

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง



การวิจัยในครั้งนี้จุดประสงค์ส่วนใหญ่จะศึกษาเทคนิคต่าง ๆ ที่อุณหภูมิต่ำ และพยายามเลือกใช้วัสดุที่มีอยู่ในบ้านเรา สำหรับสร้างอุปกรณ์บางอย่างเพื่อใช้ทดลอง นอกจากนี้ยังศึกษาผลการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น รายละเอียดเกี่ยวกับการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและเทคนิคต่าง ๆ ในการทดลอง จะได้กล่าวในหัวข้อข้างล่างนี้

4.1 ภาชนะใส่ไนโตรเจนเหลว

ภาชนะใส่ไนโตรเจนเหลวทำจากโพลี โฟมที่ใช้นี้สามารถเก็บไนโตรเจนเหลวได้นานพอสมควรประมาณ 25 - 30 นาที นอกจากนี้ยังมีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับ dewar บรรจุไนโตรเจนเหลวซึ่งสั่งซื้อจากต่างประเทศ และเพื่อให้โพลีเก็บไนโตรเจนเหลวได้นานมากขึ้น หลังจากเขาจะเป็นร่องสำหรับใส่ไนโตรเจนเหลวแล้ว เราอาจใช้แอสเบสตอสปิดโพลีโดยรอบเพื่อป้องกันไม่ให้ไนโตรเจนเหลวและความร้อนไหลออกทางด้านข้าง โพลีขนาดใหญ่ ๆ จะช่วยทำให้เรา เก็บไนโตรเจนเหลว ได้นานขึ้นเช่นกัน

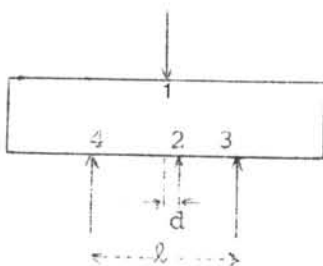
4.2 เทคนิคต่าง ๆ ในการสร้างจุดสัมผัสทางไฟฟ้า

ในการสร้างจุดสัมผัสทางไฟฟ้ากับผลึกกึ่งตัวนำ ได้ทดลองใช้วิธีต่าง ๆ หลายวิธีพบว่าส่วนมากไม่ประสบความสำเร็จ ตัวอย่างเช่น ได้พยายามฉาบผิวของผลึกเป็นจุดเล็ก ๆ ด้วยทองแดงโดยใช้ evaporation chamber จากนั้นขัดกริลลวดตัวนำกับผิวทองแดงนี้ ผลปรากฏว่าผิวทองแดงที่ฉาบนี้ไม่เกาะกับผลึกแน่นอนจริง เมื่อถูกกระทบกระเทือนจะทำให้ลวดตัวนำหลุดออกจากผิวของผลึก ซึ่งเป็นจุดสัมผัสที่ดีไม่ได้ นอกจากนี้ได้พยายามใช้ epoxy ผสมกับผงอะลูมิเนียม เพื่อติดปลายลวดตัวนำกับผลึก แต่พบว่าเมื่อ epoxy แข็งตัวแล้ว

ไม่นำไฟฟ้าแม้ว่าจะใช้ผงเงินแทนผงอะลูมิเนียมแล้วก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้เพราะผสมผงเงินใน epoxy น้อยเกินไป ถ้าจะให้ได้ดีผลแล้วต้องผสมผงเงินใน epoxy ประมาณ 90 % โดยน้ำหนัก ในขั้นสุดท้ายเราจึงหันไปใช้ตัวนำเหลวช่วยในการสร้างจุดสัมผัส ตัวนำเหลวเป็นโลหะผสมระหว่างแคลเซียมและอินเดียม มีคุณสมบัติเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องซึ่งช่วยให้ลวดทองแดงสัมผัสกับผลึกกึ่งตัวนำดีขึ้น จุดสัมผัสกับผลึกมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.2 มม. จุดสัมผัสแบบนี้ทำหน้าที่ได้ดีพอประมาณ

4.3 ความสัมพันธ์ของจุดสัมผัสที่ใช้วัดความต่างศักย์ของฮอลล์ของผลึกกึ่งตัวนำ

ในการวางตำแหน่งของจุดสัมผัสในการทดลองนั้น ปรากฏว่าจุดสัมผัสคู่ที่ใช้วัดความต่างศักย์ของฮอลล์ (คือจุด 1 และจุด 2 ดังรูป 4.1) สร้างให้ตรงกันยากมาก เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กความต่างศักย์ระหว่างลวดคู่นี้ควรจะเป็นศูนย์ แต่ในการทดลองจริง ๆ ถึงแม้จะไม่มีสนามแม่เหล็ก เราก็อาจวัดความต่างศักย์ของลวดคู่นี้ได้ แสดงว่าจุดสัมผัสทั้งสองไม่ตรงกันจริง ความต่างศักย์ที่วัดได้เป็นความต่างศักย์ของจุด 1 และจุด 2 ซึ่งสัมพันธ์รวมกับความต่างศักย์ของฮอลล์ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.1 แสดงจุดสัมผัสทางไฟฟ้าของผลึกกึ่งตัวนำ

สำหรับการทดลองที่ทำมาแล้ว เราสามารถคำนวณระยะที่จุดสัมผัสทั้งสองเหลื่อมออกจากกัน (d) ได้ดังนี้ จากกฎทางไฟฟ้าเราได้

$$d = \frac{V_{12} l}{V_{34}}$$

โดย λ เป็นระยะระหว่างจุด 3 และจุด 4 V_{12} และ V_{34} เป็นความต่างศักย์ระหว่างจุด 1 กับจุด 2 และจุด 3 กับจุด 4 ตามลำดับ ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก

เมื่อพลิกกึ่งตัวนำอยู่ในสถานะสวอตอย่างี่สร้างด้วยเทฟลอน $V_{12} = 9.41 \times 10^{-4}$ โวลต์ $V_{34} = 10.584 \times 10^{-3}$ โวลต์ เมื่อ $B = 0$ และ $\lambda = 0.93$ ซม. แทนค่าในสมการข้างบนได้

$$d = \frac{9.41 \times 10^{-4} \times 0.93}{10.584 \times 10^{-3}}$$

$$= 0.8 \text{ มม.}$$

เมื่อพลิกกึ่งตัวนำอยู่ในสถานะตัวอย่างี่สร้างด้วยพลาสติกใส $V_{12} = 1.92 \times 10^{-4}$ โวลต์ $V_{34} = 9.456 \times 10^{-3}$ โวลต์ ที่ $B = 0$ และ $\lambda = 0.98$ ซม. แทนค่าในสมการข้างบนได้

$$d = \frac{1.92 \times 10^{-4} \times 0.98}{9.456 \times 10^{-3}}$$

$$= 0.2 \text{ มม.}$$

การที่เราจะปรับตำแหน่งของจุดสัมผัสคู่ที่ใช้วัดความต่างศักย์ของฮอลล์ให้ตรงกันทำได้ยากมาก แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียนี้ไม่มีผลต่อการคำนวณหาความหนาแน่นของพาหะของสารตัวอย่าง เนื่องจากเราใช้ความชันของกราฟระหว่าง B กับ V : ซึ่งก็คือ $\frac{B}{V_H}$ นั้นเอง

4.4 ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ของฮอลล์ของสารตัวอย่าง

จากการวัดความต่างศักย์ของฮอลล์ เราสามารถทราบชนิดของพาหะตัวนำของสารตัวอย่าง นอกจากนี้ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของพาหะเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ ดังจะได้กล่าวโดยละเอียดต่อไป

4.4.1 ผลึกซิลิกอนสารตัวอย่าง

จากการทดลองพบว่าพาหะของผลึกซิลิกอนสารตัวอย่าง คืออิเล็กตรอน นั่นคือผลึกซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ความหนาแน่นเฉลี่ยของอิเล็กตรอนอิสระที่อุณหภูมิห้อง $= (7.27 \pm 0.03) \times 10^{19}$ เมตร⁻³

4.4.2 ผลึกกึ่งตัวนำสารตัวอย่าง

จากการทดลองพบว่าพาหะของสารกึ่งตัวนำนี้คือโฮล แสดงว่า ผลึกนี้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ความหนาแน่นของโฮลที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงความหนาแน่นของโฮลของผลึกกึ่งตัวนำ

T (°K)	P (เมตร ⁻³)
300	$(9.54 \pm 0.10) \times 10^{22}$
77	$(4.28 \pm 0.07) \times 10^{21}$

จากตารางข้างบนจะได้ $\frac{P_{300}}{P_{77}} = 22.29$ เราอาจเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎีทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำได้ดังนี้ จากสมการความหนาแน่นของโฮล

$$P = \frac{\left[1 + \frac{4N_a}{P_c} \exp \frac{E_a}{\beta} \right]^{1/2}}{2 \exp \frac{E_a}{\beta}} P_0 - P_0$$

เมื่อ $\Gamma = 2(2\pi m_h k_B T/h^2)^{3/2}$ เนื่องจากผลึกกึ่งตัวนำที่ใช้ทดลองเราไม่ทราบว่าเป็นสารอะไร คุณสมบัติต่าง ๆ ของผลึกกึ่งตัวนำนี้เราก็ไม่ทราบเช่นจำนวนแอกเซพเตอร์ที่ใส่ (dope) ในสาร ระดับพลังงานของแอกเซพเตอร์ และระนาบต่าง ๆ ของผลึกนี้ แต่จำนวนแอกเซพเตอร์เราอาจหาได้จากการทดลองที่อุณหภูมิสูง ๆ กล่าวคือที่อุณหภูมิสูง ๆ แอกเซพเตอร์ถูกไอออนไนซ์หมด นั่นคือความหนาแน่นของโฮลไม่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิ ความหนาแน่นของโฮลที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้จะมีค่าประมาณความหนาแน่นของแอกเซพเตอร์ในทางองเดียวกันเราอาจหาค่า E_a ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ เช่นที่อุณหภูมิต่ำของฮีเลียมเหลว (4°K) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในการวิจัยครั้งนี้เราไม่สามารถจะทดลองถึงที่กล่าวแล้วข้างบนได้

ด้วยเหตุนี้เพื่อที่จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโฮลไปกับอุณหภูมิ เราจึงสมมุติให้ $N_a \approx 10^{23}$ เมตร⁻³ และ $\approx 10^{24}$ เมตร⁻³ $E_a = 0.04$ eV และ 0.05 eV และ $m_h = 0.4 m$ เราสามารถคำนวณหาค่า p ที่อุณหภูมิต่ำ 300°K และ 77°K จากสมการข้างบน ทั้งแสดงไว้ในตารางข้างล่าง

ตารางที่ 4.2 แสดงความหนาแน่นของโฮลของสารกึ่งตัวนำที่คำนวณได้จากทฤษฎี

N_a (เมตร ⁻³)	E_a (eV)	p (เมตร ⁻³)	
		$T = 300^\circ\text{K}$	$T = 77^\circ\text{K}$
10^{23}	0.04	9.35×10^{22}	6.69×10^{21}
10^{23}	0.05	9.10×10^{22}	6.44×10^{21}
10^{24}	0.04	6.69×10^{23}	4.37×10^{22}
10^{24}	0.05	6.03×10^{23}	2.08×10^{22}

จากตารางข้างบนเราพบว่า เมื่ออุณหภูมิต่ำลงความหนาแน่นของโฮลมีค่าลดลงในทุกกรณี ผลการทดลองในตารางที่ 4.1 สอดคล้องกับทฤษฎีทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำดังแสดงในตารางข้างบน

4.4.3 ทองแดงสารตัวอย่าง

พาหะตัวนำของทองแดงคืออิเล็กตรอน เราสามารถตรวจสอบได้จากปรากฏการณ์ของฮอลล์ เนื่องจากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระของทองแดงมีค่าสูง ดังนั้นในการวัดความต่างศักย์ของฮอลล์จึงต้องใช้กระแสไฟฟ้ามากและความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ด้วยเหตุนี้ เราจึงทดลองได้เพียงไม่กี่จุด ผลการทดลองของทองแดงแสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของทองแดง

ทองแดงหนา 3.69×10^{-3} ซม.

T (°K)	σ ($\times 10^7$ โอห์ม ⁻¹ เมตร ⁻¹)	n ($\times 10^{28}$ เมตร ⁻³)
300	4.77 ± 0.01	8.24 ± 0.49
77	34.97 ± 0.03	7.83 ± 0.26

ทองแดงหนา 3.88×10^{-3} ซม.

T (°K)	σ ($\times 10^7$ โอห์ม ⁻¹ เมตร ⁻¹)	n ($\times 10^{28}$ เมตร ⁻³)
300	4.72 ± 0.02	9.12 ± 0.37
77	34.67 ± 0.05	8.22 ± 0.35

ความหนาของทองแดง ($\times 10^3$ ซม.)	τ_{300}/τ_{77}
3.69	0.13
3.88	0.12

เนื่องจากทองแดงสารตัวอย่างที่ใช้ทดลองมีความหนาไม่สม่ำเสมอ การ
เบี่ยงเบนมาตรฐานของทองแดงมีค่าสูง ดังแสดงในตารางข้างล่าง ผลเสียจากเหตุนี้ทำให้

ความหนาเฉลี่ยของทองแดง ($\times 10^{-3}$ ซม.)	การเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\times 10^{-3}$)
3.69	0.70
3.88	0.50

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตัวนำที่ได้จากการทดลองมีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง เนื่องจาก
ทองแดงเป็นโลหะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน = 1 และมีจำนวนอะตอมในหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เมตร
= 8.50×10^{28} อะตอม ดังนั้นตามทฤษฎีแล้วความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตัวนำจะมีค่า
= 8.50×10^{28} เมตร⁻³ และมีค่าไม่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่าที่
อุณหภูมิ 300°K ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงกว่าที่อุณหภูมิ 77°K เล็กน้อย อาจเป็น
ไปได้ที่ว่าอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานความร้อนสามารถเปลี่ยนระดับพลังงานไปอยู่
ในแถบนำได้ แต่ความน่าจะเป็นที่จะเกิดแบบนี้มีน้อยมาก สำหรับสภาพนำไฟฟ้าของทองแดง
จากการทดลองปรากฏว่าได้ค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดจากตารางคือ 5.88×10^7 โอห์ม⁻¹ เมตร⁻¹

เพราะทองแดงบนแผ่นปรินท์มีสารอื่นเจือปนอยู่ด้วย และอัตราส่วนของ $\tau_{300}/\tau_{77} = 0.125$ ดังแสดงในตารางข้างบน ผลการทดลองนี้แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น τ มีค่าลดลง เราสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎีทางไฟฟ้าดักแล้วในตัวที่ 1 ดังนี้

$$\text{ที่อุณหภูมิสูง} \quad \frac{C}{T} \ll 1 \quad \tau \propto \frac{1}{T}$$

$$\text{ที่อุณหภูมิต่ำ} \quad \frac{C}{T} \gg 1 \quad \tau \propto \frac{1}{T^5}$$

สำหรับทองแดง $C = 3.18^\circ\text{K}$ ที่อุณหภูมิห้อง $\frac{C}{T} = 1.16$ และที่อุณหภูมิ 77°K

$\frac{C}{T} = 4.52$ ซึ่งไม่อยู่ในเงื่อนไขที่กล่าวข้างบน แต่อย่างไรก็ตามจากเงื่อนไขทั้งสองกรณีเราพอจะสรุปได้ว่า τ ของอิเล็กทรอนิกส์ตัวนำมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอันตรกิริยากับโฟนอนมีค่ามากขึ้น ผลการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้อธิบายแล้วข้างต้น

4.5 พลังงานความร้อนที่สูญเสียไป

การทดลองวัดสภาพนำความร้อนของสารตัวอย่าง ต้องสูบลูกอากาศออกจนความดันเหลือประมาณ 10^{-2} ทอร์ตลอดเวลาทดลอง เพราะเมื่อทดลองเทียบกับกรณีที่เราปิดลิ้นท่อสุญญากาศ (หลังจากสูบลูกอากาศออก) ขณะทดลองพบว่าในกรณีหลังมีการสูญเสียพลังงานความร้อนมากกว่า กล่าวคือขณะที่พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ให้ความร้อนเท่ากับในกรณีแรก เมื่อเราสูบลูกอากาศออกตลอดเวลา อุณหภูมิของอุปกรณ์ให้ความร้อนหรืออุณหภูมิที่ผิวบนของสารสูงกว่าในกรณีหลัง เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อปิดลิ้นท่อสุญญากาศแล้วโมเลกุลของซิลิโคนที่พุ่งออกมาเพิ่มขึ้น ซึ่งเรารู้จากความดันภายในภาชนะทดลองสูงขึ้นเรื่อย ๆ การสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนของโมเลกุลของซิลิโคนที่พุ่งออกมามีค่ามากกว่าการสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับอากาศที่สูบลูกออกไป นอกจากการสูญเสียพลังงานจากการพาที่กล่าวข้างบน ยังมีการสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีและจากการนำความร้อนของลวดทองแดงของอุปกรณ์ให้ความร้อนและของเทอร์มิสเตอร์ เราสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพลังงานความร้อนจากสาเหตุเหล่านี้ได้ดังนี้

4.5.1 การสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี

จากกฎของสตีฟาน (Stefan's law)

$$R = e\sigma (T^4 - T_0^4)$$

เมื่อ R คืออัตราการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการแผ่รังสีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ e คือสภาพปล่อย (emissivity) มีค่าขึ้นกับชนิดของสาร สำหรับอุลุมิเนียม $e = 0.022$ $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ในระบบเอสไอ T เป็นอุณหภูมิของสารที่แผ่รังสีความร้อนออกมา T_0 เป็นอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของสาร ถ้าสารแผ่รังสีความร้อนนี้มีพื้นที่ผิว A \dot{Q} เป็นอัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี จากสมการ ข้างบนเราได้

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= RA \\ &= e\sigma (T^4 - T_0^4) A\end{aligned}$$

คิดในกรณีที่ภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็ง $T_0 = 273^\circ\text{K}$ เลือกพิจารณาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

3 ค่า คือที่ 283°K 293°K และ 303°K อุณหภูมิให้ความร้อนมีพื้นที่ผิว

$= 19.72 \times 10^{-4}$ เมตร แทนค่า e, σ, T, T_0 และ A ในสมการข้างบนได้

$$\begin{aligned}\text{ที่ } 283^\circ\text{K} \quad \dot{Q} &= 0.022 \times 5.67 \times 10^{-8} \left[(283)^4 - (273)^4 \right] \times 19.72 \times 10^{-4} \text{ วัตต์} \\ &= 0.002 \text{ วัตต์}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ที่ } 293^\circ\text{K} \quad \dot{Q} &= 0.022 \times 5.67 \times 10^{-8} \left[(293)^4 - (273)^4 \right] \times 19.72 \times 10^{-4} \\ &= 0.004 \text{ วัตต์}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ } 303^{\circ}\text{K} \quad \dot{Q} &= 0.022 \times 5.67 \times 10^{-8} \left[(303)^4 - (273)^4 \right] \times 19.72 \times 10^{-4} \\ &= 0.007 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

จากกราฟของแอสเบลทอสเมื่อมาขณะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็ง การสูญเสียพลังงานความร้อนที่ $10^{\circ}\text{C} = 0.07$ วัตต์ ที่ $20^{\circ}\text{C} = 0.17$ วัตต์ และที่ $30^{\circ}\text{C} = 0.26$ วัตต์ ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีที่ 10°C 20°C และ 30°C มีค่าดังนี้

$$\text{ที่ } 10^{\circ}\text{C} \quad \dot{Q} = \frac{0.002}{0.07} \times 100 = 2.86 \%$$

$$\text{ที่ } 20^{\circ}\text{C} \quad \dot{Q} = \frac{0.004}{0.17} \times 100 = 2.35 \%$$

$$\text{ที่ } 30^{\circ}\text{C} \quad \dot{Q} = \frac{0.007}{0.26} \times 100 = 2.69 \%$$

จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีมีค่าน้อยมาก และมีค่าเกือบเท่ากันในอุณหภูมิต่างที่ทดลอง ในกรณีที่ภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็งแห้ง พบว่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีใกล้เคียงกับที่ภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็ง

4.5.2 การสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนของหลอดน้ำกระแสของอุปกรณ์ให้ความร้อนและหลอดของเทอร์มิสเตอร์

หลอดน้ำกระแสของอุปกรณ์ให้ความร้อนยาวเส้นละ 7 ซม. 2 เส้นและหลอดของเทอร์มิสเตอร์ยาว 5.5 ซม. 2 เส้น หลอดทั้งสองเส้นเป็นหลอดทองแดงมีพื้นที่หน้าตัด $= 9.62 \times 10^{-4}$ ซม.² สภาพนำความร้อนของทองแดง $= 0.92$ แคลอรี/วินาที องศาเซนติเกรด ซม. จากสมการการนำความร้อน

$$\dot{Q} = KA \frac{dT}{dx}$$

เมื่อ \dot{Q} คืออัตราการไหลของปริมาณความร้อน K คือสภาพนำความร้อน A คือพื้นที่หน้าตัดของสาร $\frac{dT}{dx}$ คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ เราเลือกคำนวณหาอัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิ 10°C 20°C และ 30°C ในกรณีที่ภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็งที่ 10°C เราคำนวณหา \dot{Q} จากสมการข้างบนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \left[0.92 \times 9.62 \times 10^{-4} \left(\frac{10 - 0}{7} \right) \times 2 \right] + \\ &\quad \left[0.92 \times 9.62 \times 10^{-4} \left(\frac{10 - 0}{5.5} \right) \times 2 \right] \\ &= 5.75 \times 10^{-3} \text{ แคลอรี/วินาที} \\ &= 0.024 \text{ วัตต์}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ที่ } 20^{\circ}\text{C} \text{ ได้ } \dot{Q} &= \left[0.92 \times 9.62 \times 10^{-4} \left(\frac{20 - 0}{7} \right) \times 2 \right] + \\ &\quad \left[0.92 \times 9.62 \times 10^{-4} \left(\frac{20 - 0}{5.5} \right) \times 2 \right] \\ &= 11.49 \times 10^{-3} \text{ แคลอรี/วินาที} \\ &= 0.048 \text{ วัตต์}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ที่ } 30^{\circ}\text{C} \text{ ได้ } \dot{Q} &= \left[0.92 \times 9.62 \times 10^{-4} \left(\frac{30 - 0}{7} \right) \times 2 \right] + \\ &\quad \left[0.92 \times 9.62 \times 10^{-4} \left(\frac{30 - 0}{5.5} \right) \times 2 \right] \\ &= 17.24 \times 10^{-3} \text{ แคลอรี/วินาที} \\ &= 0.072 \text{ วัตต์}\end{aligned}$$

เราหาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนของลวดทองแดง ได้ดังนี้

$$\text{ที่ } 10^{\circ}\text{C} \quad \dot{Q} = \frac{0.024}{0.07} \times 100 = 34.29 \%$$

$$\text{ที่ } 20^{\circ}\text{C} \quad \dot{Q} = \frac{0.048}{0.17} \times 100 = 28.24 \%$$

$$\text{ที่ } 30^{\circ}\text{C} \quad \dot{Q} = \frac{0.072}{0.26} \times 100 = 27.69 \%$$

การสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนของลวดทองแดงมีค่าประมาณ 1 ใน 3 ของการสูญเสียพลังงานความร้อนทั้งหมดในกรณีที่ภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็ง ในทำนองเดียวกันเราสามารถคำนวณได้ว่า การสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากสาเหตุนี้มีค่าประมาณ 1 ใน 2 ของการสูญเสียพลังงานความร้อนทั้งหมดเมื่อภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็งแห้ง

จากการคำนวณหาการสูญเสียพลังงานความร้อนในหัวข้อ 4.5.1 และ 4.5.2 เราพบว่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปนั้นส่วนมากเนื่องจากการสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับอากาศที่สูบออก

4.6 การทดลองวัดสภาพนำความร้อน

เมื่อให้พลังงานไฟฟ้าแก่อุปกรณ์ให้ความร้อนค่าหนึ่ง พลังงานไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนไหลผ่านสารตัวอย่างเพราะต้านลิ่งของสารตัวอย่างมีอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อถึงสภาวะสมดุลความร้อน อุณหภูมิผิวบนของสารตัวอย่างควรจะคงที่ นั่นคือ ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ควรจะคงที่ สำหรับสารตัวอย่างที่เป็นพลาสติก ถ้าความต้านทานนี้ไม่เปลี่ยนในช่วง 30 นาที ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์นี้ก็คืออุณหภูมิที่สภาวะสมดุลความร้อน แต่ในกรณีกระจกซึ่งนำความร้อนได้ดีกว่าพลาสติกจะถึงสภาวะสมดุลความร้อน

เร็วกว่า ค่ายเหตุนี้ที่สภาวะสมดุลความร้อน บางครั้งความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์จะขึ้น ๆ ลง ๆ ในช่วงของ $\pm 0.1 \times 10^3$ โอห์ม และถ้าความต้านทานนี้ไม่เปลี่ยนในช่วง 10 นาที ความต้านทานนี้ก็คืออุณหภูมิในสภาวะสมดุลความร้อน ในขณะที่ทดลองเมื่อภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็ง ต้องคอยใช้ไขควงกระทุ้งน้ำแข็งทุก ๆ 10 นาที เพื่อให้ด้านข้างของภาชนะทดลองสัมผัสน้ำแข็งตลอดเวลา ในกรณีที่ภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็งแห้ง เราเติมเอทิลแอลกอฮอล์ในน้ำแข็งแห้งด้วย เพื่อให้อุณหภูมิของภาชนะทดลองคงที่เท่ากับอุณหภูมิของน้ำแข็งแห้ง (-76°C) เราสามารถทดสอบความถูกต้องนี้ได้โดยต่อกราฟที่เขียนขึ้นจะหาปริมาณความร้อนของอุปกรณ์ให้ความร้อนกับอุณหภูมิของสารตัวอย่าง ถ้าภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็ง เมื่อต่อกราฟออกไปควรจะต้องตัดแกนอุณหภูมิที่ใกล้ ๆ 0°C และถ้าภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็งแห้ง กราฟที่ต่อออกไปควรจะต้องตัดที่ใกล้ ๆ -76°C จากการทดลองพบว่า สารตัวอย่างที่เป็นพลาสติกขนาด $\frac{A}{L} = 19.052$ ซม. 18.576 ซม. 9.524 ซม. และ 9.329 ซม. กราฟที่ต่อออกไปจะตัดแกนอุณหภูมิที่ 0.2°C 0.4°C 0.6°C และ 0.8°C ตามลำดับ สำหรับแอสเบสทอสจะตัดแกนอุณหภูมิที่ 1.2°C และกระจกขนาด $\frac{A}{L} = 16.441$ ซม. ตัดแกนอุณหภูมิที่ 0.2°C และ 0.3°C ขนาด $\frac{A}{L} = 12.455$ ซม. ตัดแกนอุณหภูมิที่ 0.4°C และ 0.6°C ในกรณีที่ภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็งแห้ง กระจกขนาด $\frac{A}{L} = 16.441$ ซม. ตัดแกนอุณหภูมิที่ -74.2°C และ -74.4°C ขนาด $\frac{A}{L} = 12.455$ ซม. ตัดแกนอุณหภูมิที่ -74.8°C สำหรับแอสเบสทอสจะตัดแกนอุณหภูมิที่ -67.8°C จะเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำแข็ง (0°C) และอุณหภูมิของน้ำแข็งแห้ง (-76°C) ซึ่งใช้ในการทดลอง

4.7 ผลการทดลองวัดสภาพนำความร้อนของสารตัวอย่าง

ผลการทดลองวัดสภาพนำความร้อนของกระจกและพลาสติกแสดงไว้ในตารางข้างล่าง

นี้

ตารางที่ 4.4 แสดงสภาพนำความร้อนของพลาสติกที่อุณหภูมิ 0°C ถึง 40°C

ขนาดของพลาสติก ($\frac{A}{L}$) (ซม.)	สภาพนำความร้อน (K) (วัตต์/เมตร องศาเซนติเกรด)
19.052	0.202
18.576	0.187
9.524	0.213
9.329	0.202
ค่าเฉลี่ย	0.201 ± 0.009

ตารางที่ 4.5 แสดงสภาพนำความร้อนของกระจก

ขนาดของกระจก ($\frac{A}{L}$) (ซม.)	สภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเซนติเกรด)	
	อุณหภูมิ 0°C ถึง 40°C	อุณหภูมิ -40°C ถึง -30°C
16.441 ค่าเฉลี่ย	0.772 0.797 0.735 ± 0.013	0.743 0.791 0.770 ± 0.022
12.455 ค่าเฉลี่ย	0.867 0.931 0.899 ± 0.032	0.787 0.827 0.807 ± 0.020

สภาพนำความร้อนเฉลี่ยของกระจกจากการทดลอง = 0.842 ± 0.062 วัตต์/เมตร องศาเซนติเกรด มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่นำมาจากตารางคือ 0.836 วัตต์/เมตร องศาเซนติเกรด แสดงว่าการทดลองวัดสภาพนำความร้อนของสารด้วยวิธีนี้พบว่าใช้ได้ดีพอสมควร ค่าสภาพนำความร้อนของพลาสติกใสเฉลี่ยที่อุณหภูมิห้อง = 0.201 ± 0.009 วัตต์/เมตร องศาเซนติเกรด จึงน่าที่จะเชื่อถือได้ แต่อย่างไรก็ตามจะกล่าวถึงค่าสภาพนำความร้อนในแง่ต่าง ๆ ดังนี้

4.7.1 ข้อผิดพลาดของการวัดสภาพนำความร้อน

การทดลองวัดสภาพนำความร้อนของสาร เราพยายามให้มีข้อผิดพลาดน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามอาจจะเืองก็ประกอบบางอย่างที่เราคิดไม่ถึง จากการทดลองวัดสภาพนำความร้อนของกระจกซ้ำ 2 ครั้ง ปรากฏว่าสภาพนำความร้อนของกระจกมีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วงประมาณ 5 % ซึ่งเราคิดว่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของข้อผิดพลาดของการวัดสภาพนำความร้อนด้วยวิธีนี้

4.7.2 ความหนาของสารตัวอย่าง

จากผลการทดลองวัดสภาพนำความร้อนของสารพบว่า สภาพนำความร้อนของพลาสติกมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง ๆ ที่ความหนาต่างกัน แต่สำหรับกระจกมีค่าต่างกันเล็กน้อย เพราะกระจกที่ใช้ทดลองตัดมาจากกระจกคนละแผ่น โครงสร้างอาจจะแตกต่างกันไปบ้าง แต่อย่างไรก็ตามค่าที่วัดได้ไม่ต่างกันมากนัก แสดงว่าสภาพนำความร้อนไม่ขึ้นกับความหนาของสาร

4.7.3 สภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เนื่องจากกราฟระหว่างปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านสารตัวอย่างและอุณหภูมิผิวบนของสารตัวอย่างเป็นกราฟเส้นตรง นั่นคือความชันของกราฟมีค่าเท่ากันทุก ๆ อุณหภูมิช่วงที่ทดลอง แสดงว่าสภาพนำความร้อนของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ นี้มีค่าเท่ากันตลอด สำหรับในกรณีของกระจกซึ่งทดลองวัดสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิ -40°C ถึง -30°C และ 0°C ถึง 40°C ปรากฏว่าค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิตั้งสองต่างกันเล็กน้อย เราประมาณได้ว่าเท่ากัน ในพิภพของความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง จากสมการสภาพนำความร้อนของสาร

$$K = \frac{1}{3} Cv\ell$$

v เป็นความเร็วเฉลี่ยของโฟนอนซึ่งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ C มีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่ทดลอง จากการทดลองได้ค่า K ประมาณว่าเท่ากัน แสดงว่าค่า ℓ ในช่วงอุณหภูมิตั้งสองมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับทฤษฎีดังกล่าวแล้วข้างต้น เพราะกระจกเป็นสารอสัณฐาน (amorphous) นั่นเอง

4.7.4 การปรับปรุงอุปกรณ์สำหรับวัดสภาพนำความร้อนเพื่อทดลองในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น

อุปกรณ์สำหรับวัดสภาพนำความร้อนอาจจะใช้ทดลองในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่านี้ได้ แต่ไม่เกิน 150°C เพราะเทอร์มิสเตอร์ตัวที่ใช้วัดอุณหภูมินี้ใช้ได้เพียงแค่ 150°C และเราต้องปรับปรุงภาชนะทดลองโดยเปลี่ยนลวดสายไฟสำหรับอุปกรณ์ให้ความร้อนและลวดมิโครมของอุปกรณ์ให้ความร้อนให้มีขนาดโตขึ้นเพื่อให้ทนกระแสได้มากขึ้น

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของพาทะและเวลาผ่อนคลายไปกับอุณหภูมิ จะให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นควรทดลองที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ เช่นที่ 4°K แต่อุปกรณ์สำหรับทดลองต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพงมากและปัญหาที่สำคัญคือในบ้านเรายังไม่มีซีเลียมเหลว อย่างไรก็ตามการวิจัยที่อุณหภูมิต้องและที่อุณหภูมิ 77°K ก็พอจะมองเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ สำหรับการทดลองวัดสภาพนำความร้อนของสารที่ทำมาแล้ววิธีการทดลองไม่ยุ่งยากมากนัก และใช้เวลาไม่นานมาก สามารถจะนำไปใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการได้