

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลองและผลการทดลองทั้งหมด ได้แก่ การวัดสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่าง (polypyrrole) ที่อุณหภูมิห้อง การวัดสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 77 K ถึง ประมาณ 300 K และการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารที่อุณหภูมิห้อง

3.1 คุณลักษณะของเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นชนิดโครเมลลูเมล (chromel-alumel) ซึ่งมีช่วงการทำงาน (วัดอุณหภูมิ) ตั้งแต่  $-190^{\circ}\text{C}$  ถึง  $550^{\circ}\text{C}$  ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต่างศักย์ของเทอร์โมคัปเปิล แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลระหว่าง อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) และความต่างศักย์ (mV) อุณหภูมิอ้างอิง =  $0^{\circ}\text{C}$

$^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-190	-5.80	-5.62	-5.63	-5.65	-5.67	-5.68	-5.70	-5.71	-5.73	-5.74
-180	-5.43	-5.45	-5.46	-5.48	-5.50	-5.52	-5.53	-5.55	-5.57	-5.58
-170	-5.24	-5.26	-5.28	-5.30	-5.32	-5.34	-5.35	-5.37	-5.39	-5.41
-160	-5.03	-5.05	-5.09	-5.10	-5.12	-5.14	-5.16	-5.18	-5.20	-5.22
-150	-4.81	-4.84	-4.86	-4.88	-4.90	-4.92	-4.95	-4.97	-4.99	-5.01
-140	-4.68	-4.60	-4.62	-4.65	-4.67	-4.70	-4.72	-4.74	-4.77	-4.79
-130	-4.32	-4.35	-4.37	-4.40	-4.42	-4.45	-4.48	-4.50	-4.52	-4.55
-120	-4.06	-4.08	-4.11	-4.14	-4.16	-4.19	-4.22	-4.24	-4.27	-4.30
-110	-3.78	-3.81	-3.84	-3.86	-3.89	-3.92	-3.95	-3.98	-4.00	-4.03
-100	-3.49	-3.52	-3.55	-3.58	-3.61	-3.64	-3.66	-3.69	-3.72	-3.76
-90	-3.19	-3.22	-3.25	-3.28	-3.31	-3.34	-3.37	-3.40	-3.43	-3.46
-80	-2.87	-2.90	-2.93	-2.96	-3.00	-3.03	-3.06	-3.09	-3.12	-3.16
-70	-2.54	-2.57	-2.61	-2.64	-2.67	-2.71	-2.74	-2.77	-2.80	-2.84
-60	-2.20	-2.24	-2.27	-2.30	-2.34	-2.37	-2.41	-2.44	-2.47	-2.51
-50	-1.86	-1.89	-1.93	-1.96	-2.00	-2.03	-2.07	-2.10	-2.13	-2.17





°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-40	-1.50	-1.54	-1.57	-1.61	-1.64	-1.65	-1.72	-1.75	-1.79	-1.82
-30	-1.14	-1.17	-1.21	-1.25	-1.28	-1.32	-1.36	-1.39	-1.43	-1.47
-20	-0.77	-0.80	-0.84	-0.88	-0.92	-0.95	-0.99	-1.03	-1.06	-1.10
-10	-0.39	-0.42	-0.46	-0.50	-0.54	-0.58	-0.62	-0.66	-0.69	-0.73
0	0.00	0.04	0.08	0.12	0.16	0.19	0.23	0.27	0.31	0.35
(+)0	0.00	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36
10	0.40	0.44	0.48	0.52	0.56	0.60	0.64	0.68	0.72	0.76
20	0.80	0.84	0.88	0.92	0.96	1.00	1.04	1.08	1.12	1.16
30	1.20	1.24	1.28	1.32	1.36	1.40	1.44	1.49	1.53	1.57
40	1.61	1.65	1.69	1.73	1.77	1.81	1.85	1.90	1.94	1.98
50	2.02	2.06	2.10	2.14	2.18	2.23	2.27	2.31	2.35	2.39
60	2.43	2.47	2.51	2.56	2.60	2.64	2.68	2.72	2.76	2.80
70	2.85	2.89	2.93	2.97	3.01	3.05	3.10	3.14	3.18	3.22
80	3.26	3.30	3.35	3.39	3.43	3.47	3.51	3.56	3.60	3.64
90	3.68	3.72	3.76	3.81	3.85	3.89	3.93	3.97	4.01	4.06
100	4.10	4.14	4.18	4.22	4.26	4.31	4.35	4.39	4.43	4.47
110	4.51	4.55	4.60	4.64	4.68	4.72	4.76	4.80	4.84	4.88
120	4.92	4.96	5.01	5.05	5.09	5.13	5.17	5.21	5.25	5.29
130	5.33	5.37	5.41	5.45	5.49	5.53	5.57	5.61	5.65	5.69
140	5.73	5.77	5.81	5.85	5.89	5.93	5.97	6.01	6.05	6.09
150	6.13	6.17	6.21	6.25	6.29	6.33	6.37	6.41	6.45	6.49
160	6.53	6.57	6.61	6.65	6.69	6.73	6.77	6.81	6.85	6.89
170	6.93	6.97	7.01	7.05	7.09	7.13	7.17	7.21	7.25	7.29
180	7.33	7.37	7.41	7.45	7.49	7.53	7.57	7.61	7.65	7.69
190	7.73	7.77	7.81	7.85	7.89	7.93	7.97	8.01	8.05	8.09
200	8.13	8.17	8.21	8.25	8.29	8.33	8.37	8.41	8.45	8.50
210	8.54	8.58	8.62	8.66	8.70	8.74	8.78	8.82	8.85	8.90
220	8.94	8.98	9.02	9.06	9.10	9.14	9.18	9.22	9.26	9.30
230	9.34	9.38	9.42	9.46	9.50	9.54	9.59	9.63	9.67	9.71
240	9.75	9.79	9.83	9.87	9.91	9.95	9.99	10.03	10.07	10.11
250	10.16	10.20	10.24	10.28	10.32	10.36	10.40	10.44	10.48	10.52
260	10.57	10.61	10.65	10.69	10.73	10.77	10.81	10.85	10.89	10.93
270	10.98	11.02	11.06	11.10	11.14	11.18	11.22	11.26	11.30	11.34
280	11.39	11.43	11.47	11.51	11.55	11.59	11.63	11.67	11.72	11.76
290	11.80	11.84	11.88	11.92	11.96	12.01	12.05	12.09	12.13	12.17
300	12.21	12.25	12.29	12.34	12.38	12.42	12.46	12.50	12.54	12.58
310	12.63	12.67	12.71	12.75	12.79	12.83	12.88	12.92	12.96	13.00
320	13.04	13.08	13.12	13.17	13.21	13.25	13.29	13.33	13.37	13.42
330	13.46	13.50	13.54	13.58	13.62	13.67	13.71	13.75	13.79	13.83
340	13.85	13.92	13.96	14.00	14.04	14.09	14.13	14.17	14.21	14.25
350	14.29	14.34	14.38	14.42	14.46	14.50	14.55	14.59	14.63	14.67
360	14.71	14.76	14.80	14.84	14.88	14.92	14.97	15.01	15.05	15.09
370	15.13	15.18	15.22	15.26	15.30	15.34	15.39	15.43	15.47	15.51
380	15.55	15.60	15.64	15.68	15.72	15.76	15.81	15.85	15.89	15.93
390	15.95	16.02	16.06	16.10	16.14	16.19	16.23	16.27	16.31	16.35
400	16.40	16.44	16.48	16.52	16.57	16.61	16.65	16.69	16.74	16.78
410	16.82	16.86	16.91	16.95	16.99	17.03	17.07	17.12	17.16	17.20
420	17.24	17.29	17.33	17.37	17.41	17.46	17.50	17.54	17.58	17.62
430	17.67	17.71	17.75	17.79	17.84	17.88	17.92	17.96	18.01	18.05
440	18.09	18.13	18.17	18.22	18.26	18.30	18.34	18.39	18.43	18.47
450	18.51	18.56	18.60	18.64	18.68	18.73	18.77	18.81	18.85	18.90
460	18.94	18.98	19.02	19.07	19.11	19.15	19.19	19.24	19.28	19.32
470	19.36	19.41	19.45	19.49	19.54	19.58	19.62	19.66	19.71	19.75
480	19.79	19.84	19.88	19.92	19.96	20.01	20.05	20.09	20.13	20.18
490	20.22	20.26	20.31	20.35	20.39	20.43	20.48	20.52	20.56	20.60
500	20.65	20.69	20.73	20.77	20.82	20.86	20.90	20.94	20.99	21.03
510	21.07	21.11	21.16	21.20	21.24	21.28	21.32	21.37	21.41	21.45
520	21.50	21.54	21.58	21.63	21.67	21.71	21.75	21.80	21.84	21.88
530	21.92	21.97	22.01	22.05	22.09	22.14	22.18	22.22	22.26	22.31
540	22.35	22.39	22.43	22.48	22.52	22.56	22.61	22.65	22.69	22.73
550	22.78	22.82	22.86	22.90	22.95	22.99	23.03	23.07	23.12	23.16



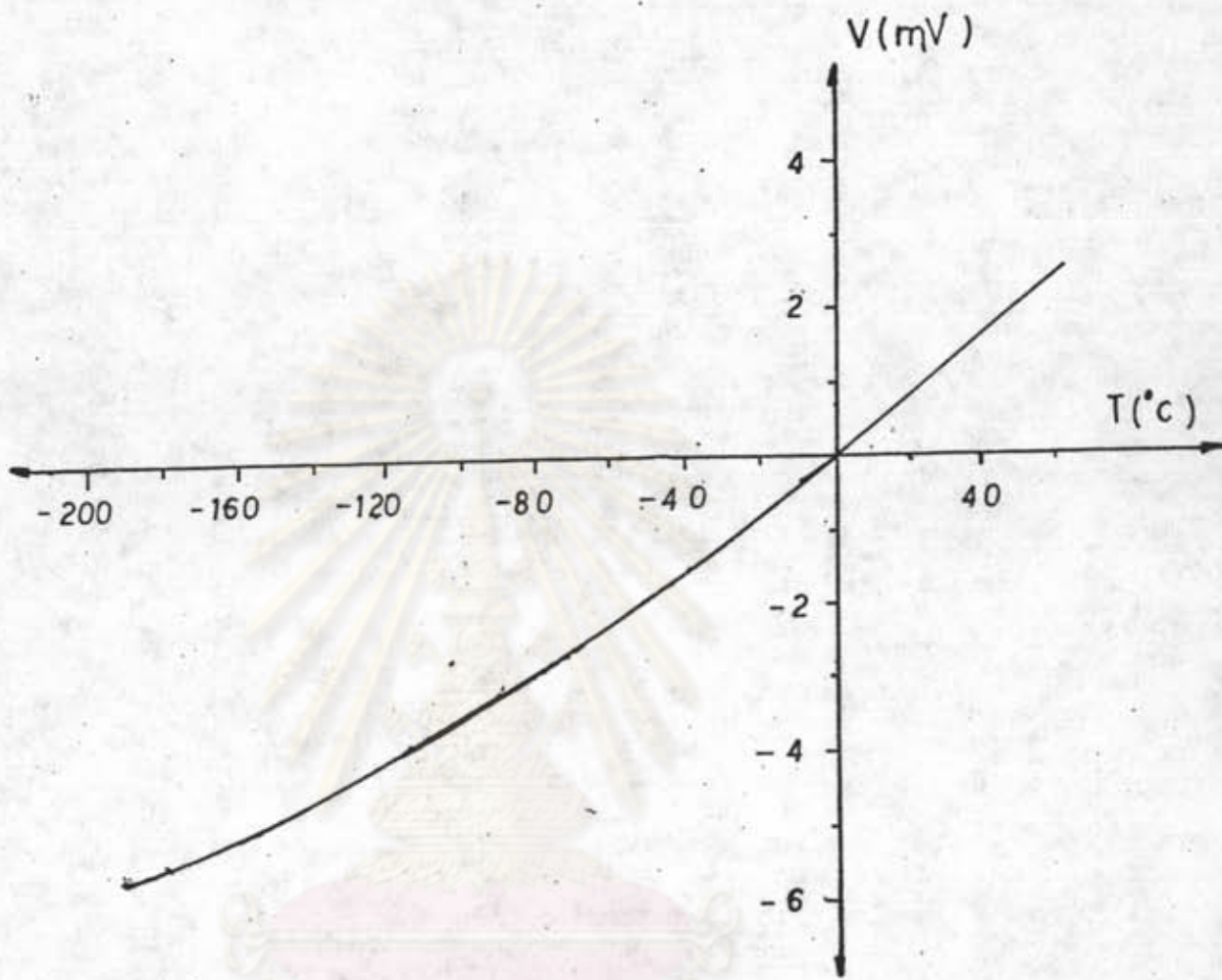
ในการทดลองครั้งนี้จำเป็นต้องแทนกราฟคุณลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลนี้ด้วยสมการคณิตศาสตร์เพื่อความสะดวกในการเทียบค่าความต่างศักย์ที่เทอร์โมคัปเปิลวัดได้เป็นอุณหภูมิ โดยการใช่วิธี polynomial least square อันดับสี่ และเพื่อความถูกต้องมากขึ้นจึงได้แบ่งเป็นช่วง ๆ ดังนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และอุณหภูมิจะเป็นไปตามสมการข้างล่างนี้

$$T = xv + yv^2 + zv^3 + wv^4 \quad (3.1)$$

แต่ละช่วงจะได้ค่า  $x$ ,  $y$ ,  $z$  และ  $w$  ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าคงที่  $x$ ,  $y$ ,  $z$  และ  $w$  ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ

ช่วงที่	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$x$	$y$	$z$	$w$
1	-199 ถึง -160	-61.57775564	-56.40002411	-11.09350092	-0.8691497
2	-160 ถึง -130	245.6788615	137.9676961	28.9590096	1.98471013
3	-130 ถึง -100	-16.55258623	-33.79202327	-8.696918304	-0.78104418
4	-100 ถึง -70	13.97126382	-13.09475853	-4.393196061	-0.529091016
5	-70 ถึง -40	35.3050425	14.2175625	7.43082063	1.19448248
6	-40 ถึง -25	39.25736753	32.3232325	26.13059638	6.785094509
7	-20 ถึง 0	24.69864159	-8.160435311	-16.05722274	-9.883571527



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต่างศักย์ของ  
เทอร์โมคัปเปิลชนิด Chromel-Alumel



สำหรับในช่วง  $0^{\circ}\text{C}$  ถึงอุณหภูมิห้องนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอุณหภูมิจะเป็นเส้นตรงตามสมการ

$$T = \frac{V}{0.04} \quad (3.2)$$

จากช่วงต่าง ๆ ทั้งหมดนี้ทำให้ได้สมการ 7 สมการ เมื่อตรวจสอบความถูกต้องโดยการแทนค่าความต่างศักย์ที่ทราบค่าอุณหภูมิจากตาราง 3.1 จะได้ตารางทดสอบความถูกต้องของสมการทั้ง 7 ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากตาราง 3.1 และการคำนวณ

ช่วงที่	ความต่างศักย์ (mV)	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )		ค่าผิดพลาด ( $^{\circ}\text{C}$ )
		ตาราง	คำนวณ	
1	-5.60	-190	-189.95	0.05
	-5.32	-174	-174.08	0.08
	-5.20	-168	-168.02	0.02
2	-4.92	-155	-154.99	0.01
	-4.67	-144	-143.82	0.18
	-4.48	-136	-135.95	0.05
3	-3.64	-105	-105.15	0.15
	-3.92	-115	-114.93	0.07
	-4.19	-125	-124.89	0.11

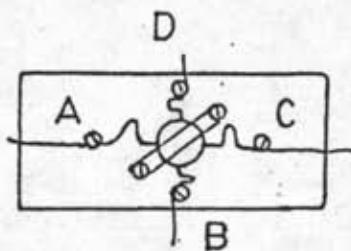




### 3.2 การวัดสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง

ดังได้กล่าวแล้วว่า การวิจัยครั้งนี้จะวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ และวิธีการวัดทั้งสองตอนนี้จะไม่เหมือนกัน โดยที่การวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องจะใช้มือควบคุมการทดลอง แต่การวัดสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ นั้นเป็นแบบอัตโนมัติ

3.2.1 การจัดวางสารตัวอย่าง อุปกรณ์ที่วางสารตัวอย่างได้กล่าวในบทที่ 2 แล้ว นำสารตัวอย่างวางบนที่วางสารตัวอย่างซึ่งเป็นแท่งพลาสติกใส แล้วยึดสารตัวอย่างด้วยแท่งพลาสติกสำหรับยึด ชั้นน็อตแท่งยึดให้แน่นพอไม่ให้สารตัวอย่างขยับไปมาได้เท่านั้น ถ้ายึดแน่นเกินไปอาจทำให้สารตัวอย่างแตกหักได้ ในการวัดสภาพนำไฟฟ้าครั้งนี้ใช้วิธีวัดแบบ แวน เคอ พาว ซึ่งต้องต่อขั้วโลหะซึ่งในที่นี้คือลวดทองแดงจำนวน 4 ขั้วเข้ากับสารตัวอย่าง โดยจัดให้ขั้วทั้งสองอยู่ในตำแหน่งซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน ลวดทองแดงที่ใช้ต้องมีขนาดเล็ก ๆ และทำการงอเป็นรูปโค้งเพื่อให้เกิดแรงสปริงเพื่อกันไม่ให้จุดสัมผัสเสียดไปเมื่อลวดหดตัวที่อุณหภูมิต่ำ ยึดลวดทองแดงนี้ด้วยน็อตทองเหลืองซึ่งติดกับแผ่นพลาสติกขนาดใหญ่ซึ่งเป็นที่วางสารตัวอย่าง ตรงที่จุดเชื่อมต่อระหว่างลวดทองแดงกับสารตัวอย่างต้องแนบสนิทกันจริง ๆ และควรจะต้องฉากกับผิวของสารตัวอย่างด้วย ทำการเชื่อมปลายลวดทองแดงติดกับแผ่นสารตัวอย่างด้วยกาวคาร์บอนซึ่งต้องระมัดระวังไม่ให้กาวติดสารตัวอย่างเป็นก้อนใหญ่ ทั้งนี้อาจทำให้เกิดการแปรเปลี่ยนสภาพของสารตัวอย่างด้วย เมื่อเชื่อมด้วยกาวคาร์บอนแล้วต้องทิ้งไว้ประมาณครึ่งชั่วโมงเพื่อให้กาวแห้ง จึงนำไปทดลองขั้นต่อไปได้ การจัดวางสารตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 3.2 ขั้วทั้งสองเป็นขั้ว A, B, C และ D



รูปที่ 3.2 แสดงการจัดวางสารตัวอย่างบนที่วางสารตัวอย่าง

3.2.2 การทดลอง หลังจากจัดวางสารตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการวัดความต้านทานระหว่างขั้วต่าง ๆ อันได้แก่  $R_{AB}$  (วัดความต้านทานระหว่างขั้ว A และ B) ,  $R_{AC}$ ,  $R_{AD}$ ,  $R_{BC}$ ,  $R_{BD}$  และ  $R_{CD}$  และต้องวัดกลับขั้วระหว่างคู่ต่าง ๆ ที่กล่าวมาทั้งหมดด้วย เพื่อทดสอบดูว่าความต้านทานระหว่างขั้วต่างๆเหล่านี้เป็นแบบ ohmic หรือไม่ ซึ่งถ้าวัดกลับขั้วแล้วได้ค่าเท่ากัน แสดงว่าเป็นแบบ ohmic ซึ่งผลการทดลองวัดความต้านทานระหว่างขั้วของสารตัวอย่างหมายเลข 1 ได้แสดงในตารางที่ 3.4

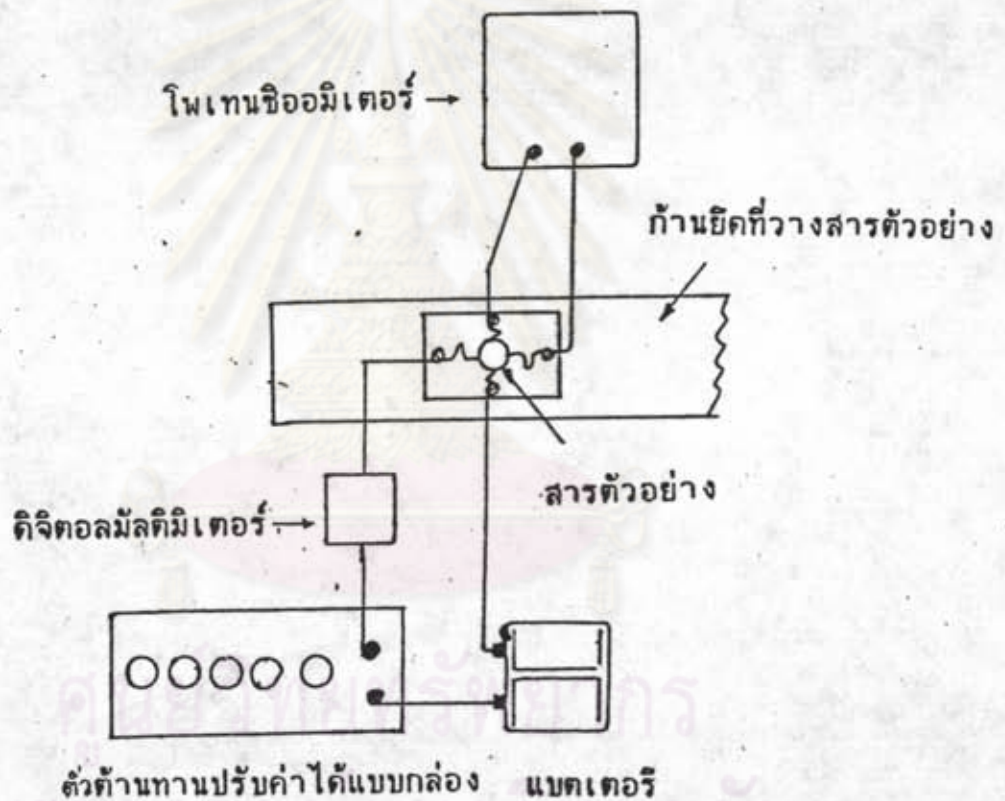
ตารางที่ 3.4 แสดงค่าความต้านทานระหว่างขั้วต่าง ๆ ของสารตัวอย่างหมายเลข 1

$R_{AB} = R_{BA}$ ( $\Omega$ )	$R_{AC} = R_{CA}$ ( $\Omega$ )	$R_{AD} = R_{DA}$ ( $\Omega$ )	$R_{BC} = R_{CB}$ ( $\Omega$ )	$R_{BD} = R_{DB}$ ( $\Omega$ )	$R_{CD} = R_{DC}$ ( $\Omega$ )
51.2	36	34.5	47.3	45.7	30.6

หลังจากที่วัดความต้านทานแล้วจึงทำการบ่อนกระแสเข้าและออกสองขั้วที่ชิดกัน แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างสองขั้วที่เหลือ การวัดกระแสใช้คิิจิตอลมัลติมิเตอร์ ความต่างศักย์ใช้โพเทนชิออมิเตอร์ ทั้งนี้เพราะความต่างศักย์มีค่า



น้อย ทำการเปลี่ยนค่ากระแสแล้ววัดความต่างศักย์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ซึ่งจะได้ความต้านทาน จากนั้นเปลี่ยนขั้วเป็นคู่อื่น ๆ เรื่อย ๆ ไป การจัดเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งแหล่งจ่ายไฟใช้แบตเตอรี่แห้ง 2 ก้อน และปรับค่ากระแสด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้แบบกลิ้ง ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.3 แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ระหว่างขั้วต่าง ๆ ของสารตัวอย่าง หมายเลข 1

$I_{AB}$ (mA)	$V_{CD}$ (mV)	$I_{BC}$ (mA)	$V_{DA}$ (mV)	$I_{CD}$ (mA)	$V_{AB}$ (mV)	$I_{DA}$ (mA)	$V_{BC}$ (mV)
6.32	0.189	6.19	0.136	6.60	0.200	9.20	0.203
9.15	0.273	8.48	0.185	8.39	0.252	11.49	0.252
11.79	0.352	10.40	0.227	10.26	0.309	13.13	0.285
14.28	0.427	13.54	0.294	13.18	0.399	15.31	0.335
16.19	0.483	15.97	0.349	16.44	0.496	17.02	0.369

จากตารางที่ 3.5 นี้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ตามสมการ

$$V = IR + C \quad (3.3)$$

ในกรณีวัด  $I_{AB}$  และ  $V_{CD}$  จะได้

$$V_{CD} = I_{AB} R_{ABCD} + C \quad (3.3.1)$$

โดยที่  $R_{ABCD} = \frac{\Delta V_{CD}}{\Delta I_{AB}}$  และ  $C$  เป็นค่าคงที่ สำหรับคู่อื่น ๆ ก็เขียนสมการความสัมพันธ์นี้ได้ในทำนองเดียวกัน จากข้อมูลข้างบนนี้ จะได้ความต้านทานต่าง ๆ ลี่ค่า เพื่อนำค่าทั้งสี่แทนค่าในสมการ (2.3) ทั้งนี้ต้องวัดความหนาของสารตัวอย่างด้วยไมโครมิเตอร์ ซึ่งวัดความหนา





เฉลี่ยได้ 0.0462 cm จะได้สภาพนำไฟฟ้าสี่ค่าและจะได้ค่าเฉลี่ยของสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างหมายเลข 1 ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างหมายเลข 1 ที่อุณหภูมิห้อง

กระแสและ ความต่างศักย์	ความต้านทาน (Ω)	ค่าคงที่ C (mV)	R Ω	R' Ω	σ (S/cm)	σ <sub>av.</sub> (S/cm)
$I_{AB}, V_{CD}$	$R_{ABCD} = 0.029838$	0.000287	$R_{ABCD}$	$R_{BCDA}$	186.82	187.03
$I_{BC}, V_{DA}$	$R_{BCDA} = 0.021735$	0.000989	$R_{BCDA}$	$R_{CDAB}$	185.61	
$I_{CD}, V_{AB}$	$R_{CDAB} = 0.030211$	0.0003323	$R_{CDAB}$	$R_{DABC}$	187.23	
$I_{DA}, V_{BC}$	$R_{DABC} = 0.021339$	0.000648	$R_{DABC}$	$R_{ABCD}$	188.46	

จากตาราง 3.6 ค่าคงที่ C มีค่าประมาณศูนย์ นั่นคือ กราฟระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าเป็นเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิด แสดงว่าเป็นไปตามกฎของโอห์มและยังเป็นแบบ ohmic ด้วย

การทดลองขึ้นไปจะเป็นการวัดสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่าง หมายเลข 1 ที่อุณหภูมิต่างๆตั้งแต่ 77 K ถึง อุณหภูมิห้อง ซึ่งอาจหาความสัมพันธ์ต่างๆได้ดังนี้ จากสมการ (2.3) จะได้ว่า (9)

$$\sigma_{R_{ABCD}} = C_1 \quad ; \quad C_1 = \text{ค่าคงที่} \quad (3.4)$$

$$\sigma_{R_{BCDA}} = C_2 \quad ; \quad C_2 = \text{ค่าคงที่} \quad (3.5)$$

โดย  $C_1$  ,  $C_2$  นี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของสารตัวอย่างและตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า จากสมการ (3.4) จะได้ว่า

$$R_{ABCD} / R_{BCDA} = C \quad ; \quad C = \text{ค่าคงที่}$$

ถ้าให้  $\sigma_0$  และ  $\sigma_T$  เป็นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ T ใดๆ ได้ว่า

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_T} = \frac{(R_{ABCD})_0}{(R_{ABCD})_T} = \frac{(R_{BCDA})_0}{(R_{BCDA})_T} \quad (3.6)$$

ในการทดลองนี้ อาจวัด  $\sigma_T$  ได้โดยวิธี  $R_{ABCD}$  หรือ  $R_{BCDA}$  อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้ผลอย่างเดียวกัน ถ้าเขียน  $(R_{ABCD})_0$  เป็น  $R_0$  และ  $(R_{ABCD})_T$  เป็น  $R_T$  และ  $\sigma_{av}$  ซึ่งเป็นสภาพนำไฟฟ้าเฉลี่ยสำหรับ  $\sigma_0$  จากสมการ (3.6) เขียนได้ว่า

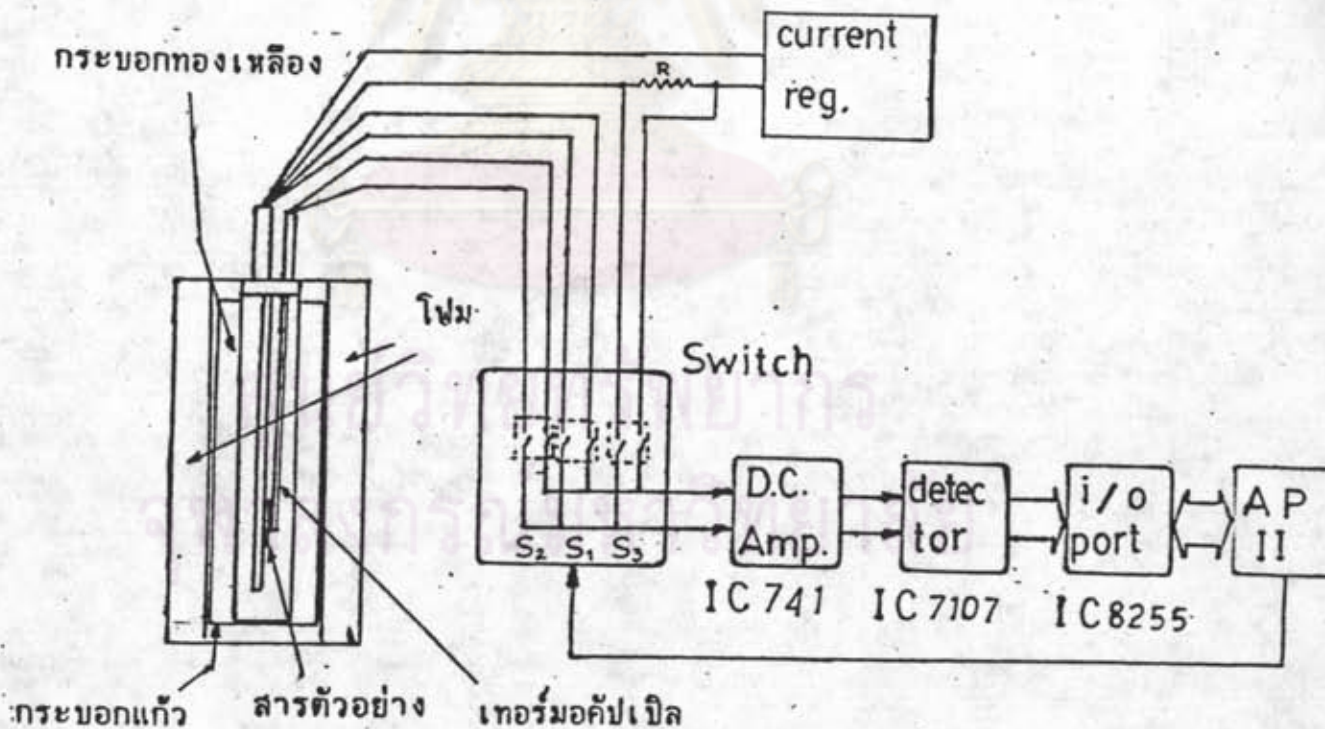
$$\sigma_T = \sigma_{av} \frac{R}{R_T}$$

$$\text{หรือ} \quad \sigma_T = \sigma_{av} \frac{RI_T}{V_T} \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.7) นี้ การที่จะคำนวณ  $\sigma_T$  ได้ โดยต้องวัด กระแสที่ป้อนเข้าสารตัวอย่าง  $I_T$  และ ความต่างศักย์  $V_T$  ที่เวลาเดียวกันหรือในเวลาใกล้เคียงกันที่สุด



แล้วในบทที่ 2 ซึ่งอธิบายเป็นส่วน ๆ เมื่อทุกส่วนต่อเชื่อมกันจะได้เครื่องมือที่พร้อมจะทำงานโดยวงจรต่าง ๆ ได้แก่ สวิตช์ reed relay ทั้งสาม วงจรขยายสัญญาณ วงจรไอซีเบอร์ 7107 ซึ่งทำหน้าที่วัดความต่างศักย์ วงจรรับ-ส่งข้อมูลซึ่งใช้ไอซีเบอร์ 8255 ทั้งหมดนี้จะประกอบลงบนการ์ดเชื่อมต่อเอนกประสงค์สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ Apple II จัดตั้งอุปกรณ์ส่วนที่เป็นภาชนะบรรจุในโครงเจเนอเรล ใส้กระบอกทองเหลืองที่บรรจุที่วางสารตัวอย่างเรียบร้อยแล้วลงไป สอดเทอร์มอคัปเปิลในกระบอกทองเหลือง จัดต่อสายไฟจากขั้วที่จะป้อนกระแสเข้ากับแหล่งจ่ายไฟที่เป็นวงจรกำเนิดกระแสคงที่ ต่อสายจากเทอร์มอคัปเปิล ขั้วที่จะวัดความต่างศักย์ และจากระหว่างปลาย 2 ข้างของตัวต้านทานที่จะวัดกระแสในรูปความต่างศักย์ การจัดเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการจัดเครื่องมือในการหาสถานะนำไฟฟ้า  
ที่อุณหภูมิใด ๆ

ขั้นตอนการทดลองหลังจากการจัดเครื่องมือเรียบร้อยแล้วมีดังนี้

1. ใส่ไนโตรเจนเหลวในกระบอกแก้วซึ่งห่อหุ้มด้วยโฟม โดยในตอนแรกเทลงไปเพียงเล็กน้อยเพราะไนโตรเจนเหลวในกระบอกแก้วจะเดือดอย่างรุนแรง ทำให้อาจเป็นอันตรายจากการกระเด็นของไนโตรเจนเหลวได้ และถ้าเทลงในปริมาณมาก ๆ กระบอกแก้วอาจแตกได้เนื่องจากการหดตัวของแก้วอย่างรวดเร็ว เมื่อกระบอกแก้วปรับอุณหภูมิต่ำลงมากแล้วก็สามารถเทลงมาก ๆ ได้ จนกระทั่งเกือบเต็ม
  2. ป้อนกระแสให้สารตัวอย่างเข้าและออกสองขั้วที่เลือกตามหลักการวัดแบบ แวน เดอ พาเว แหล่งจ่ายกระแสเป็นแบบจ่ายกระแสคงที่
  3. ทำการติดต่อกับพอร์ตอินพุตเอาต์พุตกับเครื่องคอมพิวเตอร์
  4. ปิดสวิตช์  $S_1$  และเปิดสวิตช์  $S_2, S_3$  เพื่อวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว
  5. ปิดสวิตช์  $S_2$  และเปิดสวิตช์  $S_1, S_3$  เพื่อวัดอุณหภูมิโดยวัดในรูปของความต่างศักย์จากเทอร์มอคัปเปิล
  6. ปิดสวิตช์  $S_3$  และเปิดสวิตช์  $S_1, S_2$  เพื่อวัดกระแสโดยวัดในรูปของความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทาน
  7. หน่วงเวลาประมาณ 2 นาที เพื่อรอให้อุณหภูมิของสารตัวอย่างสูงขึ้น แล้วไปทำขั้นตอนที่ 4, 5, 6 และ 7 กระทำซ้ำจนกระทั่งอุณหภูมิของสารตัวอย่างสูงขึ้นถึงอุณหภูมิห้อง
- ในขั้นตอนที่ 1 และ 2 กระทำด้วยมือ แต่ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3-7 ควบคุมและสั่งงานด้วยโปรแกรม ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก จ.

สำหรับสารตัวอย่างหมายเลข 1 ใช้ค่า  $R_{CDAB} = 0.030211$  หมายถึงให้กระแสเข้า C ออก D แล้ว วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว A กับ B จากผลการวัดซึ่งควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ชนิด Apple และได้คำนวณสภาพนำไฟฟ้า อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน ดังตารางที่ 3.7



ตารางที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของสาร  
ตัวอย่างหมายเลข 1 กับอุณหภูมิโต ๆ

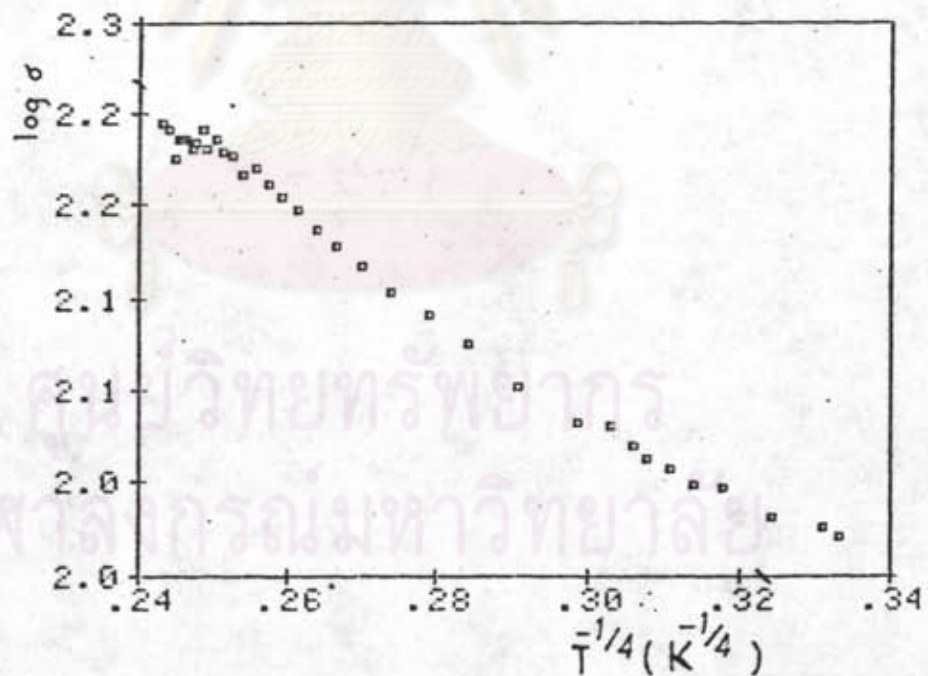
สภาพนำไฟฟ้า (S/cm)	อุณหภูมิ , T (K)	$\log \sigma$	$T^{-1/4}$ ( $K^{-1/4}$ )
108.03	81.02	2.03	0.333
109.64	83.57	2.04	0.331
112.15	89.41	2.05	0.325
115.33	96.32	2.06	0.319
117.89	103.05	2.07	0.314
120.73	107.89	2.082	0.310
121.84	111.68	2.086	0.308
123.74	114.88	2.090	0.305
125.46	118.07	2.098	0.3034
125.73	119.48	2.099	0.302
126.71	122.02	2.103	0.301
128.12	126.63	2.108	0.298
131.90	136.72	2.120	0.292
135.74	145.66	2.133	0.288
138.99	154.69	2.143	0.2836
142.97	163.78	2.155	0.279
146.34	172.43	2.165	0.276
149.14	181.15	2.174	0.273
151.63	189.08	2.181	0.269
152.57	196.44	2.183	0.267
155.79	203.32	2.193	0.265

สภาพนำไฟฟ้า (S/cm)	อุณหภูมิ, T (K)	log $\sigma$	$T^{-1/4}$ ( $K^{-1/4}$ )
158.01	209.82	2.199	0.263
158.60	216.06	2.200	0.261
161.14	221.94	2.21	0.259
161.16	227.41	2.207	0.258
162.22	232.40	2.20	0.256
164.49	237.25	2.216	0.255
164.53	241.72	2.216	0.254
164.59	246.04	2.216	0.253
16.95	249.90	2.223	0.252
168.07	253.66	2.225	0.251
168.03	257.29	2.225	0.249
168.78	260.24	2.230	0.249
170.53	263.48	2.232	0.248
171.67	266.89	2.235	0.2474
171.68	269.52	2.235	0.2468
172.77	272.10	2.237	0.246
172.47	275.10	2.237	0.246
174.69	277.10	2.242 <sub>a</sub>	0.245
174.67	278.87	2.242	0.245
176.25	280.60	2.246	0.244
175.49	282.35	2.244	0.244
175.51	284.10	2.244	0.244
176.31	285.12	2.246	0.243
175.49	286.35	2.244	0.243



สภาพนำไฟฟ้า (S/cm)	อุณหภูมิ , T (K)	log $\sigma$	$T^{-1/4}$ ( $K^{-1/4}$ )
178.22	287.57	2.251	0.243
179.04	288.6	2.253	0.243

จากตารางข้อมูลดังกล่าวข้างบนนี้เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log \sigma$  กับ  $T^{-1/4}$  ได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log \sigma$  กับ  $T^{-1/4}$  ของสารตัวอย่างหมายเลข 1

สำหรับสารตัวอย่างอีก 2 สารตัวอย่างนั้นการทดลองต่าง ๆ เป็นเช่นเดียวกับการทดลองในสารตัวอย่างแรก จึงจะได้บอกผลการทดลองต่าง ๆ ดังนี้

สำหรับสารตัวอย่างหมายเลข 2

$$\text{ความหนาเฉลี่ยของสารตัวอย่าง} = 0.049 \text{ cm}$$

ตารางที่ 3.8 แสดงความต้านทานระหว่างขั้วต่าง ๆ ของสารตัวอย่างหมายเลข 2

$R_{AB} = R_{BA}$ ( $\Omega$ )	$R_{AC} = R_{CA}$ ( $\Omega$ )	$R_{AD} = R_{DA}$ ( $\Omega$ )	$R_{BC} = R_{CB}$ ( $\Omega$ )	$R_{BD} = R_{DB}$ ( $\Omega$ )	$R_{CD} = R_{DC}$ ( $\Omega$ )
82	78	55	102	80	70

ตารางที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของสารตัวอย่างหมายเลข 2

$I_{AB}$ (mA)	$V_{CD}$ (mV)	$I_{BC}$ (mA)	$V_{DA}$ (mV)	$I_{CD}$ (mA)	$V_{AB}$ (mV)	$I_{DA}$ (mA)	$V_{BC}$ (mV)
6.1	0.269	6.1	0.179	6.5	0.289	6.0	0.172
9.1	0.396	9.1	0.261	9.9	0.437	8.8	0.251
13.5	0.583	13.6	0.385	13.9	0.658	13.4	0.379
17.5	0.774	15.2	0.429	15.5	0.668	15.0	0.431



ตารางที่ 3.10 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างหมายเลข 2 ที่อุณหภูมิห้อง

กระแสและ ความต่างศักย์	ความต้านทาน ( $\Omega$ )	ค่าคงที่, C (mV)	R $\Omega$	R' $\Omega$	$\sigma$ (S/cm)	$\sigma_{25}$ (S/cm)
$I_{AB}, V_{CD}$	$R_{ABCD} = 0.042779$	0.007129	$R_{ABCD}$	$R_{BCDA}$	130.34	123.99
$I_{BC}, V_{DA}$	$R_{BCDA} = 0.027486$	0.011159	$R_{BCDA}$	$R_{CDAB}$	119.79	
$I_{CD}, V_{AB}$	$R_{CDAB} = 0.050022$	-0.04388	$R_{CDAB}$	$R_{DABC}$	117.76	
$I_{DA}, V_{BC}$	$R_{DABC} = 0.028538$	0.0000385	$R_{DABC}$	$R_{ABCD}$	128.07	

ตารางที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ  
สารตัวอย่างหมายเลข 2 กับอุณหภูมิใด ๆ

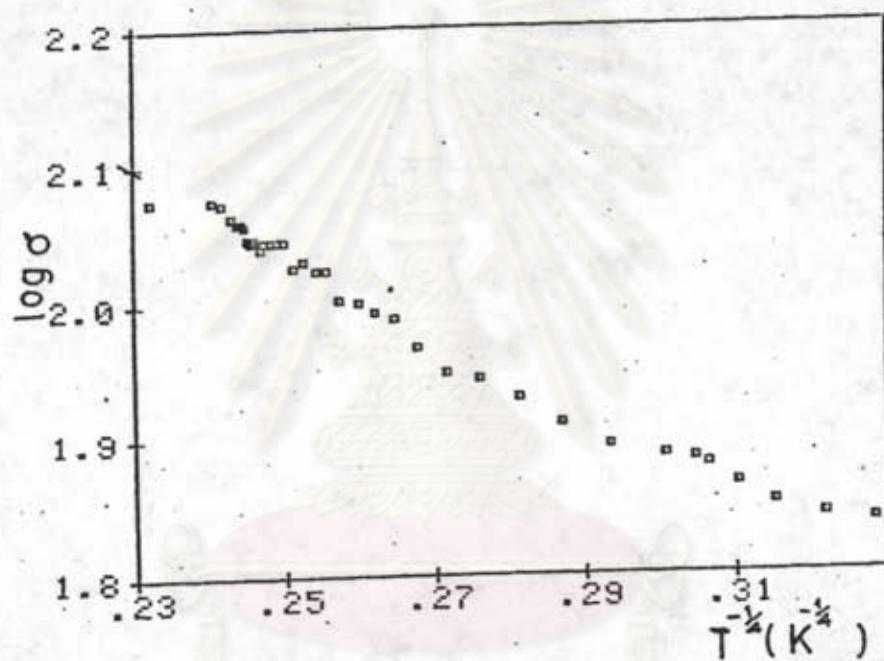
สภาพนำไฟฟ้า (S/cm)	อุณหภูมิ, T (K)	$\log \sigma$	$T^{-1/4}$ ( $K^{-1/4}$ )
68.43	82.46	1.835	0.332
68.58	84.19	1.836	0.330
69.56	88.02	1.842	0.327
69.58	93.15	1.842	0.322
70.87	98.54	1.850	0.317

สภาพนำไฟฟ้า (S/cm)	อุณหภูมิ, T (K)	$\log \sigma$	$T^{-3/4}$ ( $K^{-3/4}$ )
72.41	103.40	1.860	0.314
74.46	111.78	1.872	0.308
76.28	114.06	1.882	0.306
76.46	115.88	1.883.	0.305
76.97	119.17	1.886	0.303
77.16	125.65	1.895	0.299
78.10	134.80	1.893	0.294
80.98	142.80	1.908	0.289
83.01	151.41	1.929	0.285
84.90	159.29	1.929	0.282
86.43	167.31	1.937	0.278
88.29	175.22	1.946	0.275
88.73	182.73	1.948	0.272
90.99	189.89	1.959	0.269
93.59	196.53	1.971	0.267
96.84	202.55	1.99	0.265
98.28	208.10	1.99	0.263
97.99	213.45	1.99	0.262
100.03	218.49	2.00	0.260
100.06	223.72	2.00	0.259
103.22	288.52	2.01	0.257
105.16	232.88	2.022	0.256
105.142	236.96	2.02	0.255
106.84	204.42	2.029	0.254



สภาพนำไฟฟ้า (S/cm)	อุณหภูมิ, T (K)	$\log \sigma$	$T^{-3/4}$ (K <sup>-3/4</sup> )
107.16	244.18	2.030	0.253
105.77	247.39	2.024	0.252
106.83	251.28	2.029	0.251
110.41	254.27	2.043	0.250
112.27	257.09	2.050	0.250
111.88	259.39	2.049	0.249
110.35	261.71	2.043	0.249
109.64	264.05	2.040	0.248
109.99	266.42	2.041	0.248
109.68	268.66	2.040	0.247
110.893	270.61	2.045	0.247
114.21	272.15	2.058	0.246
110.40	273.45	2.043	0.246
112.23	274.90	2.050	0.246
114.17	275.95	2.058	0.245
113.42	277.15	2.055	0.245
114.23	278.45	2.058	0.245
114.21	279.65	2.658	0.245
114.18	280.65	2.06	0.244

จากตารางที่ 3.11 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log \sigma$  กับ  $T^{-1/4}$  แสดงในรูปที่ 3.6



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log \sigma$  กับ  $T^{-1/4}$   
ของสารตัวอย่างหมายเลข 2.



สำหรับสารตัวอย่างหมายเลข 3 ได้ผลการทดลองเป็นดังนี้

ความหนาเฉลี่ย = 0.0438 cm

ตารางที่ 3.12 แสดงความต้านทานระหว่างขั้วต่าง ๆ ของสารตัวอย่างหมายเลข 3

$R_{AB} = R_{BA}$ ( $\Omega$ )	$R_{AC} = R_{CA}$ ( $\Omega$ )	$R_{AD} = R_{DA}$ ( $\Omega$ )	$R_{BC} = R_{CB}$ ( $\Omega$ )	$R_{BD} = R_{DB}$ ( $\Omega$ )	$R_{CD} = R_{DC}$ ( $\Omega$ )
56	60	62	58	64	68

ตารางที่ 3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของสารตัวอย่างหมายเลข 3

$I_{AB}$ (mA)	$V_{CD}$ (mV)	$I_{BC}$ (mA)	$V_{DA}$ (mV)	$I_{CD}$ (mA)	$V_{AB}$ (mV)	$I_{DA}$ (mA)	$V_{BC}$ (mV)
5.3	0.145	5.1	0.200	4.6	0.127	4.54	0.178
8.1	0.219	8.2	0.316	8.1	0.220	9.36	0.364
10.54	0.284	10.6	0.408	10.49	0.283	12.76	0.493
13.18	0.353	13.2	0.510	13.1	0.351	17.10	0.656
17.55	0.470	17.7	0.681	17.4	0.465	-	-



ตารางที่ 3.14 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างหมายเลข 3 ที่อุณหภูมิห้อง

กระแสและ ความต่างศักย์	ความต้านทาน ( $\Omega$ )	ค่าคงที่, C (mV)	R $\Omega$	R' $\Omega$	$\sigma$ (S/cm)	$\sigma_{av}$ (S/cm)
$I_{AB}, V_{CD}$	$R_{ABCD} = 0.026488$	0.004637	$R_{ABCD}$	$R_{BCDA}$	157.4	158.5
$I_{BC}, V_{DA}$	$R_{BCDA} = 0.038256$	0.004322	$R_{BCDA}$	$R_{CDAB}$	157.5	
$I_{CD}, V_{AB}$	$R_{CDAB} = 0.26433$	0.005518	$R_{CDAB}$	$R_{DABC}$	159.5	
$I_{CD}, V_{AB}$	$R_{DABC} = 0.037376$	0.016105	$R_{DABC}$	$R_{ABCD}$	159.4	

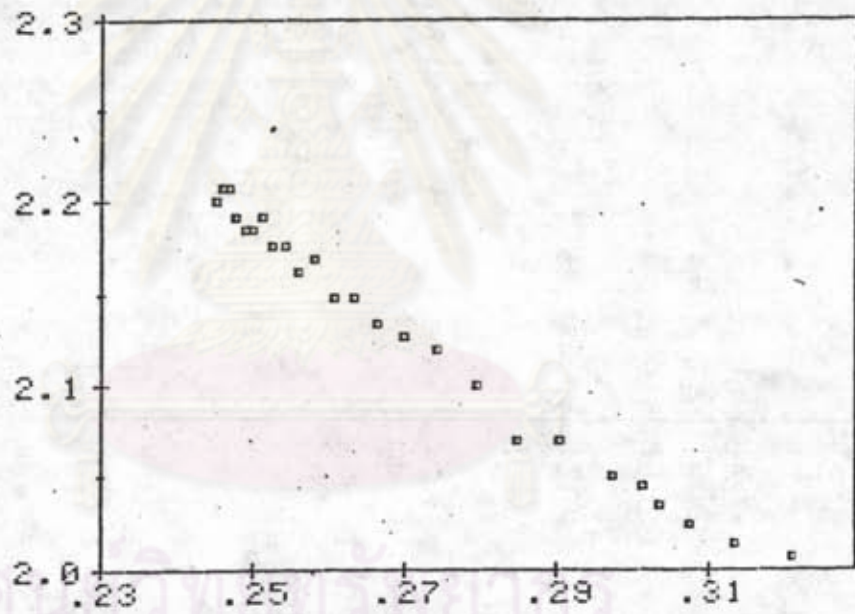
ตารางที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างหมายเลข 3 กับอุณหภูมิใด ๆ

สภาพนำไฟฟ้า (S/cm)	อุณหภูมิ, T (K)	$\log \sigma$	$T^{-1/4}$ ( $K^{-1/4}$ )
98.13	78.78	1.992	0.336
97.08	81.34	1.987	0.333
100.44	87.43	2.002	0.327
101.63	93.70	2.007	0.321
104.18	100.62	2.018	0.316
103.00	106.59	2.013	0.311
105.47	111.78	2.013	0.311
106.79	116.34	2.029	0.305
108.37	119.53	2.035	0.302



สภาพนำไฟฟ้า (S/cm)	อุณหภูมิ (K)	$\log \sigma$	$T^{-1/4}$ (K <sup>-1/4</sup> )
111.03	120.89	2.045	0.302
108.22	123.60	2.034	0.300
110.95	131.47	2.045	0.295
117.28	139.89	2.069	0.291
118.65	147.11	2.074	0.287
122.22	155.34	2.087	0.283
125.63	163.15	2.099	0.280
129.44	171.43	2.112	0.276
129.53	179.58	2.112	0.273
133.58	186.96	2.126	0.270
133.58	194.07	2.126	0.268
135.80	200.74	2.133	0.266
140.15	218.78	2.147	0.260
147.61	224.01	2.169	0.259
145.00	229.08	2.161	0.257
147.60	233.69	2.169	0.256
155.77	253.45	2.192	0.250
155.55	256.57	2.192	0.250
152.77	259.39	2.184	0.250
155.66	262.75	2.192	0.248
158.43	265.63	2.200	0.248
161.53	268.00	2.208	0.247

จากตารางข้อมูลดังกล่าวนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log \sigma$  กับ  $T^{-1/4}$  ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log \sigma$  กับ  $T^{-1/4}$  ของสารตัวอย่างหมายเลข 3



### 3.3 การวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคที่อุณหภูมิห้อง

ดังได้กล่าวแล้วว่า เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่จุดสองจุดของสารตัวอย่างจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะจากบริเวณที่อุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่า จึงเกิดการสะสมประจุที่บริเวณร้อนหรือเย็นเล็กน้อยต่างกันทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดที่ร้อนและเย็น ทำให้เราวิเคราะห์ได้ว่าพาหะเป็นชนิดใดอีกด้วย การทดลองในขั้นตอนนี้จัดเครื่องมือและอุปกรณ์ ดังรูปที่ 2.17, 2.18 แล้วการให้ความร้อนโดยต่อตัวต้านทานเข้ากับถ่านไฟฉาย 2 ก้อน (3 โวลต์) ตัวต้านทานจะร้อนมีผลทำให้แท่งอลูมิเนียมและสารตัวอย่างร้อนขึ้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์มอคัปเปิลคงที่หรือไม่เพิ่มอีกแล้ว จึงทำการวัดอุณหภูมิที่จุดหรือขั้วร้อน (ได้รับการให้ความร้อน) ส่วนอีกขั้วไม่ต้องวัด เพราะขั้วตรงข้ามนี้สัมผัสอยู่บนแท่งอลูมิเนียมขนาดใหญ่ ทำหน้าที่เป็นแผ่นระบายความร้อนทำให้อุณหภูมิขั้วนี้คงที่ที่อุณหภูมิห้องตลอดเวลา การวัดผลต่างอุณหภูมิระหว่างจุดสองจุดจึงทำได้โดยวัดที่ขั้วร้อนขั้วเดียวเท่านั้น สำหรับการวัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดดังกล่าวได้ใช้ปลายลวดทองแดงขนาดเล็ก ๆ ชนกับขอบสารตัวอย่างแล้วใช้กาวคาร์บอนเชื่อมตรงจุดสัมผัสนั้น ปล่อยให้แห้งจึงจะใช้งานได้ การวัดความต่างศักย์จากเทอร์มอคัปเปิลและความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ร้อนและเย็นนี้ต้องวัดในเวลาเดียวกัน แต่ในทางปฏิบัติก็วัดขณะที่อุณหภูมิของสารตัวอย่างคงที่ ทำให้การวัดไม่จำเป็นต้องวัดในเวลาเดียวกันได้ สัมประสิทธิ์ซีเบคหาได้จาก

$$\text{สัมประสิทธิ์ซีเบค} = \frac{\text{ความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด}}{\text{ผลต่างของอุณหภูมิ}} ; S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (3.8)$$

ซึ่งการเทียบความต่างศักย์ที่วัดได้จากเทอร์มอคัปเปิลเป็นอุณหภูมิหาได้จากสมการ  $T = (\text{ความต่างศักย์ที่อ่านได้}) / 0.04$  ซึ่งดูได้จากตารางที่ 3.1 ผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์ที่อุณหภูมิห้องของสารตัวอย่างพอลิซิลิโคนโรลิ่งสาม แสดงในตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 แสดงข้อมูลการวัดและสัมประสิทธิ์ซีเบคที่  
อุณหภูมิห้องของสารตัวอย่างพอลิไพร์โรล

สารตัวอย่าง	ความต่างศักย์ $V$ (V)	$\Delta T = T_1 - T_2$ (K)	$\Delta V = V_1 - V_2$ ( $\mu V$ )	$S = \frac{\Delta V}{\Delta T}$ ( $\mu V/K$ )	$\sigma_{av}$ (S/cm)
4	3.0	8.2	63.6	7.8	64.0
2	3.0	6.0	44.4	7.4	123.9
5	3.0	8.2	149.75	18.3	114.8

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย