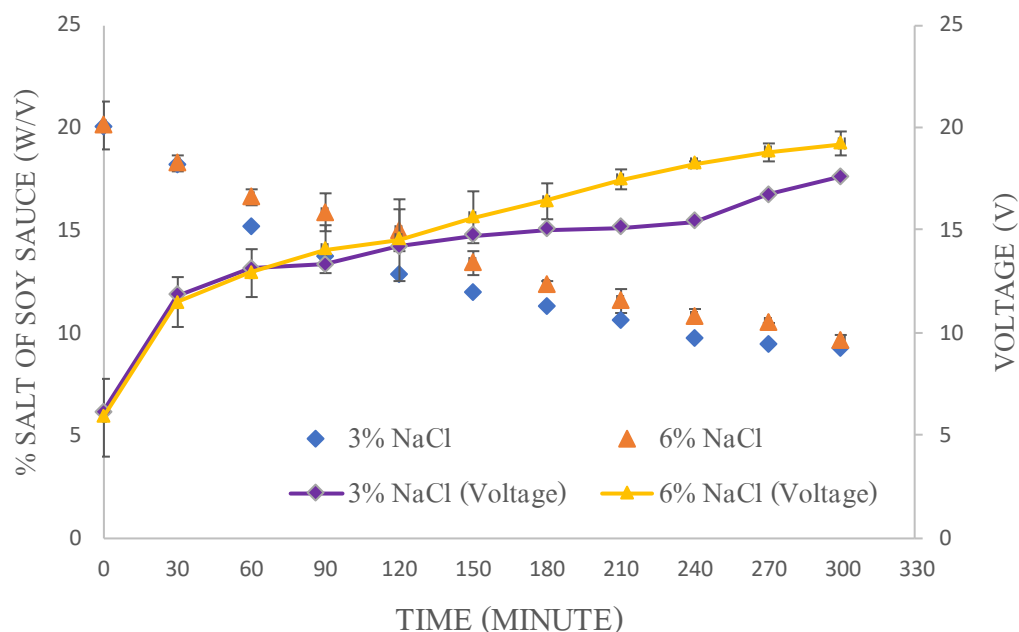


## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

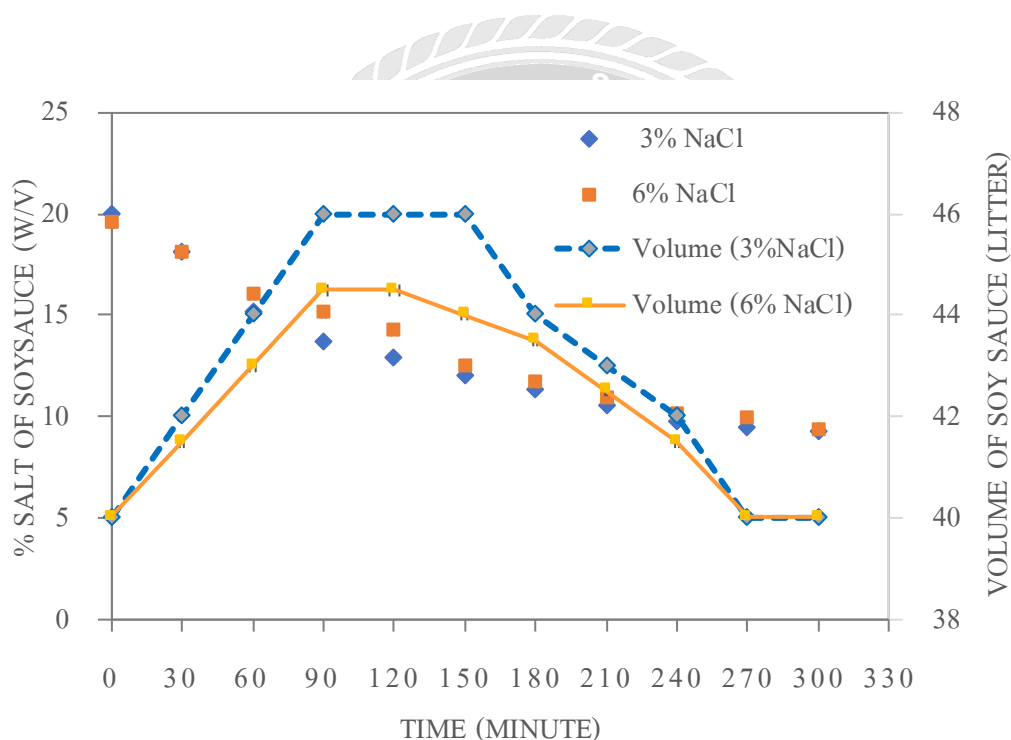
#### 4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้าระดับโรงงานต้นแบบในการกำจัดเกลือออกจากซอสถั่วเหลือง

จากผลการทดลองแยกเกลือออกจากซอสถั่วเหลืองซึ่งประกอบด้วยเกลือ (โซเดียมคลอไรด์) เริ่มต้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 40 ลิตร โดยใช้เครื่องแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้าซึ่งใช้ concentrate เป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่ร้อยละ 3 และ 6 และจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 13 แอมแปร์ เป็นเวลา 300 นาที จากนั้นติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ (voltage) ที่ตกคร่อมระบบ รวมทั้งความเข้มข้นของเกลือ (Salt concentration) ปริมาตร (Volume) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) และค่า water activity ( $a_w$ ) ของซอสถั่วเหลือง (ซึ่งเรียกว่า Diluate) ได้ดังรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือและความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ของซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำระหว่างการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า

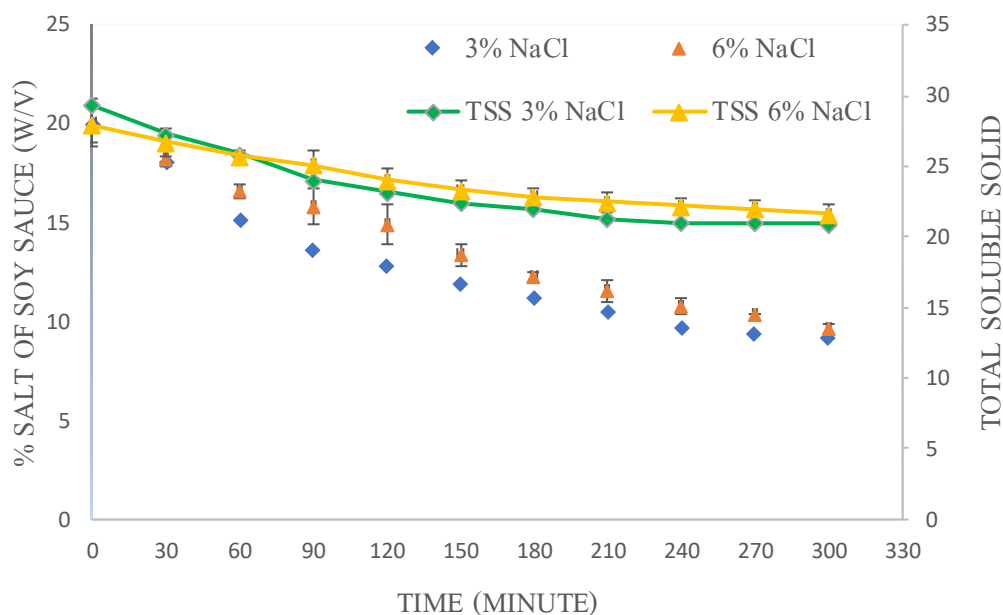
จากรูปที่ 4.1 พบว่าปริมาณเกลือในซอสถั่วเหลืองลดลงอย่างต่อเนื่องระหว่างการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า เนื่องจากโซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนจะเคลื่อนที่ออกจากซอสถั่วเหลืองผ่านเมมเบรนได้โดยอาศัยแรงขับ (driving force) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนด (anode) และ แคโทด (cathode) อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ 3% NaCl เป็น concentrate ทำให้ความเข้มข้นของเกลือในซอสถั่วเหลืองลดลงได้เร็วกว่าการใช้ 6% NaCl เป็น concentrate เล็กน้อย แม้ว่าระบบที่ใช้ 6% NaCl เป็น concentrate จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์ไฟฟ้ามากกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะการลดลงของความเข้มข้นของเกลือในซอสถั่วเหลืองมิได้เกิดขึ้นโดยการแยกโซเดียมไอออนออกจากซอสถั่วเหลืองเนื่องจากแรงขับของกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว แต่เป็นผลจากการเจือจางด้วยโมเลกุลของน้ำที่เคลื่อนที่เข้ามาในซอสถั่วเหลืองเนื่องจาก osmotic pressure ด้วย



**รูปที่ 4.2** การเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือและปริมาตรของซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำในระหว่างการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า

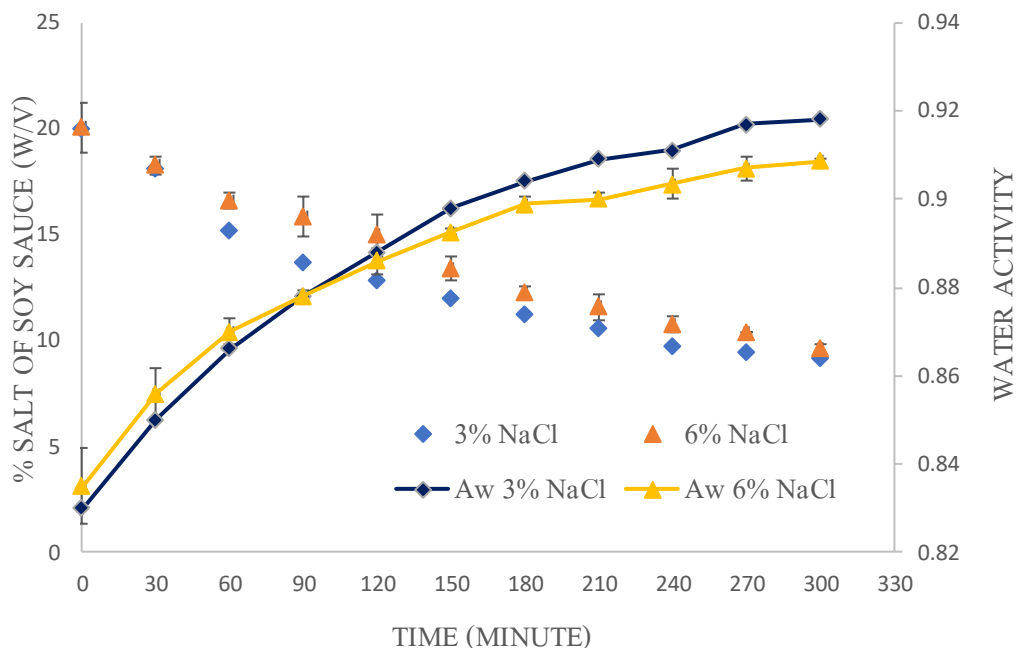
จากรูปที่ 4.2 พบว่าปริมาณเกลือในซอสถั่วเหลืองลดลงอย่างต่อเนื่องระหว่างการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ 3% NaCl เป็น concentrate ส่งผลให้ความเข้มข้นของเกลือในซอสถั่วเหลืองมีอัตราการลดลงได้เร็วกว่าการใช้ 6% NaCl เป็น concentrate เล็กน้อย และเมื่อพิจารณาปริมาตรของซอสถั่วเหลืองใน diluate tank พบว่าในช่วง 90 นาทีแรก ปริมาตรของซอสถั่ว

เหลือจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เพราะมีการไหลของน้ำจากช่อง concentrate เข้าสู่ช่อง diluate เนื่องจาก osmotic pressure อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นว่ากระบวนการซึ่งใช้ 6% NaCl เป็น concentrate ทำให้ปริมาณของซอสถั่วเหลือง (diluate) เพิ่มขึ้นน้อยกว่ากระบวนการซึ่งใช้ 3% NaCl เป็น concentrate ทั้งนี้เป็นเพราะแรงดันออสโมติกในช่อง concentrate ของกระบวนการที่ใช้ 6% NaCl เป็น concentrate มีค่าต่ำกว่าการใช้ 3% NaCl เป็น concentrate



**รูปที่ 4.3** การเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ของซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำในระหว่างการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.3 พบว่าขณะที่ปริมาณเกลือในซอสถั่วเหลืองลดลงในระหว่างการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้าส่งผลทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ของซอสถั่วเหลืองลดลงอย่างต่อเนื่องด้วย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการที่ใช้ 3% NaCl และ 6% NaCl เป็น concentrate พบว่ากระบวนการที่ใช้ 6% NaCl เป็น concentrate มีอัตราการลดลงของปริมาณ TSS น้อยกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการลดลงของปริมาณน้ำเนื่องจากกระบวนการออสโมซิสเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ใช้ 3% NaCl เป็น concentrate



**รูปที่ 4.4** การเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือและค่า water activity ( $a_w$ ) ของซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำในระหว่างการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.4 พบว่าขณะที่ความเข้มข้นของเกลือในซอสถั่วเหลืองลดลงระหว่างการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า ส่งผลทำให้ค่า water activity ของซอสถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามหลังจากกระบวนการแยกผ่านไป 90 นาที พบว่าค่า water activity ของซอสถั่วเหลืองที่ใช้ 6% NaCl เป็น concentrate ต่ำกว่าซอสถั่วเหลืองที่ใช้ 3% NaCl เป็น concentrate ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ TSS ของซอสถั่วเหลืองที่ได้จากการใช้ 6% NaCl เป็น concentrate มีค่าสูงกว่าซอสถั่วเหลืองที่ได้จากการใช้ 3% NaCl เป็น concentrate

#### 4.2 ผลศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี-กายภาพ ของซอสถั่วเหลืองในระหว่างกำจัดเกลือ โดยใช้กระบวนการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้าระดับโรงงานต้นแบบ

จากผลการทดลองแยกเกลือออกจากซอสถั่วเหลืองซึ่งประกอบด้วยเกลือเริ่มต้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 40 ลิตร โดยใช้เครื่องแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้าซึ่งใช้ Concentrate เป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 6 และจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 13 แอมแปร์ เพื่อให้ได้ซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำซึ่งประกอบด้วยเกลือร้อยละ 14, 12, 10 และ 9 โดยปริมาตรตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี-กายภาพของซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำแสดง ดังตารางที่ 4.1 , 4.2 และ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 เวลาที่ใช้ในการผลิต (ED time) และความเข้มข้นของเกลือที่ได้ (Actual salt concentration) รวมทั้งสมบัติทางกายภาพบางประการของซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำ

Targeted salt concentration	ED Time (Minute)	Actual salt concentration (%w/v)	pH	TSS
CS*	-	10.004 ± 0.08	3.94 ± 0.007	31.0 ± 0.21
20% salt	0	19.72 ± 0.68 <sup>a</sup>	4.14 ± 0.02 <sup>c</sup>	27.9 ± 1.27 <sup>a</sup>
14% salt	150	13.38 ± 0.55 <sup>b</sup>	4.27 ± 0.01 <sup>b</sup>	23.3 ± 0.71 <sup>b</sup>
12% salt	210	11.56 ± 0.58 <sup>c</sup>	4.39 ± 0.01 <sup>a</sup>	22.5 ± 0.71 <sup>b</sup>
10% salt	270	10.41 ± 0.00 <sup>cd</sup>	4.43 ± 0.04 <sup>a</sup>	22.0 ± 0.56 <sup>b</sup>
9% salt	300	9.63 ± 0.22 <sup>d</sup>	4.46 ± 0.01 <sup>a</sup>	21.7 ± 0.63 <sup>b</sup>

\* CS คือ ซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำทางการค้า

จากตารางที่ 4.1 พบว่าสมบัติทางกายภาพของซอสถั่วเหลืองเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในระหว่างการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า โดยพบว่าการลดลงของเกลือโซเดียมคลอไรด์ในระหว่างกระบวนการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า ส่งผลทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ในซอสถั่วเหลืองลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้ามกลับทำให้ pH ของซอสถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้าไม่เพียงกำจัดเกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ออกจากซอสถั่วเหลืองเท่านั้น แต่อาจทำให้มีการสูญเสียกรดอินทรีย์บางชนิดได้ด้วย

ตารางที่ 4.2 ค่าสีและดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (Browning index) ของซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำ

Targeted salt concentration (%w/v)	Color value				Chroma	Hue angle	Browning Index
	L*	a*	b*	$\Delta E^*$	C*		
CS*	9.73±0.01	3.21±0.09	-1.96±0.13	-	-	-	-
20	9.60±0.01	3.25±0.01	-1.79±0.65	-	6.17	-22.26	9.42
14	10.02±0.43	3.45±0.35	-1.44±0.09	0.58	6.98	-22.65	9.30
12	9.82±0.75	3.59±0.71	-1.78±0.17	0.41	8.03	-26.37	7.56
10	9.74±0.74	3.34±0.57	-1.68±0.08	0.20	6.99	-26.70	6.98
9	9.91±0.55	3.04±0.43	-1.66±0.19	0.39	5.99	-28.64	5.23

\*CS คือ ซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำทางการค้า

จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสีของซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำเปรียบเทียบกับซอสถั่วเหลืองซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบ (20% salt) พบว่าค่าสีได้แก่ L\*, a\* และ b\* ของซอสถั่วเหลืองเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ ) เมื่อผ่านกระบวนการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า

โดยพบว่าซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำซึ่งประกอบด้วยเกลือร้อยละ 14 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม ( $\Delta E^*$ ) สูงที่สุด จากนั้นค่า  $\Delta E^*$  มีแนวโน้มลดลงแม้ว่าความเข้มข้นของเกลือในซอสถั่วเหลืองยังคงลดต่ำลงจาก 14 % เป็น 10 % นอกจากนี้พบว่าค่า  $\Delta E^*$  จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อซอสถั่วเหลืองมีความเข้มข้นของเกลือเหลือ 9% โดยสังเกตเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่า  $\Delta E^*$  เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของทั้งค่า L\* a\* และ b\* ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีบางประการของซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำ

Targeted salt concentration	Ion concentration		Protein Content (g/100ml)	Total acidity (g/100ml)	Reducing Sugar (g/100ml)
	Na <sup>+</sup> g/kg	K <sup>+</sup> g/kg			
CS*	29.81±0.76	3.21±0.08	9.36 ± 0.25	21.2 ± 0.09	0.42 ± 0.00
20% salt	70.78±13.28	1.75±0.18	7.22 ± 0.12 <sup>a</sup>	11.5 ± 0.15 <sup>a</sup>	0.35 ± 0.01 <sup>c</sup>
14% salt	36.16±2.47	0.89±0.01	4.88 ± 0.09 <sup>c</sup>	8.8 ± 0.22 <sup>b</sup>	0.45 ± 0.00 <sup>b</sup>
12% salt	32.31±2.87	0.73±0.01	5.12 ± 0.22 <sup>bc</sup>	8.7 ± 0.23 <sup>b</sup>	0.46 ± 0.00 <sup>b</sup>
10% salt	28.98±2.56	0.64±0.00	5.34 ± 0.06 <sup>b</sup>	8.6 ± 0.32 <sup>b</sup>	0.47 ± 0.00 <sup>b</sup>
9% salt	29.81±1.55	0.62±0.01	5.43 ± 0.06 <sup>b</sup>	8.5 ± 0.32 <sup>b</sup>	0.48 ± 0.01 <sup>a</sup>

\* CS คือ ซอสถั่วเหลืองโซเดียมต่ำทางการค้า

จากตารางที่ 4.3 พบว่าการลดลงของปริมาณเกลือ (โซเดียมคลอไรด์) โดยการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า ส่งผลทำให้มีปริมาณโปรตีนและปริมาณกรดทั้งหมดในซอสถั่วเหลืองมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในซอสถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น การลดลงของปริมาณโปรตีนและกรดสามารถเกิดจากการเจือจางด้วยน้ำเนื่องจากกระบวนการออสโมซิส นอกจากนี้ยังอาจมีการสูญเสียกรดอะมิโนและกรดอินทรีย์ขนาดเล็กที่สามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านเมมเบรนได้โดยอาศัยแรงขับ (driving force) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้า เช่นเดียวกับไอออนของโซเดียมและคลอไรด์ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าระหว่างกระบวนการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า อาจมีโปรตีนบางส่วนเกิดการเสียสภาพและการเกิดตกตะกอนบนผิวหน้าของเมมเบรน