

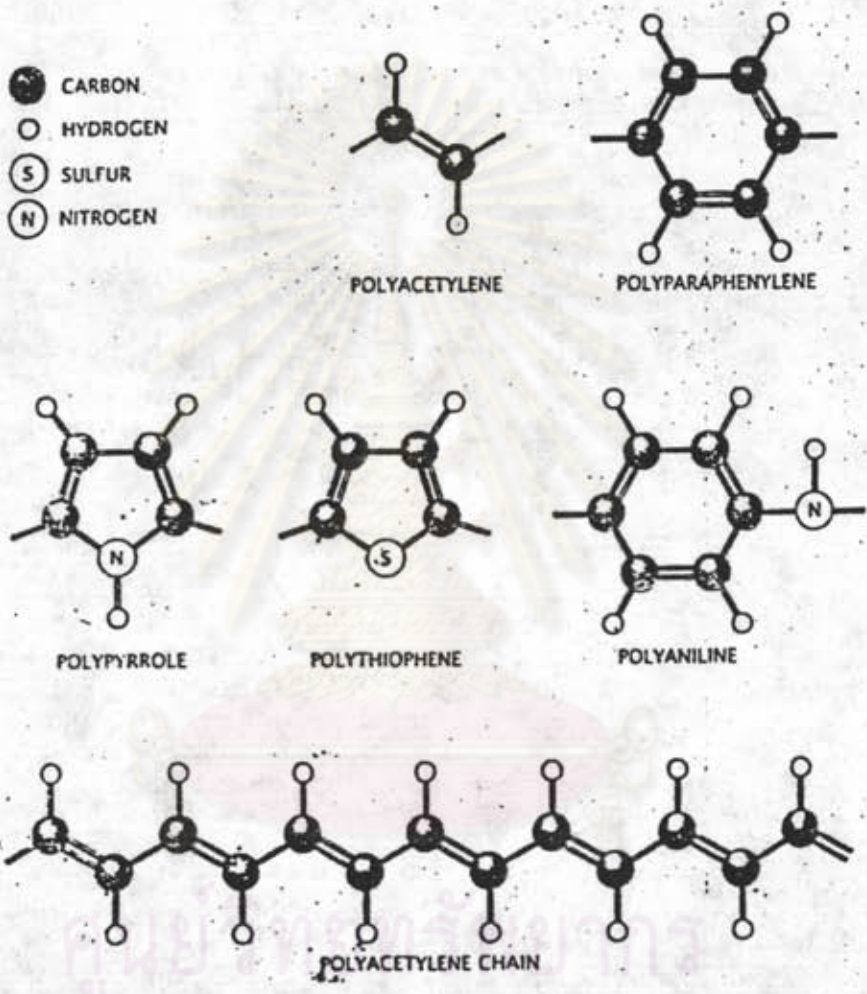


บทที่ 1

บทนำและทฤษฎี

1.1 บทนำ

การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymers) เริ่มต้นด้วยความบังเอิญในต้นปี ค.ศ. 1970 ที่ห้องปฏิบัติการของ Hideki Shirakawa สถาบันเทคโนโลยีแห่งโตเกียว (1) จากนั้นก็มีการศึกษาวิจัยเรื่อยมาจนกระทั่งปี ค.ศ. 1976 Mac Diarmid และ Shirakawa ได้ร่วมกันสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มหาวิทยาลัยเพนซิลวาเนีย พบว่าการโคปพอลิอะเซทิลีน (polyacetylene) ด้วยไอโอดีนจะทำให้ได้พอลิอะเซทิลีนที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงมากเทียบได้กับทองแดง (2) เป็นที่ทราบกันดีว่าพอลิอะเซทิลีนนี้เป็นสารประกอบคาร์บอนสายยูกแบบเชิงเส้น (linearly conjugated carbon compound) โดยอะตอมของคาร์บอนเชื่อมโยงกันด้วยพันธะเดี่ยว (single bond) และพันธะคู่ (double bond) สลับกันไป และพบว่า π -อิเล็กตรอน ของระบบดังกล่าวเป็นตัวทำให้เกิดการนำไฟฟ้าในระบบนี้ จึงได้มีผู้พยายามสังเคราะห์สารที่เป็นคาร์บอนสายยูก (conjugated carbon) แบบอื่น ๆ ขึ้น ทั้งที่เป็นแบบเชิงเส้น และแบบเป็นวงปรากฏว่าได้พบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ เช่น พอลิพาราฟินิลีน (polyparaphenylene) พอลิไทโอฟีน (polythiophene) พอลิไพร์โรล (polypyrrole) และพอลิแอนิลีน (polyaniline) เป็นต้น โครงสร้างของพอลิเมอร์เหล่านี้แสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดต่างๆ

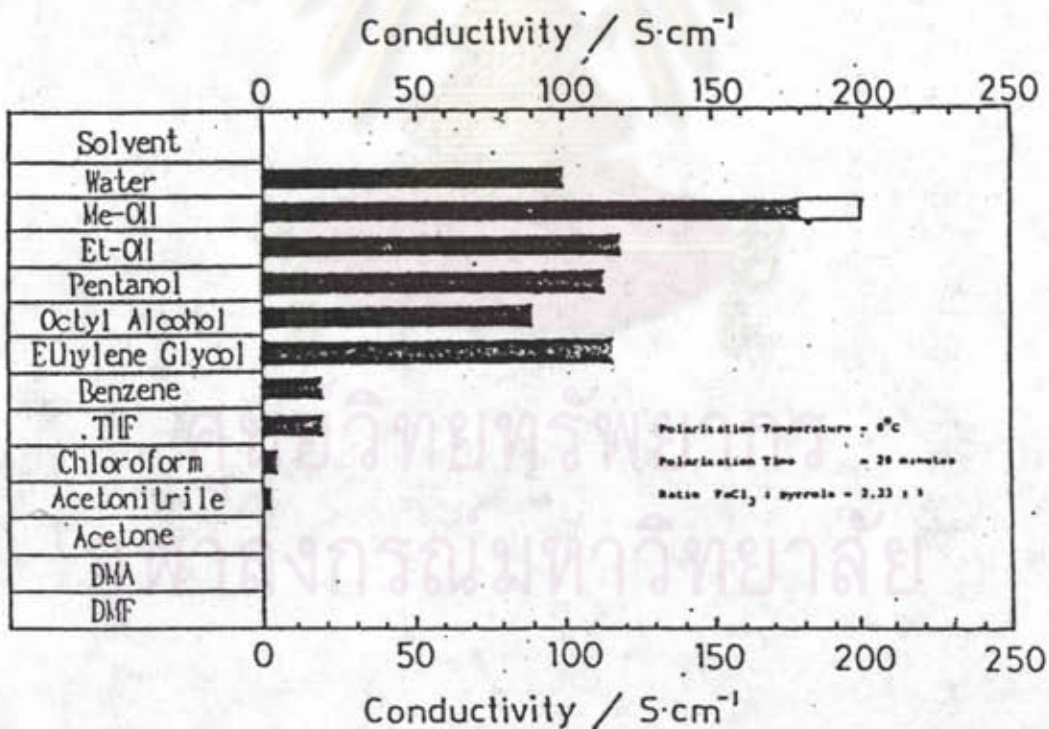
มีการศึกษาขบวนการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเหล่านี้ ซึ่งสำหรับพอลิอะเซทิลีนนั้นได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง(3,4) อย่างไรก็ตามสภาพนำไฟฟ้าของพอลิอะเซทิลีนไม่ค่อยมีเสถียรภาพทางไฟฟ้านัก กล่าวคือสภาพนำไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วกับเวลาเมื่อเก็บไว้ในอากาศซึ่งแตกต่างกับพอลิไพร์โรลถึงแม้สภาพนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลจะต่ำกว่าของพอลิอะเซทิลีนก็ตาม(3,5)เนื่องจากการที่มีเสถียรภาพมากกว่าพอลิไพร์โรลจึงเหมาะที่จะประยุกต์เป็นเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ มากมายเช่น แบตเตอรี่ที่ประจุใหม่ได้ (rechargeable battery) อุปกรณ์แสดงผล (display device) เป็นต้น

สำหรับพอลิไพร์โรลอาจสังเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น โดยวิธีทางเคมี (chemical method, CM) โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมี (electrochemical method, EM) และ chemical vapor deposition (CVD) การสังเคราะห์โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมีนั้นมีการศึกษามานานกว่า 10 ปีแล้ว (3-7) ซึ่งได้มีการศึกษาขบวนการนำไฟฟ้าและสมบัติทางกายภาพอื่นๆของพอลิไพร์โรลแบบนี้อย่างถี่ถ้วนด้วย แต่การสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีนั้นเพิ่งจะพบวิธีการซึ่งทำให้ได้พอลิไพร์โรลซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าสูงเมื่อปีก่อนนี้เอง (8) การศึกษาขบวนการนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลแบบนี้ก็ยังไม่มีการทำ นอกจากวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเท่านั้น จึงเป็นการสมควรที่จะเริ่มวิจัยเพื่อวิเคราะห์ปรากฏการณ์ขนส่งของพอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์แบบเคมีโดยศึกษาความแตกต่างของลักษณะการนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลที่ได้จากการสังเคราะห์แบบไฟฟ้า-เคมีและแบบเคมีเพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ในอนาคตต่อไป

1.2 การสังเคราะห์พอลิไพร์โรล

การสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีกล่าวพอสังเขปได้ดังนี้(8) เริ่มต้นด้วยการนำ $FeCl_3$ ใส่ลงในตัวทำละลาย จากนั้นใส่ไพร์โรลลงไปจะเกิดการ

polymerize ซึ่งจะได้ตะกอนสีดำ ทำการกรองเอาตะกอนแล้วล้างด้วย เมทานอลและนำไปทำให้แห้งภายใต้สุญญากาศ สำหรับการวัดสภาพนำไฟฟ้านั้น ต้องนำผงที่ได้ไปอัดเป็นเม็ดโดยต้องทำให้มีความหนาสม่ำเสมอและวิธีการวัด อาจใช้วิธีการวัดแบบ แวน เดอ พาว (๑) หรือโดยวิธีการวัดแบบโฟฟอยท์ไพรบ (four point probe method) พบว่าการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลโดยวิธี ทางเคมีที่ทำให้ได้พอลิไพร์โรลที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงๆนั้นมีเงื่อนไขดังนี้ เมทานอลเป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุดดังแสดงในรูปที่ 1.2 อัตราส่วนโมลาร์ ระหว่าง $FeCl_3$ ต่อ ไพร์โรล เป็น 2.33 : 1 อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา polymerize เท่ากับ $0^{\circ}C$ เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 20 นาที และความเข้มข้นของสารละลาย $FeCl_3$ เท่ากับ 2.5 M



รูปที่ 1.2 แสดงผลของชนิดตัวทำละลายต่อสภาพนำไฟฟ้า

ขั้นตอนในเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้

1. FeCl_3 แตกตัวในตัวทำละลาย



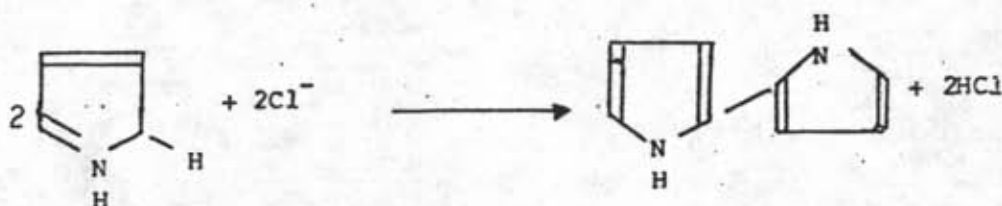
2. พิโรล 1 มอนอเมอร์ให้อิเล็กตรอน 1 ตัวแก่ Fe^{3+} เกิดเป็นไอออนบวกของพิโรล



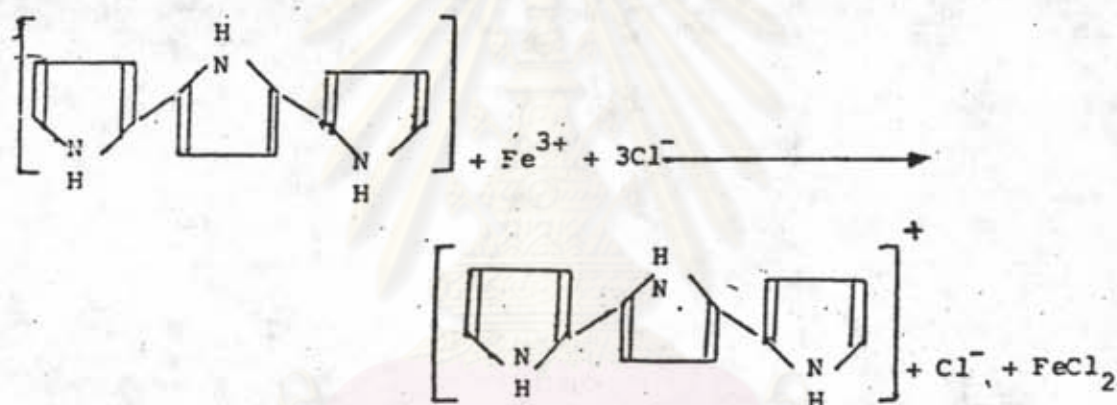
3. ไอออนบวกของพิโรลมีการจัดพันธะใหม่



4. ไอออนบวกที่จัดตัวใหม่แล้ว 2 ตัวรวมกับ 2Cl^- จะได้ dimer ของพิโรล



5. ปฏิกริยาจะดำเนินซ้ำเดิมต่อไปทำให้ได้พอลิไพร์โรลจากการวิเคราะห์พบว่าพอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์ โดยให้เวลาในการเกิดปฏิกริยาต่างๆมีอัตราส่วนระหว่างอะตอมต่างๆดังแสดงในตารางที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อคลอรีนเป็น 4 : 0.33 ซึ่งหมายความว่าในขั้นสุดท้ายของปฏิกริยา 3 มอนอเมอร์ของพอลิไพร์โรลจะให้อิเล็กตรอนแก่ไอออนลบของคลอรีน 1 ไอออน ดังแสดงในสมการข้างล่าง



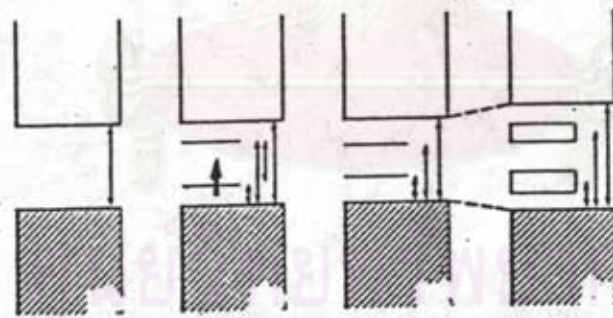
ตารางที่ 1.1 แสดงอัตราส่วนระหว่างอะตอมต่างๆในปฏิกริยา

| Polymerization time (min) | Conductivity (S/cm) | C | N | H | Cl | Fe | O |
|---------------------------|---------------------|------|------|------|------|-------|------|
| 20 | 190 | 4.00 | 1.00 | 3.25 | 0.33 | 0.003 | 0.12 |
| 60 | 147 | 4.00 | 1.00 | 3.26 | 0.31 | 0.003 | 0.13 |
| 160 | 102 | 4.00 | 1.00 | 3.32 | 0.30 | 0.004 | 0.14 |

1.3 การนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

นับตั้งแต่มีการค้นพบพอลิอะเซทิลีนได้มีผู้ทำการศึกษาทางทฤษฎี เพื่ออธิบายสภาพนำไฟฟ้าที่สูงมากของพอลิอะเซทิลีนอย่างมากมาย แต่จนกระทั่งปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีใดที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ขนส่งของพอลิอะเซทิลีนได้ทุกแง่ทุกมุม (1,3,4) โดยทั่วไปอธิบายได้ว่า พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ยังไม่โดป (pristine sample) จะมีสภาพเป็นฉนวน กล่าวคือ แถบนำ (conduction band) และแถบเวเลนซ์ (valence band) ของอิเล็กตรอนจะมีระดับพลังงานที่แตกต่างกันมากและแถบเวเลนซ์จะมีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็ม ส่วนแถบนำไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย เมื่อถูกโดปในกระบวนการสังเคราะห์แบบไฟฟ้า เคมี อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแถบเวเลนซ์ไปยังตัวโดป ทำให้พอลิเมอร์เกิดประจุพาหะแบบ p และตัวโดปมีสภาพเป็นไอออนลบ หรืออาจเป็นการที่อิเล็กตรอนจากตัวโดปเคลื่อนที่ไปอยู่แถบนำทำให้พอลิเมอร์มีประจุอิสระแบบ n และตัวโดปมีสภาพเป็นไอออนบวกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอะตอมที่ใช้โดป โดยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งดังกล่าวพบว่าประจุอิสระที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์นี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ (10) ทำให้อะตอมต่างๆ เคลื่อนออกจากตำแหน่งปกติ ก่อนเกิดการโดป กล่าวคือมีการยืดหรือสั้นเข้าของความยาวพันธะ (bond length) ต่าง ๆ และจะทำให้เกิดระดับพลังงานขึ้นในช่องว่างพลังงาน 2 ระดับ ดังรูปที่ 1.3 ข. ซึ่งเรียกว่าสถานะ polaron (polaron state) ซึ่งเป็นประจุเดี่ยวมีสปิน = 1/2 (11) เมื่อความเข้มข้นของการโดปมีมากขึ้น ใน polyheterocycles เช่น พอลิไพร์โรลพบว่า จะเกิดการรวมกันของ polaron กลายเป็น bipolaron ดังรูปที่ 1.3 ค. ซึ่งไม่มีสปิน หรือสปินเป็นศูนย์ (11) และเมื่อความเข้มข้นของการโดปมีมากขึ้นอีก จะทำให้เกิดการซ้อนกันของสถานะ bipolaron เป็นแถบ bipolaron ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ง. พบว่าแถบการนำที่เกิดขึ้นนี้จะซ้อนทับแถบนำและ

แถบเวเลนซ์ซึ่งมีอยู่เต็ม ผลคือทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นในสายโซ่ของพอลิเมอร์ เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์มีโซ่เป็นโมเลกุลที่ยาวมากอาจประกอบด้วย 100 มอนอเมอร์เท่านั้น ในการนำไฟฟ้าพาหะไม่สามารถเคลื่อนที่อยู่ภายในสายโซ่อันเดียวตลอดไป ณ จุดหนึ่งจะต้องกระโดดไปยังสายโซ่อีกสายหนึ่ง จากการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์แบบไฟฟ้า-เคมี พบว่าการกระโดดนี้สอดคล้องกับ กระบวนการกระโดด (hopping mechanism) (12, 13) เนื่องจากการกระโดดนี้เกิดขึ้นได้น้อย จึงทำให้สภาพนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับโลหะ อาจกล่าวได้ว่ากระบวนการกระโดดนี้เป็นตัวจำกัดสภาพนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ ซึ่งทำให้การนำไฟฟ้าภายในสายโซ่มีบทบาทน้อยมากต่อการนำไฟฟ้าในสารแบบนี้



ก. ข. ค. ง.

- รูปที่ 1.3 แสดง ก. แถบพลังงานของพอลิเมอร์ที่ยังไม่โดป
 ข. สถานะ polaron มีสปิน = $1/2$
 ค. สถานะ bipolaron สปิน = 0
 ง. แถบ bipolaron ซึ่งเกิดจากการโดปมาก

1.4 ทฤษฎีของ Mott

Mott ได้อธิบายการเคลื่อนที่ของประจุพาหะในวัสดุที่ไม่มีความเป็นระเบียบของตำแหน่งแลตทิซหรือวัสดุที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) โครงสร้างแบบนี้จะทำให้เกิดความไม่เป็นคาบของศักย์ไฟฟ้า (non-periodic potential) การนำไฟฟ้าในวัสดุเหล่านี้ จะแตกต่างกับผลึกซึ่งมีตำแหน่งแลตทิซอยู่อย่างเป็นระเบียบ (14)

ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในศักย์ที่ไม่เป็นคาบนี้ ถ้าให้อิเล็กตรอนกระโดดจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งที่ห่างออกไปเป็นระยะ R และทั้งสองสถานะมีระดับพลังงานต่างกัน W โอกาสที่อิเล็กตรอนจะกระโดดไปจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แก่ แฟกเตอร์ของโบลต์ซมันน์ $\exp(-W/k_B T)$ ซึ่งบ่งชี้ว่าที่อุณหภูมิสูง ๆ โอกาสที่อิเล็กตรอนจะกระโดดจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่งนั้นมาก แฟกเตอร์ที่บอกความเสื่อมกันของฟังก์ชันคลื่นของพาหะ $\exp(-2\alpha R)$ โดย α^{-1} แสดงระยะการลดลงของฟังก์ชันคลื่น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความถี่โฟนอน ν_{ph} ด้วย ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างสถานะต่าง ๆ เป็นดังนี้

$$p = \nu_{ph} \exp(-2\alpha R - W/k_B T) \quad (1.1a)$$

โดยทั่วไปในก๊าซ สัมประสิทธิ์การแพร่ $D \propto \bar{v} l$ โดย \bar{v} และ l เป็นอัตราเร็วเฉลี่ยและระยะทางอิสระเฉลี่ยของโมเลกุลของก๊าซตามลำดับ ในการนำไฟฟ้าเนื่องจากการกระโดดนี้ อาจพิสูจน์ได้ว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะเนื่องจากการกระโดดเป็นระยะ R เท่ากับ pR^2 นั่นคือ

$$D = pR^2 \quad (1.1b)$$

พาหะที่สามารถเคลื่อนที่ได้ต้องมีพลังงานในช่วง $k_B T$ และอยู่ในระดับใกล้เคียงระดับพลังงานเฟอร์มิ ($N(E_F)$) ความหนาแน่นของพาหะของพวกนี้คือ $N(E_F)k_B T$ โดย $N(E_F)$ เป็นความหนาแน่นสถานะ (density of states) ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ ในที่นี้อาจเขียนได้ว่าความหนาแน่นของพาหะที่สามารถเคลื่อนที่ได้

$$n = N(E_F)k_B T$$

จาก Einstein's relation

$$D = \left(\frac{\mu}{e}\right) k_B T$$

ดังนั้นสภาพเคลื่อนที่ได้

$$\mu = De/k_B T \quad (1.2)$$

โดยใช้สมการ (1.1) และ (1.2) จะได้สภาพนำไฟฟ้า

$$\begin{aligned} \sigma &= ne\mu \\ &= N(E_F)k_B T e p R^2 e/k_B T \\ &= e^2 p R^2 N(E_F) \end{aligned} \quad (1.3)$$

จากการพิจารณาพบว่าในการกระโดดเป็นระยะ R ผลต่างของระดับพลังงาน W อาจหาได้จาก

$$W = \frac{1}{\frac{4\pi R^3}{3} N(E_F)} \quad (1.4)$$

ซึ่งที่ระยะ R มาก อิเล็กตรอนจะมองเห็นระดับพลังงานอื่นที่มีผลต่างพลังงาน W น้อยๆ ได้ แทนสมการ (1.4) ลงในสมการ (1.1a) จะได้

$$\begin{aligned} p &= v_{ph} \exp[-2\alpha R - \left(\frac{3}{4\pi R^3 N(E_F) k_B T}\right)] \\ &= v_{ph} \exp[-F(R)] \end{aligned} \quad (1.5a)$$

โอกาสมากที่สุดที่อิเล็กตรอนจะกระโดดได้ ก็ต่อเมื่อเทอมยกกำลังของ exponential ต้องน้อยที่สุดนั่นคือ $dF(R)/dR = 0$ จะได้ว่า

$$2\alpha = \frac{9}{4\pi N(E_F) k_B T R^4} \quad (1.5b)$$

$$\text{หรือ } R = \left(\frac{9}{8\pi N(E_F)k_B T \alpha} \right)^{1/4} \quad (1.5)$$

แทนสมการ (1.5a) ลงในสมการ (1.3) จะได้

$$\sigma = e^2 R^2 N(E_F) v_{ph} \exp \left[-2\alpha R - \left(\frac{3}{4\pi R^3 N(E_F) k_B T} \right) \right] \quad (1.7)$$

แทนสมการ (1.5b) ลงในสมการข้างบนจะได้

$$\sigma = \frac{3}{(8k_B)^{1/2}} e^2 \left(\frac{N(E_F)}{\alpha} \right)^{1/2} v_{ph} T^{-1/2} \exp \left[- \left(\frac{16\alpha^3}{k_B N(E_F)} \right)^{1/2} T^{-1/4} \right] \quad (1.8)$$

โดยทั่วไปแล้วถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างๆ เช่นจาก 4.2 K จนถึง 300 K สภาพนำไฟฟ้าของสารซึ่งนำไฟฟ้าโดยกระบวนการกระโดด จะเปลี่ยนแปลงหลายระดับขนาด จะเห็นได้ว่า เราอาจใช้สมการ (1.8) เพื่อทดสอบดูว่า การนำไฟฟ้าในสารเป็นกระบวนการกระโดดหรือไม่ ทั้งนี้เพราะในกระบวนการนี้ กราฟระหว่าง $\ln \sigma$ และ $T^{-1/4}$ จะเป็นเส้นตรงเสมอ

1.5 สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient)

จากทฤษฎีของโบลต์ซมันน์สมการขนส่ง (transport equation) สำหรับการนำไฟฟ้าในผลึกซึ่งเป็นแบบ band conduction อาจเขียนได้เป็น (15)

$$\vec{J} = e^2 \vec{K}_0 \cdot \vec{E} + \frac{e}{T} \vec{K}_1 \cdot (-\nabla T) \quad (1.9)$$

โดยที่

$$\vec{J} = \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า}$$

$$\vec{E} = \text{สนามไฟฟ้า}$$

$$K_0, K_1 \quad \text{ได้จาก } K_n = \frac{1}{4\pi^3} \int \left(\frac{1}{T} \right) \left(\frac{\partial f^0}{\partial \epsilon} \right) \left(-\frac{\partial f^0}{\partial \epsilon} \right) \frac{d\mathbf{s}}{V} d\epsilon$$

v = ความเร็วของพาหะ

ϵ, ϵ_r = ระดับพลังงานใด ๆ และระดับพลังงานเฟอร์มิ

f^0 = ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิ-ไดแรก

S = ผิวพลังงาน E

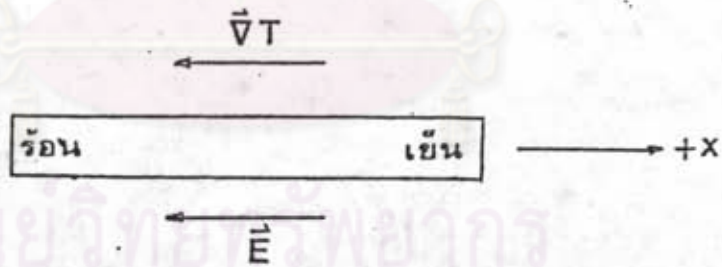
∇T = การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อระยะทาง

จากสมการ (1.9) ถ้า $J = 0$ คือไม่มีกระแสไหลในสารตัวอย่างจะได้

$$\vec{E} = \frac{1}{eT} (\bar{K}_0 \bar{K}_1) \nabla T \quad (1.10)$$

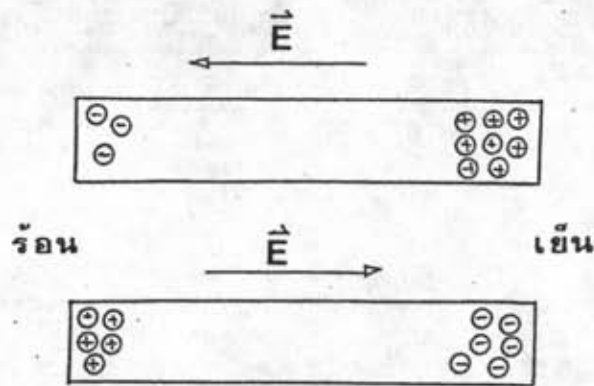
หรือ $\vec{E} = \frac{k}{e} \nabla T$ โดยที่ k เท่ากับค่าคงที่ (1.11)

จากสมการ (1.11) นี้เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง \vec{E} และ ∇T ปริมาณ \bar{K}_0, \bar{K}_1 อาจแสดงได้ว่าเป็นขวก นั่นคือ k เป็นลบ ถ้า e เป็นลบ, \vec{E} กับ ∇T มีทิศสวนทางกัน หาก e เป็นขวก \vec{E} กับ ∇T มีทิศเดียวกัน ดังรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้ากับ ∇T ซึ่งไปทางเดียวกับในกรณีพาหะเป็นขวก

และในการนำไฟฟ้าจากการกระโดดของพาหะ อาจหาทิศของสนามไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของพาหะซึ่งพาหะที่ได้รับความร้อนมีพลังงานจลน์มากกว่าจะเคลื่อนที่เร็วกว่า แต่การเคลื่อนที่ของพาหะนี้จะถูกต้านด้วยสนามไฟฟ้าในทิศที่ทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของพาหะจนพาหะหยุดนิ่งไม่เคลื่อนที่ต่อไปอีก ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 แสดงการเกิดความต่างศักย์ที่ปลายร้อนและเย็น
ในกรณีประจุพาหะเป็นชนิดบวกและลบ

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ศึกษาเกี่ยวกับขบวนการขนส่งในสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลส์เพื่อวิเคราะห์ว่าปรากฏการณ์ขนส่งของพาหะถูกควบคุมด้วยขบวนการกระโดด (hopping mechanism) เช่นในกรณีของพอลิไพร์โรลส์ที่สังเคราะห์โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมีหรือไม่ โดยการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าและอุณหภูมิซึ่งกราฟระหว่าง $\log \sigma$ กับ $T^{-1/4}$ เป็นตัวบ่งชี้ว่าปรากฏการณ์ดังกล่าว สอดคล้องตามทฤษฎีการกระโดดของพาหะของ Mott หรือไม่ ดังได้กล่าวแล้วว่า ตามทฤษฎีของ Mott จะได้ $\log \sigma \propto T^{-1/4}$ นอกจากนี้ผลการทดลองจะเปรียบเทียบกับการศึกษาในเรื่องปรากฏการณ์ขนส่งของพอลิไพร์โรลส์ที่สังเคราะห์โดยวิธีอื่น ๆ อีกส่วนหนึ่งของการวิจัยครั้งนี้คือการศึกษาศนิตประจุพาหะด้วยการทดลองวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลส์ซึ่งจะทำให้ทราบว่าประจุพาหะเป็นชนิดบวกหรือลบ สอดคล้องกับข้อสรุปที่ได้จากการสังเคราะห์หรือไม่ ทั้งนี้เนื่องจากการสังเคราะห์นั้นประจุพาหะน่าจะเป็นชนิดบวกของ 3 มอนอเมอร์ ซึ่งให้อิเล็กตรอนแก่อะตอมคลอรีน

อนึ่งในการทดลองครั้งนี้บางส่วนของ การทดลองต้องพัฒนาอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาคอมพิวเตอร์ทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ เพื่อใช้ในการควบคุมการทดลองอย่างอัตโนมัติ รวมทั้งการบันทึกข้อมูล และการแสดงผลต่าง ๆ