยวกับระบบของอิเล็กโตรไลต์แก่  $A^+ R^-$  และ  $B^+ R^-$  ในทางตรงกันข้ามกับรูปที่ 2.8 โซน 3 ประกอบด้วยไอออน  $A^+$  ที่มีความคล่องตัวสูงอยู่หลังไอออน  $B^+$  ที่มีความคล่องตัวต่ำกว่าในโซน 1 (รูปที่ 2.9 a) จากรูปที่ 2.9 b เมื่อป้อนสนามไฟฟ้า ไอออน  $A^+$  จะทะลุ boundary ด้านหลังของโซน 1 ที่บรรจุไอออน  $B^+$  และถูกเร่งให้ไปไกลขึ้นระหว่างที่เกิด electromigration ดังนั้นนอกจากจะเกิดโซนที่ปรับตัวแล้วของอิเล็กโตรไลต์  $A^+ R^-$  (โซน 2) จะมีการสร้าง time-variable mixed zone (1-2) ที่บรรจุทั้ง  $A^+$  และ  $B^+$  จะได้คำตอบของสมการ partial differential ของสมการ 25 เมื่อไม่สนใจการแพร่

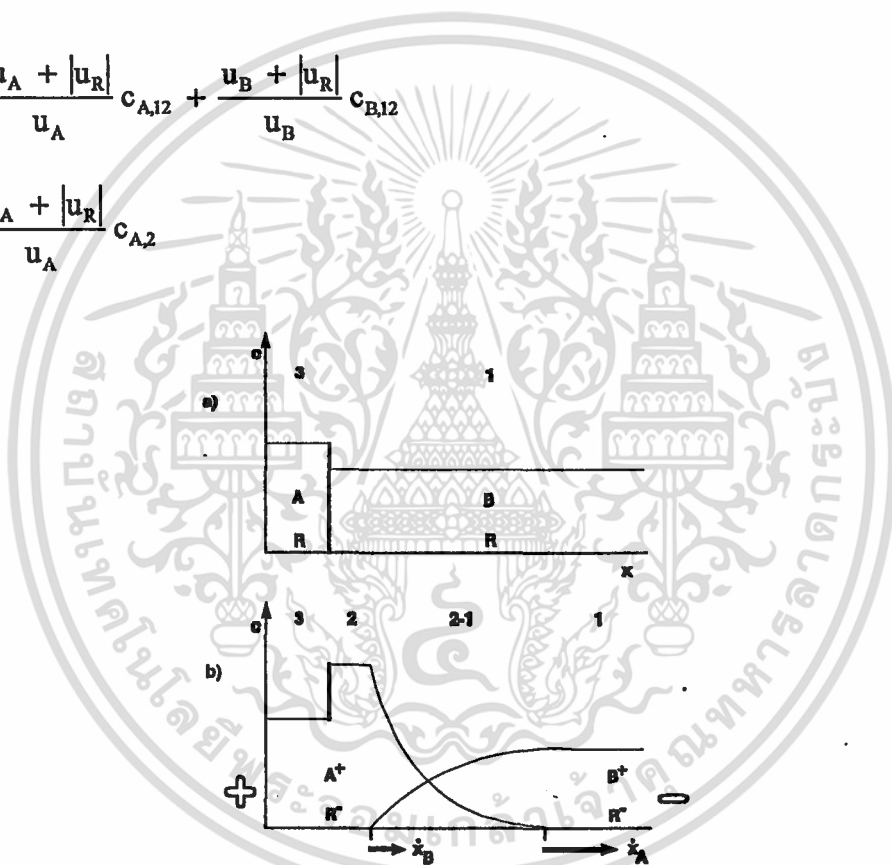
regulating function ในรูปของสมการ 30 มีความสำคัญมากถ้าพบ concentration distribution ใน โชน 1-2 สำหรับเงื่อนไขเริ่มต้นของ regulating function ของโชนที่เกี่ยวข้อง สามารถเขียนอยู่ในรูป สำหรับ  $t = 0, x > 0$  :

$$\omega'_1 = \left( \frac{c_{B,1}}{u_B} + \frac{c_{R,1}}{|u_R|} \right) |u_R| = \frac{u_B + |u_R|}{u_B} c_{B,1} \quad (40)$$

และสำหรับ  $t > 0, x > 0$  :

$$\omega'_{12} = \frac{u_A + |u_R|}{u_A} c_{A,12} + \frac{u_B + |u_R|}{u_B} c_{B,12} \quad (41)$$

$$\omega'_2 = \frac{u_A + |u_R|}{u_A} c_{A,2} \quad (42)$$



รูปที่ 2.9 ความเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์  $A^+R^-$  และ  $B^+R^-$  ( $u_A > u_B$ ) ในระหว่างที่เกิด unsteady-state electromigration

ที่ตำแหน่งของระบบนี้เมื่อโชน 1, 1-2, 2 เกิดขึ้นติดต่อกันระหว่างช่วงที่ทำการวิเคราะห์ค่าของ regulating function จะไม่เปลี่ยนแปลง

$$\omega'_1 = \omega'_{12} = \omega'_2 \quad (43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมสมการ 40, 42 และ 43 จะสามารถหาค่าความเข้มข้นในโซน 2 ได้ว่า

$$c_{A,2} = \frac{u_A}{u_A + |u_R|} \cdot \frac{u_B + |u_R|}{u_B} c_{B,1} \quad (44)$$

เปรียบเทียบกับสมการ 39

ความเร็วของ boundary ของอ็อน  $B^+$   $\dot{x}_B$  เท่ากับความเร็วของอ็อนเดี่ยว  $B^+$  ในโซน

2

$$\dot{x}_B = u_B E_2 = u_B \frac{I}{S\chi_2} \quad (45)$$

เมื่อรวมกับสมการ 44 จะได้

$$\dot{x}_B = \frac{u_B^2 I}{SF u_A (u_B + |u_R|) c_{B,1}} \quad (46)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับแคทอ็อน  $A^+$

$$\dot{x}_A = \frac{u_A I}{SF (u_B + |u_R|) c_{B,1}} \quad (47)$$

เมื่อ  $\dot{x}_A$  เท่ากับความเร็วของอ็อนเดี่ยว  $A^+$  ในโซน 1 เมื่อรวมสมการ 46 กับ 47 จะได้ว่า

$$\dot{x}_A = \frac{u_A^2}{u_B^2} \dot{x}_B \quad (48)$$

นั่นคือความเร็วของ boundary ทั้งสองอยู่ในอัตราส่วนของกำลังสองของค่าความคล่องตัวของแต่ละ boundary

เพื่อคำนวณตำแหน่งของโซนผสม 1-2 กำหนดเงื่อนไข  $\omega'_{12} = \omega'_1$  เพื่อแก้สมการอื่นๆ ด้วยผลบวกของสมการการเคลื่อนที่ในสมการ 20 สำหรับอ็อน  $A^+$  และ  $B^+$  ได้สมการ partial differential ที่มีตัวแปรใหม่ว่า

$$Z = \omega' / \chi \quad (49)$$

คำตอบของสมการนี้อยู่ในรูปของ

$$Z = (a/b)^{1/2} \quad (50)$$

เมื่อ

$$a(x) = \frac{1}{Fu_A u_B} \int_0^x \omega'(x) dx \quad (51)$$

และ

$$b(x) = \frac{1}{S} \int_0^t I dt \quad (52)$$

ในกรณีนี้สำหรับ  $x > 0$  และ  $t > 0$ ,  $\omega$  และ  $I$  เป็นค่าคงที่ ผลที่ได้คือ

$$Z(x,t) = \left( \frac{S\omega'x}{Fu_A u_B I t} \right)^{1/2} \quad (53)$$

เมื่อแทนค่า  $\omega'$  และ  $\chi$  ในสมการ 43 และ 49 และบวกสมการทั้งสองด้วยสมการ 53 จะได้ค่าความเข้มข้นของไอออน  $A^+$  และ  $B^+$  ใน mixed zone 1-2 เป็น

$$c_{A,12}(x,t) = c_{B1} \frac{u_A}{u_A - u_B} \frac{u_B + |u_R|}{u_A + |u_R|} \left( \frac{1}{Fu_B Z} - 1 \right) \quad (54)$$

$$c_{B,12}(x,t) = c_{B1} \frac{1}{u_A - u_B} \left( u_A - \frac{1}{FZ} \right) \quad (55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

concentration distribution ของอ็อน A และ B ระหว่างมี unsteady-state migration แสดงในรูป 10 b

## 2.3 Effects accompanying electrophoresis

electrophoresis มักจะประกอบด้วยหลายปรากฏการณ์ที่มีอิทธิพลต่อการแยกของสัญญาณ detector ปรากฏการณ์ที่สำคัญที่สุดคือผลของ Joule heat ,electroosmosis, การแพร่และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับ boundary wall

### 2.3.1 Joule heat

ในขณะที่มีกระแสไฟฟ้า  $i$  ไหลผ่านอิเล็กโตรไลต์ที่บรรจุอยู่ใน separation column ที่มีพื้นที่หน้าตัด  $S$  ยาว  $l$  Joule heat ที่เกิดขึ้นต่อหน่วยปริมาตรต่อวินาที คือ

$$P_v = \frac{EI}{S} = \frac{I^2}{\chi S^2} \quad (56)$$

เมื่อ  $\chi$  คือ conductivity ของอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $I/E$

เมื่อเกิด Joule heat จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ effective mobility มีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนั้นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้จะเป็นสาเหตุให้ thermolabile compound ถูกทำลายไป หรือจะทำให้เกิดฟองที่ไปขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้า

เพื่ออธิบายการเพิ่มขึ้นของ steady-state mean temperature ของอิเล็กโตรไลต์ เรากำหนดพารามิเตอร์  $\bar{Q}$  ว่า

$$\bar{Q} = \frac{(\bar{T} - T_0)}{P_1} \quad (57)$$

เมื่อ  $\bar{T}$  เป็น steady-state mean temperature ของอิเล็กโตรไลต์  $T_0$  คือ อุณหภูมิของ thermostatic medium และ  $P_1$  คือ Joule heat ที่เกิดขึ้นใน unit length of a column แล้ววัดกระแสที่ได้ ความผิดพลาดจากกฎของโอห์มที่มีสาเหตุมาจากความร้อนคือ ค่า  $\Delta T$  ส่วนค่า  $\bar{Q}$  ใช้ในการเปรียบเทียบชนิดของ column หลายชนิดโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิ(ให้คงที่) ของ column

Joule heat ไม่เพียงแต่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ยังก่อให้เกิด temperature gradient กำหนดให้ค่าความนำความร้อน (คงที่) ของอิเล็กโตรไลต์เป็น  $1(\text{Js}^{-1}\text{m}^{-1}\text{K}^{-1})$  คำตอบของสมการ steady-state heat transfer ภายใน column ของพื้นที่หน้าตัดที่เป็นวงกลมจะอยู่ในรูป

$$T(r) = \frac{P_v}{4\lambda} (R^2 - r^2) + T_0 \quad (58)$$

เมื่อ  $r$  คือ ระยะทางจากแกนตั้งของท่อ  
 $R$  คือ รัศมีภายใน

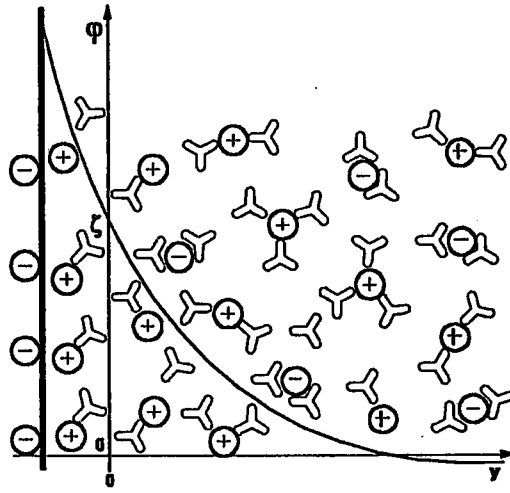


รูปที่ 2.10 แสดงการกระจายค่าของรัศมีกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น  $T - T_0$  คือค่า Joule heat ที่เกิดขึ้นในแคปิลลารีที่มีรัศมีภายใน  $R = 0.4 \text{ mm}$   $PI = 3.3 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-1}$ ;  $Q = 1.36 \text{ KmsJ}^{-1}$

### 2.3.2 Electroosmotic

การเคลื่อนที่ของของเหลวไปยังอิเล็กโทรดเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาเรียกว่า electroosmotic flow เมื่อ separation column บรรจุอิเล็กโทรไลต์ electric double layer จะเกิดขึ้นบนผิวของผนังท่อเนื่องจาก ionizable group ของวัสดุที่เป็นผนัง และ(หรือ)ไอออนของประจุบวกหรือลบที่ถูก adsorb อยู่บนผนัง

ดังตัวอย่าง ใน capillary ที่ทำจากควอทซ์ silanol groups ที่อยู่บนผิวจะสร้างส่วนลบของ electric double layer ไอออนบวกจะถูกดูดไปยังผนัง(ที่เป็นประจุ ลบ) และไอออนลบจะถูกผลักออก ดังรูปที่ 2.11 ส่วนหนึ่งของไอออนจะสร้างเป็นส่วนอิเล็กโทรไลต์ของ electric double layer จะถูกกำหนดโดย electrostatic force ใกล้ผนัง capillary และเรียกว่า Stern layer ไอออนส่วนที่เหลือจะรวมตัวเป็น space charge ของ mobile diffusive layer ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของ electroneutrality space charge ของ mobile layer จะได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า shell รูปทรงกระบอกของ space charge จะแตกตัวจาก Stern layer ที่ slipping plane ( $y=0$ ) และจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดพร้อมๆ กับ ion solvation atmosphere เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลาย การเคลื่อนที่นี้จะกระจายไปทั้งของเหลว



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดง electric double layer

ที่สภาวะคงตัว electrostatic force และแรงเสียดทานจะเขียนอยู่ในรูปสมการได้ สำหรับ model 2 มิติของผนังเรียบ

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \rho = \eta \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (59)$$

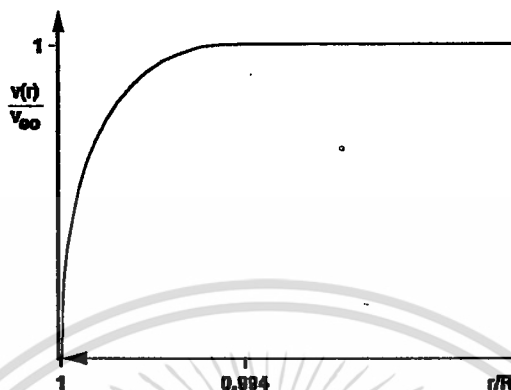
เมื่อ  $\rho$  เป็น charge density และ  $x, y$  เป็น Cartesian coordinate จากสมการของ ปัวซอง  $d^2\phi/dy^2 = -\rho/\epsilon$  เมื่อ  $\epsilon$  เป็นค่า permittivity ของอิเล็กโตรไลต์ และ  $\phi$  เป็นศักย์ไฟฟ้าของ double layer ดังรูปที่ 2.11 แทนค่าความหนาแน่นประจุลงในสมการ 59 ได้ว่า

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = -\frac{\eta}{\epsilon} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (60)$$

คำตอบของสมการนี้จะได้ค่าความเร็วของ electroosmotic flow เนื่องจาก boundary condition ค่าศักย์ไฟฟ้า electrostatic ของ double layer และค่า derivative ของความเร็ว electroosmotic flow จะหมดไปเมื่อ  $y$  มีค่า ; ที่ slipping plane เมื่อ  $y=0$  ความเร็วจะเท่ากับ ศูนย์และศักย์ไฟฟ้า electrostatic มีค่าเป็น  $\zeta$  (รูปที่ 2.11) ค่าความเร็วจะเป็น

$$v(y) = \frac{E\epsilon}{\eta} [\zeta - \phi(y)] \quad (61)$$

แปลงรูปสมการโดยอาศัยสมการ 2 สมการนี้แสดงให้เห็นว่าค่าความเร็วนี้พิจารณาจาก curve ของ double layer potential ค่าความหนาที่ใช้นี้มีค่าเป็นหลายๆ เท่าของหน่วยนาโนเมตร ดังนั้นผลที่ได้เกือบจะเรียบเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ electroosmotic mobility  $v(r)/v_{\infty}$  กับอัตราส่วนของระยะห่าง  $r/R$  ของท่อ

ความเร็วเชิงเส้นของ plug profile เมื่อ  $\phi(y) = 0$  คือ

$$v_{\infty} = \frac{e\zeta}{\eta} E \quad (62)$$

เทอม  $e\zeta/\eta$  มักจะเขียนอยู่ในรูป  $U_{e0}$  และเรียกว่า electroosmotic mobility

ค่าของ zeta potential จะขึ้นกับ ประจุบนผิวและความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าตกเร็วขึ้น และค่า zeta potential ลดลง สำหรับ quartz capillary ค่าแรงดัน  $-100$  mV สารละลายโปตัสเซียมคลอไรด์เข้มข้น  $0.001$  M เราจะประมาณค่า  $U_{e0}$  ภายใต้เงื่อนไขนี้ได้ว่าประมาณ  $71 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$

### 2.3.3 Diffusion

การแพร่เป็นการเคลื่อนที่ของสารภายใต้การกระทำของ gradient ของศักย์ไฟฟ้าเคมีหรือภายใต้การกระทำของความเข้มข้นของสารนี้ การเคลื่อนที่นี้สามารถสังเกตได้จากการไหลของมวลเนื่องจาก gradient ของความเข้มข้นของสารที่มีอยู่ ซึ่งสามารถ อธิบายได้ในรูปสัดส่วนของ gradient ของความเข้มข้นขององค์ประกอบ  $i$  ( $dc_i/dx$ ) กับ mass flux ของตัวมันเองในตัวทำละลายที่ไหลมา

$$J_i = -D_i \left( \frac{dc_i}{dx} \right) \quad (63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $D_i$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ จะแสดงถึงความสามารถของอนุภาคในการเคลื่อนที่หรือการแพร่ในตัวกลางเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบ Brownian

ค่าฟลักซ์ของการแพร่นี้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับ electromigrational flux ( $c_i u_i E$ ) ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอก ภายใต้เงื่อนไขของสภาวะคงตัวเมื่อค่าทั้งสองเท่ากัน

$$c_i u_i E = -D_i \left( \frac{dc_i}{dx} \right) \quad (64)$$

แก้สมการนี้โดยกำหนดให้  $E$ ,  $u_i$  และ  $D_i$  เราจะได้สมการความเข้มข้นที่สภาวะคงตัวว่า

$$c_i = c_0 \exp\left( - \frac{u_i E x}{D_i} \right) \quad (65)$$

เมื่อความเข้มข้น  $c_0$  (ที่  $x = 0$ ) เป็นค่าคงที่

หลักสำคัญของการแพร่คือ ความสัมพันธ์ระหว่าง binary diffusion coefficient และค่า electrophoretic mobility ซึ่งทำให้สามารถทำนายค่า  $u_i$  โดยใช้ค่า  $D_i$  และในทางกลับกัน เปรียบเทียบสมการ 65 กับสมการ Boltzmann distribution  $c_i = c_0 \exp(-U_i/kT)$  เมื่อ  $k$  เป็นค่า Boltzmann constant  $U_i = z_i e \Phi$  คือ พลังงานศักย์ไฟฟ้า และ  $T$  เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ เราได้สมการ Nernst-Einstein โดยอาศัยสมการ 2

$$D_i = \frac{u_i k T}{z_i e} \quad (66)$$

ถ้า electrophoretic mobility ถูกแทนด้วยสมการ 7 จะได้สมการ Stokes-Einstein สำหรับทรงกลมที่มีรัศมี  $r_i$

$$D_i = \frac{kT}{6\pi\eta r_i} \quad (67)$$

มีหลักทั่วไปในการประมาณค่า  $D_i$  จากความคล่องตัวว่า

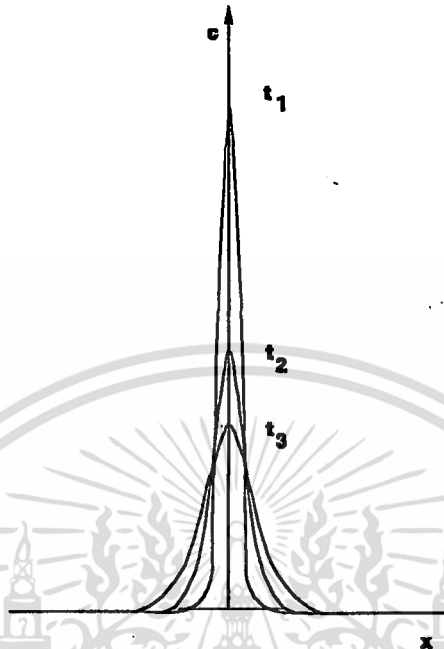
$$D_i = 0.025 u_i \quad (68)$$

ใน electrophoresis การแพร่ทำให้แถบกว้างขึ้นซึ่งจะไปขัดขวางการแยก กำหนดให้โซนตัวอย่างที่สร้างขึ้นในตอนแรกมีลักษณะเป็นพัลส์แคบๆ เมื่อเวลาผ่านไป  $t$  เนื่องจากการแพร่ กราฟที่ได้จะเป็นรูประฆังคว่ำ นั่นคือ Gaussian concentration profile ซึ่งจะแทนด้วยตัวแปร

$$\sigma_i^2 = 2D_i t$$

(69)

การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของการแพร่กับเวลาจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของการกระจายค่าความเข้มข้นกับเวลา  $t_1 < t_2 < t_3$

## 2.4 วิธีการแยกสารด้วยวิธี electrophoresis

ระบบ capillary electrophoresis จะมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคร่อมหลอด แคปิลลารีเพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในหลอด ซึ่งจะส่งผลให้มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มี ประจุและเกิดการแยกชั้นได้ก็ต่อเมื่อโมเลกุลเหล่านี้มีความเร็วในการเคลื่อนที่ภายในหลอดแคปิลลารีไม่เท่ากัน ความเร็วของอนุภาคอธิบายได้โดยใช้สมการ

$$v = \mu E$$

(70)

เมื่อ  $v$  คือ ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ ; ซม./วินาที

$\mu$  คือ ค่า mobility ของอนุภาค ; ซม.<sup>2</sup>/โวลต์.วินาที

$E$  คือ ความแรงของสนามไฟฟ้า ; โวลต์/ซม.

ค่าความแรงของสนามไฟฟ้าได้มาจากสมการ

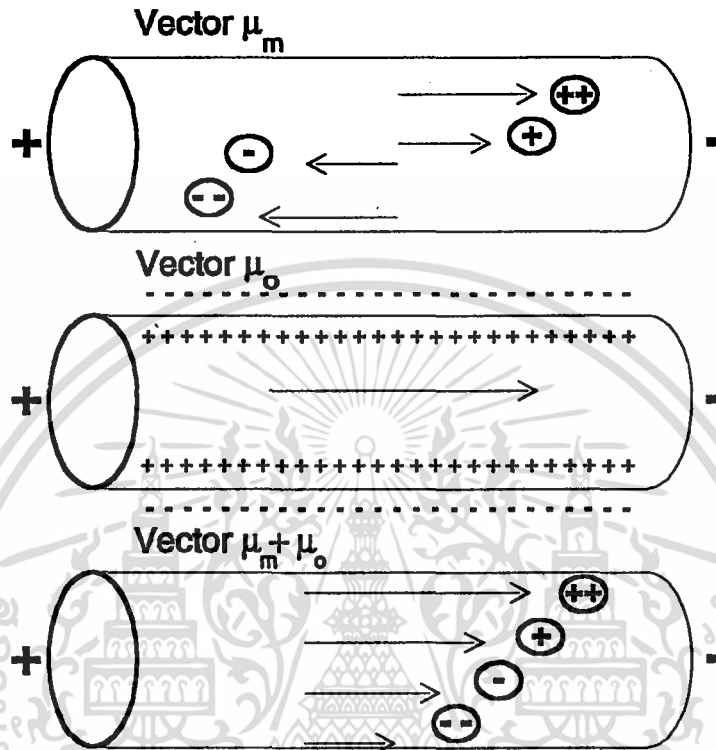
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \frac{V}{L}$$

เมื่อ  $V$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแคปิลลารี ; โวลต์

$L$  คือ ค่าความยาวของหลอดแคปิลลารี ; ซม.

รูปที่ 2.14 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของโมเลกุล



รูปที่ 2.14 Mobility ของสารภายใน Fused Silica

## 2.5 ความเร็วสัมพัทธ์ของโมเลกุล

ความเร็วสัมพัทธ์ของโมเลกุลประกอบด้วยการเคลื่อนที่ 2 แบบ คือ

### 2.5.1 Electrophoretic mobility ( $\mu_m$ )

เป็นการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุกับขั้วไฟฟ้าบวก (anode) ทำให้โมเลกุลมีค่า electrophoretic mobility ในทิศเคลื่อนเข้าสู่ขั้วบวก โดยที่ electrophoretic mobility ของโมเลกุลหนึ่งๆ จะขึ้นอยู่กับประจุและขนาดของโมเลกุลนั้น โมเลกุลที่มีประจุแรงมากจะมีค่า electrophoretic mobility สูงกว่าโมเลกุลที่มีประจุอ่อน และโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ต่างจากโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก

### 2.5.2 Electroosmotic mobility ( $\mu_0$ )

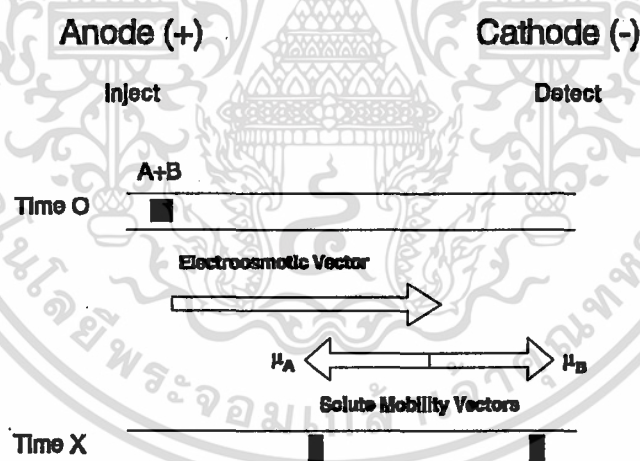
เป็นการเคลื่อนที่ของประจุบวกที่เกิดจากการแตกตัวของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยจะมีทิศการเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วลบ (cathode) ทำให้มีการไหลเกิดขึ้น

ความเร็วสัมพัทธ์ของโมเลกุล จะเป็นผลรวมของการเคลื่อนที่ทั้งสองแบบดังสมการ

$$\mu = \mu_m + \mu_0 \quad (72)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ ค่าการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวอย่าง

สารตัวอย่างจะถูกตรวจวัดได้ก็ต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ผ่าน detector ซึ่งอยู่ที่ปลายด้านคาโทด (ขั้วลบ) สำหรับโมเลกุลส่วนใหญ่ค่า osmotic flow จะมีค่ามากกว่าค่า electrophoretic vector ซึ่งทำให้ทั้งโมเลกุลที่มีประจุบวกและที่มีประจุลบสามารถเคลื่อนสู่คาโทดได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม โมเลกุลที่มีประจุบวกจะมีแรงดึงดูดให้เคลื่อนเข้าสู่คาโทด (ซึ่งเป็นขั้วลบ) รวมกับแรงจากการไหลของออสโมติกของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electroosmotic flow) ซึ่งเคลื่อนเข้าสู่คาโทดเช่นกัน ทำให้ประจุบวกเคลื่อนออกมาได้เร็วที่สุด (มี migration time น้อยที่สุด) จากนั้นจึงเป็นโมเลกุลที่เป็นกลาง ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของ electroosmotic flow เท่านั้น และจึงเป็นประจุลบซึ่งมี electrophoretic vector อยู่ในทิศตรงข้ามกับ electroosmotic flow ทำให้ออกมาได้ช้าที่สุด การเคลื่อนที่ของโมเลกุลมีลักษณะดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในหลอดแคปิลลารี

## 2.6 การพิจารณาค่าความเร็วสัมพัทธ์

### 2.6.1 ความเร็วของอนุภาค (Analyte velocity)

ในการพิจารณาความเร็วของอนุภาค จะสังเกตจากเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปยัง detector ค่าความเร็วของอนุภาคมีค่าเป็น

$$v = \frac{L_d}{t_d} \quad (73)$$

เมื่อ  $v$  คือ ค่าความเร็วของอนุภาค ; ซม./วินาที

$L_d$  คือ ค่าความยาวของหลอดแคปิลลารีถึง detector ; ซม.

$t_d$  คือ ค่าเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปยัง detector ; วินาที

เมื่อได้ทราบค่าความเร็วของอนุภาค จะสามารถพิจารณาค่าเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคและค่า elution time เมื่อความยาวของหลอดแคปิลลารีมีค่าเปลี่ยนแปลงได้

### 2.6.2 ความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาค (Analyte mobility)

จะใช้ค่าเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคมาพิจารณาค่าความเร็วสัมพัทธ์รวมของอนุภาค นั่นคือ

$$\mu = \frac{L_d L_t}{t_d V} \quad (74)$$

เมื่อ  $m$  คือ ค่าความเร็วสัมพัทธ์รวมของอนุภาค ; ซม.<sup>2</sup>/โวลต์.วินาที

$L_d$  คือ ค่าความยาวของหลอดแคปิลลารีถึง detector ; ซม.

$L_t$  คือ ค่าความยาวของหลอดแคปิลลารีทั้งหมด ; ซม.

$t_d$  คือ ค่าเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปยัง detector ; วินาที

$V$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ; โวลต์

เมื่อได้ทราบค่าความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาค จะสามารถพิจารณาค่าเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาค และค่า elution time สำหรับค่าศักย์ไฟฟ้าและความยาวของหลอดแคปิลลารีที่เปลี่ยนแปลง

### 2.6.3 เวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Migration time) เวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีค่าเป็น

$$t_d = \frac{L_d L_t}{\mu V} \quad (75)$$

- เมื่อ  $t_d$  คือ ค่าเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปยัง detector ; วินาที  
 $L_d$  คือ ค่าความยาวของหลอดแคปิลลารีถึง detector ; ซม.  
 $L_t$  คือ ค่าความยาวของหลอดแคปิลลารีทั้งหมด ; ซม.  
 $m$  คือ ค่าความเร็วสัมพัทธ์รวมของอนุภาค ; ซม.<sup>2</sup>/โวลต์.วินาที  
 $V$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ; โวลต์

### 2.6.4 elution time มีค่าเป็น

$$t_e = \frac{L_t^2}{\mu V} \quad (76)$$

- เมื่อ  $t_e$  คือ ค่าเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปยัง detector ; วินาที  
 $L_t$  คือ ค่าความยาวของหลอดแคปิลลารีทั้งหมด ; ซม.  
 $m$  คือ ค่าความเร็วสัมพัทธ์รวมของอนุภาค ; ซม.<sup>2</sup>/โวลต์.วินาที  
 $V$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ; โวลต์

## บทที่ 3

### การดำเนินงานและการวิจัย

#### 3.1 องค์ประกอบหลักของเครื่อง Capillary Electrophoresis

เมื่อทราบถึงลักษณะพื้นฐานของเครื่องมือ capillary electrophoresis จึงได้มีการออกแบบพร้อมทั้งสร้างเครื่องมือขึ้น เพื่อให้ผลการทดสอบที่แม่นยำและอำนวยความสะดวกให้กับผู้ทดลองมากขึ้น ซึ่งได้สร้างส่วนที่ทำหน้าที่แยกสารขึ้น

ส่วนที่ทำหน้าที่แยกสาร เป็นส่วนที่สารเกิดการแตกตัวเป็นไอออนและมีการเคลื่อนที่ เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ จนทำให้มีการแยกของสารแต่ละชนิดออกจากกัน ในส่วนนี้ประกอบด้วยส่วนย่อยๆ หลายส่วนดังนี้

1. หลอดแคปิลลารี
2. อิเล็กโตรด
3. ขวดบรรจุสาร
4. ที่ใส่ขวดบรรจุสารขนาดเล็ก
5. ที่ใส่ขวดบรรจุสารขนาดใหญ่
6. ที่ยึดที่ใส่ขวดบรรจุสาร
7. ที่จับยึดอิเล็กโตรดด้านนำสารเข้าสู่หลอดแคปิลลารี
8. ที่จับยึดอิเล็กโตรดด้านรับสารออกจากหลอดแคปิลลารี
9. ที่พันหลอดแคปิลลารี
10. ที่จับยึดหลอดแคปิลลารี
11. ตู้ใส่อุปกรณ์

##### 3.1.1 หลอดแคปิลลารี

ทำมาจากซิลิกา ผิวนอกจะเคลือบด้วย polyimide ซึ่งเป็นสารโพลีเมอร์เพื่อเพิ่มความทนทานให้กับหลอดแคปิลลารี ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดจะขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ใช้ เช่น ในกรณีของ open tube capillary electrophoresis จะใช้หลอดยาวประมาณ 40-100 ซม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 25-100 ไมครอน ส่วนของ packed tube capillary electrophoresis จะใช้หลอดที่สั้นกว่าคือประมาณ 10-25 ซม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50-200 ไมครอน ณ จุดที่ทำการตรวจจับโชนของสารที่วิเคราะห์ จะต้องลอก polyimide ที่เคลือบออกไปโดยการเผาไฟ เพื่อให้แสงจากแหล่งกำเนิดทะลุผ่านได้ จุดนี้จะเป็นจุดที่เปราะมาก แต่ในการ ทดลอง จะมีแท่นสำหรับเสียบหลอดแคปิลลารีเพื่อป้องกันการโค้งงอของหลอด ซึ่งจะทำให้หลอดแตกหรือหักได้

### รูปที่ 3.1 แสดงหลอดแคปิลลารี

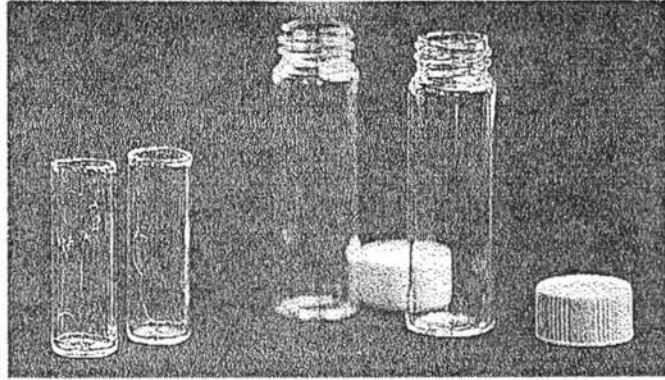
#### 3.1.2 อิเล็กโตรด

เป็นแท่งฟลาตินัมขนาดเล็กความยาวประมาณ 4 ซม. ดังรูปที่ 3.2 ขณะใช้งานจะต่อกับแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง ปลายทั้งสองด้านจะจุ่มลงในสารทดสอบและบัฟเฟอร์ ทำหน้าที่ผ่านแรงดันไปยังสารทั้งสองข้าง การที่เลือกเอาฟลาตินัมมาเป็นอิเล็กโตรดก็เนื่องมาจากฟลาตินัมเป็นโลหะที่เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ซึ่งอาจจะมีผลต่อการทดลองได้

### รูปที่ 3.2 แสดงลวดฟลาตินัมที่ใช้เป็นอิเล็กโตรด

#### 3.1.3 ขวดบรรจุสาร

มี 2 ขนาด ขนาดใหญ่อยู่ทางด้านรับสารตัวอย่าง สูง 5.5 ซม. และมีเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 1.5 ซม. ขนาดเล็กอยู่ทางด้านนำสารเข้าระบบ สูง 3.5 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลางยาว 1 ซม. ใช้สำหรับบรรจุสารบัฟเฟอร์และสารทดสอบ โดยที่ขวดขนาดใหญ่จำนวน 8 ขวดจะบรรจุสารบัฟเฟอร์และรรับสารทดสอบเมื่อทำการทดลอง ขวดขนาดเล็กจำนวน 8 ขวดจะบรรจุสารทดสอบและบัฟเฟอร์สลับกัน ดังนั้นจะสามารถ ทำการทดลองกับสารทดสอบได้ 4 สาร อย่างต่อเนื่องกัน

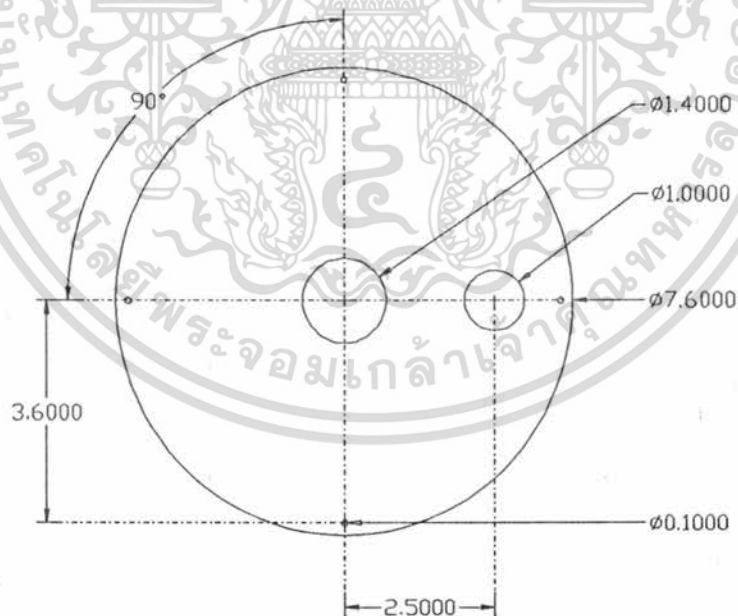


รูปที่ 3.3 ภาพแสดงขบวนการจุสสารขนาดเล็ก (ซ้าย) และขนาดใหญ่ (ขวา)

### 3.1.4 ที่ใส่ขบวนการจุสสารขนาดเล็ก

ประกอบด้วยชิ้นส่วน 3 ส่วน

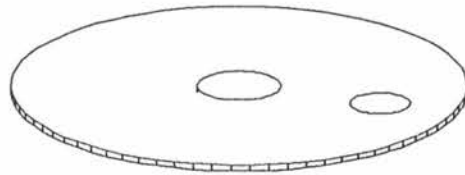
3.1.4.1 ฝาปิด เป็นแผ่นพลาสติกใสรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 ซม. ตรงกลางเจาะเป็นช่องวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 ซม. ดังรูปที่ 3.4 และมีช่องเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. เพื่อให้หลอดแคปิลลารีและอิเล็กโตรดจุ่มลงในสารทดสอบหรือบัพเฟอร์ ส่วนที่บริเวณขอบของฝาปิดจะเจาะเป็นรูขนาดเล็กจำนวน 4 รู เพื่อใช้เป็นที่ยึดกับสลักของกล่องใส่ขบวนการจุสสาร ฝาปิดจะป้องกันการระเหยของสารในกรณีที่สารทดสอบนั้นเป็นสารระเหยง่าย และป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับผู้ทดลองในกรณีที่ไอของสารนั้นเป็นพิษ ฝาปิดจะใช้สำหรับทางด้านนำสารเข้าระบบเท่านั้น



รูปที่ 3.4 แบบด้านบนของฝาปิด

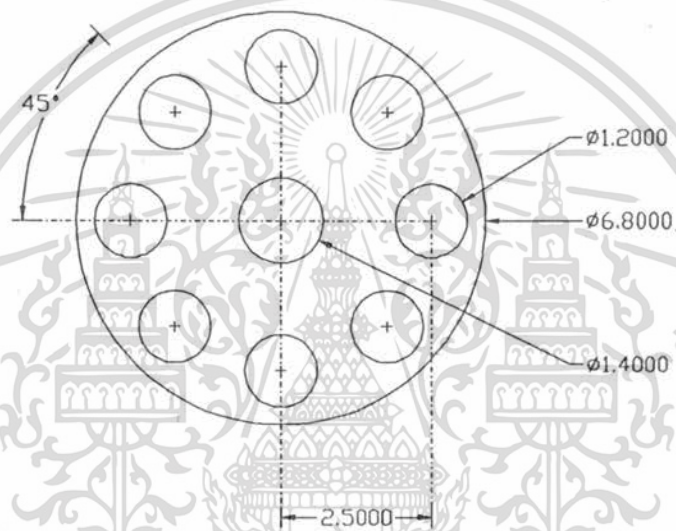
หน่วยที่ใช้ในรูปที่แสดงแบบของชิ้นงานทุกชิ้นมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



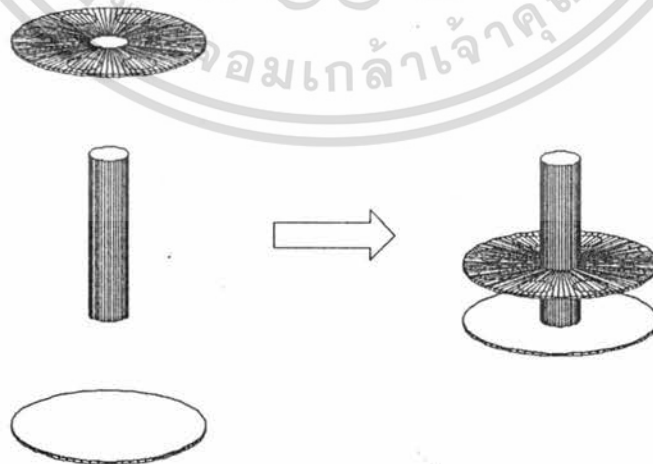
รูปที่ 3.5 ภาพแสดงฝาปิดที่สมบูรณ์แล้ว

3.1.4.2 ที่เลือกขวดบรรจุสาร เป็นแกนหมุนติดกับแผ่นพลาสติกหนา 1 มม. จำนวน 2 แผ่น แผ่นบนมีหน้าที่ป้องกันการล้นของขวดบรรจุสารแบบดังรูปที่ 3.6 แผ่นล่างตัดแผ่นพลาสติกให้เป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6.8 มม. ใช้เป็นพื้นรองขวดบรรจุสาร เมื่อหมุนแกนจะทำให้ส่วนนี้ทั้งหมดหมุนไปด้วย เป็นการเปลี่ยนขวดบรรจุสารจากขวดหนึ่งไปยังขวดหนึ่ง



รูปที่ 3.6 แบบด้านบนของพลาสติกแผ่นบน

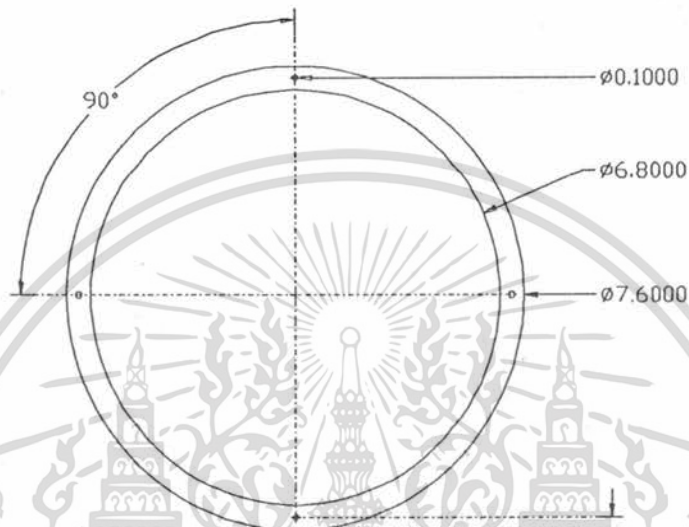
แกนหมุนจะใช้แท่งพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดเท่ากับ 1.4 ซม. ยาว 5.5 ซม.



รูปที่ 3.7 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่เลือกขวดบรรจุสาร

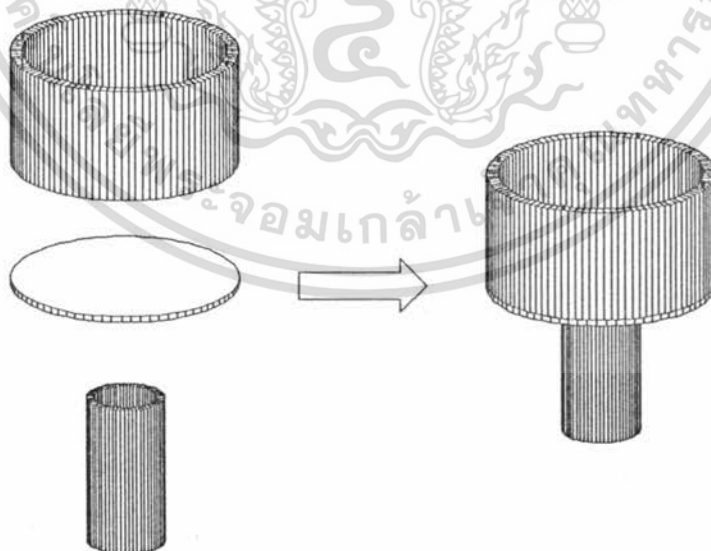
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4.3 กล้องใส่ขวดบรรจุสาร เป็นกล้องวงกลมทำจากท่อพีวีซีขนาด 3 นิ้ว สูง 4 ซม. ดังรูปที่ 3.8 ด้านล่างปิดด้วยแผ่นพลาสติกวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 มม. หนา 2 มม. และนำไปต่อเข้ากับแกนหมุนที่ทำจากท่อพีวีซี ด้านบนของกล้องจะมีสลักเล็กๆ ติดอยู่เพื่อใช้เป็นที่ยึดฝาปิด สลักทำจากแท่งพลาสติกขนาด 1 มม. ยาว 3 มม. นำสลักไปใส่ในช่องขนาด 1 มม. ที่เจาะไว้ด้านบนทั้ง 4 ช่อง โดยให้สลักโผล่ขึ้นมาจากช่อง 1 มม.



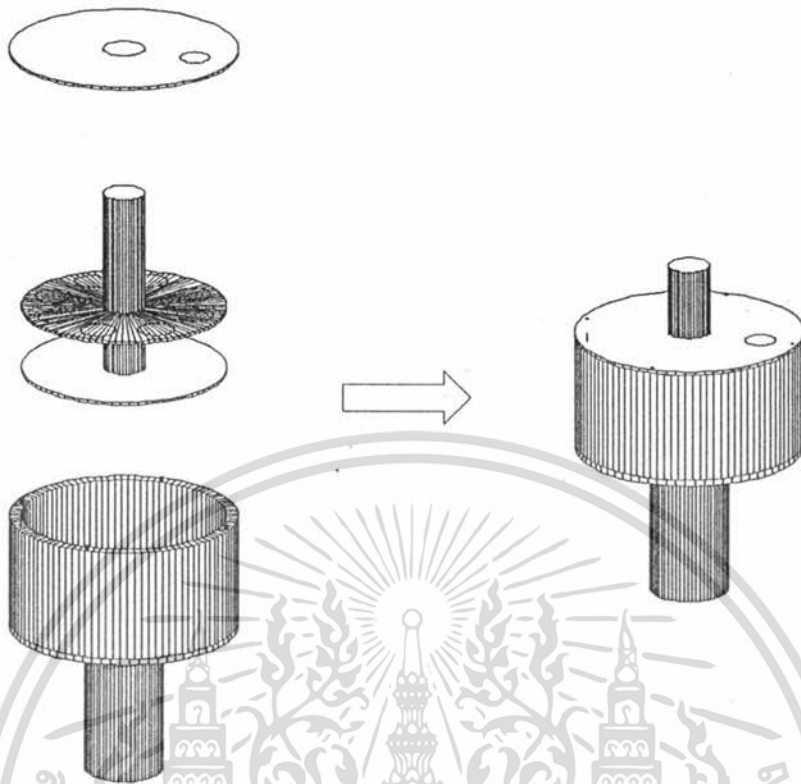
รูปที่ 3.8 แบบด้านบนของกล้องวงกลม

แกนหมุนจะใช้ท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว นำมาตัดให้มีขนาดยาว 25 ซม.



รูปที่ 3.9 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของกล้องใส่ขวดบรรจุสาร

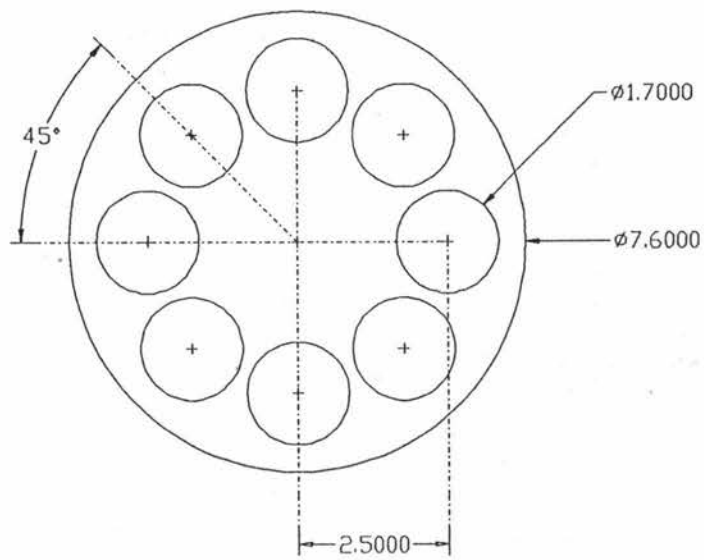
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



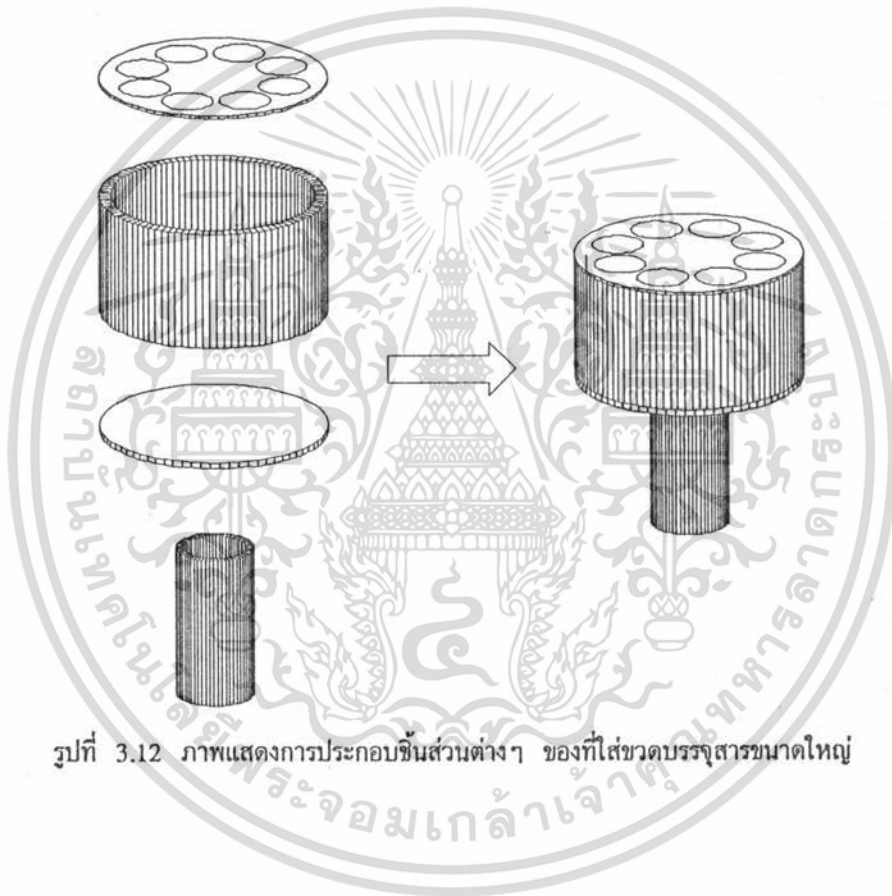
รูปที่ 3.10 แสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่ใส่ขดบรรจุสารขนาดเล็ก

### 3.1.5 ที่ใส่ขดบรรจุสารขนาดใหญ่

เป็นกล่องวงกลมทำจากท่อพีวีซีขนาด 3 นิ้ว สูง 3.5 ซม. ด้านล่างปิดด้วยแผ่นพลาสติกวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 ซม. หนา 2 มม. และต่อเข้ากับแกนหมุนที่ทำจากท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว ยาว 25 ซม. ด้านบนของกล่องปิดด้วยแผ่นพลาสติกใสเจาะเป็นรูตามจำนวนของขดบรรจุสารให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.7 ซม. ดังรูปที่ 3.11 เพื่อทำหน้าที่พยุ่งขดบรรจุสาร



รูปที่ 3.11 แบบด้าบนของพลาสติกที่เจาะรูตามจำนวนขวดบรรจุสาร



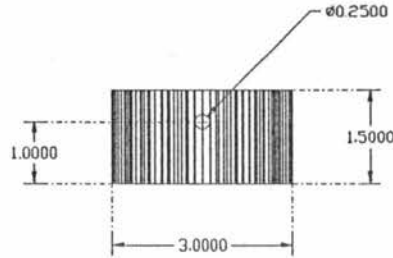
รูปที่ 3.12 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่ใส่ขวดบรรจุสารขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.6 ที่ยึดที่ใส่ขวดบรรจุสาร

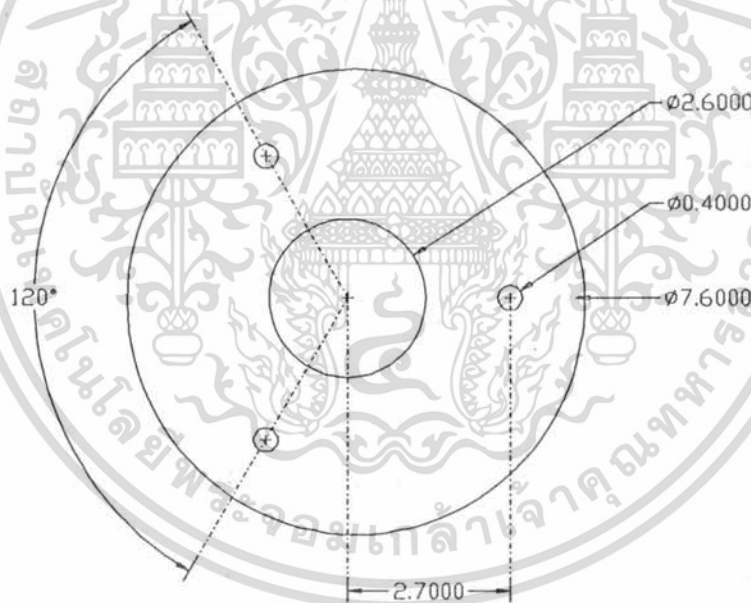
ประกอบด้วยชิ้นส่วน 3 ชิ้น

3.1.6.1 ชิ้นแรกเป็นส่วนที่ทำหน้าที่หลักในการยึดที่ใส่ขวดบรรจุสาร ทำมาจากข้อต่อตรงของท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว นำมาตัดให้มีขนาดความยาว 1.5 ซม. และเจาะรูที่ด้านข้างให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 ซม. เพื่อใช้ใส่น็อตเข้าไปยึดติดกับที่ใส่ขวดบรรจุสารแบบแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แบบด้านข้างของชิ้นแรก

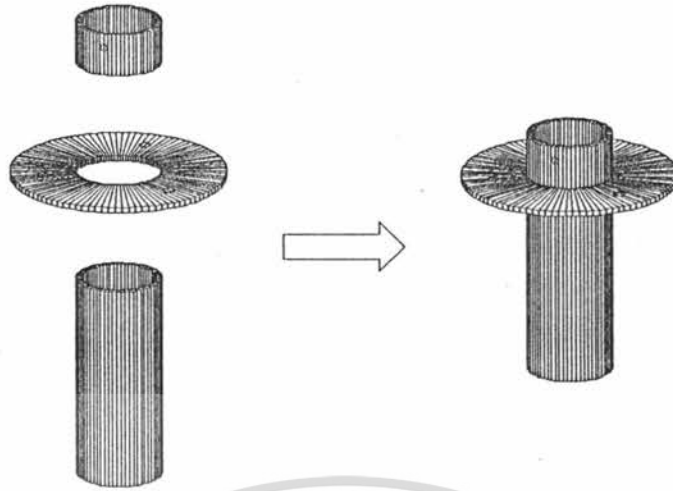
3.1.6.2 ชิ้นส่วนที่สองเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการยึดติดกับแผ่นฐาน ทำมาจากแผ่นพลาสติกวงกลมใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 ซม. หนา 2 มม. เจาะรูที่ด้านบนให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 ซม. จำนวน 3 ช่อง ดังแบบในรูปที่ 3.14 เพื่อใช้เป็นที่ใส่น็อตยึดติดกับแผ่นฐาน



รูปที่ 3.14 แบบด้านบนของชิ้นที่สอง

3.1.6.3 ชิ้นส่วนที่สามทำมาจากท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว ยาว 10 ซม. ใช้เป็นตัวป้องกันไม่ให้ที่ใส่ขวดบรรจุสารบิดหรือเอียง

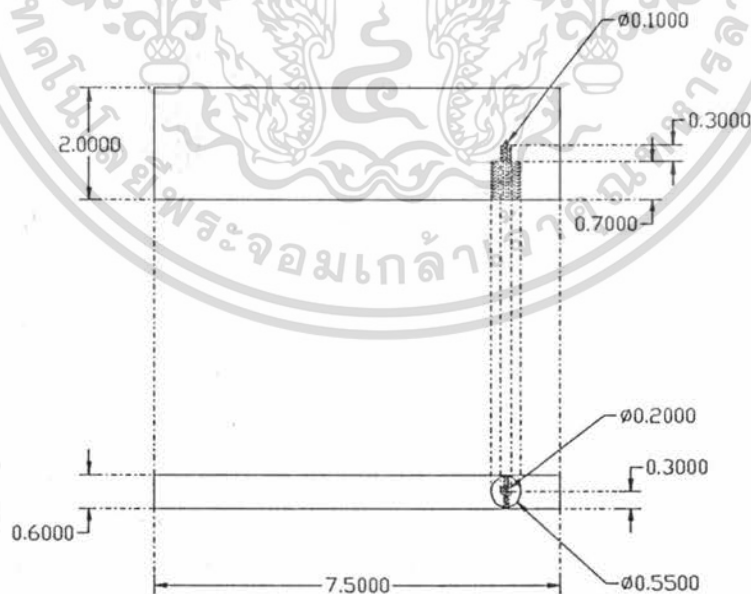
ในการประกอบนอกจากจะใช้การเพื่อเป็นตัวประสานชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเข้าด้วยกันแล้ว จะใช้อะครีลิกอิมัลชันเป็นตัวใส่ลงไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่ออีกด้วย



รูปที่ 3.15 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่ยึดที่ใช้ขวดบรรจุสาร

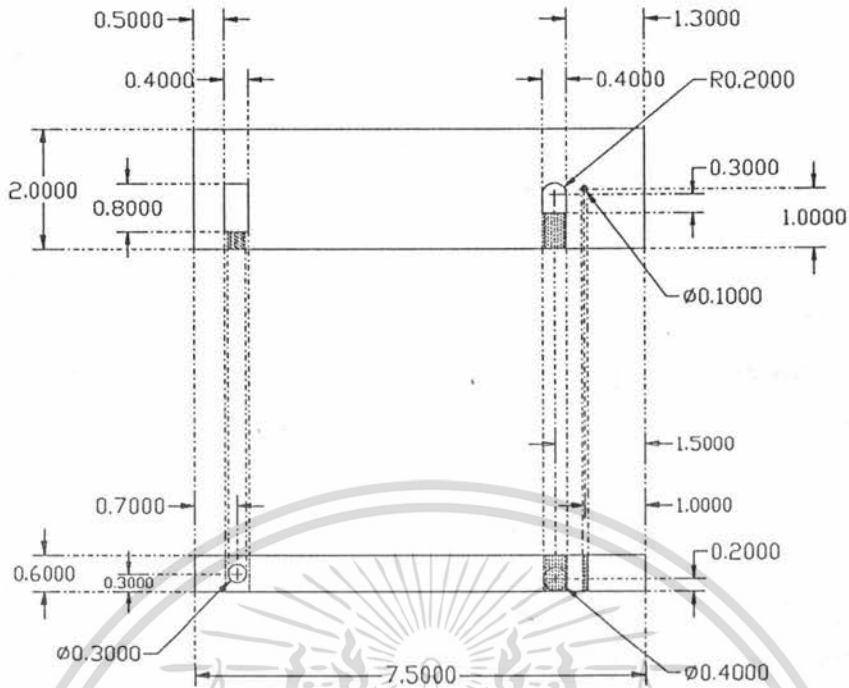
### 3.1.7 ที่จับยึดอิเล็กโตรดด้านนำสารเข้าสู่หลอดแคปิลลารี

ทางด้านนี้จะมีการปรับระดับความสูงตามแท่นวางที่บรรจุสารจึงประกอบด้วย แกนหมุนที่ทำจากแท่งพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 ซม. ยาว 25 ซม. (พลาสติกชนิดที่ 4) ด้านบนของแกนหมุนติดกับแผ่นพลาสติก กว้าง 2 ซม. ยาว 7.5 ซม. หนา 6 มม. จำนวน 3 แผ่น โดยมีแบบดังรูปที่ 3.16, 3.17 และ 3.18 ซึ่งเป็นที่เสียบหลอดแคปิลลารีและอิเล็กโตรด ช่องที่เสียบหลอดแคปิลลารีจะมีน๊อตสำหรับจับหลอดแคปิลลารีไม่ให้เลื่อนหลุด ช่องที่เสียบอิเล็กโตรดจะมีสายไฟต่อไปยังอีกด้านหนึ่งของแผ่นพลาสติกเพื่อต่อเข้ากับสายไฟจากแหล่งจ่ายไฟ ที่ช่องสำหรับเสียบอิเล็กโตรดและเสียบสายไฟจะมีน๊อตขนาดเล็กไว้เพื่อจับแท่งอิเล็กโตรดและสายไฟไม่ให้เลื่อนหลุด

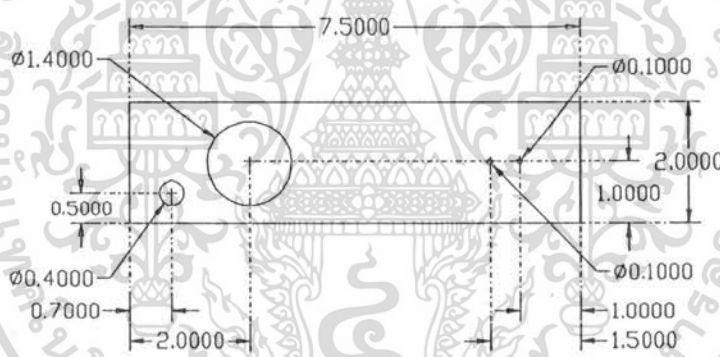


รูปที่ 3.16 แบบด้านบนและด้านข้างของแผ่นพลาสติกชนิดที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

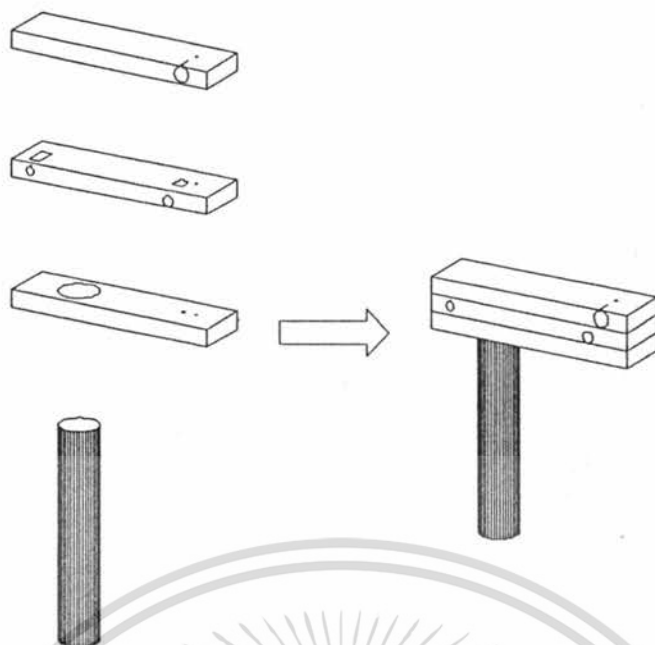


รูปที่ 3.17 แบบด้านบนและด้านข้างของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 2



รูปที่ 3.18 แบบด้านบนของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 3

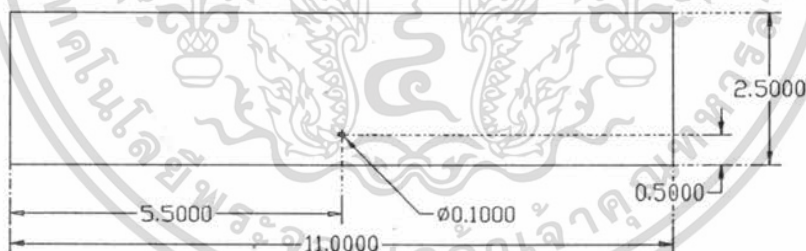
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่จับยึดอิเล็กโตรดด้านนำสารเข้าสู่หลอดแคปิลลารี

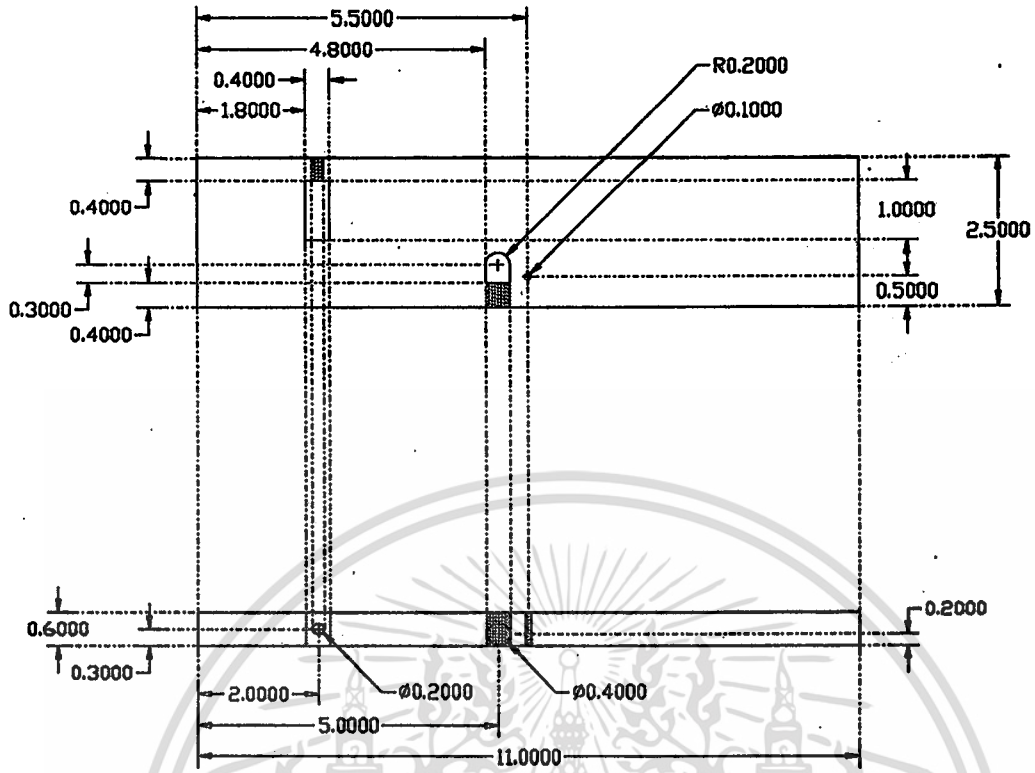
### 3.1.8 ที่จับยึดอิเล็กโตรดด้านรับสารออกจากหลอดแคปิลลารี

มีลักษณะดังรูปที่ 3.22 เนื่องจากด้านนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับความสูง ขาทั้งสองข้างจึงยึดติดกับพื้นโดยที่ด้านบนติดกับแผ่นพลาสติกกว้าง 2.5 ซม. ยาว 11 ซม. หนา 6 มม. จำนวน 3 แผ่น ดังแบบในรูปที่ 3.20, 3.21 และ 3.22 มีลักษณะคล้ายกับด้านนำสารเข้าระบบ แต่จะเห็นว่ามี ความกว้างมากกว่า เนื่องจากจะต้องเป็นที่วางของส่วนที่เป็นที่จับยึดหลอดแคปิลลารีและส่วนที่เป็น UV-Source และ detector ที่ใช้วัดและแสดงผลของการวิเคราะห์สาร

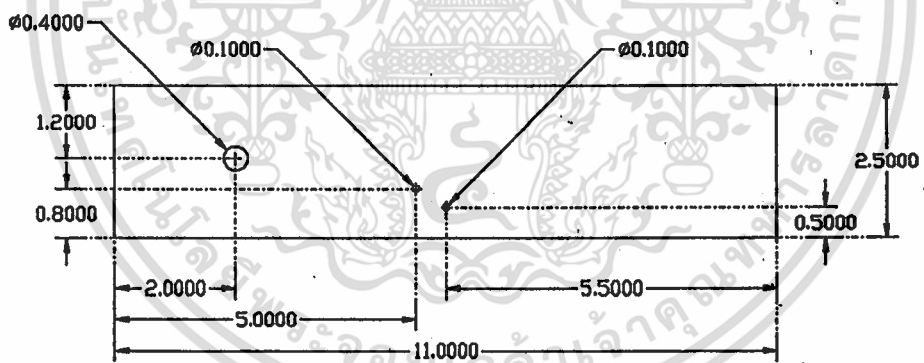


รูปที่ 3.20 แบบด้านบนของพลาสติกชิ้นที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

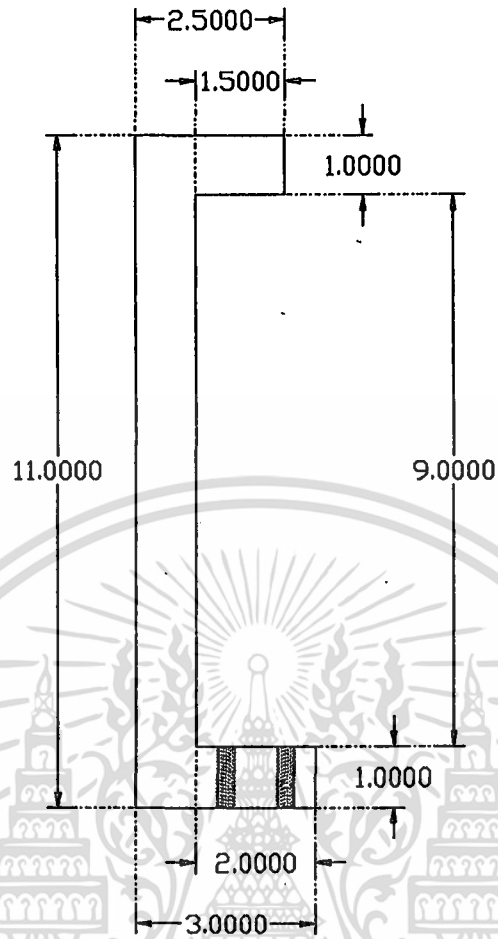


รูปที่ 3.21 แบบด้านบนและด้านข้างของพลาสติกชิ้นที่ 2

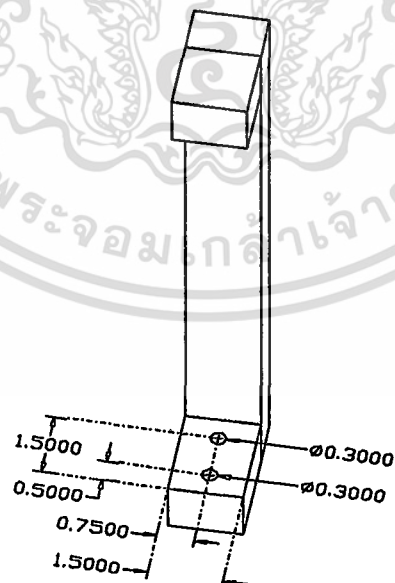


รูปที่ 3.22 แบบด้านบนของแผ่นพลาสติกชิ้นที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

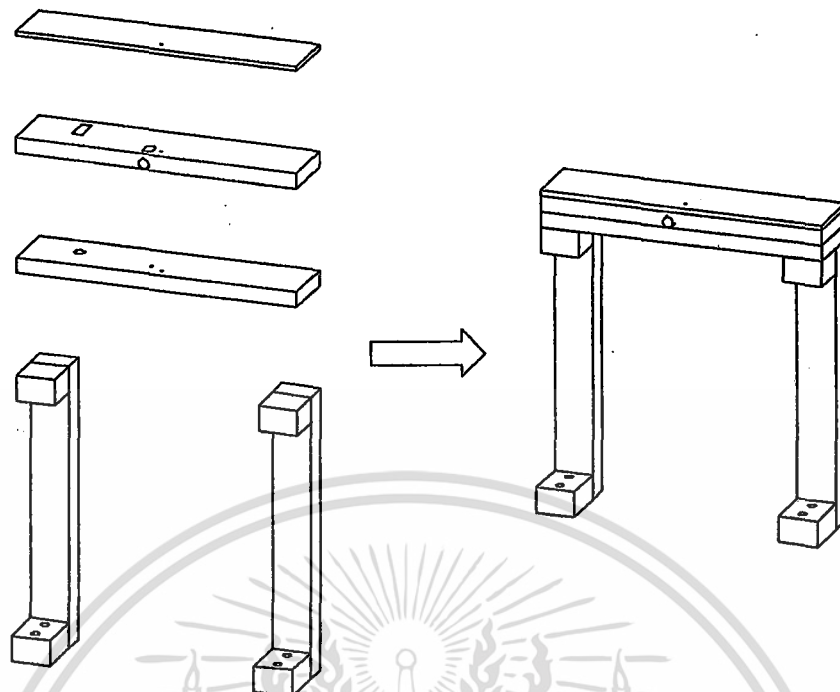


รูปที่ 3.23 แบบด้านข้างของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 4 และ 5



รูปที่ 3.24 แบบแสดงตำแหน่งที่เจาะรูของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 4 และ 5

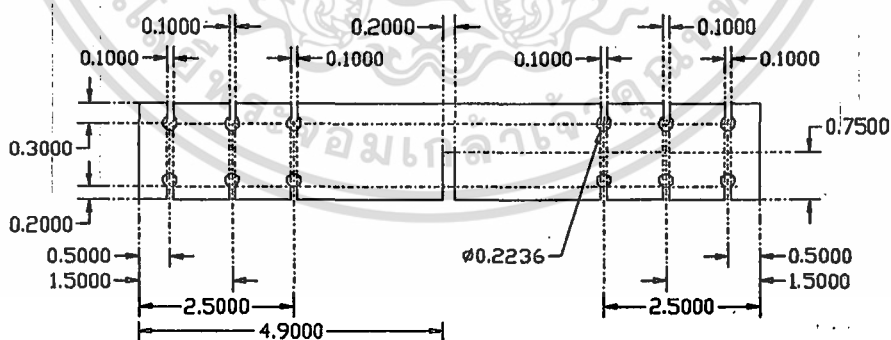
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่จับยึดอิเล็กทรอนิกส์ด้านรับสารออกจากหลอดแคปิลลารี

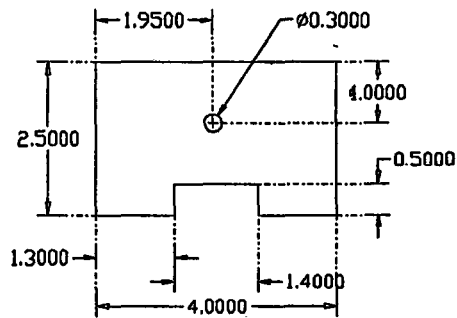
### 3.1.9 ที่พื้นหลอดแคปิลลารี

เนื่องจากหลอดแคปิลลารีที่ใช้มีความยาวมาก เพื่อเป็นการประหยัดเนื้อที่ของเครื่องมือจึงต้องพื้นหลอดแคปิลลารีไว้ ที่พื้นหลอดแคปิลลารีประกอบด้วยแท่งพลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดเท่ากับ 1.4 ซม. ยาว 15 ซม. ปลายด้านหนึ่งติดกับแผ่นพลาสติก 2 ชั้นสำหรับพื้นหลอดแคปิลลารีซึ่งยาว 10 ซม. กว้าง 1.5 ซม. และหนา 2 มม. แบบดังรูปที่ 3.26 ปลายอีกด้านหนึ่งติดพลาสติกอีก 2 ชั้นเพื่อใช้ยึดกับโครงของตัวกล่อง ดังรูปที่ 3.29

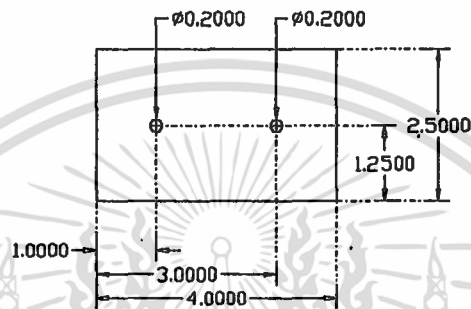


รูปที่ 3.26 แบบดำนบนของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 1 และ 2

สำหรับแท่งพลาสติก (พลาสติกชั้นที่ 3) จะบากเป็นกากบาทที่ด้านติดกับพลาสติกชั้นที่ 1 และ 2 โดยมีความกว้างเท่ากับความหนาของแผ่นพลาสติกและลึก 1.5 ซม. ด้านที่ติดกับพลาสติกชั้นที่ 4 จะบากเป็นแนวตรงกว้างเท่ากับ 2 มม. ลึก 5 มม.

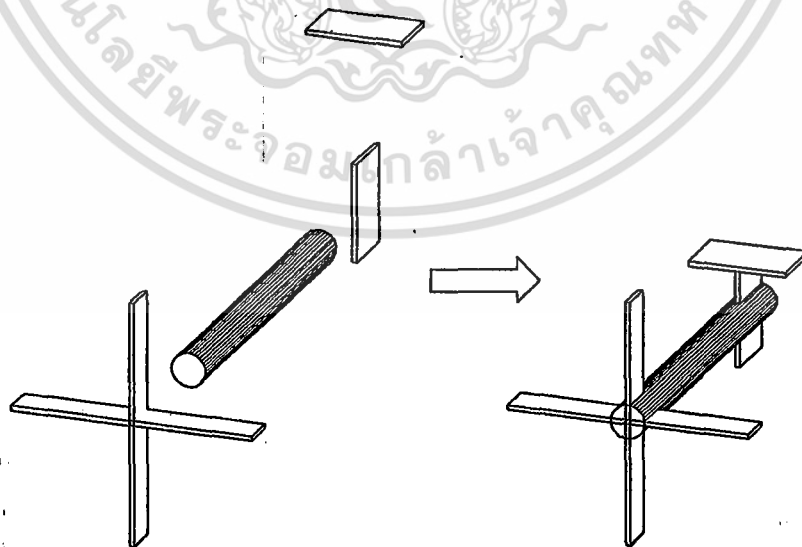


รูปที่ 3.27 แบบด้านบนของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 4



รูปที่ 3.28 แบบด้านบนของแผ่นพลาสติกชั้นที่ 5

การประกอบจะนำพลาสติกชั้นที่ 1 และ 2 มาติดกันไว้ด้วยกาว และพลาสติกชั้นที่ 3 และ 4 ก็จะถูกยึดติดกันไว้ด้วยกาวเช่นกัน ส่วนการยึดแท่งพลาสติกเข้ากับพลาสติกชั้นอื่นๆ นั้น จะยึดเข้ากับรอยที่บากไว้ แต่เพื่อความแข็งแรงการยึดติดเข้ากับพลาสติกชั้นที่ 4 จะใช้น็อตขนาด 2.5 มม. ช่วย และการติดที่พื้นหลอดแคปิลลารีเข้ากับตัวกล่องจะใช้น็อตขนาด 2 มม. เป็นตัวยึดพลาสติกชั้นที่ 5 เข้ากับตัวกล่อง



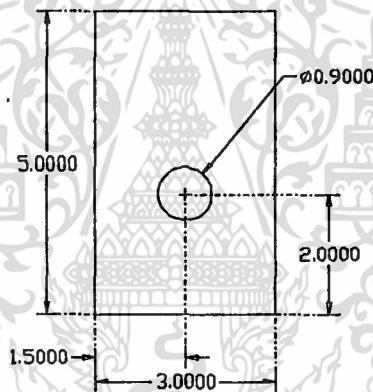
รูปที่ 3.29 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่พื้นหลอดแคปิลลารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

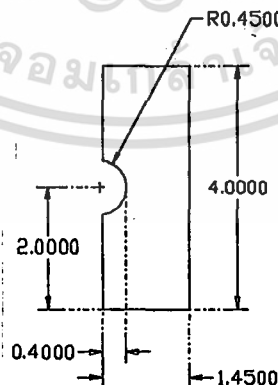
### 3.1.10 ที่จับยึดแคปิลลารี

เป็นแท่งที่มีช่องสำหรับจับยึดแคปิลลารี เพื่อให้หลอดดูดตราไวโอเล็ตส่องแสงผ่าน แล้วให้ตัวโฟโตไดโอดซึ่งทำหน้าที่เป็น detector วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ เพื่อเป็นการป้องกันความผิดพลาดของค่าที่ได้เนื่องมาจากการรบกวนของแสงภายนอก จึงจำเป็นต้องสร้างอุปกรณ์ส่วนนี้ให้แสงจากภายนอกเข้าไปถึงแคปิลลารีและโฟโตไดโอดได้น้อยที่สุด ส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์นี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน

3.1.10.1 ส่วนที่หนึ่ง คือ ส่วนที่ทำหน้าที่เป็น slit ทำจากแผ่นพลาสติกสีดำหนา 1 มม. จำนวน 4 แผ่น แบบดังรูปที่ 3.30, 3.31 และ 3.32 ตรงกลางเจาะเป็นช่องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 มม. และจะมี slit ที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียม เจาะเป็นช่องกว้างประมาณ 100 ไมครอน ติดอยู่ระหว่างพลาสติกชั้นที่ 5 กับชั้นที่ 2&3 เพื่อควบคุมทิศทางของแสงดูดตราไวโอเล็ต แบ่งเป็น 2 แบบ ตามลักษณะการใช้งาน แบบแรก ใช้สำหรับเสียบแคปิลลารี ลักษณะดังรูปที่ 3.30 แบบที่สอง ใช้ในการเปรียบเทียบค่าระหว่างแสงที่ผ่านแคปิลลารีกับแสงที่ไม่ผ่านแคปิลลารี (คือปล่อยให้แสงผ่านอากาศเพียงอย่างเดียว) ลักษณะดังรูปที่ 3.32 ทั้งสองแบบสามารถถอดออกจากส่วนที่สองได้ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน และการเปลี่ยน slit



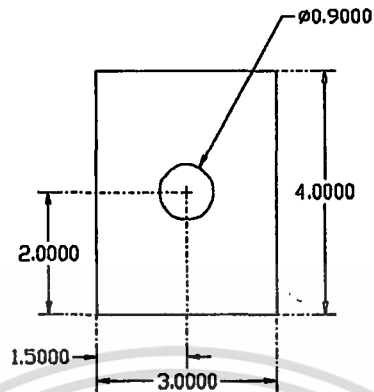
รูปที่ 3.30 แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 5 แบบแรก



รูปที่ 3.31 แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 2 และ 3 แบบแรก

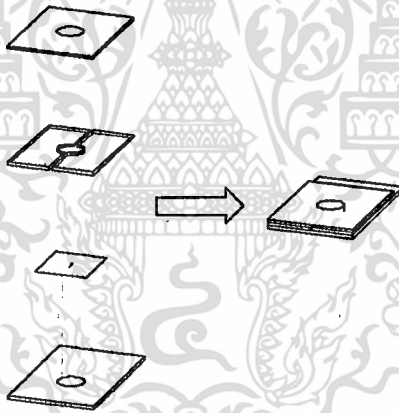
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นที่ 2 ที่ใช้เป็น slit ทำมาจากแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์บางขนาดกว้าง 2 ซม. ยาว 2 ซม. เจาะให้เป็นช่องยาวตรงกลางยาว 8 มม. กว้างไม่มากกว่า 100 ไมครอน

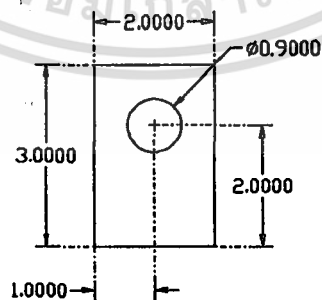


รูปที่ 3.32 แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 1 แบบแรก

การประกอบชั้นที่ 2, 3, 4 และ 5 จะยึดกันด้วยกาว ส่วนชั้นที่ 1 จะติดกับชั้นที่เหลือนด้วยเดือยขนาดเล็ก



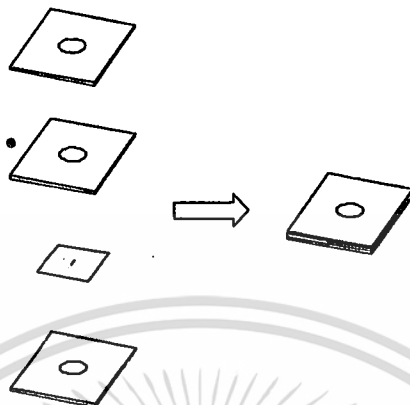
รูปที่ 3.33 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วน ของส่วนที่ทำหน้าที่เป็น slit ของที่จับยึดแคปิลลารีแบบแรก



รูปที่ 3.34 แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 1, 2 และ 4 แบบที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

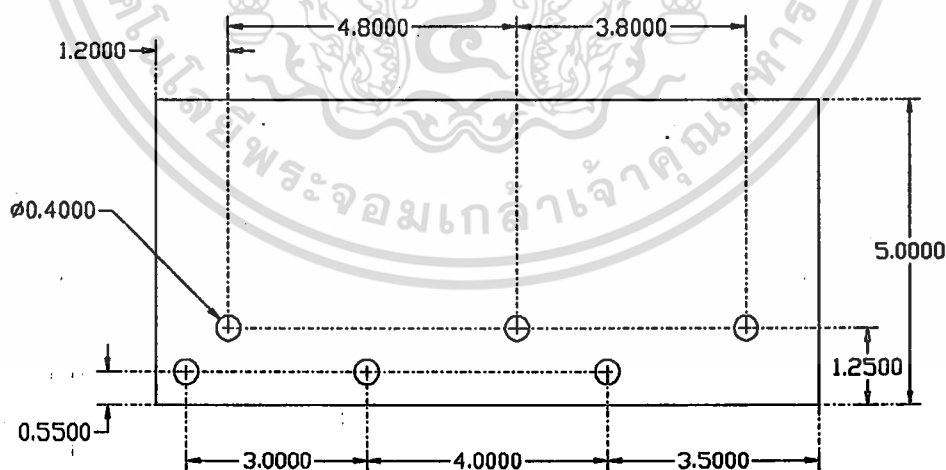
ชั้นที่ 3 ที่ใช้เป็น slit ทำมาจากแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์บางขนาดกว้าง 2 ซม. ยาว 2 ซม. เจาะให้เป็นช่องยาวตรงกลางยาว 8 มม. กว้างไม่มากกว่า 100 ไมครอน การประกอบจะติดทุกส่วนเข้าด้วยกันด้วยกาว



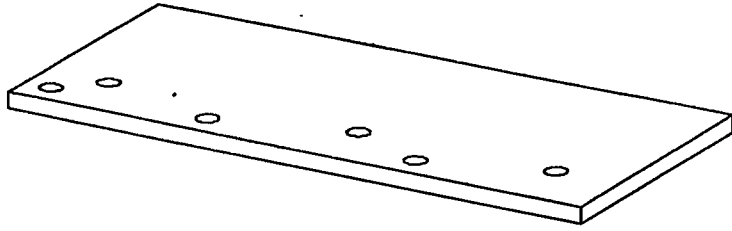
รูปที่ 3.35 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วน ของส่วนที่ทำหน้าที่เป็น slit ของที่จับยึดแคปซิลารีแบบที่สอง

3.1.10.2 ส่วนที่สอง คือส่วนที่เป็นแทนสำหรับยึดส่วนที่เป็น slit ในส่วนนี้ประกอบด้วยชิ้นส่วนย่อยๆ หลายชิ้นประกอบเข้าเป็นชิ้นเดียวกัน ด้านหน้าจะเจาะเป็นช่องไว้สำหรับติดโฟโตไดโอด และมีฝาปิดเพื่อป้องกันแสงเข้าไปยังโฟโตไดโอด ด้านหลังจะมีช่องสำหรับให้แสงจาก UV-source ผ่านไปได้ ช่องตรงกลาง 2 ช่องจะใช้สำหรับเสียบส่วนที่เป็น slit ในส่วนที่สองนี้จะประกอบด้วยชิ้นส่วนย่อยอีก 3 ส่วนคือ

ก) ที่วางหลอดอุลตราไวโอเล็ต เป็นแผ่นพลาสติกสีดำหนา 2 มม. กว้าง 5 มม. ยาว 11 มม. เจาะช่องจำนวน 6 ช่องตามแบบรูปที่ 3.36 เพื่อใช้ใส่น้ำอัด

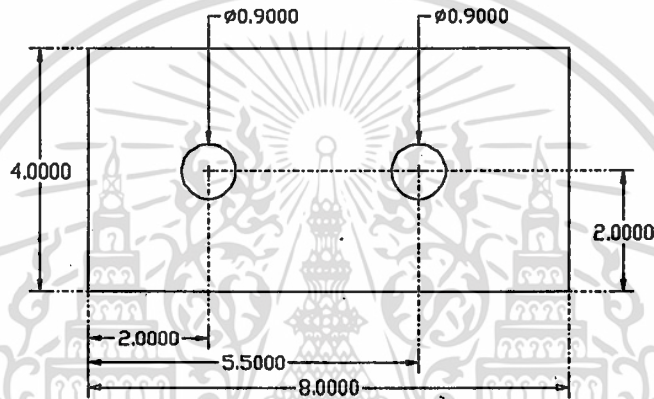


รูปที่ 3.36 แบบด้านบนของที่วางหลอดอุลตราไวโอเล็ต

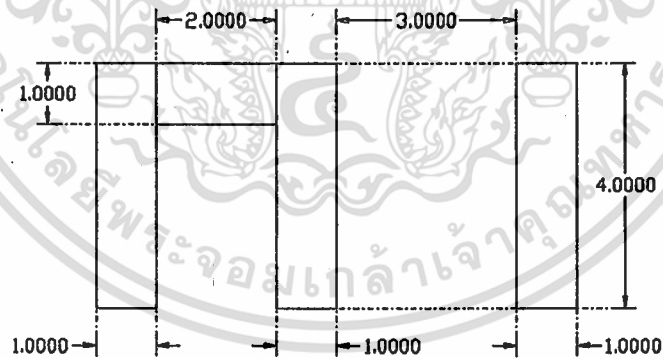


รูปที่ 3.37 ภาพแสดงที่วางหลอดอุตราไวโอเลต

ข) ที่ยึด slit ประกอบด้วยพลาสติกสีดำจำนวน 5 ชั้น โดยชั้นที่ 1-3 จะใช้แผ่นพลาสติกหนา 3 มม. ชั้นที่ 4 และ 5 ใช้แผ่นพลาสติกหนา 1 มม. ตามแบบรูปที่ 3.38-3.40 การประกอบจะยึดชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกันด้วยกาว

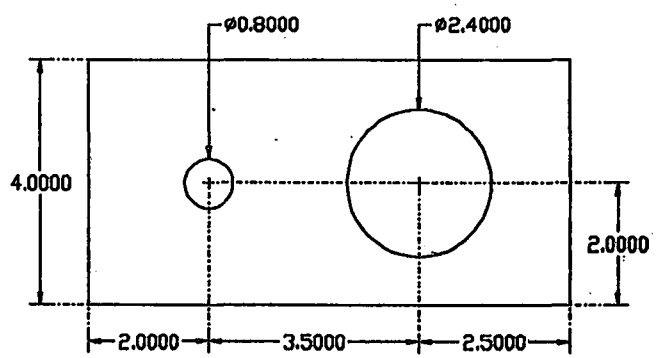


รูปที่ 3.38 แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 1

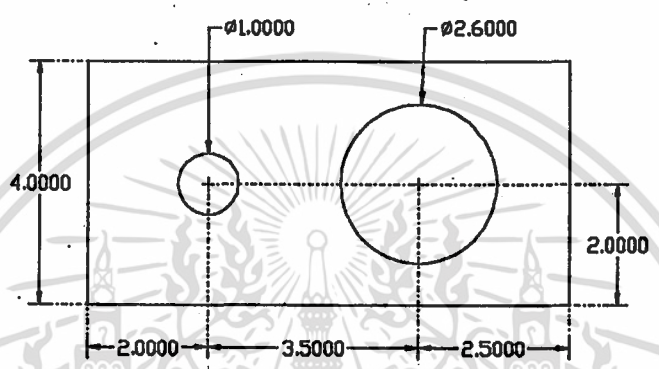


รูปที่ 3.39 แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 2

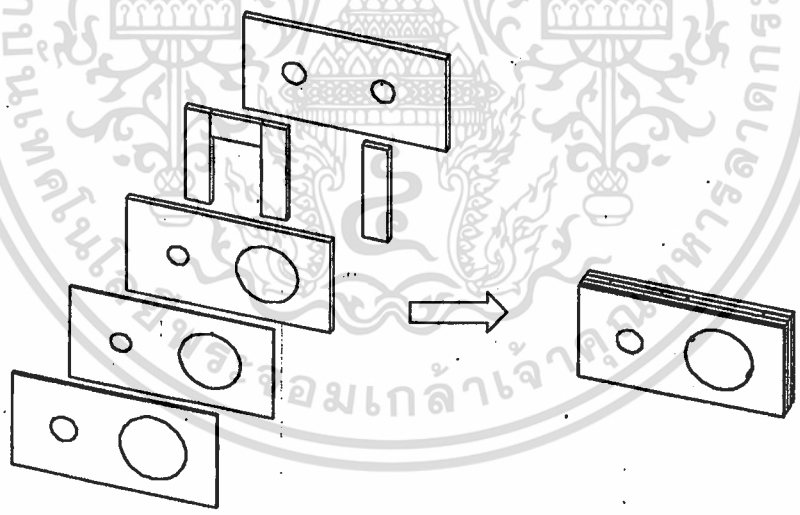
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.40 แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 3 และ 4

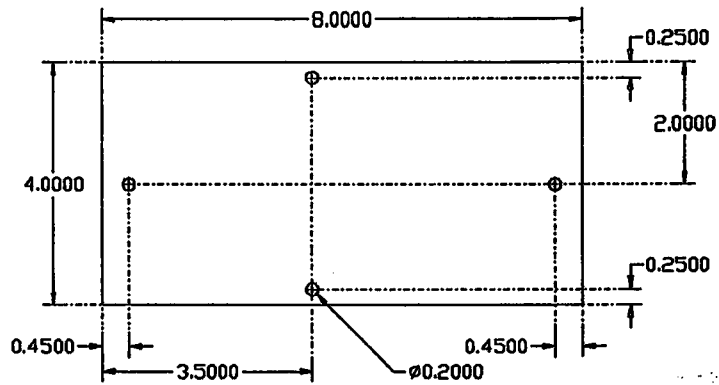


รูปที่ 3.41 แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 5



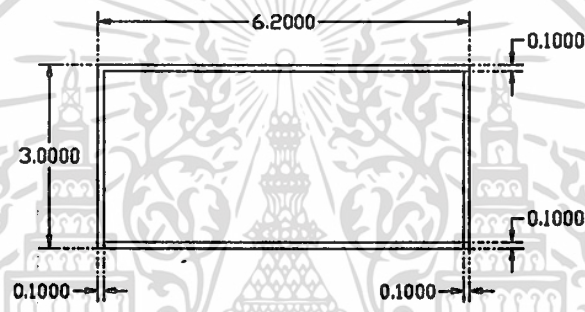
รูปที่ 3.42 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่ยึด slit

ค) ส่วนฝาครอบ ชั้นที่ 1, 3 และ 4 เป็นแผ่นพลาสติกสีดำหนา 1 มม. แบบดังรูปที่ 3.43, 3.45 และ 3.46

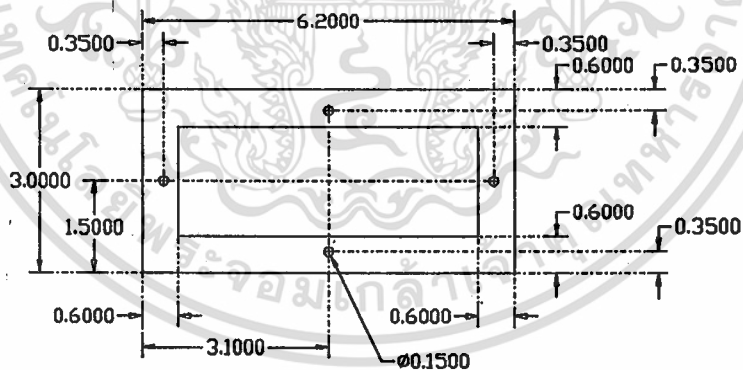


รูปที่ 3.43 แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 1

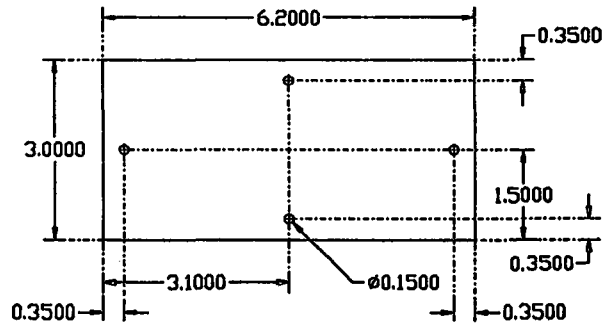
ชั้นที่ 2 ใช้แผ่นพลาสติกสีดำหนา 1 ซม. แต่ในการสร้างจริงพบว่าไม่สะดวกนักจึงใช้แผ่นพลาสติกสีดำหนา 1 มม. ตัดให้ได้ความยาวตามรูปที่ 3.41 โดยให้ความกว้างเท่ากับ 1 ซม.



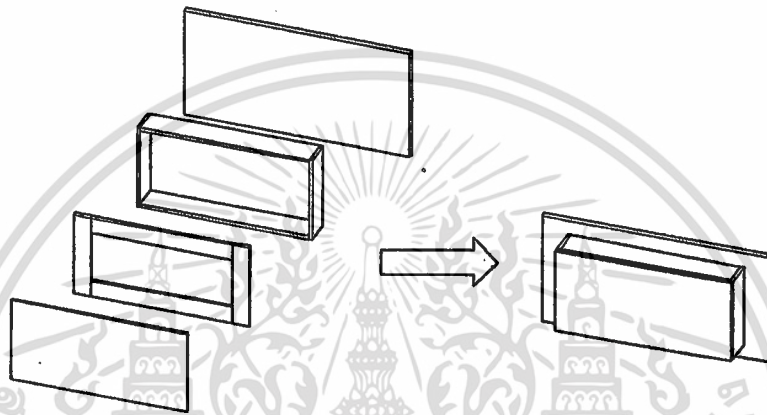
รูปที่ 3.44 แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 2



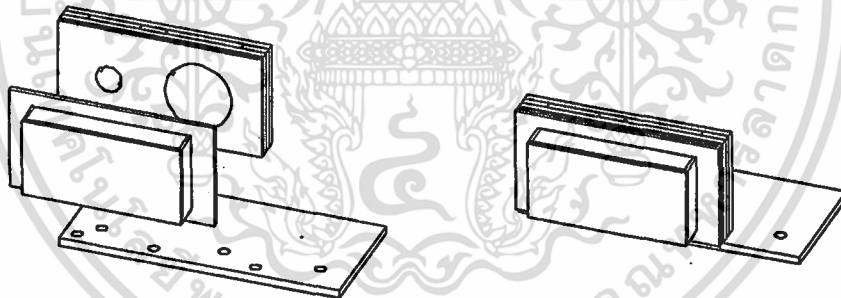
รูปที่ 3.45 แบบด้านหน้าของพลาสติกชั้นที่ 3



รูปที่ 3.46 แบบด้านหน้าของพลาสติกขึ้นที่ 4



รูปที่ 3.47 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของฝาครอบตัวตรวจจับแสงอุลตราไวโอเล็ต

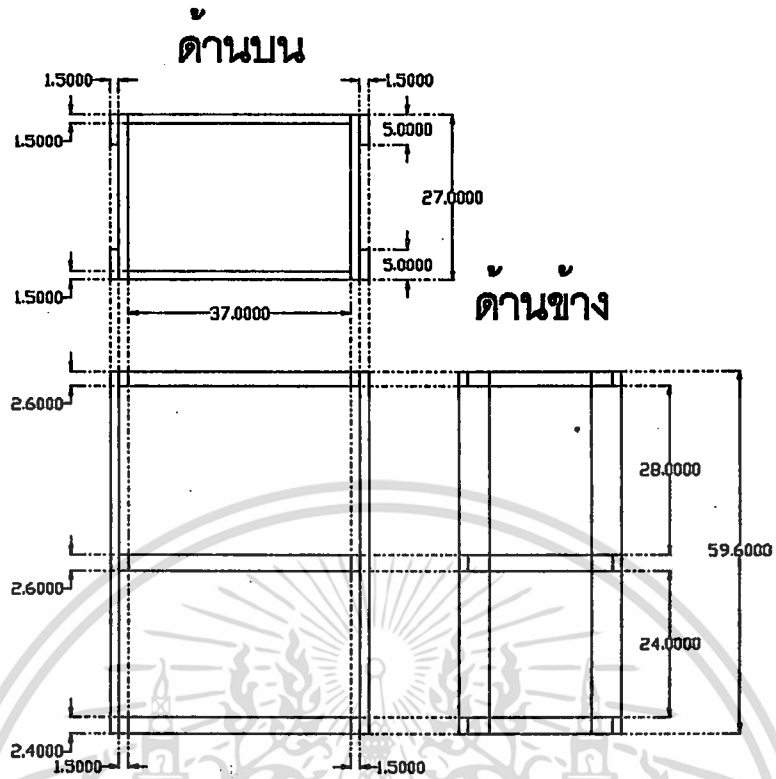


รูปที่ 3.48 ภาพแสดงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของที่จับยึดแคปซิลารี

### 3.1.11 ตู้ใส่อุปกรณ์

ตัวโครงของตู้ทำมาจากไม้ฉำฉาโดยมีขนาดดังรูปที่ 3.47 ส่วนฝาแต่ละด้านทำมาจากแผ่นพลาสติกหนา 3 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ด้านหน้า**

รูปที่ 3.49 แบบของโครงตู้ใส่อุปกรณ์



รูปที่ 3.50 ภาพแสดงตู้ใส่อุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การนำสารเข้าสู่ระบบ

การนำสารเข้าสู่ระบบทำได้ 2 วิธี คือ

### 3.2.1 Hydrostatic injection

อาศัยความแตกต่างระหว่างปลายทั้งสองข้างของหลอดแคปิลลารี ทำได้โดยการยกภาชนะบรรจุสาร ที่มีปลายด้านหนึ่งของหลอดแคปิลลารีจุ่มอยู่ให้สูงกว่าปลายหลอดอีกด้านหนึ่งที่จะมีการตรวจวัด ทำให้สารไหลเข้าไปในหลอดแคปิลลารีเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ในบางครั้งจึงเรียกรวีนีว่า Gravity injection ปริมาณของสารที่เข้าสู่หลอดแคปิลลารีจะขึ้นอยู่กับเวลาที่หลอดแคปิลลารีจุ่มอยู่ในสาร และความแตกต่างระหว่างระดับความสูงของปลายทั้งสองของหลอดแคปิลลารี

### 3.2.2 Electrokinetic injection

ทำได้โดยการจุ่มปลายหลอดแคปิลลารีลงในภาชนะบรรจุสาร แล้วป้อนแรงดันให้กับขั้วอิเล็กโตรดที่จุ่มอยู่ในสารทั้งสองด้าน จะทำให้โมเลกุลที่มีประจุในสารมีการเคลื่อนที่เข้าสู่หลอดแคปิลลารีไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง ปริมาณสารที่เข้าสู่หลอดจะขึ้นกับเวลาและศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้ และยังขึ้นอยู่กับ electrophoretic mobility ของไอออนในสารนั้นด้วย

วิธีที่สองเป็นวิธีที่นิยมใช้เพราะสะดวกในการควบคุม แต่พบว่ามีปัญหาอยู่ 2 ประการ ประการแรกมาจากความแตกต่างของความคล่องตัวของประจุในสารละลายที่ทดสอบ ซึ่งจะทำให้ได้ผลที่ผิดพลาดไป ประการที่สองเกี่ยวกับความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวกลางที่อนุภาคละลายอยู่ ทำให้ electrophoretic flow และ electroosmotic flow เปลี่ยนไป

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

จากการศึกษาและดำเนินการสร้างส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง Capillary Electrophoresis ทำให้ได้เครื่องมือที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.1

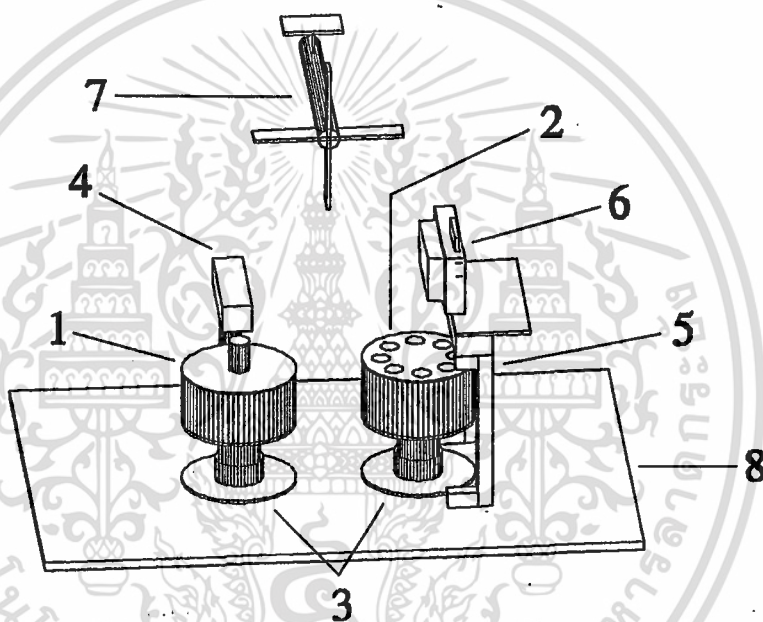


รูปที่ 4.1 ภาพแสดงเครื่อง Capillary Electrophoresis ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบต่างๆ ดังที่กล่าวถึงรายละเอียดมาแล้วในบทที่ 3 ส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่

1. ที่ใส่ขวดบรรจุสารขนาดเล็ก
2. ที่ใส่ขวดบรรจุสารขนาดใหญ่
3. ที่ยึดที่ใส่ขวดบรรจุสาร
4. ที่จับยึดอิเล็กโทรดด้านนำสารเข้าสู่หลอดแคปิลลารี
5. ที่จับยึดอิเล็กโทรดด้านรับสารออกจากหลอดแคปิลลารี
6. ที่จับยึดหลอดแคปิลลารี
7. ที่พื้นหลอดแคปิลลารี
8. แผ่นฐาน



รูปที่ 4.2 ภาพแสดงส่วนประกอบที่สำคัญของ Capillary Electrophoresis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

ในการดำเนินงานสร้างเครื่อง Capillary Electrophoresis ทำให้ได้เครื่องมือที่มีลักษณะสมบูรณ์ในขั้นหนึ่งตามจุดมุ่งหมายที่ได้วางไว้ นั่นคือการศึกษาหลักการของ Capillary Electrophoresis และสร้างเครื่อง Capillary Electrophoresis ให้สามารถนำมาใช้ในการทดลองได้ โดยจะต้องต่อเข้ากับอุปกรณ์อีก 2 ส่วน คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง และตัวตรวจจับและวัดปริมาณสารที่ทำการวิเคราะห์

เมื่อพิจารณาเครื่อง Capillary Electrophoresis ที่สร้างขึ้น พบว่าเครื่องมือนี้ยังมีประสิทธิภาพไม่สูงพอเมื่อเทียบกับเครื่องมือจริงที่ใช้กันในปัจจุบัน เนื่องจากยังขาดคุณสมบัติอีกหลายประการที่จะใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการวิเคราะห์สาร อันได้แก่

#### 1. ความไม่ต่อเนื่องในการวิเคราะห์สาร

เนื่องมาจาก ในการเปลี่ยนตำแหน่งของขวดบรรจุสารเพื่อเปลี่ยนชนิดของสาร ทำได้โดย ใช้มือปรับระดับของที่ใส่ขวดบรรจุสารและหมุนที่เลือกขวดบรรจุสาร ซึ่งทำให้ไม่สะดวกต่อผู้ใช้งานและเสียเวลาในการทำการใช้งาน

การพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหา ทำได้โดยการนำระบบอัตโนมัติเข้ามาใช้ในการเปลี่ยนชนิดของสาร คือ นำ stepping motor เข้ามาควบคุมการหมุนของที่เลือกขวดบรรจุสารและแท่นจับอิเล็กโตรดด้านนำสารเข้าระบบ และใช้มอเตอร์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้ง มาควบคุมการเปลี่ยนระดับ ขึ้น-ลงของที่ใส่ขวดบรรจุสาร ซึ่งทั้ง stepping motor และมอเตอร์นี้จะมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานอีกที

#### 2. การเกิดอุดตันหรือมีฟองอากาศในหลอดแคปิลลารี

อาจเกิดจากสารตัวอย่างที่ใช้มีความหนืดสูง หรือมีอนุภาคของสิ่งเจือปนไปติดอยู่บนผนังภายในของหลอดแคปิลลารีจึงทำให้เกิดการอุดตัน ส่วนการเกิดฟองอากาศนั้นมีสาเหตุมาจากปัญหาในหัวข้อ 5.1 ทำให้การทำงานของเครื่องมือไม่ต่อเนื่อง จึงทำให้อากาศเข้าไปยังหลอดแคปิลลารีได้

การพัฒนาเพื่อแก้ปัญหา โดยนำระบบบีบสุญญากาศเข้ามาต่อเข้ากับปลายหลอดแคปิลลารีทางด้านรับสารตัวอย่าง เพื่อดูดสารเข้ามาในหลอดแคปิลลารี ซึ่งเป็นการกำจัดฟองอากาศหรือสิ่งอุดตันนั้น

#### 3. ความร้อนที่เกิดขึ้นที่หลอดแคปิลลารี

เนื่องจาก การใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ที่มีค่าสูงมาก (อยู่ในช่วง 10-30 กิโลโวลต์) ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นได้ที่หลอดแคปิลลารี ซึ่งจำเป็นจะต้องควบคุมอุณหภูมิของ หลอดแคปิลลารีไว้ เพื่อป้องกันการเบี่ยงเบนของการทดลอง

การพัฒนาเพื่อแก้ปัญหา มีหลายวิธีด้วยกันที่สามารถนำมาใช้ได้ วิธีที่ง่ายวิธีหนึ่งคือ การใช้ พัฒนาระบายความร้อนภายในเครื่อง Capillary Electrophoresis ขณะใช้งาน แต่ถ้าหากความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากเกินไปที่จะใช้พัฒนาระบายความร้อนได้ อาจจะต้องใช้ระบบหล่อเย็น (cooling) อื่นๆ เข้ามาช่วย ได้แก่ การใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ, ระบบทำความเย็นโดยใช้ฟริออน หรือ thermoelectric effect เป็นต้น

#### 4. ชนิดของสารที่นำมาวิเคราะห์

เนื่องจาก ข้อมูลที่ได้รับรวบรวมไว้พบว่า การใช้แสงอุลตราไวโอเล็ตในการตรวจสอบและ วิเคราะห์สารตัวอย่างนั้น มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์สารผสมประเภทสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีสารอีกหลายชนิดที่ไม่สามารถทำการวิเคราะห์โดยใช้แสงอุลตราไวโอเล็ตได้ เนื่องจากสาร เหล่านั้นไม่ดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเล็ต

การพัฒนาเพื่อแก้ปัญหา คือต้องมีการพัฒนาตัวตรวจจับและวิเคราะห์สาร ให้มีหลายชนิด เช่น การใช้แสงชนิดอื่น การวัดความนำเปลี่ยนแปลง เป็นต้น เพื่อให้เครื่องมือนี้สามารถวิเคราะห์สาร ได้มากชนิดขึ้น

นอกจากนี้ ควรจะมีการนำเอาระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาเชื่อมต่อเข้ากับเครื่อง Capillary Electrophoresis เพื่อที่จะสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องมือได้อย่างสะดวก และสามารถคำนวณ ค่าต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์สารได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถใช้คอมพิวเตอร์มาเป็นตัวแสดงผล และเก็บข้อมูลได้อย่างดี

## ภาคผนวก

### รายละเอียดเพิ่มเติมของวัสดุที่ใช้

#### 1. หลอดแคปิลลารี

หลอดแคปิลลารีที่ใช้เป็นชนิดที่ใช้ในเครื่อง CE โดยตรง หาซื้อได้จากบริษัทที่ขายเครื่อง CE มีราคาประมาณ 1,000 บาทต่อความยาว 1 เมตร

#### 2. ขวดบรรจุสาร

ขวดบรรจุสารที่ใช้ทำจากแก้ว ในด้านที่นำสารเข้าสู่หลอดแคปิลลารี จะใช้ท่อแก้วมาตัดให้ได้ขนาดตามต้องการ แล้วนำส่วนที่ตัดแล้วไปลบไฟเพื่อลบคมและปิดด้านหนึ่งให้เป็นกันขวด ในด้านที่รับสารจากหลอดแคปิลลารี จะใช้ขวดแก้วที่มีฝาปิดเพราะในบางครั้งเราต้องการสารนั้นไว้ใช้ต่อไป ทั้งขวดและท่อแก้วสามารถหาซื้อได้จากร้านขายเครื่องมือวิทยาศาสตร์

#### 3. พลาสติก

พลาสติกที่ใช้มี 3 แบบ

3.1 พลาสติกแบบแผ่น เป็นพลาสติกที่ทำมาจากอะคริลิก สามารถหาซื้อได้จากร้านขายพลาสติกที่วงเวียน 22 ราคาของแผ่นพลาสติกจะขึ้นอยู่กับความหนา ซึ่งจะมีราคาเพิ่มตามความหนาของแผ่นพลาสติก โดยคิดราคาเป็นบาทต่อพื้นที่ 1 ตารางฟุต

3.2 พลาสติกแบบแท่งกลมใส เป็นพลาสติกที่ทำมาจากอะคริลิก สามารถหาซื้อได้จากร้านขายพลาสติกที่วงเวียน 22 ราคาของแท่งพลาสติกจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด ซึ่งจะมีราคาแปรตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยคิดราคาเป็นบาทต่อความยาวของแท่งพลาสติกเป็นเมตร

3.3 พลาสติกชนิดเป็นท่อ เป็นท่อพลาสติกพีวีซีที่ใช้เป็นท่อประปา สามารถหาซื้อได้จากร้านขายท่อประปาทั่วไป ราคาของท่อพลาสติกจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด ซึ่งจะมีราคาแปรตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยคิดราคาเป็นบาทต่อความยาวของแท่งพลาสติกเป็นเมตร

#### 4. กาวติดพลาสติก

เป็นสารเคมีที่มีชื่อว่าไดคลอโรมีเทน สามารถหาซื้อได้จากร้านที่ขายแผ่นพลาสติกที่กล่าวมาแล้ว สารเคมีชนิดนี้เป็นอันตรายต่อร่างกาย ในการใช้งานควรจะมีควมระมัดระวังเป็นพิเศษ โดยทำตามคำแนะนำของฉลากที่ติดไว้ข้างขวด

## 5. อะคีรีคออโท

ประกอบด้วยสารเคมี 2 ชนิด ได้แก่ นํ้ายาออโท เป็นของเหลวใส และผงออโท เป็นผงละเอียดสีขาว อะคีรีคออโทเป็นสารเคมีที่ใช้ในการแพทย์ ด้านทันตกรรม ใช้สำหรับเหงือกเทียม จึงสามารถหาซื้อได้จากร้านที่ขายเครื่องมือของทันตแพทย์ ราคาประมาณ 1,000 บาทต่อ 1 ชุด ในการใช้งานจะผสมนํ้ายาออโทต่อผงออโทในอัตราส่วน 3:1 ในกรณีที่ใช้หล่อเป็นชิ้นงาน หรือในกรณีที่ต้องการใช้เพื่อเป็นตัวประสานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน จะใช้วิธีโรยผงออโทลงไปที่ชิ้นงานที่ได้เชื่อมต่อไว้แล้ว หลังจากนั้นจึงหยดนํ้ายาออโทตามลงไปให้ทั่วพอหมด อะคีรีคออโทนี้หลังจากผสมใช้งานแล้วจะใช้เวลาแข็งตัว (มักเรียกว่าเซ็ดตัว) ประมาณ 5 นาที หลังจากทำเสร็จเรียบร้อยแล้วควรนำชิ้นงานนั้นไปแช่นํ้าเป็นเวลา 2 วัน หรือจนกระทั่งกลิ่นของนํ้ายาออโทจางลง

## 6. อลูมิเนียมฟอล์ย

อลูมิเนียมฟอล์ยที่ใช้เป็นชนิดเดียวกับที่ใช้ในการปรุงอาหาร หรืออาจจะใช้แผ่นตะกั่วที่อยู่ในของบุหรีก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้แผ่นทองแดงบางๆ ที่ใช้ในงานไฟฟ้าหรือเครื่องกลก็ได้

## 7. ไม้

ไม้ที่ใช้สามารถใช้ได้ทุกชนิด ที่ใช้ในโครงการนี้ใช้ไม้ฉำฉาเนื่องจากเป็นไม้ที่หาง่าย, มีราคาถูก และเครื่องที่สร้างเป็นเครื่องต้นแบบ โดยนำมาจากกิ่งไม้ที่ใช้บรรจุของ หรือสามารถหาซื้อได้จากร้านขายไม้บริเวณตลาดคลองเตย

## บรรณานุกรม

Karel Kleparnik and Peter Bocek. "Theoretical background for clinical and biomedical applications of electromigration techniques" *Journal of Chromatography* 569 (1991) : 4-41.

Z. Deyl and R. Struzinsky. "Capillary zone electrophoresis: its applicability and potential in biomedical analysis" *J. Chromatogr* 569(1991) : 81-84.

ปรีชญา เกาสวรรณ. "หลักการวิเคราะห์โดยเทคนิค Capillary Electrophoresis" *SA Newsletter* vol.2 No.3 (1991) : 11-20.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวนุชนาท แก้วซิม เกิดเมื่อวันที่ 17 มกราคม พ.ศ. 2513 ที่จังหวัดชลบุรี

### การศึกษา

สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลชลบุรี

สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนชลกันยานุกูล

สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบดินทร์เดชา (สิงห์ สิงหเสนี)

ศึกษาระดับปริญญาตรีใน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### การฝึกงาน

เข้ารับการฝึกงานภาคฤดูร้อนที่ บริษัท โอบีเอ็ม ประเทศไทย จำกัด ระหว่างเดือนเมษายน-พฤษภาคม  
พ.ศ. 2534

### ผลงานทางวิชาการ

สัมมนาทางฟิสิกส์ในเรื่อง Silicon Ratina เมื่อ กันยายน พ.ศ. 2534

สัมมนาทางฟิสิกส์ในเรื่อง Measurement of Density เมื่อ กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2535

นายฉัตรเจต พันพาไพโร เกิดเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2512 ที่กรุงเทพฯ

### การศึกษา

สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนสวนบัว

สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัย  
รามคำแหง

ศึกษาระดับปริญญาตรีใน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### การฝึกงาน

เข้ารับการฝึกงานภาคฤดูร้อนที่ บริษัท โอบีเอ็ม ประเทศไทย จำกัด ระหว่างเดือนเมษายน-  
พฤษภาคม พ.ศ. 2534

### ผลงานทางวิชาการ

สัมมนาทางฟิสิกส์ในเรื่อง Gallium Arsenide เมื่อ กรกฎาคม พ.ศ. 2534

สัมมนาทางฟิสิกส์ในเรื่อง Capillary Electrophoresis เมื่อ มกราคม พ.ศ. 2535