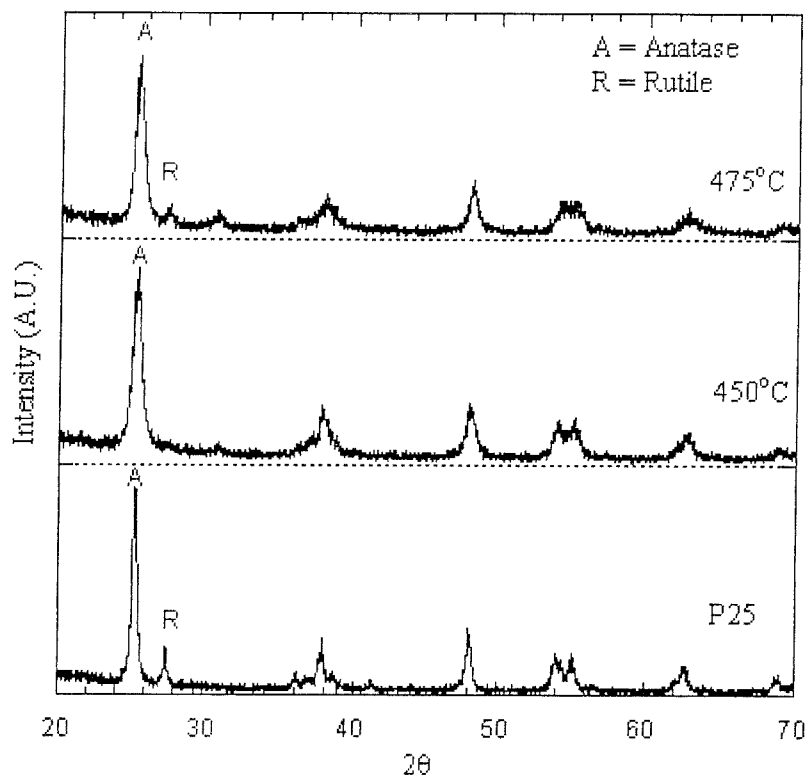


บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

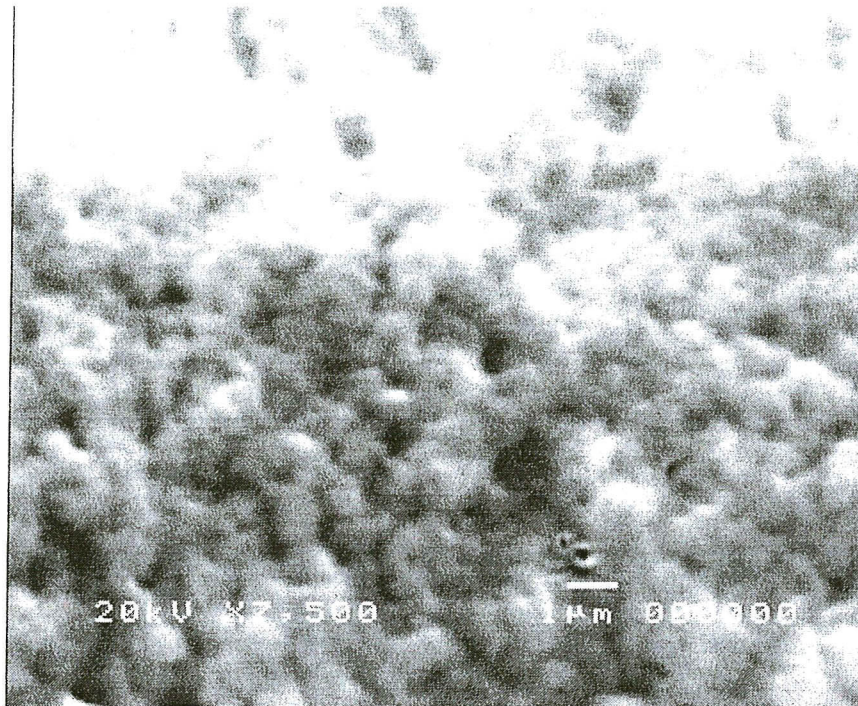
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก TiO_2 ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธี sol-gel



รูปที่ 7 X-ray diffraction pattern ของ TiO_2 เฟส anatase ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ anneal ต่าง ๆ กันและ P25 คือ TiO_2 มาตรฐานทางการค้าของ Degussa, Germany

รูปที่ 7 แสดง X-ray diffraction pattern ของ TiO_2 เฟส anatase ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ anneal 450 และ 475 °C และ P25 คือ TiO_2 มาตรฐานทางการค้าของ Degussa, Germany ข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่า TiO_2 ของเรามีเฟสเดียวเมื่อ anneal ที่ 450 °C ซึ่งดีกว่า TiO_2 มาตรฐานทางการค้าของ Degussa, Germany ที่ประกอบไปด้วย เฟส anatase และ rutile

ผลการวิเคราะห์สารที่สังเคราะห์ได้คือไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีโครงสร้างผลึกเป็น tetragonal และมีเฟสเป็น anatase อยู่ใน space group $I4_1/amd$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคคำนวณได้จาก Scherer's formula (Cullity, 1978),



รูปที่ 8 ภาพถ่าย SEM ของ TiO_2 เฟส anatase ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ anneal 450°C

$$d = \frac{0.9\lambda}{B\cos(\theta)}$$

โดยที่ d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

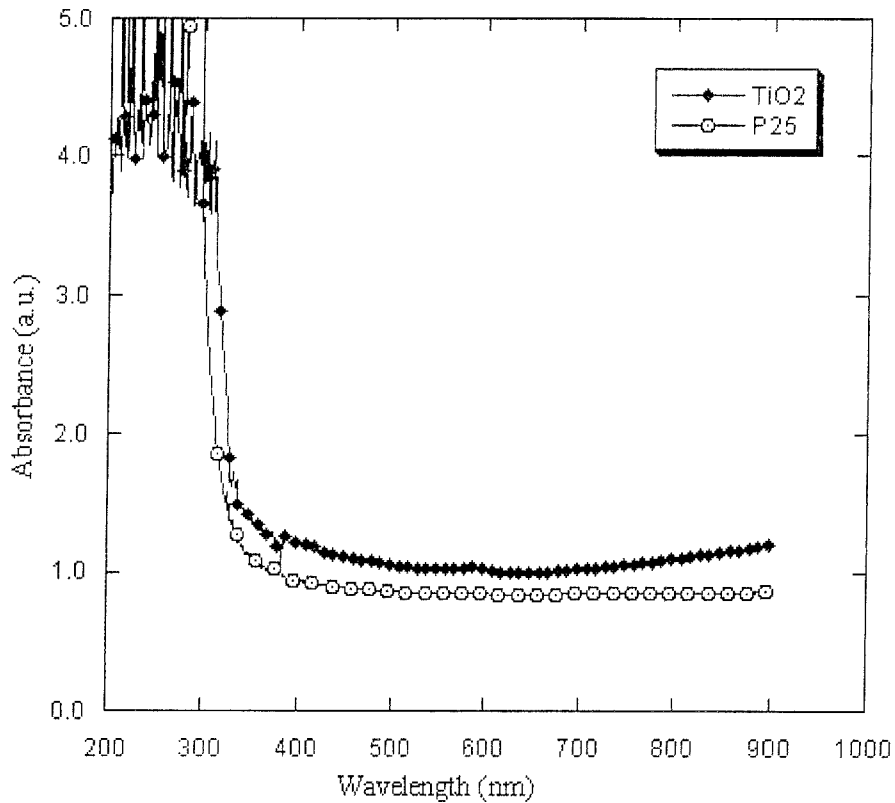
λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$)

B = ความกว้างของ diffraction line ที่ half of its maximum intensity (FWHM)

2θ = มุมที่ยอด Peak สูงที่สุด

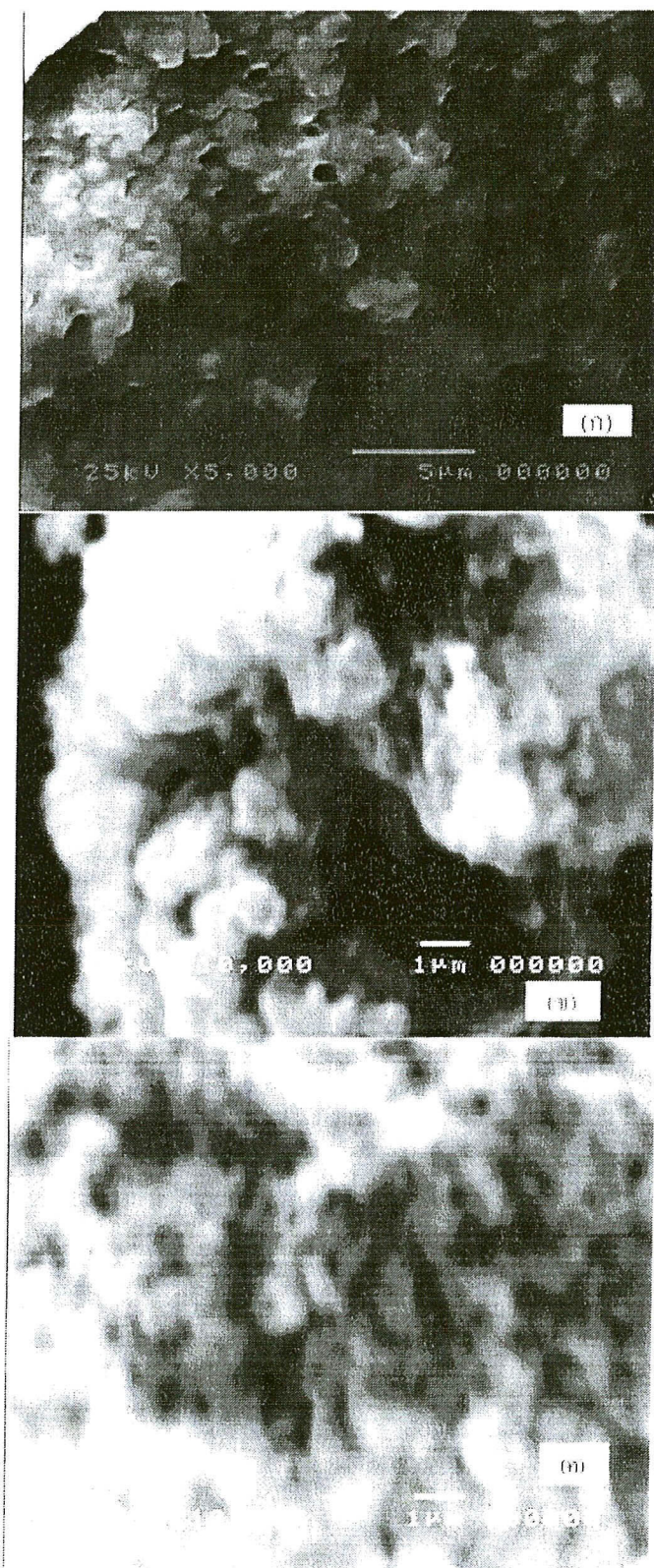
จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$, $B = 1.1^\circ = 0.0912$, $2\theta = 25.40^\circ$, $\theta = 0.2216 \text{ rad}$ พบว่า TiO_2 มีขนาดอนุภาคประมาณ 73 nm โดยมี lattice parameters: $a = 3.78 \text{ \AA}$, $b = 3.78 \text{ \AA}$ และ $c = 9.53 \text{ \AA}$

4.2 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของ TiO_2 ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ TiO_2 เฟส anatase ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ anneal ที่ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ P25

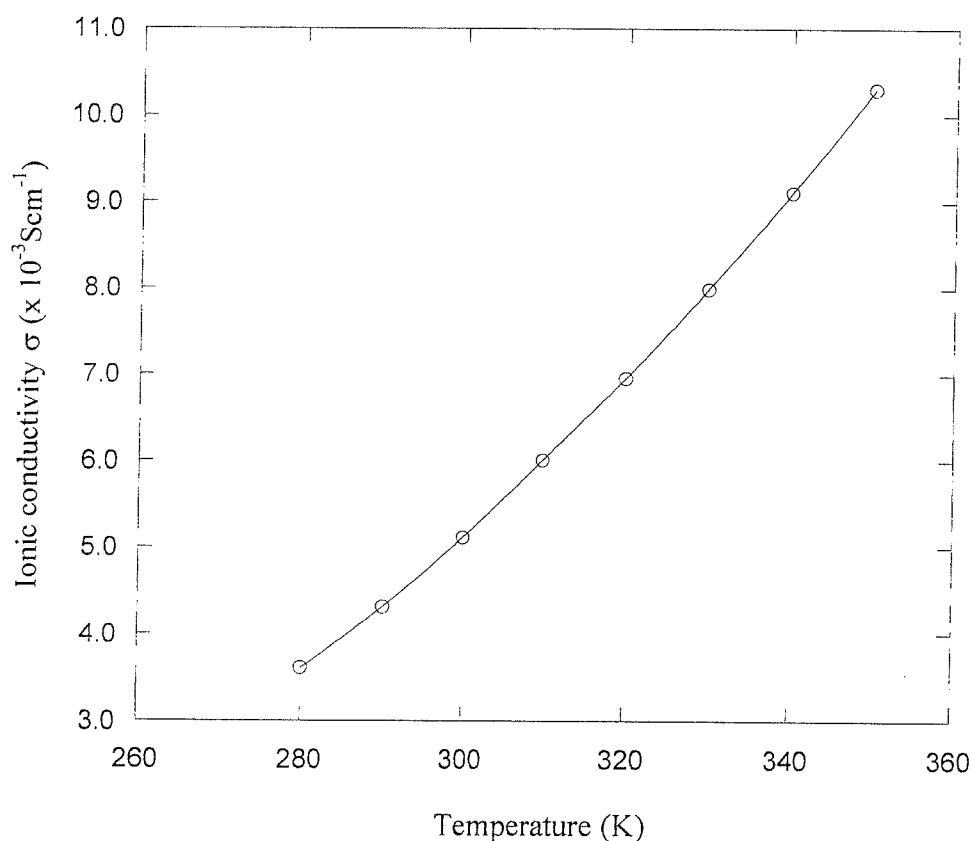
จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่า TiO_2 เฟส anatase ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ anneal ที่ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่า P25 ทุกช่วงความยาวคลื่น เราจึงสรุปได้ว่า ตัวอย่างที่เราสังเคราะห์ได้ สามารถ รับเอาพลังงานแสงได้มากกว่า TiO_2 มาตรฐานทางการค้า (P25) อย่างไรก็ตาม การบันทึกการดูดกลืนช่วงความยาวคลื่นสั้นกว่า 290 nm ที่ได้กราฟมีลักษณะเชิงสุ่ม (random) อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของตัวตรวจวัดแสง (sensor) ใน spectrometer เมื่อแสงมีพลังงานสูง ๆ หรือที่ความถี่ต่ำ ๆ



รูปที่ 10 ภาพ SEM ของ polymer electrolytes (ก) N-methyl-quinoline iodide (PE1),(ข) Oligomer polymer gel electrolyte (PE3) และ (ค) Alkali metal iodide(KI) polymer gel electrolyte (PE3)

4.3 โครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของ polymer electrolytes

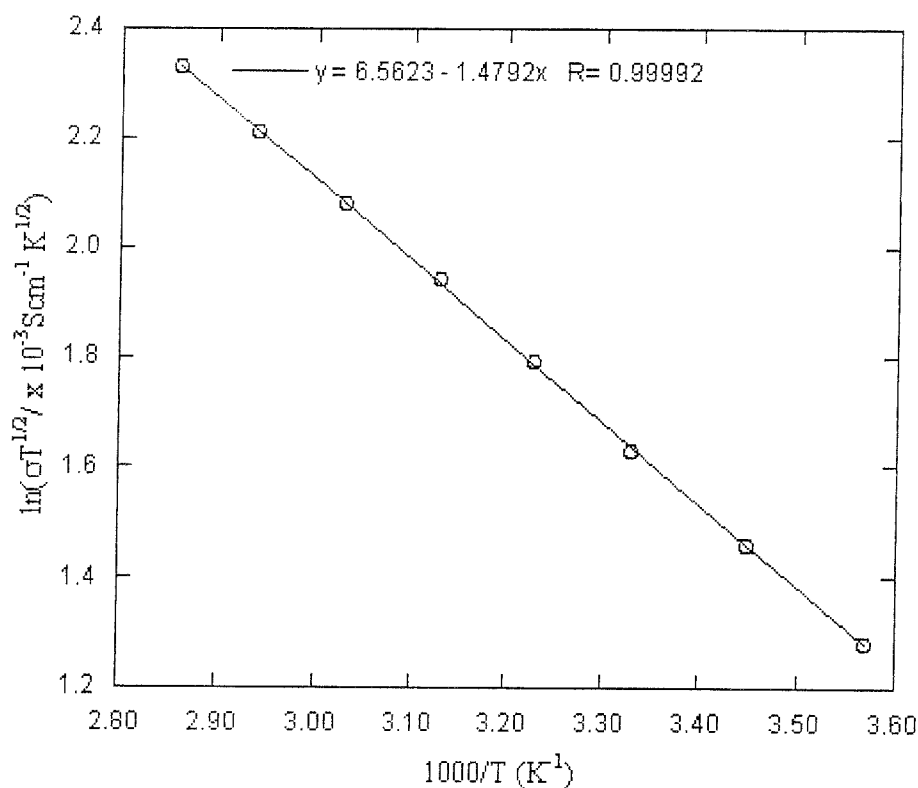
ภาพ SEM ของ polymer electrolytes ทั้ง 3 ชนิดแสดงในรูปที่ 10 คือ N-methyl-quinoline iodide (PE1), Oligomer polymer gel electrolyte (PE3) และ Alkali metal iodide polymer gel electrolyte (PE3) มีลักษณะพรุน สามารถนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง ภาพข้างล่างนี้ แสดงกราฟการนำไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ



รูปที่ 11 Ionic conductivity ($\sigma/\times 10^{-3} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$) ที่แปรตามอุณหภูมิสัมบูรณ์ (T/K) ของ PE1

สภาพนำไฟฟ้าของไอออน (ionic conductivity) ของ polymer electrolyte ที่ทำจาก N-methyl-quinoline iodide (PE1) ณ อุณหภูมิสัมบูรณ์ ต่าง ๆ แสดงในรูป 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง สภาพนำไฟฟ้าของไอออนกับอุณหภูมิไม่เป็นเส้นตรง แต่สอดคล้องกับ สมการ Aarhenius ที่ดัดแปลง ดังนี้ (Gray, 1997 และ Li et al., 2006)

$$\sigma = \sigma_0 T^{-1/2} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$



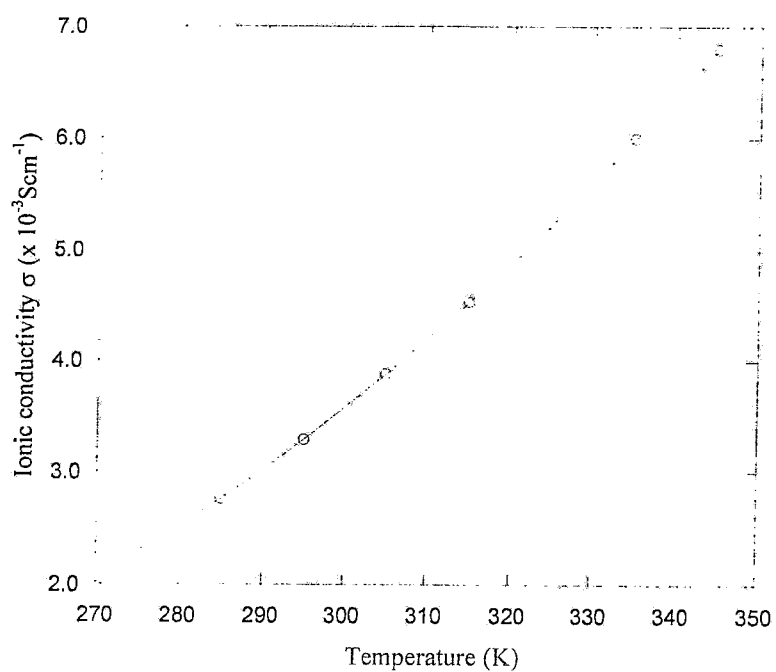
รูปที่ 12. Arrhenius plots ของ Ionic conductivity $\ln(\sigma T^{1/2} / \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1} \text{ K}^{1/2})$ ที่เป็นฟังก์ชันของ อุณหภูมิสัมบูรณ์ ($1000/T: \text{K}^{-1/2}$) ของ PE1

$$\sigma(T) = \sigma_0 T^{-1/2} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

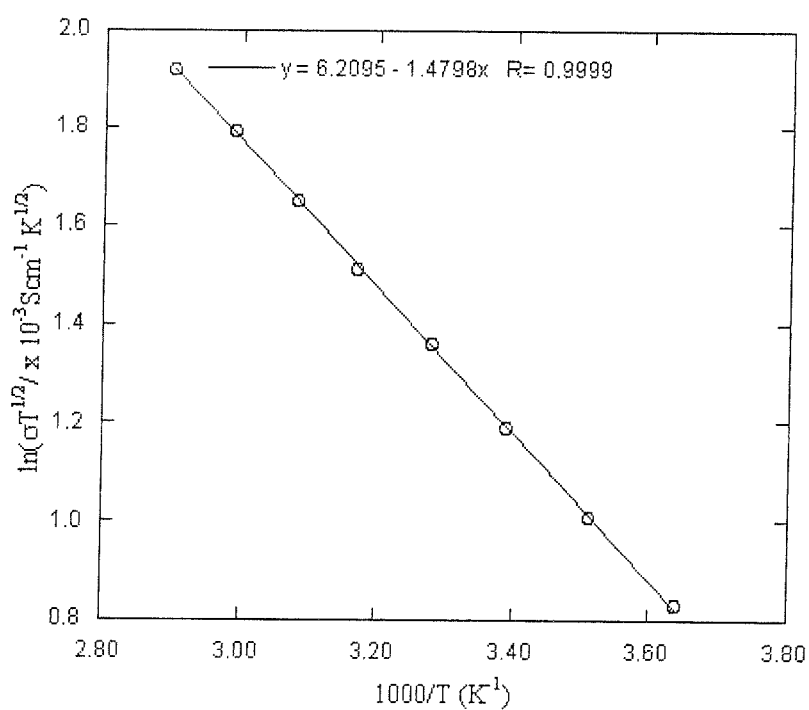
$$\text{หรือ } \sigma T^{1/2} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

$$\text{หรือ } \ln(\sigma T^{1/2}) = -\frac{E_a}{RT} + \ln(\sigma_0),$$

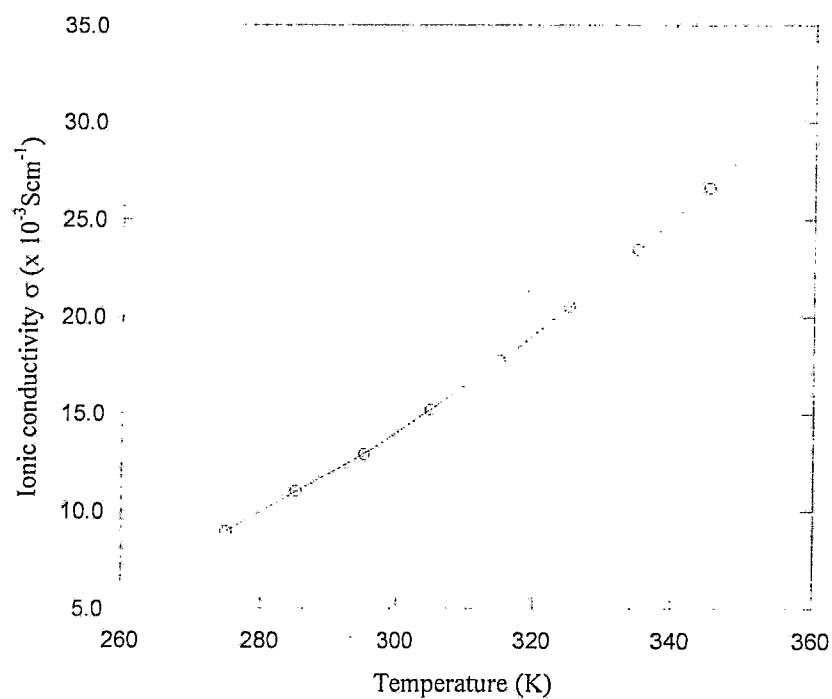
จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้น ความสัมพันธ์เชิงเส้นนี้แสดงในกราฟตามรูปที่ 12 เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้าของไอออนที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสัมบูรณ์, T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์, E_a และ R เป็น activation energy และ ค่าคงที่ของกาซ (molar gas constant) ตามลำดับ



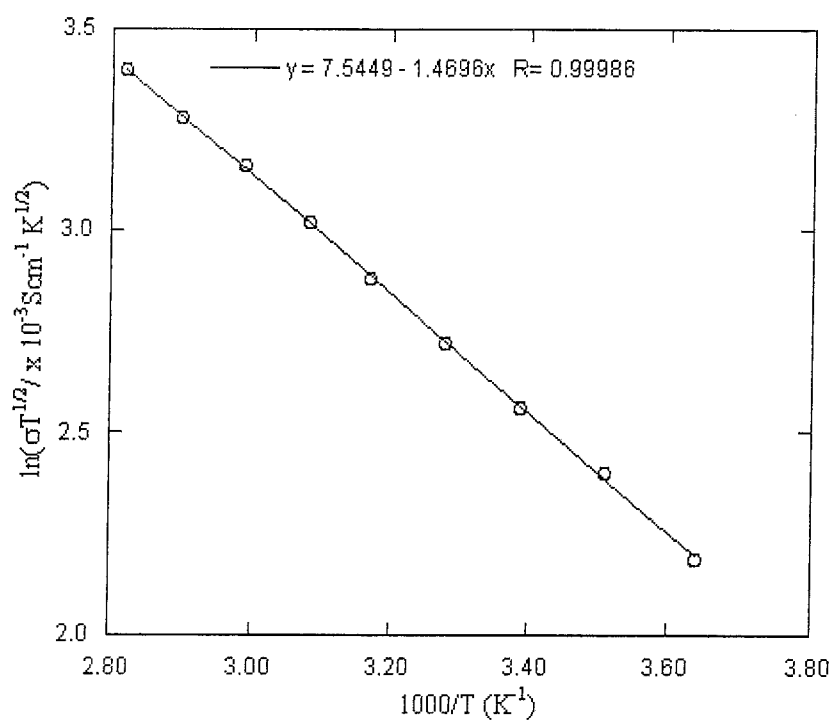
รูปที่ 13 Ionic conductivity ($\sigma/\times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$) ที่แปรตามอุณหภูมิสัมบูรณ์ (T/K) ของ PE2



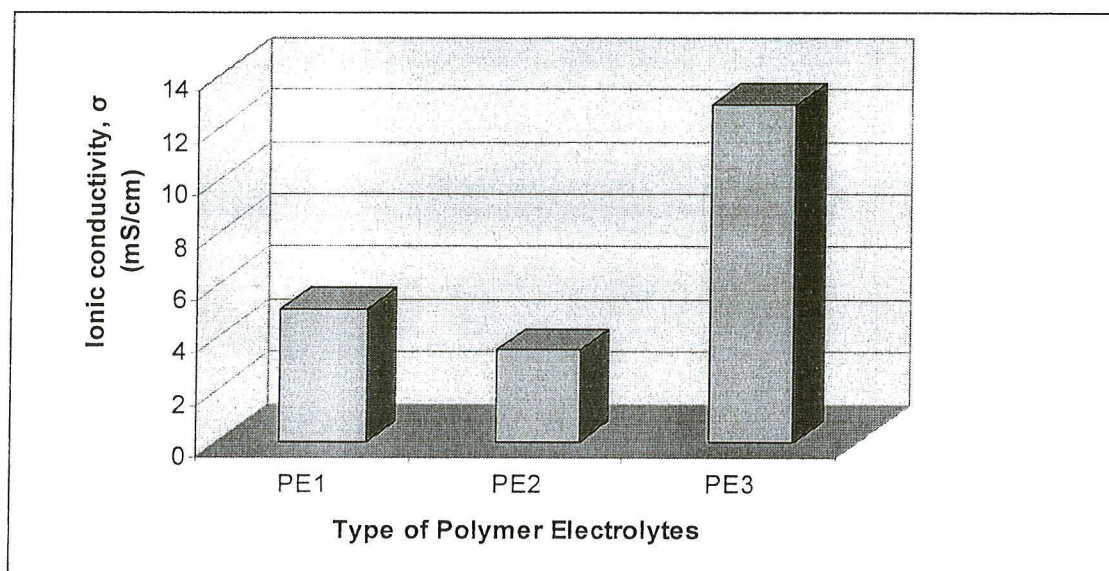
รูปที่ 14. Arrhenius plots ของ Ionic conductivity $\ln(\sigma T^{1/2} / \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ K}^{1/2})$ ที่เป็นฟังก์ชันของ อุณหภูมิสัมบูรณ์ ($1000/T: \text{K}^{-1/2}$) ของ PE2



รูปที่ 15 Ionic conductivity ($\sigma/\times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$) ที่แปรตามอุณหภูมิสัมบูรณ์ (T/K) ของ PE3



รูปที่ 16. Arrhenius plots ของ Ionic conductivity $\ln(\sigma T^{1/2} / \times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ K}^{1/2})$ ที่เป็นฟังก์ชันของ อุณหภูมิสัมบูรณ์ ($1000/T: \text{K}^{-1/2}$) ของ PE3



รูปที่ 17. Ionic conductivity ของ polymer electrolytes ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C)

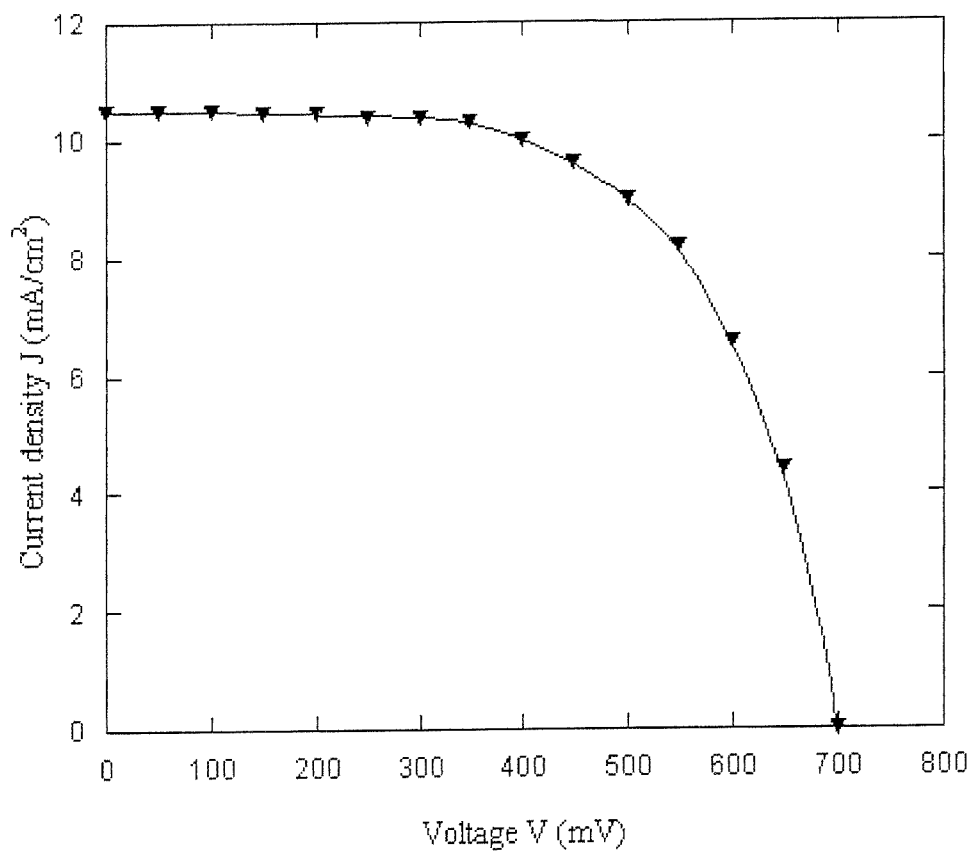
จากการทดลอง จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นของ polymer electrolytes ทั้ง 3 ชนิด ในรูปของ

$$\ln(\sigma T^{1/2}) = -\frac{E_a}{RT} + \ln(\sigma_0) \quad \text{ความชันของกราฟเท่ากับ } -\frac{E_a}{R}$$

เมื่อ ionic electrolytes นำไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับขบวนการส่งผ่านประจุ โดยการกระโดดระหว่างโมเลกุลหรือไอออน (intermolecular ion hopping) และสภาพนำไฟฟ้าของ polymer electrolytes นี้จะเกี่ยวข้องกับ thermal hopping ซึ่งแปรตาม $e^{(-E/RT)}$, $\frac{E}{k} = \frac{E_a}{R}$ เมื่อ kT คือ thermal energy จากข้อมูลความสัมพันธ์เชิงเส้นของ $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $\frac{1}{T}$ จึงแสดงว่า การนำไฟฟ้าของ polymer electrolytes ที่สังเคราะห์ได้เกิดจาก intermolecular ion hopping ซึ่งเป็นกลไกของ hole conductor [17] ของ solid electrolytes ตามที่เราต้องการ

4.4 การวัด I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์

ตัวอย่าง PE1 (specimen 1)



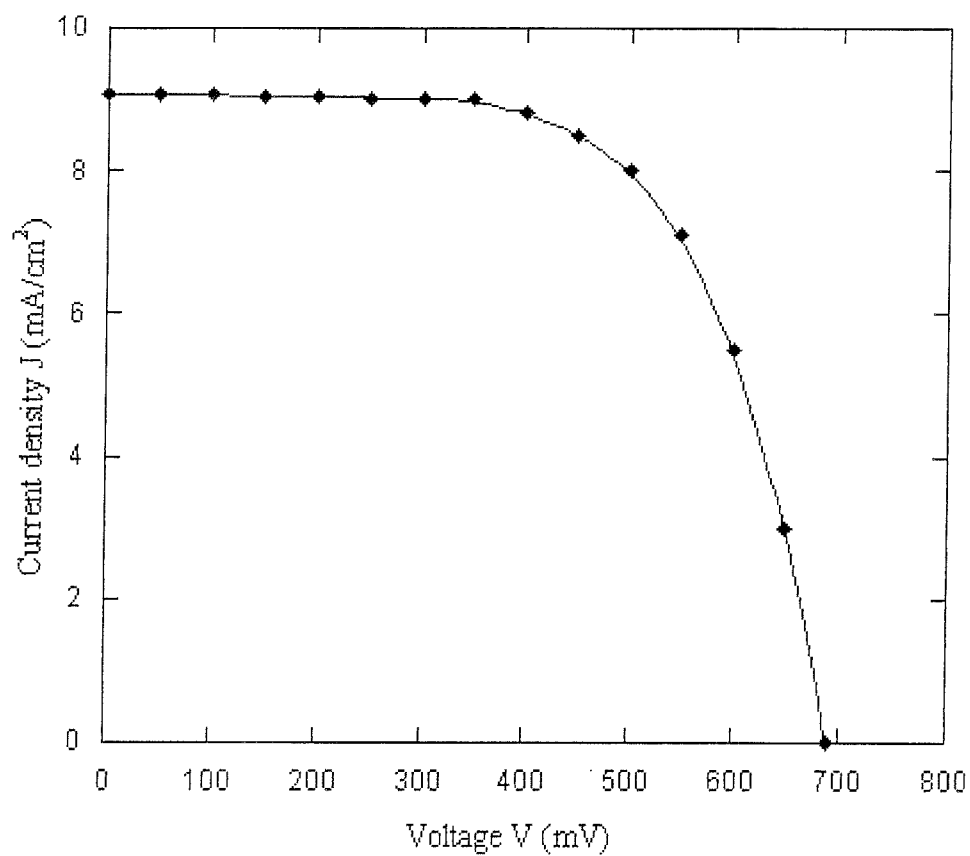
รูปที่ 18 J-V curve ของตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นโดยใช้ PE1 electrolyte

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ คำนวณได้จากสมการ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{(J \times V)_{max}}{P_{light}} \times 100 = \frac{FF \times (J_{sc} \times V_{oc})}{P_{light}} \times 100$$

Conductivity σ ($\times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$) ที่ 25 °C	5.10
Photocurrent density, J_{sc} (mA/cm ²)	10.50
Open circuit voltage, V_{oc} (mV)	700
Fill Factor (FF)	0.61
Efficiency η (%)	4.50

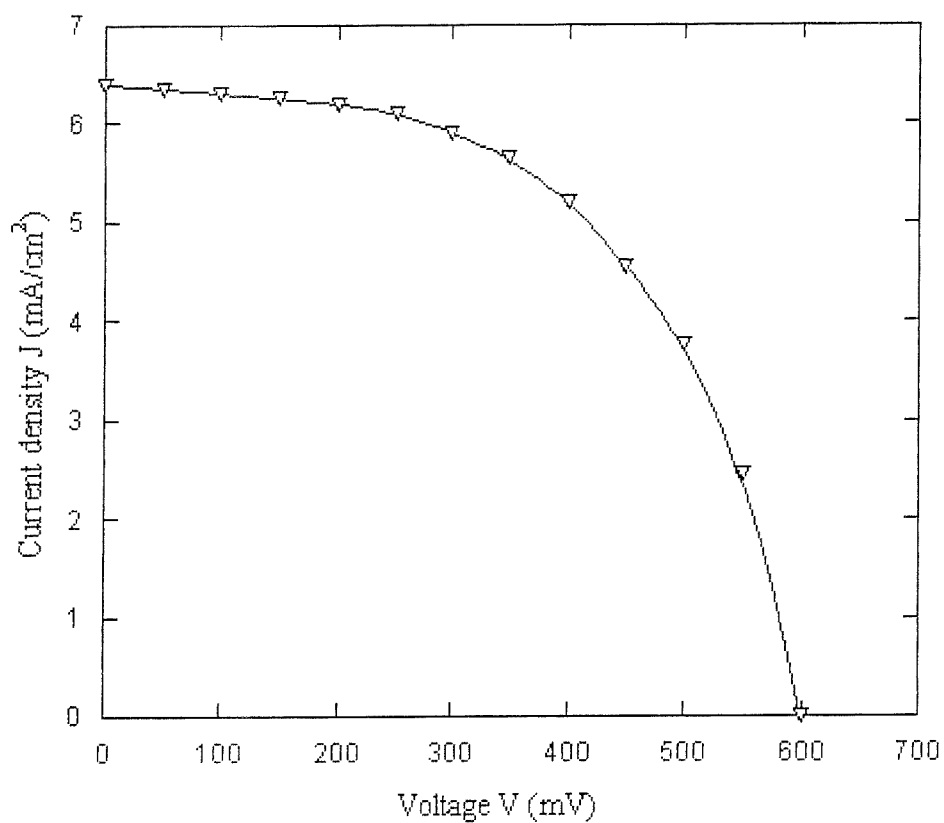
ตัวอย่าง PE2 (specimen 2)



รูปที่ 19 J-V curve ของตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้น โดยใช้ PE2 electrolyte

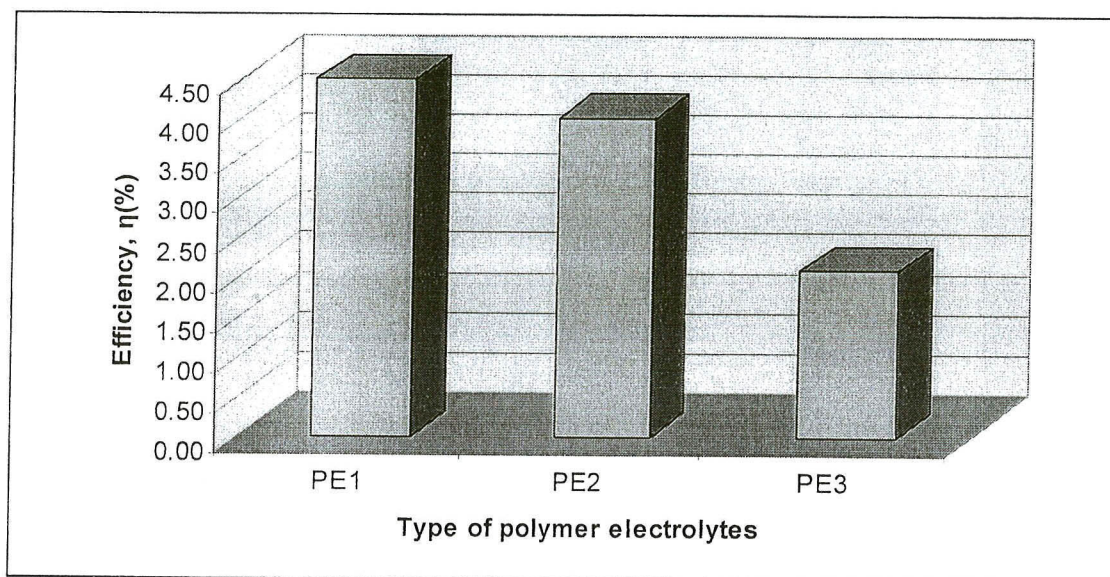
Conductivity $\sigma (\times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1})$ ที่ 25 °C	3.51
Photocurrent density, J_{sc} (mA/cm ²)	9.08
Open circuit voltage, V_{oc} (mV)	690
Fill Factor (FF)	0.63
Efficiency η (%)	4.00

ตัวอย่าง PE3 (specimen 3)

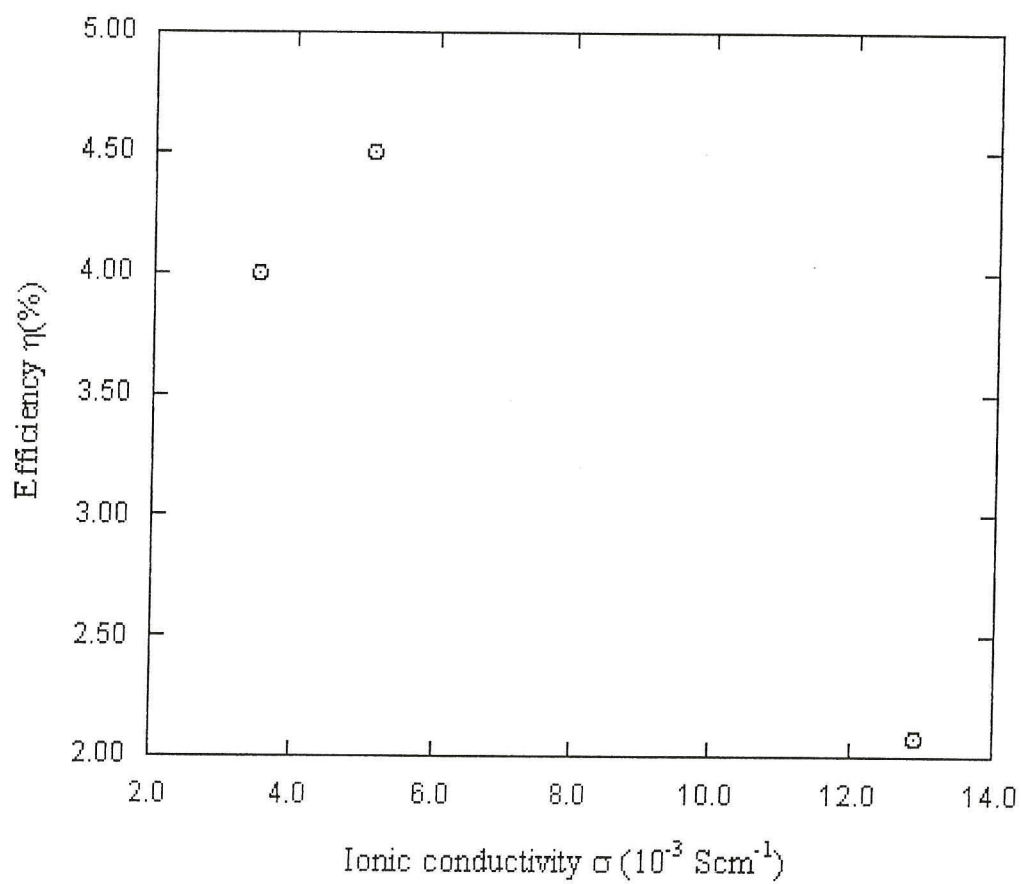


รูปที่ 20 J-V curve ของตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้น โดยใช้ PE3 electrolyte

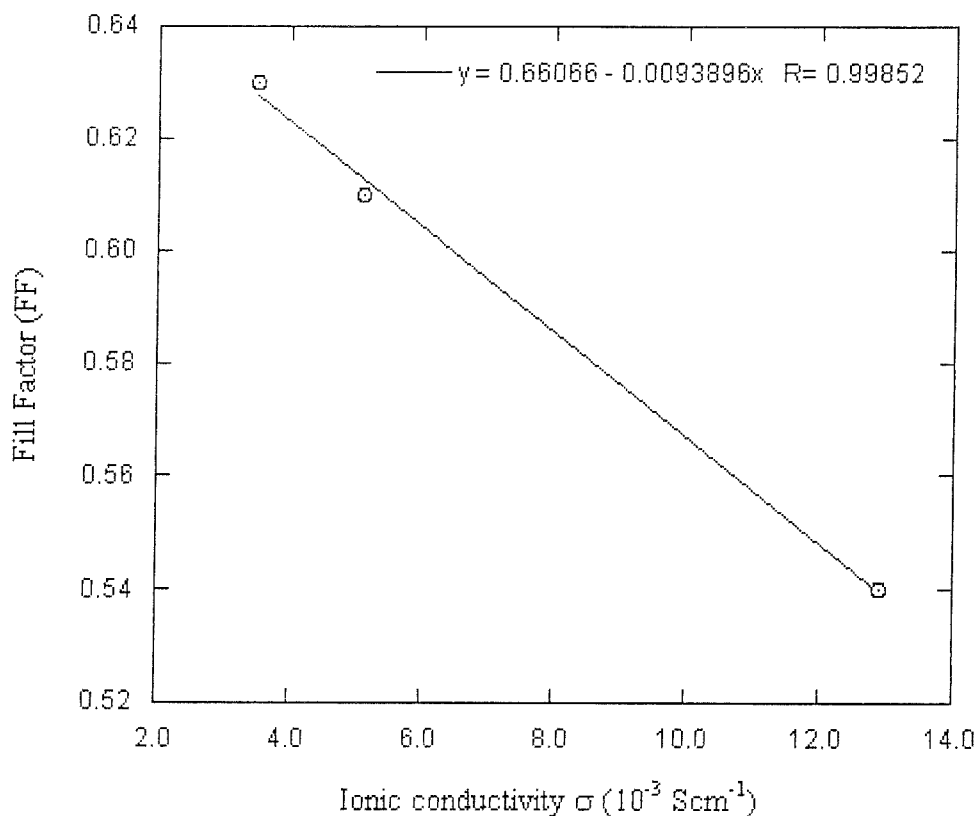
Conductivity σ ($\times 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$) ที่ 25 °C	12.90
Photocurrent density, J_{sc} (mA/cm^2)	6.40
Open circuit voltage, V_{oc} (mV)	600
Fill Factor (FF)	0.54
Efficiency η (%)	2.08



รูปที่ 21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ polymer electrolyte ทั้ง 3 ชนิด

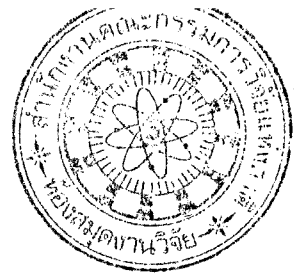


รูปที่ 22 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์กับสภาพนำไฟฟ้าของไอออน ของ polymer electrolyte

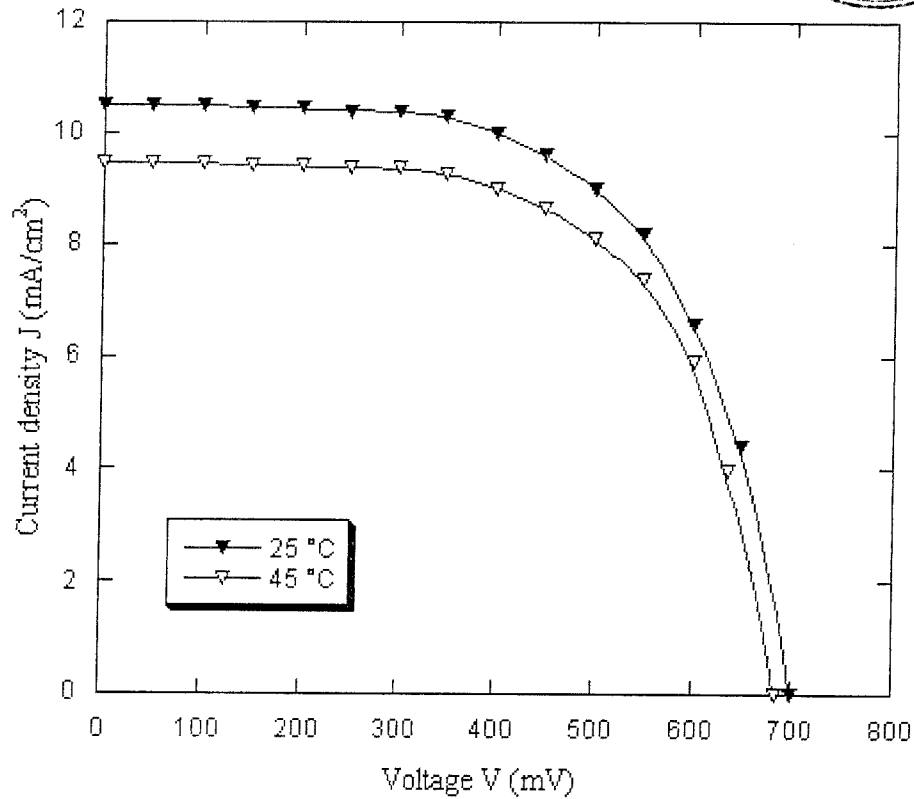


รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ของ Fill Factor กับสภาพนำไฟฟ้าของไอออนของ polymer electrolyte ทั้ง 3 ชนิด

ประสิทธิภาพของตัวอย่างที่ดีที่สุด (specimens) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากอิเล็กโตรไลต์ของแข็งหรือกึ่งของแข็ง Quasi solid-state polymer (hole conductor) 3 ชนิด N-methyl-quinoline iodide (PE1), Oligomer polymer gel electrolyte (PE2), และ Alkali metal iodide polymer gel electrolyte (PE3) เป็น 4.5 %, 4.00 % และ 2.08 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 18, 19, 20 ตามลำดับและสรุปในรูปที่ 21 จากข้อมูลชุดนี้อิเล็กโตรไลต์ของแข็งหรือกึ่งของแข็งที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ N-methyl-quinoline iodide (PE1) จากข้อมูลในรูปที่ 22 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ขึ้นกับสภาพนำไฟฟ้าของไอออนของ polymer electrolyte ในขณะที่ข้อมูลในรูปที่ 23 แสดงให้เห็น Fill Factor แปรผกผันกัน กับสภาพนำไฟฟ้าของไอออนของ polymer electrolyte กล่าวคือ Fill Factor มีค่ามากเมื่อสภาพนำไฟฟ้าของไอออนมีค่าน้อยและ Fill Factor มีค่าลดลงเมื่อสภาพนำไฟฟ้าของไอออนมีค่าเพิ่มขึ้น

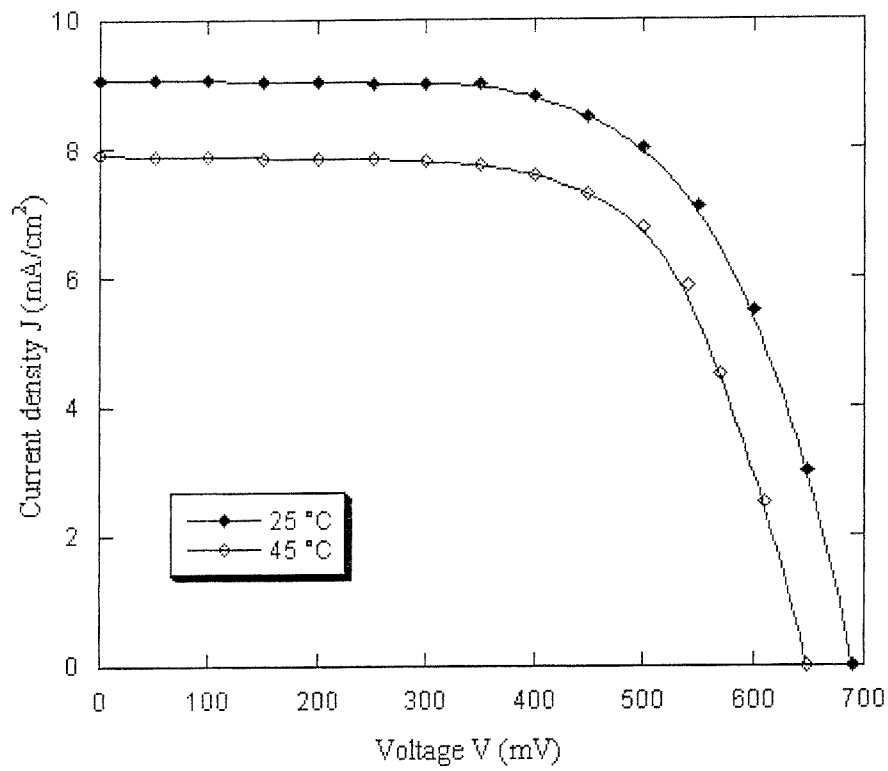


4.5 ผลของอุณหภูมิต่อการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์



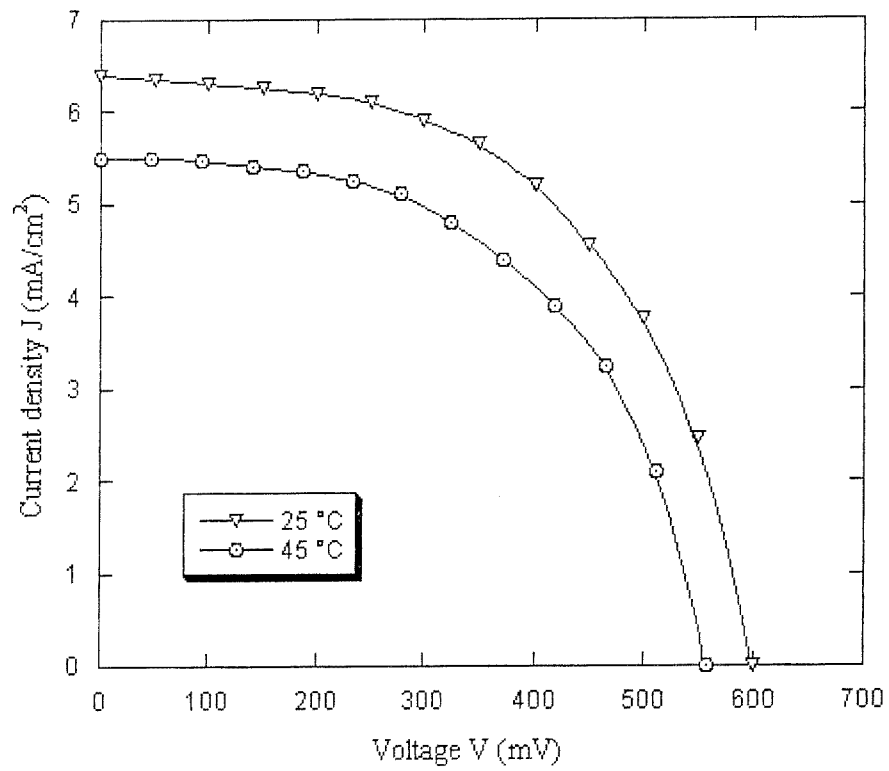
รูปที่ 24 J-V curve ของตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้น โดยใช้ PE1 electrolyte ที่อุณหภูมิ 25 °C และ 45 °C

	T=25 °C	T=45 °C
Photocurrent density, J_{sc} (mA/cm ²)	10.5	9.5
Open circuit voltage, V_{oc} (mV)	700	690
Fill Factor	0.61	0.59
Efficiency η (%)	4.50	3.9
$\frac{1}{I_{sc}} \left(\frac{dI_{sc}}{dT} \right) (K^{-1})$	0.47 %	
$\frac{1}{V_{oc}} \left(\frac{dV_{oc}}{dT} \right) (K^{-1})$	-0.07 %	
$\frac{1}{\eta} \left(\frac{d\eta}{dT} \right) (K^{-1})$	-0.66 %	



รูปที่ 25 J-V curve ของตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้น โดยใช้ PE2 electrolyte ที่อุณหภูมิ 25 °C และ 45 °C

	T=25 °C	T=45 °C
Photocurrent density, J_{sc} (mA/cm ²)	9.08	7.90
Open circuit voltage, V_{oc} (mV)	690	665
Fill Factor	0.63	0.62
Efficiency η (%)	4.00	3.30
$\frac{1}{J_{sc}} \left(\frac{dJ_{sc}}{dT} \right) (K^{-1})$	-0.65%	
$\frac{1}{V_{oc}} \left(\frac{dV_{oc}}{dT} \right) (K^{-1})$	-0.18%	
$\frac{1}{\eta} \left(\frac{d\eta}{dT} \right) (K^{-1})$	-0.87 %	

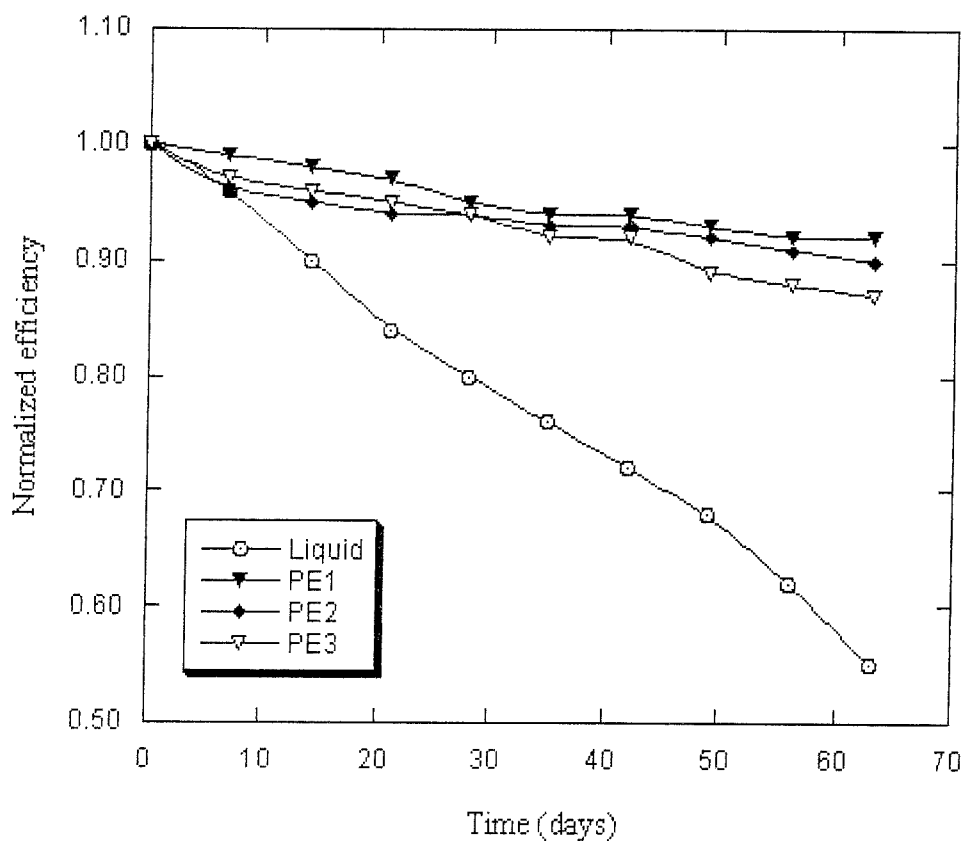


รูปที่ 26 J-V curve ของตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้น โดยใช้ PE3 electrolyte ที่อุณหภูมิ 25 °C และ 45 °C

	T=25 °C	T=45 °C
Photocurrent density, J_{sc} (mA/cm ²)	6.4	5.5
Open circuit voltage, V_{oc} (mV)	600	558
Fill Factor	0.54	0.53
Efficiency η (%)	2.08	1.64
$\frac{1}{I_{sc}} \left(\frac{dI_{sc}}{dT} \right) (K^{-1})$	-0.70 %	
$\frac{1}{V_{oc}} \left(\frac{dV_{oc}}{dT} \right) (K^{-1})$	-0.35 %	
$\frac{1}{\eta} \left(\frac{d\eta}{dT} \right) (\%/K)$	-1.05 %	

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นโดยใช้ electrolytes 3 ชนิด ที่อุณหภูมิ 25 °C และ 45 °C พบว่าอัตราการลดลงของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ $\frac{1}{\eta} \left(\frac{d\eta}{dT} \right)$ คิดเป็น -0.66 %, -0.87 %, และ -1.05 % ต่อเคลวิน (K^{-1}) สำหรับ N-methyl-quinoline iodide electrolyte (PE1), Oligomer polymer gel electrolyte (PE2), และ Alkali metal iodide polymer gel electrolyte (PE3) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า อัตราการลดลงของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเคลวินของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นโดยใช้ N-methyl-quinoline iodide electrolyte (PE1) มีค่าต่ำสุด แสดงว่าที่อุณหภูมิสูง ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเคลวินของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นโดยใช้ N-methyl-quinoline iodide electrolyte (PE1) มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าและมีเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ดีกว่าชนิดอื่น ๆ

4.6 เสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 27 เสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นโดยใช้ polymer gel electrolytes ชนิดต่าง ๆ เทียบกับ liquid electrolyte ที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบตลอดช่วง 9 สัปดาห์

ผลของการทดสอบเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นโดยใช้ polymer gel electrolytes ชนิดต่าง ๆ เทียบกับ liquid electrolyte ที่อุณหภูมิห้องตลอดช่วง 9 สัปดาห์ได้แสดงในรูปที่ 27 จะเห็นว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นโดยใช้ polymer gel electrolytes ลดลงเล็กน้อยโดย สัปดาห์ที่ 9 มีค่าประมาณ 92 %, 90 % , และ 87 % ของประสิทธิภาพครั้งแรก เมื่อใช้ N-methyl-quinoline iodide electrolyte (PE1), Oligomer polymer gel electrolyte (PE2), และ Alkali metal iodide polymer gel electrolyte (PE3) เป็น electrolyte ตามลำดับ ในขณะที่ liquid electrolyte มี ประสิทธิภาพ ในสัปดาห์ที่ 9 ประมาณ 55 % งานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ J. H. Park และคณะ [18] ของ ประสิทธิภาพครั้งแรก ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าเสถียรภาพระยะยาว (long-term stability) ของ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นโดยใช้ polymer gel electrolytes ดีกว่าของ liquid electrolyte และในกลุ่มของ polymer gel electrolytes เราพบว่า N-methyl-quinoline iodide electrolyte (PE1) ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ มีเสถียรภาพระยะยาวดีที่สุด