

บทที่ 3

ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. ไคโตซานจากเปลือกกุ้งชนิดมวลงโมเลกุลสูง มีค่า Degree of deacetylation (DDA) 98.6% จากบริษัท A.N. Lab, Co., Ltd. ประเทศไทย
2. ซีเรียมแอมโมเนียมไนเตรด (Cerium(IV) Ammonium Nitrate) จากบริษัท Fluka ประเทศออสเตรเลีย
3. โมโนเมอร์ของไวนิลอะซิเตท (Vinyl acetate monomer) จากบริษัท Merck Schuchardt OHG ประเทศเยอรมัน
4. กรดอะซิติก (Acetic acid) จากบริษัท Merck KGaA ประเทศเยอรมัน
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) จากบริษัท Merck KGaA ประเทศเยอรมัน
6. เมทานอล (Commercial grade)
7. อะซีโตน (Acetone) จากบริษัท SK Chemicals ประเทศเกาหลี
8. กลูตาโรลดีไฮด์ (Glutaraldehyde, GLA) จากบริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
9. กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) จากบริษัท J.T. Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. กรดฟอสโฟทังสติก (Phosphotungstic acid) จากบริษัท Himedia Laboratory Pvt ประเทศอินเดีย
11. เขม่าดำขนาดนาโนเมตรชนิดกระจายตัว (Self-dispersible carbon black), (เขม่าดำซื้อจากบริษัท Loxley ประเทศไทย)
12. เมมเบรนนาฟิออน (Nafion®117) จากบริษัท Ion power Inc ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องแก้วต่างๆ
2. ชุดเครื่องมือวิเคราะห์การซึมผ่านเมทานอล
3. เครื่องกวนและใบกวน

4. เครื่องชั่งดิจิตอล
5. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
6. ชุดการกรอง
7. เครื่องกวนและทำความร้อน
8. เตาอบความร้อน

3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์

1. Potentiostat testing
2. Four-probe-points cell
3. UV-Visible spectrophotometer

3.2 วิธีการสังเคราะห์สาร

การสังเคราะห์ไคโตซานต่อกิ่งด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ (CS-g-PVA)

การทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ CS-g-PVA ทำโดยการทำปฏิกิริยาสองขั้นตอน คือ ทำปฏิกิริยา graft copolymerization ของโพลิไวนิลอะซิเตทที่โครงสร้างของไคโตซานแล้วจึงนำมาทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นไคโตซาน-กราฟต์-โพลิไวนิลแอลกอฮอล์ตามวิธีการของ Don และคณะ (2006) มีรายละเอียดและขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.2.1. ปฏิกิริยาโคโพลิเมอร์ไรเซชันแบบต่อกิ่ง (Graft copolymerization)

1. นำไคโตซานชนิดมวโมเลกุลสูง (High Molecular Weight Chitosan หรือ HMCS) ค่า degree of deacetylation (DDA) 98.6% จำนวน 15 g ละลายในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 2% โดยน้ำหนักปริมาตร 1000 ml เมื่อไคโตซานละลายจนหมดแล้วจึงกวนสารละลายด้วยความเร็ว 350 rpm จากนั้นค่อยๆเติมสารซีเรียมแอมโมเนียมไนเตรท, $\text{Ce}(\text{NH}_4)_2(\text{NO}_3)_6$ หรือ CAN ปริมาณ 11.836 g เพื่อให้ ceric ion เป็น initiator ในปฏิกิริยา graft copolymerization

2. เติมโมโนเมอร์ ของไวนิลอะซิเตทปริมาณ 100 g (W_{VAc}) ลงไปในสารละลายข้อ 1 เพื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงได้สารแขวนลอยของโคโพลิเมอร์ของไคโตซาน ซึ่งก็คือไคโตซานต่อกิ่งด้วยโพลิไวนิลอะซิเตทผสมกับโพลิเมอร์ของไวนิลอะซิเตท

การหาค่า Conversion (%X) ของปฏิกิริยาดังกล่าวทำได้โดยนำสารแขวนลอยที่ได้ ทำให้แห้งแล้ว ชั่งน้ำหนัก (W_1) แล้วคำนวณหาค่า Conversion ได้จากสมการ

$$\%x = \frac{(W_1 - W_{CS})}{W_{VAc}} \times 100 \quad \dots (3.1)$$

ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันแบบตอกิ่ง (Grafting efficiency หรือ %GE) และค่าอัตราส่วนการตอกิ่ง (Grafting ratio หรือ GR) หาได้โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ทำให้แห้งแล้วข้างต้น ไปสกัดเอาโพลิเมอร์ของไวนิลอะซิเตทออกโดยแช่ทิ้งไว้ในอะซิโตนบริสุทธิ์อย่างน้อย 72 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทำให้แห้งและชั่งน้ำหนัก (W_2) โดยค่า %GE และ GR สามารถหาได้ดังสมการ

$$\%GE = \frac{W_2 - W_{CS}}{W_1 - W_{CS}} \times 100 \quad \dots (3.2)$$

$$GR = \frac{W_2 - W_{CS}}{W_{CS}} \quad \dots (3.3)$$

3.2.2 การทำปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis)

1. เตรียมสารละลายของ NaOH โดยละลาย 40 g ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ 40 ml
2. เติมนีทานอลปริมาณ 1000 ml ลงไปในสารละลายข้อ 1
3. อุณหภูมิของสารละลายข้อ 2 ที่อุณหภูมิ 40°C และกวนด้วยความเร็วรอบประมาณ 300 rpm
4. ค่อยๆหยดสารละลายโคโพลิเมอร์ของไคโตซานที่ได้ลงไปลงในสารละลายข้อ 2 ทีละน้อยเป็นเวลาประมาณ 45 นาที แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 15 นาที จะมีตะกอนเกิดขึ้นซึ่งก็คือไคโตซานตอกิ่งด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับโพลิเมอร์ของไวนิลแอลกอฮอล์
5. กรองตะกอนที่ได้ และล้างตะกอนให้สะอาดด้วยเมทานอล จากนั้นนำไปตากให้แห้งเพื่อรอการใช้งานต่อไป

3.3 การเตรียมเมมเบรน

การเตรียมเมมเบรนไคโตซานตอกิ่งด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์

1. นำไคโตซานตอกิ่งด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ (CS-g-PVA) ที่เตรียมได้ปริมาณ 2.2 g ละลายในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 10% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 40 ml ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65°C กวนให้ CS-g-PVA ละลายจนหมดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปกรอง

2. นำสารละลายที่กรองแล้วเทลงบนจานเพาะเชื้อที่สะอาด ทิ้งไว้ให้ระเหยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำเมมเบรนที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วทำให้เป็นกลางโดยนำไปแช่ไว้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นล้างออกด้วยน้ำกลั่น
4. เก็บเมมเบรนที่ได้โดยการแช่ไว้ในน้ำกลั่นเพื่อรอใช้งานต่อไป

3.4 การเพิ่มคุณสมบัติของเมมเบรนไคโตซานต่อกิ่งด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์

3.4.1 การเติมเขม่าดำขนาดนาโนเมตรชนิดกระจายตัว (CS-g-PVA+SDCB)

1. ละลาย CS-g-PVA 2.2 g ในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 10% โดยน้ำหนัก ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65°C จนละลายหมดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายไปกรอง
2. กรองสารละลายทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
3. ค่อยๆ เติมเขม่าดำขนาดนาโนเมตรชนิดกระจายตัวลงไป โดยปริมาณ SDCB ที่ใช้คิดเป็น 1, 2, 4, 6 และ 8% ของน้ำหนัก CS-g-PVA
4. กรองสารละลายจนกระทั่ง SDCB กระจายทั่วถึง เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
5. ค่อยๆ เทสารละลายที่ได้ลงบนจานเพาะเชื้อ ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
6. ทำเมมเบรนให้เป็นกลางโดยนำไปแช่ไว้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นล้างออกให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น
7. เก็บเมมเบรนที่ได้โดยการแช่ไว้ในน้ำกลั่นเพื่อรอใช้งานต่อไป

3.4.2 การสังเคราะห์ไคโตซานต่อกิ่งด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับกรดฟอสโฟทังสติก (CS-g-PVA+PWA)

3.4.2.1 ปฏิริยาโคโพลิเมอไรเซชันแบบต่อกิ่ง (Graft copolymerization)

1. นำกรดฟอสโฟทังสติกปริมาณต่างๆ กันคือ 5, 10, 20 และ 40% ของน้ำหนักไคโตซานมาละลายในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 2% โดยน้ำหนักปริมาตร 1000 ml จากนั้นนำไคโตซานชนิดมวโมเลกุลสูง จำนวน 15 g ละลายในสารละลายดังกล่าว เมื่อละลายหมดแล้วนำสารละลายที่ได้ไปทำปฏิริยาโคโพลิเมอไรเซชันแบบต่อกิ่งตามหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 เช่นเดียวกับการสังเคราะห์ CS-g-PVA แล้วนำตะกอนที่ล้างด้วยเมทานอลแล้ว ตากให้แห้งเพื่อรอการขึ้นรูปเป็นเมมเบรนต่อไป

อย่างไรก็ตามในการคำนวณค่า Conversion (%X), ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันแบบตอ้ง (Grafting efficiency หรือ %GE) และค่าอัตราส่วนการตอ้ง (Grafting ratio หรือ GR) ของ CS-g-PVA+PWA มีข้อแตกต่างจาก CS-g-PVA ปกติ โดยสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$\%X = \frac{W_1 - (W_{CS} + W_{PWA})}{W_{VAc}} \times 100 \quad \dots (3.4)$$

$$\%GE = \frac{W_2 - (W_{CS} + W_{PWA})}{W_1 - (W_{CS} + W_{PWA})} \times 100 \quad \dots (3.5)$$

$$GR = \frac{W_2 - (W_{CS} + W_{PWA})}{(W_{CS} + W_{PWA})} \quad \dots (3.6)$$

เมื่อ W_{PWA} คือปริมาณของ PWA ที่เติมลงไปในช่วงขั้นตอนการสังเคราะห์สาร [g]

3.4.2.2 การเตรียมเมมเบรนไคโตซานตอ้งด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับกรดฟอสฟอริก (CS-g-PVA+PWA membrane)

1. นำ CS-g-PVA+PWA ที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 2.2 g ละลายในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 10% โดยปริมาตร ปริมาตร 40 ml ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65°C กวนให้ CS-g-PVA+PWA ละลายจนหมดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปกรอง
2. นำสารละลายที่กรองแล้วเทลงบนจานเพาะเชื้อที่สะอาด ทิ้งไว้ให้ระเหยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำเมมเบรนที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วทำให้เป็นกลางโดยนำไปแช่ไว้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นล้างออกด้วยน้ำกลั่น
4. เก็บเมมเบรนที่ได้โดยการแช่ไว้ในน้ำกลั่นเพื่อรอใช้งานต่อไป

3.4.3 การเชื่อมขวางโดยใช้กลูตาโรลดีไฮด์และกรดซัลฟูริก

1. เตรียมสารผสมเพื่อทำการเชื่อมขวาง โดยผสมกลูตาโรลดีไฮด์ ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาตร 1.5 ml และกรดซัลฟูริกปริมาตร 60 ml ซึ่งมีความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 2, 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แล้วผสมให้เข้ากัน

2. รอให้สารผสมเย็นก่อน จากนั้นนำเมมเบรน CS-g-PVA, CS-g-PVA+SDCB และ CS-g-PVA+PWA ที่เตรียมได้จากขั้นตอน 3.3, 3.4.1 และ 3.4.2.2 มาแช่ในสารผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง
3. นำเมมเบรนที่แช่แล้วไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง
4. เก็บเมมเบรนไว้ในน้ำกลั่นเพื่อรอการใช้งานต่อไป

3.5 การทดสอบคุณสมบัติของเมมเบรน

คุณสมบัติที่จำเป็นของเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้เมทานอลโดยตรงของงานวิจัยนี้ได้แก่ การนำไอออนหรือการนำโปรตอนของตัวเมมเบรน การทดสอบการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรน และการทดสอบการดูดซึมน้ำและเมทานอลของเมมเบรน โดยมีรายละเอียดของการทดสอบต่างๆ ดังนี้

3.5.1 การทดสอบคุณสมบัติการนำไอออนหรือโปรตอน (Ion or Proton Conductivity)

การทดสอบการแลกเปลี่ยนโปรตอนของเมมเบรนใช้วิธีที่เรียกว่า Four-Probe Method ซึ่งวิธีนี้เป็นการวัดความต้านทานทางไฟฟ้า (impedance) โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า four-probe-points cell ที่ต่อกับเครื่อง Potentiostat testing ค่าการนำไอออนจะวัดจากค่าความต้านทานในการนำไฟฟ้าของเมมเบรนระหว่างลวดอิเล็กโทรดสองเส้น คำนวณค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่วัดได้โดยใช้โปรแกรม Frequency Response Analysis ที่ความถี่ไฟฟ้า 10 kHz แอมพลิจูด 0.35 mA ในการวัดการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านเมมเบรนจะวัดในสถานะที่เมมเบรนอิ่มน้ำ โดยการแช่เมมเบรนในน้ำกลั่นอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ค่าการนำโปรตอนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma = \frac{l}{Z \times S} \quad \text{.....(3.7)}$$

โดย σ คือ ค่าการนำไอออนหรือโปรตอน [mS/cm]

l คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด [cm]

Z คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างสองอิเล็กโทรด [$k\Omega$]

S คือ พื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน [cm^2]

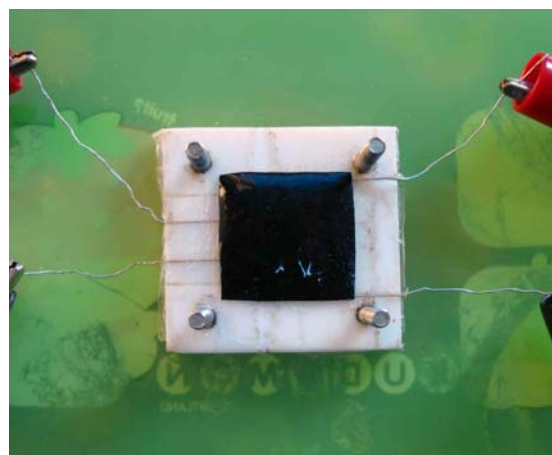
ภาพที่ 3.1

แสดงเครื่องมือทดสอบสมบัติการนำไฮออนหรือโปรตอน

(ก) Potentiostat Testing (ข) Four-Probe-points Cell



(ก)



(ข)

3.5.2 การดูดซึมน้ำและการดูดซึมเมทานอลของเมมเบรน (Water and Methanol Uptake)

เป็นการวัดความสามารถในการดูดซึมน้ำหรือเมทานอลของเมมเบรน ทำได้โดยการนำเมมเบรนไปชั่งน้ำหนักแห้งก่อน จากนั้นจึงนำไปแช่น้ำกลั่นหรือเมทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำเมมเบรนมาชั่งน้ำหนัก เปอร์เซ็นต์ในการดูดซึมน้ำของเมมเบราก็จะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\% \text{ Water Uptake (or Methanol Uptake)} = \left[\frac{W_w - W_d}{W_d} \right] \times 100\% \quad \dots\dots(3.8)$$

เมื่อ W_d คือ น้ำหนักของเมมเบรนแห้ง [g]

W_w คือ น้ำหนักของเมมเบรนเมื่อครบเวลา 24 ชั่วโมง [g]

ในงานวิจัยทั่วไปนั้นมักจะทำการศึกษาค่าการดูดซึมน้ำเท่านั้น ซึ่งการดูดซึมน้ำจะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนของโปรตอน เพราะเมื่อเมมเบรนอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วโปรตอนก็สามารถเคลื่อนที่ได้ดีนั่นเอง แต่การดูดซึมเมทานอลเป็นปัจจัยหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากไม่ใช่เพียงแค่เมทานอลจะสูญเสียโดยการแพร่ผ่านเมมเบรนเท่านั้น แต่บางครั้งเมมเบรนอาจจะสะสมเมทานอลทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของโปรตอนในเมมเบรนได้ และการศึกษาการดูดซึมเมทานอลนั้นยังเกี่ยวข้องกับการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรนอีกด้วย

3.5.3 การทดสอบการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรน (Methanol Permeability)

ในงานวิจัยของ Mukoma และคณะ (2004) ได้ทำการทดสอบการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรนโดยการทำเครื่องมือที่ประกอบไปด้วยเซลล์สองเซลล์ ที่แต่ละเซลล์นั้นใส่สารละลายเมทานอลและน้ำกลั่นไว้ ดังภาพที่ 3.2

ในการทดลองนี้ชุดเครื่องมือทดสอบการแพร่ผ่านของเมทานอลถูกแบ่งออกเป็น 2 เซลล์ เซลล์หนึ่งใส่สารผสมระหว่างเมทานอลกับน้ำที่ความเข้มข้น 40% โดยปริมาตร ปริมาตร 400 ml อีกเซลล์หนึ่งใส่น้ำกลั่นปริมาตร 400 ml โดยที่ทั้งสองเซลล์นั้นถูกแบ่งออกจากกันโดยมีเมมเบรนกั้นกลางและมีพื้นที่ในการซึมผ่านขนาด 4 cm^2 เซลล์ทั้งสองจะถูกกวนด้วยอัตราเร็ว 200 รอบต่อนาทีเท่ากัน เพื่อให้ความเข้มข้นของแต่ละฝั่งมีค่าเท่ากันทั่วทั้งเซลล์ จากนั้นสุ่มตัวอย่างของสารละลายจากทั้งสองเซลล์ออกมาทุก 30 นาที ครั้งละ 10 ml แล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนของรังสี UV ที่ความยาวคลื่น 200 nm โดยใช้เครื่อง UV Vis Spectroscopy โดยทำ Calibration Curve ของค่าการดูดกลืนรังสี UV กับความเข้มข้นของเมทานอลก่อน เมื่อได้ค่าความเข้มข้นของเมทานอลที่เวลาต่างๆ แล้ว ก็สามารถนำมาคำนวณค่าการแพร่ผ่านของเมทานอลได้

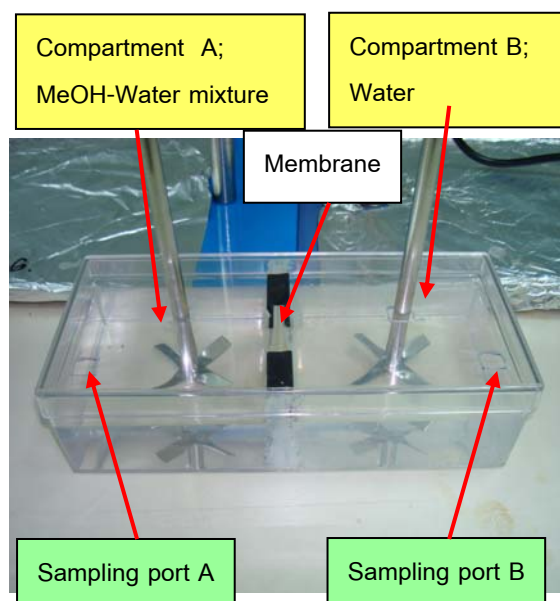
ภาพที่ 3.2

แสดงชุดเครื่องมือทดสอบการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรน (ก) Mechanical Stirrers

(ข) เซลล์ใส่สารละลายเมทานอลและน้ำกลั่นคั่นกลางด้วยเมมเบรน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.3
เครื่อง UV Vis Spectroscopy



ในการวัดค่าการแพร่ผ่านของเมทานอลอาศัยกฎการแพร่ของ Fick's Law ซึ่งเป็นการคำนวณหาค่าการแพร่ผ่านของเมทานอลผ่านเมมเบรน (thin film) ค่าฟลักซ์ของเมทานอลสามารถหาได้จากสมการ

$$j_1 = \frac{DH}{L}(C_A - C_B) \quad \text{.....(3.9)}$$

เมื่อ j_1 คือ ฟลักซ์ของเมทานอลผ่านเมมเบรน [$\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$]

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) [cm^2/s]

C_A คือความเข้มข้นของเมทานอลในเซลล์สารละลายเมทานอลกับน้ำ (compartment A) [mol/cm^3]

C_B คือความเข้มข้นของเมทานอลในเซลล์ที่ใส่น้ำ (compartment B) [mol/cm^3]

H คือสัดส่วนของความเข้มข้นของเมทานอลภายในเมมเบรนต่อความเข้มข้นของเมทานอลในสารละลาย [-]

L คือความหนาของเมมเบรน [cm]

ค่าความเข้มข้นของเมทานอลนั้นจะเปลี่ยนตามเวลา ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการในรูปอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเมทานอลได้

ในเซลล์ของสารละลายเมทานอล

$$V_A \cdot \frac{dC_A}{dt} = -A j_1 = -A \left[\frac{DH}{L} \right] \cdot (C_A - C_B) \quad \text{.....(3.10)}$$

ในเซลล์ของน้ำกลั่น

$$V_B \cdot \frac{dC_B}{dt} = +A j_1 = A \left[\frac{DH}{L} \right] \cdot (C_A - C_B) \quad \text{.....(3.11)}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ผิวของเมมเบรนที่กั้นกลางระหว่างเมทานอลและน้ำกลั่น (cm²)

V_A คือ ปริมาตรของเมทานอล (cm³)

V_B คือ ปริมาตรของน้ำกลั่น (cm³)

จากสมการ (3.10) พบว่ามีค่าเป็นลบ เนื่องจากค่าความเข้มข้นของเมทานอลในเซลล์นี้จะลดลง โดยเมทานอลจะแพร่ผ่านเมมเบรนไปยังเซลล์ของน้ำ

จากสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเมทานอลเมื่อนำมาสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นของเมทานอลกับเวลา

ในเซลล์ของสารละลายเมทานอล จะสามารถหาค่าความชันของกราฟเป็น k_A

$$k_A = \frac{dC_A}{dt} = -\frac{A}{V_A} \left[\frac{DH}{L} \right] \cdot (C_A - C_B) \quad \text{.....(3.12)}$$

แล้วสามารถหาค่าการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรน (Methanol permeability หรือ P) ได้เป็น

$$P = (D \times H) = -\frac{k_A \times V_A \times L}{A \times (C_A - C_B)} \quad \text{.....(3.13)}$$

ในเซลล์ของน้ำกลั่น จะสามารถหาค่าความชันของกราฟเป็น k_B

$$k_B = \frac{dC_B}{dt} = \frac{A}{V_B} \left[\frac{DH}{L} \right] \cdot (C_A - C_B) \quad \text{.....(3.14)}$$

แล้วสามารถหาค่าการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรน (Methanol permeability หรือ P) ได้เป็น

$$P = (D \times H) = \frac{k_B \times V_B \times L}{A \times (C_A - C_B)} \quad \text{.....(3.15)}$$