

## บทที่ 5

### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์เครื่องมือขึ้นมาเพื่อทำการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีในสารละลายที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลอง ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนกับอุณหภูมิ ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งได้ทำการทดลองกับสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล 4 ตัวอย่าง ผลการทดลองได้ผลดีพอสมควร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมี ปรากฏว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนกับอุณหภูมิต่างๆ มีลักษณะคล้ายๆกัน

#### 5.1 ความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้จากการทดลอง

เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมา ดังนั้นผลการทดลองที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ควรจะเป็นบ้าง สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

##### 5.1.1 ภาวะบรรจุไนโตรเจนเหลว

ในการทดลองใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นตัวเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้แก่สารตัวอย่างในช่วง 77 เคลวิน ถึงอุณหภูมิห้อง ภาวะที่ใช้เป็นกระบอกแก้วดวง ห่อหุ้มด้วยโฟมชนิดหนา เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นไปอย่างช้าๆ ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เหมาะสมกับการทดลอง ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเร็วเกินไป จะมีผลต่อการทดลอง และถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจ้าเกินไป ก็จะทำให้การทดลองใช้เวลานานเกินความจำเป็น

### 5.1.2 พลาตินัมเทอร์โมมิเตอร์

ในการวัดอุณหภูมิของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลขณะที่ทำการทดลองซึ่งใช้พลาตินัมเทอร์โมมิเตอร์ 2 อัน ฝังไว้ที่ตัวให้ความร้อน และตัวระบายความร้อน ดังได้กล่าวในหัวข้อ 3.3 ขอบของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลทั้งสองด้านจะวางสัมผัสกับพลาตินัมเทอร์โมมิเตอร์โดยมีพลาสติกเล็กๆสำหรับชั้นนอตยึดไว้เพื่อให้สารตัวอย่างสัมผัสกับพลาตินัมเทอร์โมมิเตอร์แน่นยิ่งขึ้น เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงต่ำลง ถ้าพลาสติกสำหรับชั้นนอตยึดสารตัวอย่างมีการคายตัว ทำให้สารตัวอย่างสัมผัสกับพลาตินัมเทอร์โมมิเตอร์ไม่แน่นก็จะมีผลกระทบต่อ การวัดอุณหภูมิของพลาตินัมเทอร์โมมิเตอร์ซึ่งทำให้ผลการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างคลาดเคลื่อนได้บ้าง

### 5.1.3 ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อน

เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล มีค่าต่ำมากประมาณ  $2 - 8 \mu\text{V/K}$  อุปกรณ์เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสำหรับการทดลองเพื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างครั้งนี้ มีข้อจำกัด จึงทำให้การทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากในการทดลองค่าผลต่างของอุณหภูมิของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล กำหนดให้มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ไม่สามารถเพิ่มค่าผลต่างของอุณหภูมิให้มากขึ้นเพื่อสะดวกในการทดลองได้ จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่มีผลกระทบต่อผลการทดลองที่ได้

### 5.1.4 ผลของความแตกต่างของอุณหภูมิของสารต่อการวัด

ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล เมื่อให้ขอบของสารตัวอย่างมีอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยขอบด้านอุณหภูมิต่ำกว่า ( $T_1$ ) แตกต่างกับขอบด้านที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ( $T_2$ ) เพียงเล็กน้อยค่าความต่างศักย์สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$\Delta V = \int_{T_1}^{T_2} S(T) dT \quad (5.1)$$

เมื่อ  $S(T)$  คือค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่าง ถ้า  $S(T)$  มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเป็นแบบเชิงเส้น

$$S(T) = a + bT \quad (5.2)$$

จากสมการที่(5.1) อินทิเกรตจะได้

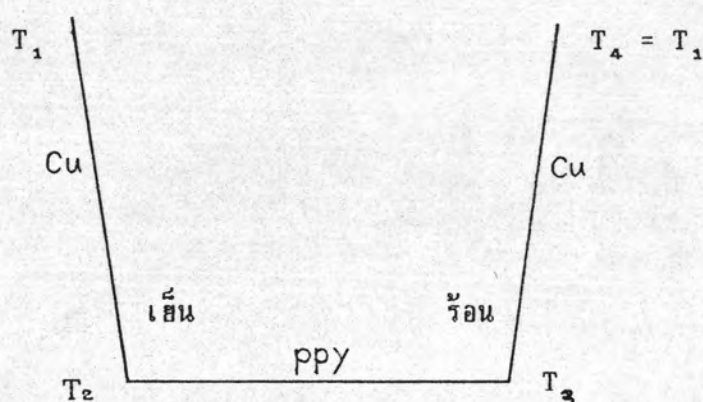
$$\begin{aligned} \Delta V &= a(T_2 - T_1) + \frac{1}{2} b(T_2 - T_1) \\ &= a \Delta T + b \left( \frac{T_2 + T_1}{2} \right) \Delta T \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = a + b T_{av} = S(T_{av}) \quad (5.3)$$

โดยที่  $S(T_{av})$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย จากสมการที่ (5.3) จะเห็นได้ว่าค่า  $\Delta V/\Delta T$  ก็คือค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย  $(T_1 + T_2)/2$  นั้นเอง อย่างไรก็ตาม ถ้าค่า  $S(T)$  ในสมการที่ (5.2) มีเทอม  $CT^2$  เพิ่มขึ้น สมการที่ (5.3) จะใช้ไม่ได้ เนื่องจากในการวิจัยพบว่า  $S(T)$  ของพอลิพิริโรลที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิเป็นแบบเชิงเส้นโดยประมาณ ดังนั้นการประเมินค่าอุณหภูมิเฉลี่ยตามแบบสมการที่ (4.1) จึงยอมรับได้ และไม่ให้เกิดผลคลาดเคลื่อนนัก

## 5.2 ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ ( $S_p$ ) ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล

ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนใช้หลักปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน กล่าวคือ ที่รอยต่อทั้งสองของขั้วทองแดงกับสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล เมื่อมีอุณหภูมิต่างกันที่ขอบของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลจะเกิดความต่างศักย์ขึ้นในสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล เมื่อพิจารณาที่ลวดทองแดงทั้งสองเส้นที่ต่อกับขอบของสารตัวอย่าง ซึ่งปลายอีกด้านหนึ่งของลวดทองแดงทั้งสองเส้นต่อกับโพรเทนซีอิมิตอร์ เพื่อสำหรับวัดค่าความต่างศักย์ ก็เข้าหลักปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อน เช่นกัน เนื่องจากขั้วทองแดงที่ต่อกับโพรเทนซีอิมิตอร์ และที่ต่อกับขอบของสารตัวอย่าง มีอุณหภูมิต่างกัน ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนที่วัดได้ซึ่งแสดงในบทที่ 4 เป็นเพียงค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของพอลิไพร์โรลที่วัดเทียบกับทองแดงเท่านั้น ในการหาค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล ( $S_p$ ) จึงต้องคำนึงค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ของลวดทองแดงด้วย พิจารณาจากรูปที่ 5.1 และจากสมการที่ (2.3.16)



รูปที่ 5.1 แสดงการต่อลวดทองแดงกับสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล

จากรูปข้างบนในการหาความต่างศักย์  $V_{14}$  สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$V_{14} = \int_{T_1}^{T_2} S_{Cu} dT + \int_{T_2}^{T_3} S_p dT + \int_{T_3}^{T_4} S_{Cu} dT \quad (5.4)$$

โดย  $S_{cu}$  และ  $S_p$  เป็นค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ของทองแดงและพอลิพีไรโรล ตามลำดับ เนื่องจาก  $T_4 = T_1 =$  อุณหภูมิห้อง สมการที่ (5.4) เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned}
 V_{14} &= \int_{T_1}^{T_2} S_{cu} dT - \int_{T_1}^{T_3} S_{cu} dT + \int_{T_2}^{T_3} S_p dT \\
 &= \int_{T_3}^{T_2} S_{cu} dT + \int_{T_2}^{T_3} S_p dT \\
 &= \int_{T_2}^{T_3} S_p dT - \int_{T_2}^{T_3} S_{cu} dT \\
 &= \int_{T_2}^{T_3} (S_p - S_{cu}) dT \quad (5.5)
 \end{aligned}$$

ถ้า  $T_3$ ,  $T_2$  ไม่ต่างกันมาก ในช่วงนั้น  $S_p$  และ  $S_{cu}$  เกือบไม่เปลี่ยน สมการที่ (5.5) สามารถเขียนได้เป็น

$$V_{14} = (S_p - S_{cu})(T_3 - T_2)$$

$V_{14}$  และ  $T_3 - T_2$  คือ  $\Delta V$  และ  $\Delta T$  ในสมการที่ (4.2) นั่นคือ

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = S_p - S_{cu} = S \quad (5.6)$$

$S$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างพอลิพีไรโรลซึ่งเทียบกับทองแดง ซึ่งวัดได้ดังแสดงในบทที่ 4 ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ของพอลิพีไรโรล

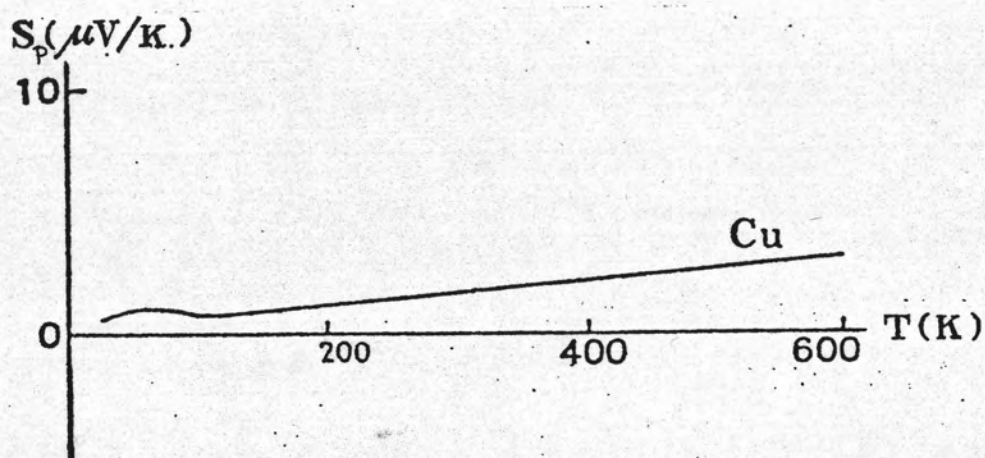
$$S_p = S + S_{cu} \quad (5.7)$$

จะเห็นได้ว่าการหา  $S_p$  จะต้องทราบ  $S_{cu}$  ของทองแดงด้วย

### 5.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล 4 ตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 77 เคลวิน ถึงอุณหภูมิห้อง ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อน (S) กับอุณหภูมิต่างๆ (T) ดังแสดงในบทที่ 4 ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างที่ได้นั้นเป็นค่าซึ่งเทียบกับทองแดง ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้า-ความร้อนสัมบูรณ์ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลได้จากผลบวกของค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างเทียบกับทองแดง กับค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของทองแดง ที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อพิจารณาจากกราฟของค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของทองแดงที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 5.2 [19]



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ของทองแดง ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 5.2 ช่วงอุณหภูมิ 100 เคลวิน ถึง 600 เคลวิน ค่ากำลังไฟฟ้า ความร้อนของทองแดงแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิ สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$S = \frac{3.094}{600} \times T$$

$$S = 5.16 \times 10^{-3} T \quad (5.8)$$

สำหรับช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 เคลวินลงมาค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของทองแดงไม่แปรผัน โดยตรงกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 100 เคลวินลงไป ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของทองแดงจะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิต่ำลงไปถึงประมาณ 60 เคลวิน ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของทองแดง ก็จะมีค่าลดลงอีก ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของทองแดงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 เคลวินนี้ สามารถวิเคราะห์ห่อ่านได้จากกราฟและแสดงเฉพาะค่าที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์เท่านั้นในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของทองแดงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 เคลวิน

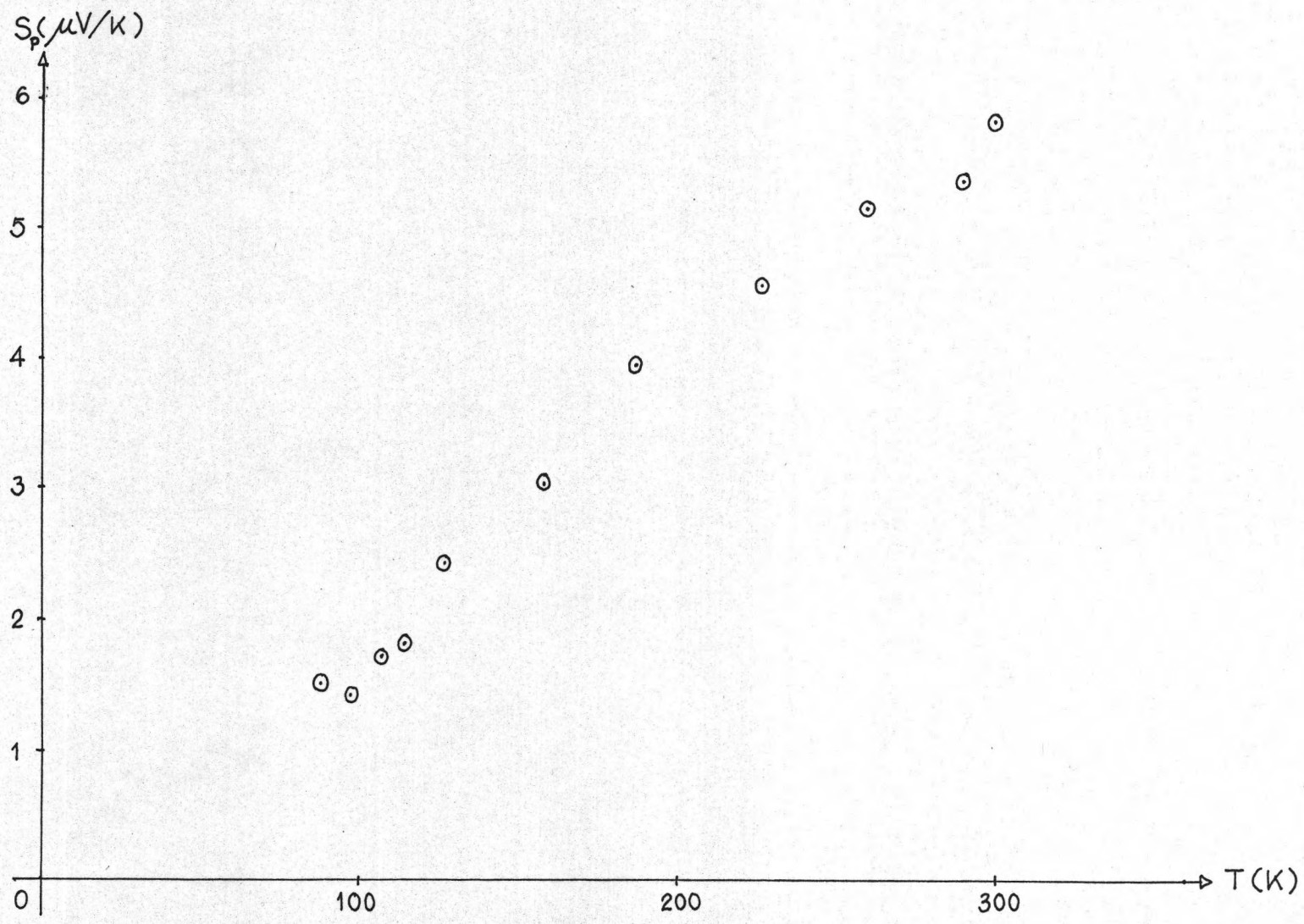
อุณหภูมิ (เคลวิน)	ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของทองแดง ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 เคลวิน ( $\mu\text{V/K}$ )
90.7	0.8
88.8	0.9

จากผลการทดลองของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลหมายเลข 1 , 2 , 3 และ 4 ในบทที่ 4 เมื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างเทียบกับทองแดงด้วยค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ของทองแดง โดยอาศัยสมการที่ (5.8) และตารางที่ 5.1 จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลหมายเลข 1 , 2 , 3 และ 4 ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 , 5.3 , 5.4 และ 5.5 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลแต่ละหมายเลข กับอุณหภูมิต่างๆ ได้แสดงในรูปที่ 5.3 , 5.4 , 5.5 และ 5.6

ตารางที่ 5.2 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล หมายเลข 1

อุณหภูมิเฉลี่ย (เคลวิน)	ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ ( $\mu\text{V/K}$ )
302.6	5.8
288.9	5.3
262.3	5.1
228.0	4.5
187.9	3.9
158.8	3.0
126.6	2.4
112.9	1.8
107.3	1.7
90.7	1.4
88.8	1.5

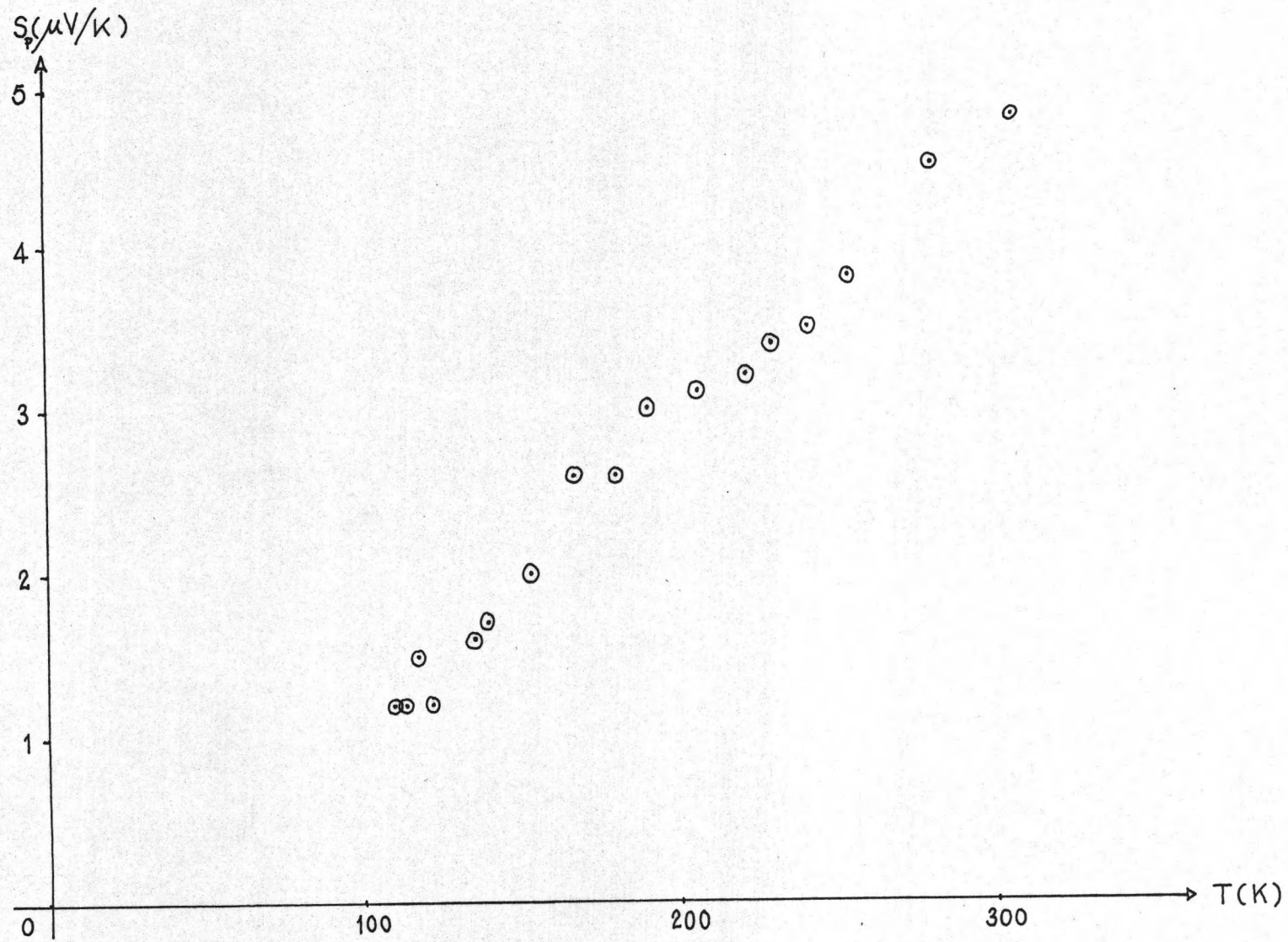




รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ กับอุณหภูมิต่างๆ ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล หมายเลข 1

ตารางที่ 5.3 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่างๆ  
ของสารตัวอย่างพอลิพีไรโรล หมายเลข 2

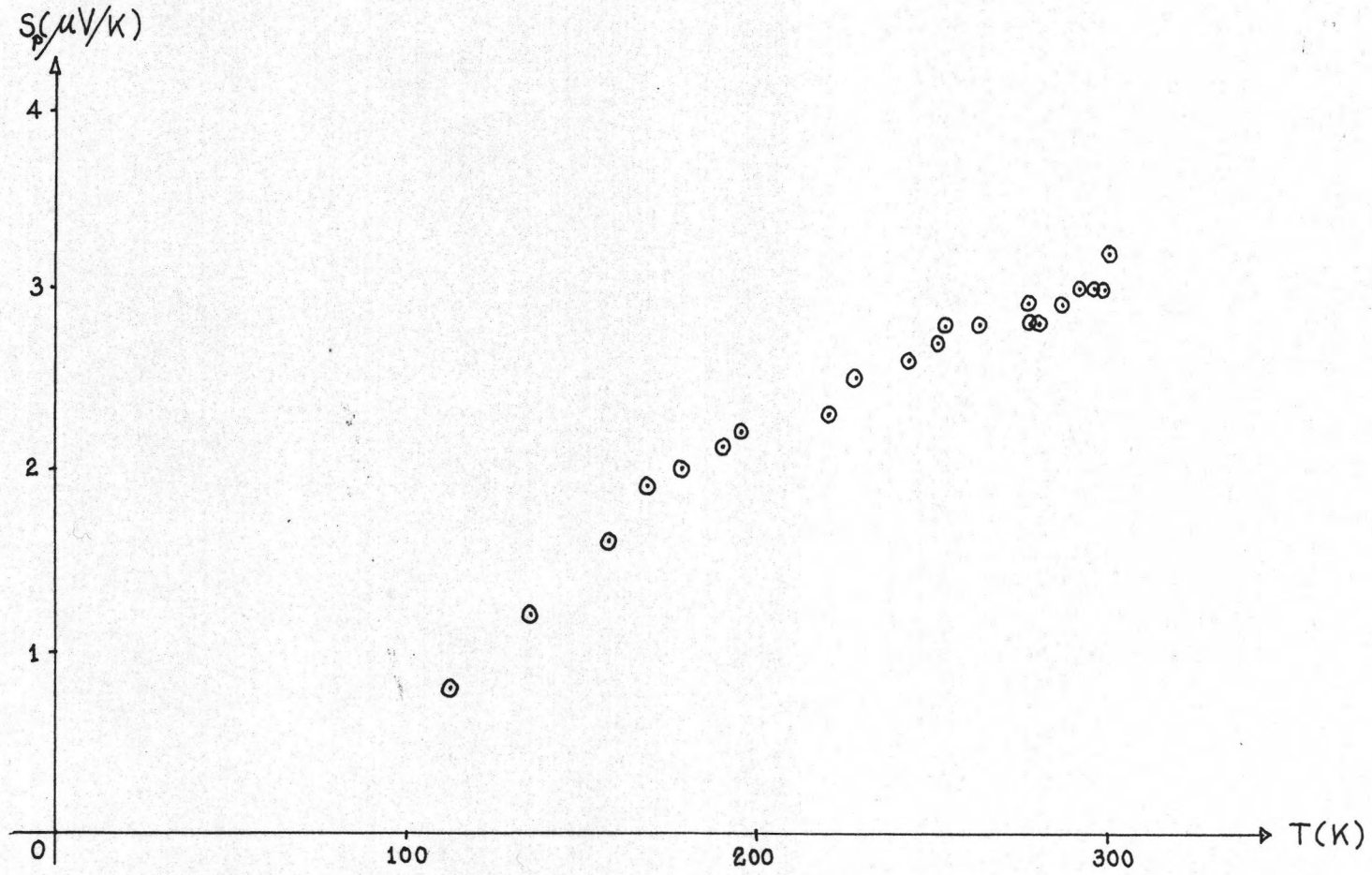
อุณหภูมิเฉลี่ย (เคลวิน)	ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ ( $\mu\text{V/K}$ )
305.0	4.8
280.0	4.5
253.1	3.8
241.0	3.5
228.7	3.4
220.9	3.2
204.6	3.1
190.2	3.0
179.7	2.6
167.4	2.6
153.5	2.0
138.8	1.7
136.1	1.6
121.0	1.2
117.3	1.5
113.5	1.2
110.6	1.2



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์  
กับอุณหภูมิต่างๆ ของสารตัวอย่างพลีนิโรล์ หมายเลข 2

ตารางที่ 5.4 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่างๆ  
ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล หมายเลข 3

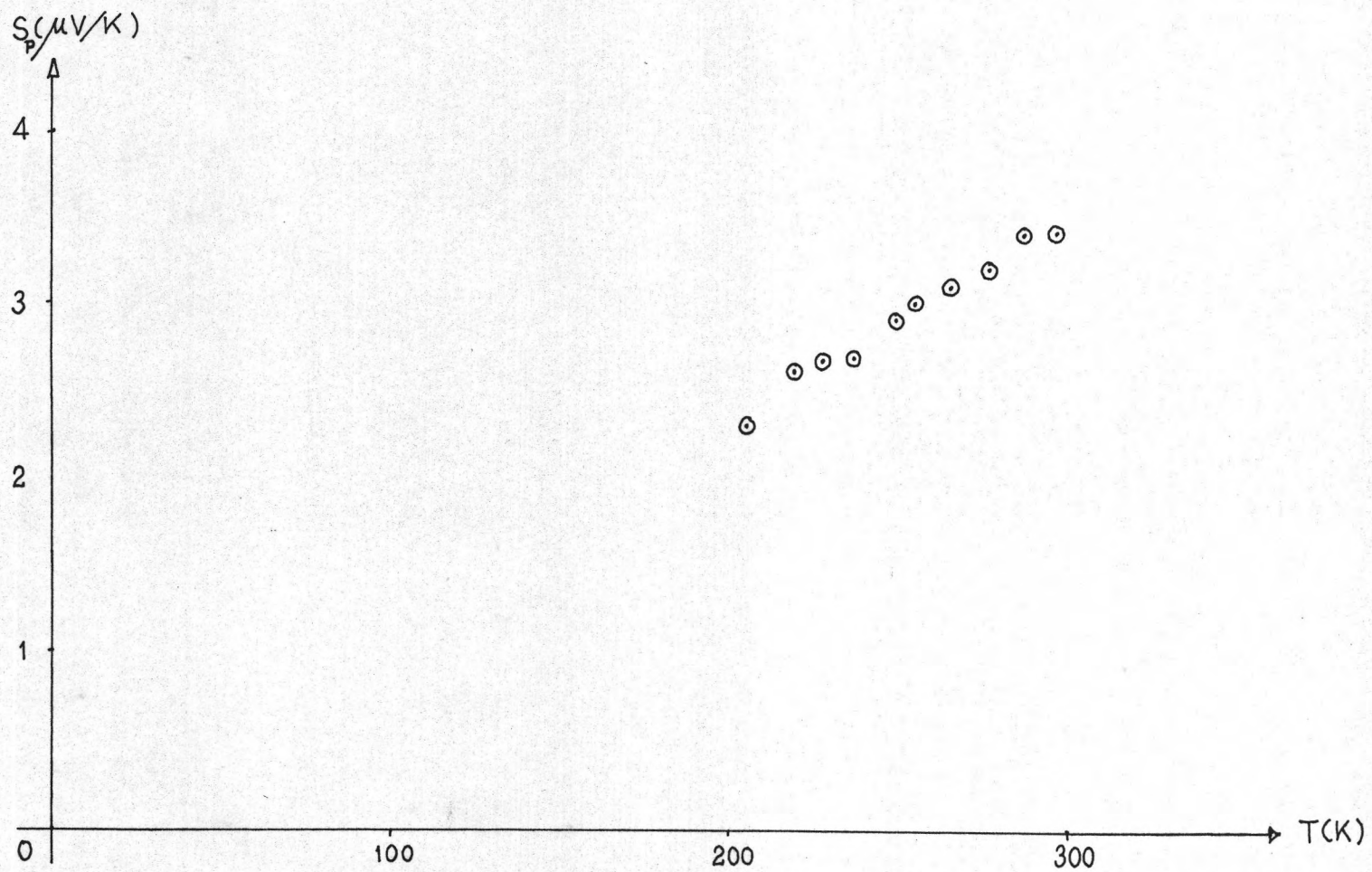
อุณหภูมิเฉลี่ย (เคลวิน)	ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ ( $\mu\text{V/K}$ )
300.0	3.2
299.0	3.0
296.0	3.0
290.0	3.0
284.6	2.9
280.0	2.8
278.5	2.8
277.0	2.9
263.0	2.8
253.0	2.8
251.0	2.7
242.5	2.6
228.0	2.5
220.0	2.3
194.5	2.2
190.5	2.1
179.0	2.0
168.5	1.9
156.5	1.6
135.0	1.2
112.0	0.8



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์  
กับอุณหภูมิต่างๆ ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล หมายเลข 3

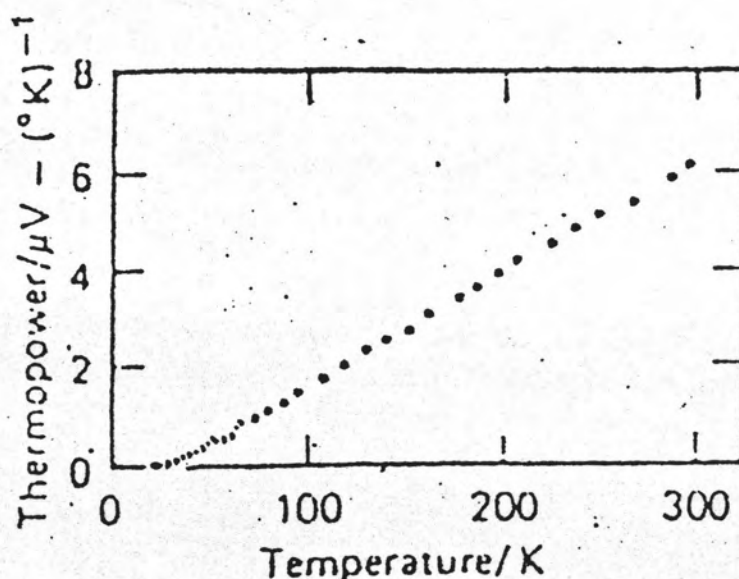
ตารางที่ 5.5 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่างๆ  
ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล หมายเลข 4

อุณหภูมิเฉลี่ย (เคลวิน)	ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ ( $\mu\text{V/K}$ )
297.0	3.4
287.1	3.4
275.7	3.2
264.6	3.1
254.7	3.0
250.5	2.9
237.1	2.7
227.3	2.7
219.6	2.6
204.0	2.3



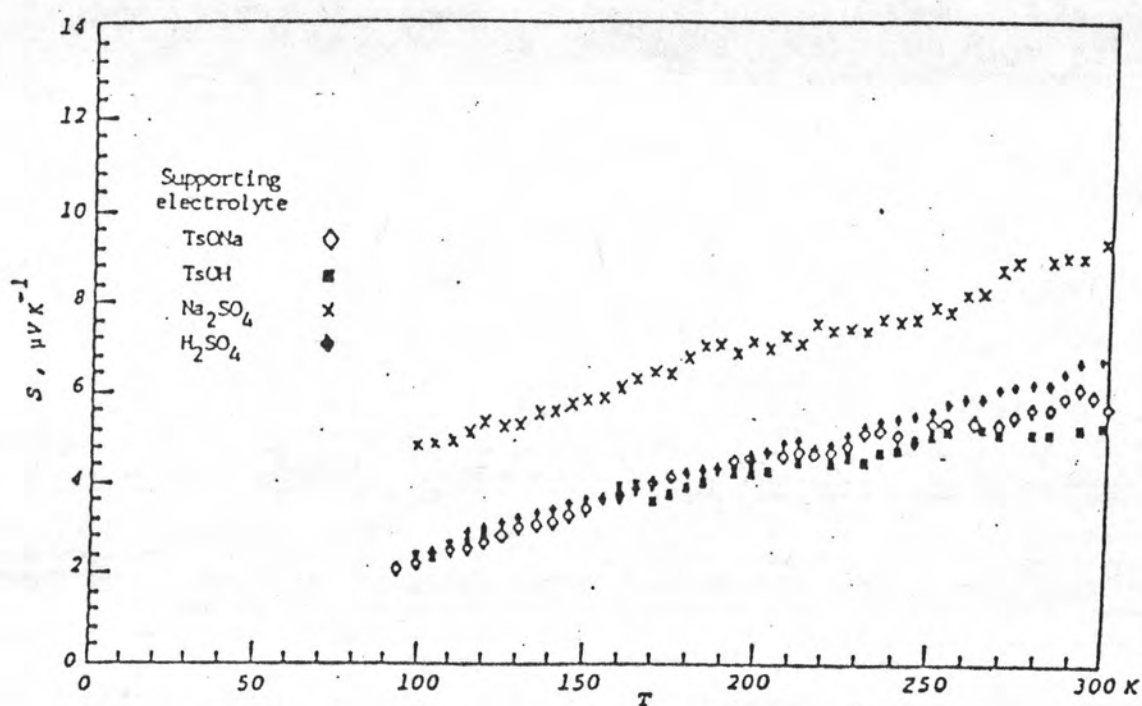
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์  
กับอุณหภูมิต่างๆ ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล หมายเลข 4

เมื่อนำกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลกับอุณหภูมิต่างๆ ของทั้ง 4 สารตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5.3 , 5.4 , 5.5 และ 5.6 มาเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์โดยวิธีไฟฟ้า-เคมี จากการทดลองของ Diaz [6] ดังรูปที่ 5.7 และจากการทดลองของ Qian กับ Qiu [9] ดังรูปที่ 5.8 ผลปรากฏว่ากราฟมีลักษณะคล้ายกัน



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนกับอุณหภูมิต่างๆ ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล ที่สังเคราะห์โดยวิธีไฟฟ้า-เคมี จากการทดลองของ Diaz





รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อน กับอุณหภูมิต่างๆ ของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล ที่สังเคราะห์ โดยวิธีไฟฟ้า-เคมี จากการทดลองของ Qian และ Qiu

#### 5.4 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีในสารละลาย ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมพันธ์กับอุณหภูมิต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวกับผลการทดลองของ Diaz และผลการทดลองของ Qian กับ Qiu ปรากฏว่ามีลักษณะเหมือนกันดังนี้

- 1) มีค่าเป็นบวกตลอดช่วงอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ  $3-6 \mu\text{V/K}$
- 2) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมพันธ์และอุณหภูมิต่างๆ มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ซึ่งผ่านหรือเกือบผ่านจุดกำเนิด ( $T = 0, S_p = 0$ )

จากผลที่ได้สรุปได้ว่า พอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมี และโดยวิธีการสังเคราะห์ทางเคมีในสารละลายซึ่งใช้ในการวิจัยนี้ มีสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนเหมือนกัน พร้อมกับผลการทดลองที่ทำมาก่อนพบว่า [13] พอลิไพร์โรลทั้งสองชนิดนี้ มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) ไปกับอุณหภูมิ ( $T$ ) เป็นไปตามแบบการนำไฟฟ้าโดยกระบวนการกระโดด (hopping mechanism) คล้ายๆ กัน จึงสรุปได้ว่าปรากฏการณ์การขนส่งทางไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลทั้งสองชนิดนี้น่าจะเหมือนกัน จึงน่าจะใช้แทนกันได้ถ้าต้องการนำไปประยุกต์ทางการนำไฟฟ้าที่วางไป และเนื่องจากพอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์ขึ้นโดยวิธีทางเคมีในสารละลายนั้นทำได้ในราคาถูกและครั้งละมากๆ จึงน่าจะมีประโยชน์อย่างมากในแง่ทางการประยุกต์

จากเรื่องของกำลังไฟฟ้าความร้อน ที่กล่าวในบทที่ 2 ในกรณีที่สารเป็นแบบผลึก และเป็นแบบอสัณฐาน ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนที่ได้จะเหมือนกัน ดังแสดงในสมการที่ (2.2.38) , (2.3.15)

$$S = \frac{\pi^2}{3} \frac{k_B}{q} k_B T \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} \ln \sigma(\xi) \right]_{\xi = \mathcal{J}} \quad (5.9)$$

สำหรับสารตัวอย่างพอลิไพร์โรลที่ใช้ในการวิจัยนี้มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน เป็นไปได้ที่ค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์ ที่วัดได้จะสอดคล้องกับสมการข้างบน

สำหรับโลหะโดยทั่วไป พาหะนำไฟฟ้าจะเป็นเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งต่างๆ ได้โดยสะดวก ดังนั้นแบบจำลองอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron model) จึงใช้ได้ดีในการอธิบายการนำไฟฟ้าของโลหะ ในการจำลองนี้ระดับพลังงานเฟอร์มี (fermi) ที่อุณหภูมิ  $T$  ของโลหะ เขียนได้เป็น

$$\mathcal{J} = \mathcal{J}_0 \left[ 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{k_B T}{\mathcal{J}_0} \right)^2 + \dots \right]$$

โดย  $\mathcal{J}_0$  และ  $\mathcal{J}$  เป็นระดับเฟอร์มี ที่ศูนย์องศาเคลวิน และที่  $T$  เคลวิน ตามลำดับ

เนื่องจากสำหรับโลหะ  $k_B T \ll \mathcal{E}_0$  ตัวอย่างเช่น สำหรับทองแดง 1.51 eV  
ขณะที่  $k_B T$  ที่ 300 เคลวิน เท่ากับ 0.026 eV จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิไม่มากนัก

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0$$

นั่นคือระดับเฟอร์มิของโลหะแทบไม่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ

เมื่อพิจารณาสมการที่ (5.9) ข้างบน สำหรับโลหะจะพบว่าเทอม

$$\left[ \frac{\partial \ln \sigma(\mathcal{E})}{\partial \mathcal{E}} \right]_{\mathcal{E} = \mathcal{E}_0}$$

จะเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ แต่ขึ้นกับชนิดของโลหะนั้น นั่นคือสำหรับโลหะแล้ว

$$S \propto T$$

จากแบบจำลองนี้ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S$  กับ  $T$  ของโลหะ จะเป็นเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิด

จากผลการทดลองของพอลิพิรโรล์ที่แสดงในรูปที่ (5.3) - (5.6) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนสัมบูรณ์และอุณหภูมิ มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงผ่านจุดกำเนิดเช่นกัน กล่าวได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนและอุณหภูมิของพอลิพิรโรล์เป็นไปตามแบบของการนำไฟฟ้าแบบโลหะ (metallic conduction) และมองในแง่แบบจำลองการนำไฟฟ้าในโครงสร้างอสัณฐานนั้น จากสมการที่ (5.9) พบว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของพอลิพิรโรล์จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ  $T$

ปัจจุบันได้มีการศึกษาปรากฏการณ์การนำไฟฟ้าของพอลิพิรโรล์ขึ้นในหลายแง่ [20] แต่ก็ยังไม่มีข้อสรุปที่แน่นอนในเรื่องการนำไฟฟ้าภายในสารซึ่งมีโครงสร้างสับสนนี้ ตัวอย่างเช่นมีผู้เสนอว่าพาหะนำไฟฟ้าภายในสายโซ่พอลิพิรโรล์ควรจะเป็นโพราลอนคู่ (bipolaron)

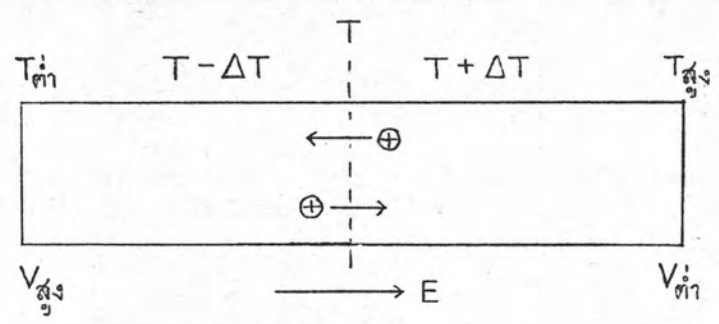
ที่ไม่มีสปิน ( $s=0$ ) และระหว่างสายโซ่จะเป็นการกระโดด (hopping) ของพาหะซึ่งยากกว่า กระบวนการชนิดหลังนี้จะเป็นตัวจำกัดการนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลล์ ถ้าโพรบาลอนคู่เป็นพาหะนำไฟฟ้าจริง ทฤษฎีควอนตัมดั่งที่อธิบายในบทที่ 2 รวมทั้งสมการที่ (2.2.38) , (2.3.15) จะใช้ไม่ได้ เพราะทฤษฎีนี้ใช้ได้เฉพาะ Fermion ซึ่งมีสปิน  $1/2$  เท่านั้น และมันทัศนั เกี่ยวกับการดับพลังงานเฟอร์มิก็ใช้ไม่ได้เช่นกัน อีกประการหนึ่งยังไม่กระจ่างชัดว่าการกระโดดของโพรบาลอนคู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลจะมีธรรมชาติอย่างไร

เพื่อหลีกเลี่ยงข้อยุ่งยากข้างบน น่าจะหันมาใช้ทฤษฎีฟิสิกส์แบบฉบับในการอธิบายปรากฏการณ์การนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลล์นี้ เพราะทฤษฎีนี้ไม่ต้องการทราบธรรมชาติของพาหะตัวนำไฟฟ้าและกระบวนการนำไฟฟ้าโดยละเอียด ทฤษฎีดังกล่าวซึ่งได้เขียนไว้ในตอนต้นของบทที่ 2 กล่าวว่าถ้าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในสาร จะเกิดความต่างศักย์ขึ้นดังสมการ

$$\Delta V = -S \Delta T$$

$$S_p = -\frac{qL_{12}}{6T^2}$$

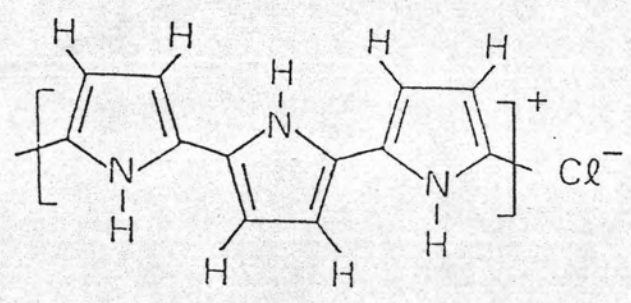
ผลการทดลองที่กล่าวในบทที่ 3 สอดคล้องกับทฤษฎีฟิสิกส์แบบฉบับในแง่ที่ว่า เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิชั้นที่ขอบของพอลิไพร์โรลล์ จะเกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างจุดทั้งสองนี้ และการที่  $S_p$  ที่วัดได้มีค่าเป็นบวก (เพราะบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำมีศักย์สูงกว่า บริเวณที่มีอุณหภูมิสูง) แสดงว่าพาหะนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลล์น่าจะมีประจุเป็นบวก ตามรูปที่ (5.9) บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงพาหะจะมีความเร็วสูงกว่า จะมีผลทำให้พาหะบวกเคลื่อนที่มาจากบริเวณอุณหภูมิต่ำมากขึ้น จึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในสารเพื่อป้องกันกา



รูปที่ 5.9 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสาร  
เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ

เคลื่อนที่นี้ ถ้าประจุเป็นลบผลจะกลับกับรูปข้างบน กล่าวคือบริเวณอุณหภูมิต่ำจะมีศักย์สูงกว่า  
บริเวณอุณหภูมิสูง

ข้อสรุปที่ว่าพาหะนำไฟฟ้าเป็นพวกนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก  
โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไพร์โรล



รูปที่ 5.10 แสดง 3 กลุ่มของไพร์โรลในสายโซ่ให้อิเล็กตรอน 1 ตัว  
แก่อะตอมของคลอรีน

จาก elemental analysis พบว่า 3 กลุ่มของพิวโรลในสายโซ่ให้อิเล็กตรอนหนึ่งตัวแก่อะตอมคลอรีน ในที่นี้  $\text{Cl}^-$  จึงเป็น dopant ซึ่งแฝงอยู่ในสารซึ่งจะเคลื่อนที่ได้ไม่ได้ ส่วนสามกลุ่มที่มีประจุบวกนั้นจะเคลื่อนที่ได้ไปตามสายโซ่เมื่อรับอิเล็กตรอนจากสามกลุ่มอื่นๆในสายโซ่นั้น สามกลุ่มของพิวโรลดังกล่าวก็คือพาหะบวกซึ่งนำไฟฟ้าภายในนั่นเอง

### 5.5 ข้อปรับปรุง

ในการวิจัยครั้งนี้ทำการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ ข้อปรับปรุงที่น่าสนใจคือ การพัฒนาอุปกรณ์เครื่องมือชุดทดลอง ทั้งเครื่องมือวัดและวิธีการโดยการเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ เพื่อให้การทดลองเป็นไปอย่างอัตโนมัติ ทั้งการบันทึกข้อมูล การประมวลผลและการแสดงผลทางจอภาพและทางเครื่องพิมพ์ ซึ่งจะทำการทดลองได้ข้อมูลมากขึ้นและสะดวกยิ่งขึ้น