การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของโลหะทองแดงด้วยเครื่องมือวัดสภาพนำไฟฟ้าร่วมกับเครื่องมือวัดสัมประสิทธิ์ซีเบค

The Investigation of Copper Purity by Electrical Conductivity Measurement in Conjunction with Seebeck Coefficient

โสพล บุตรงาม*[1] อารีย์ วิเชียรฉาย[2] สายชล พิมพ์มงคล[1] และ อุดม ทิพราช[1]

Sopon Budngam Aree Wichainchai Saichol Pimmongkol and Udom Tipparach

[1]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ. วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

[2]สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

ได้ออกแบบชุดเครื่องมือ ที่ใช้ตรวจสอบความบริสุทธิ์ของโลหะทองแดง ด้วยการใช้หลักการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า และสัมประสิทธิ์ซีเบค ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 85 เคลวิน ถึง 1200 เคลวิน ความต้านทานไฟฟ้าถูกวัดด้วยเทคนิคสี่ขั้ว ใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด ที เป็นหัววัดในระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 เคลวิน ใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด เอส เป็นหัววัดในระบบก๊าซเฉื่อยในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 400 เคลวิน ถึง 1200 เคลวิน สภาพต้านไฟฟ้า (ρ_T) ในหน่วย ไมโครโอห์มเซนติเมตรจะเป็นไปตามสมการ $\rho_T = -0.3191 + 6.8x10^{-3}T - 6.0x10^{-7}T^2 + 8.0x10^{-10}T^3$ และสภาพนำไฟฟ้าจะเป็นส่วนกลับของสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบค α_T ในหน่วย ไมโครโวลต์ต่อเคลวิน จะเป็นไปตามสมการดังนี้ $\alpha_T = 1.9653 - 1.49x10^{-2}T + 9.0x10^{-5}T^2 - 2.0x10^{-7}T^3 + 2.0x10^{-10}T^4 - 1.0x10^{-13}T^5 + 3.0x10^{-17}T^6$ เมื่อ T เป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน ผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับการทดสอบหาความบริสุทธิ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) และ การเรืองรังสีเอ็กซ์ (XRF) พบว่าให้ผลการทดสอบเทียบเท่ากัน โดยที่ชิ้นงานตัวอย่างมีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99

คำสำคัญ : สภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพนำไฟฟ้า, ทองแดง, การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของทองแดง, สัมประสิทธิ์ซีเบค

---

*E-mail address : budngamsopon@gmail.com โทรศัพท์ 0897877819 โทรสาร 045288381

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract

Testing apparatus was designed and built to examine the purity of copper by means of the measurement of electrical conductivity and Seebeck coefficient. The apparatus can be used to measure electrical conductivity and Seebeck coefficient between 85 and 1200 Kelvin. The electrical resistance measurement was carried out by using four-point probe technique. The electrical conductivity was calculated from the resistance and the dimensions of the specimens. Type T thermocouple in vacuum system was used below 400 Kelvin. Type S was applied for temperature between 400 and 1200 Kelvin in an inert gas system. The electrical resistivity (ρ_T) in the unit of microohm-centimeter ($\mu\Omega - cm$) is written in polynomial, $\rho_T = -0.3191 + 6.8x10^{-3}T - 6.0x10^{-7}T^2 + 8.0x10^{-10}T^3$. The electrical conductivity can be obtained by taking inversion of the electrical resistivity. Seebeck coefficient (α_T) can be calculated in microvolt per Kelvin as follows: $\alpha_T = 1.9653 - 1.49x10^{-2}T + 9.0x10^{-5}T^2 - 2.0x10^{-7}T^3 + 2.0x10^{-10}T^4 - 1.0x10^{-13}T^5 + 3.0x10^{-17}T^6$, when T is temperature in Kelvin. The Seebeck coefficient data was compared with X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF) of the specimen. The result showed that our apparatus yields the same as standard method when copper with purity greater than 99 percent was employed.

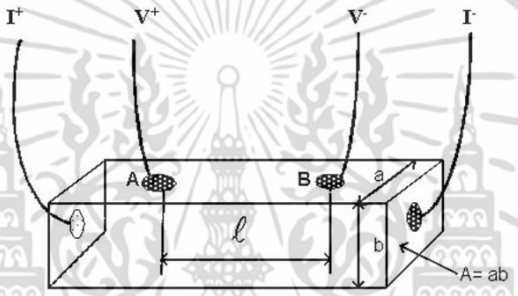
Keywords : Electrical resistivity, Electrical conductivity, copper, The investigation of purify copper, Seebeck coefficient

1. บทนำ

โลหะและโลหะผสมเป็นวัสดุที่สำคัญมากๆในการใช้เป็นวัสดุในการดำรงชีวิตประจำวัน สภาพนำไฟฟ้าของโลหะและโลหะผสม จึงเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่นิยมวัดมากที่สุดปริมาณหนึ่ง การตรวจหาความบริสุทธิ์ของโลหะด้วย เทคนิคการวัดสภาพความต้านทานแล้วเปลี่ยนไปเป็นสภาพนำไฟฟ้า [1-3] ณ อุณหภูมิต่างๆ จึงเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้เป็นการตรวจสอบหาความบริสุทธิ์ โลหะและโลหะผสม นอกจากนี้ สภาพนำไฟฟ้า ยังเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญมากๆในการพัฒนา วัสดุเทอร์โมอิเล็กตริกที่ใช้แปลงพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ในการวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการวัดสภาพนำไฟฟ้าชนิด 4 ขั้ว (four-point probe) ในการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของทองแดง พร้อมทั้งเป็นการสอบเทียบเครื่องมือวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใช้งานเอง สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุหา ได้จากส่วนกลับของสภาพต้านทานของวัสดุ ดังนั้นจึงต้องวัดความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุแล้วคำนวณสภาพความต้านทานจากมิติ (ความยาวและพื้นที่หน้าตัด) ของวัสดุนั้นๆ ซึ่งวัสดุในปัจจุบันมีหลากหลายรูปร่าง ถ้าวัสดุมีรูปร่างเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท่ง เนื่องจากโลหะมีสภาพความต้านทานต่ำมากและสายไฟที่ทำการวัดมีความต้านทานในระดับขนาดเดียวกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวัดละเอียด วิธีการดังกล่าวเรียกว่า การวัดแบบสี่ขั้ว กล่าวคือ ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ชิ้นงานตัวอย่าง ผ่านขั้วกระแสสองขั้ว (เข้า-ออก) และวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นงานสารตัวอย่างด้วยสายวัดอีกชุดหนึ่ง (บวก-ลบ) ดังรูปที่ 1 แล้วจึงคำนวณ หาค่าความต้านทานจากกฎของโอห์ม หาค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้า ค่าความนำไฟฟ้าตามลำดับ ในกรณีวัสดุมีรูปร่างเป็นแผ่นบางๆ ยังคงใช้เทคนิคการวัดแบบ 4 ขั้ว เช่นเดียวกัน ในกรณีที่วัสดุมีรูปร่างใดๆ จะใช้เทคนิคการวัดแบบ van der Pauw [4-5]



รูปที่ 1 แผนภาพเทคนิคการวัดสี่ขั้ว (four-point probe technique) สองขั้ว (I^+ และ I^-) ทำหน้าที่จ่ายกระแสตรงคงที่ และสองขั้ว (V^+ และ V^-) ทำหน้าที่วัดแรงดันไฟฟ้า

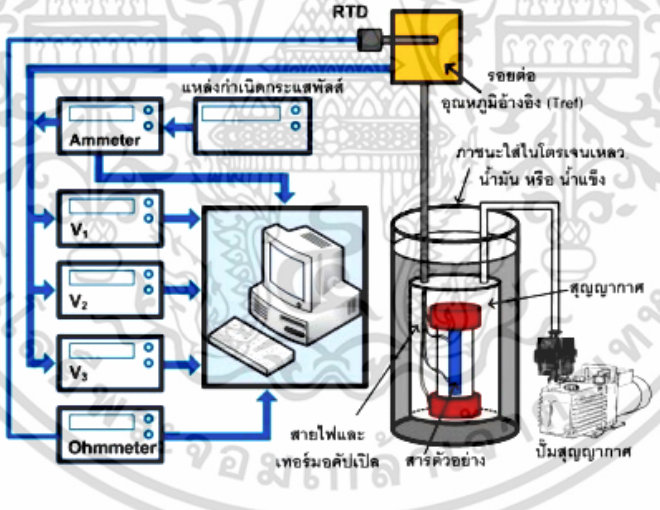
การวัดความบริสุทธิ์ของวัสดุอีกวิธีหนึ่งคือการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคของวัสดุ ซึ่งเป็นสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กตริกของวัสดุ ที่มีความสำคัญต่อการนำเอาวัสดุนั้นๆ ไปใช้งาน อย่างเช่น วัสดุที่เป็นโลหะทองแดงเป็นต้น วัสดุที่เป็นโลหะ หรือสารกึ่งตัวนำบางชนิด สามารถสร้างเป็นตัวกำเนิดเทอร์โมอิเล็กตริก และเป็นอุปกรณ์ที่ให้ความเย็นได้ และยังสามารถที่จะนำไปใช้ร่วมกับ วัสดุกึ่งตัวนำ ในการนำเอาวัสดุเทอร์โมอิเล็กตริกไปประยุกต์ใช้งานนั้น มักต้องการวัสดุที่มีพารามิเตอร์ทางเทอร์โมอิเล็กตริกสูง ๆ หรือในทางกลับกันนั้น ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าต่ำๆ ในระดับ ไมโครหรือนาโนโวลต์ เช่นมิเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สแกนเนอร์ และตัวตรวจวัดทางไฟฟ้า ต้องการค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่มีค่าต่ำๆ เมื่อเทียบกับทองแดง [6] การวิเคราะห์สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กตริก ของโลหะและโลหะผสม จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เมื่อมีการนำเอาปรากฏการณ์ไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติ เช่น ห้องปฏิบัติการณ์วิจัยหรือโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการนำเอาเทอร์โมคัปเปิลวัดไปวัดอุณหภูมิเพื่อควบคุมการผลิต เป็นต้น ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กตริกเป็นพื้นฐานในการสร้างเครื่องมือ ความไวสูงมากๆ อย่างเช่น เครื่องมือวัดการแผ่รังสีในทางดาราศาสตร์ เครื่องมือที่ใช้ปริมาณกระแสน้อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือในระบบสุญญากาศความดันสูง และแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กตริก เป็นต้น นอกจากนี้ ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กตริกยังมีความสำคัญในการพัฒนากระบวนการทางโลหะวิทยา ในการวิเคราะห์สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กตริกของโลหะบริสุทธิ์ จากข้อมูลของปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กตริกของโลหะบริสุทธิ์ และโลหะที่ไม่บริสุทธิ์จะมีความแตกต่างกันมาก แม้ว่าจะมีสิ่งที่ไม่บริสุทธิ์จำนวนน้อยเจืออยู่ก็ตาม [6] ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กตริก หรือที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ ซีเบค (Seebeck effect) ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1821 โดย นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ โธมัส โยฮัน ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) โดย ซีเบค สังเกตในครั้งแรกเห็นว่า มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นในระหว่าง ปลายขั้วทั้งสองของแท่งโลหะ ที่มีเกรเดียร์นอุณหภูมิ [7]

2. วิธีการทดลอง

การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของทองแดง ที่อาศัยการวัดสภาพนำไฟฟ้า ด้วยชุดเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นมา และได้แสดงแผนภาพรวมของชุดเครื่องมือวัดสภาพนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิ 85 K-400 K ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพรวมชุดเครื่องมือวัดสภาพนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่ำ จากช่วง 85 เคลวินถึง 400 เคลวิน

จากรูปที่ 2 ประกอบไปด้วยวัสดุอุปกรณ์ คือภาชนะที่ใส่ไนโตรเจนเหลว น้ำมัน หรือ น้ำแข็ง เกลือ เพื่อรักษาอุณหภูมิของระบบให้ได้ตามที่ต้องการ แท่งชิ้นงานสารตัวอย่างทองแดง พื้นที่หน้าตัด A เท่ากับ 0.3 ตารางเซนติเมตร (cm^2) ความยาว L เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร (cm) เทอร์โมคัปเปิล ชนิด ที เพื่อใช้วัดอุณหภูมิ RTD ใช้วัดอุณหภูมิรอยต่ออ้างอิงของเทอร์โมคับเปิล ดิจิตัลมัลติมิเตอร์ (Agilent 34401 A)

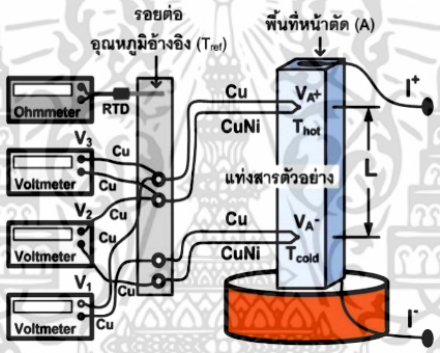
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพิวเตอร์และซอฟแวร์ ใช้เก็บบันทึก และวิเคราะห์ข้อมูล แหล่งกำเนิดกระแสพัลส์ เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่าง และระบบสุญญากาศ หรือระบบก๊าซเฉื่อย

2.1 วิธีการวัด

1. นำสารตัวอย่างแท่งทองแดงเข้าไปวางในภาชนะใส่สารตัวอย่าง และปิดให้มิดชิด ให้ระบบภายในภาชนะ เป็นระบบปิด และ ทำให้ระบบเป็นสุญญากาศ และจัดวางเอาไว้ในระบบที่มีอุณหภูมิคงที่ ณ อุณหภูมิต่างๆที่ต้องการวัด

2. เมื่อชิ้นงานสารตัวอย่าง อยู่ในระบบที่มีอุณหภูมิคงที่ตามต้องการ ผ่านกระแสพัลส์เข้าสู่สารตัวอย่างทางขั้ว I^+ และ I^- และทำการวัดแรงดันไฟฟ้าทางขั้ว V^+ และ V^- และปริมาณต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะได้อธิบายดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพการวัดสภาพนำไฟฟ้า

จากรูปที่ 3 เมื่อกระแสไฟฟ้า I^+ ไหลผ่านเข้าไปยังชิ้นงานสารตัวอย่าง ที่มีพื้นที่หน้าตัด A ยาว L มีความต้านทาน R ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า เป็น $V_{IR} = +I^+R$ และเกิดแรงดันไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กตริก $V_{TE} = \alpha\Delta T$ เมื่อ α เป็น สัมประสิทธิ์ซีเบคที่เกิดขึ้นในชิ้นงานสารตัวอย่าง และ ΔT ความแตกต่างอุณหภูมิในช่วงความยาว L [8-12] ดังนั้น แรงดันไฟฟ้ารวม V_{I+} จึงเป็น

$$V_{I+} = +I^+R + \alpha\Delta T \qquad (1)$$

เพื่อที่จะกำจัดเทอม $V_{TE} = \alpha\Delta T$ ที่ไม่ต้องการออกไป จะต้องผ่านกระแสไฟฟ้าให้ไหลกลับทางกัน I^- เข้าไป ดังนั้น แรงดันไฟฟ้ารวม V_{I-} จึงเป็น

$$V_{I-} = -I^-R + \alpha\Delta T \qquad (2)$$

นำสมการ (1)-(2) จะได้ว่า

$$(V_{I+} - V_{I-}) = (+I^+R + \alpha\Delta T) - (-I^-R + \alpha\Delta T)$$

$$(V_{I+} - V_{I-}) = (+I^+R + I^-R) = (I^+ + I^-)R$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = (V_{I+} - V_{I-}) / (I^{+} + I^{-}) \quad (3)$$

ดังนั้นในการวัด จึงต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับหรือกระแสพัลส์ตรง ผ่านเข้าในชิ้นงานสารตัวอย่าง และจากกฎของโอห์ม ความต้านทาน R ของชิ้นงานสารตัวอย่าง จะหาได้จาก

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4)$$

เมื่อ ρ คือ สภาพต้านทานทางไฟฟ้า และ σ คือ สภาพนำไฟฟ้าหาได้จาก

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5)$$

แรงดันไฟฟ้ารวม V_{I+} และ V_{I-} จะวัดได้จากค่า V_1 และ อุณหภูมิรอยต่ออ้างอิง (T_{ref}) ในหน่วยองศาเซลเซียส (°C) หาได้จากความต้านทาน R_{Pt}ของ RTD ตามสมการ (6)

$$T_{ref}(R_{pt}) = 30.098 + 2.3026R_{Pt} + 0.0012209R_{Pt}^2 - 273.15 \quad (6)$$

คำนวณหา แรงดันของเทอร์โมคัปเปิลชนิดที ณ อุณหภูมิรอยต่ออ้างอิง $V_{T_{ref}}$จากสมการ (7)

$$V_{T_{ref}} = c_0 + c_1 T_{ref}(R_{Pt}) + c_2 T_{ref}^2(R_{Pt}) + c_3 T_{ref}^3(R_{Pt}) + c_4 T_{ref}^4(R_{Pt})$$
$$+c_5 T_{ref}^5(R_{Pt}) + c_6 T_{ref}^6(R_{Pt}) + c_7 T_{ref}^7(R_{Pt}) + c_8 T_{ref}^8(R_{Pt}) \quad (7)$$

เมื่อ V_{Tref} เป็นแรงดันไฟฟ้าในหน่วย มิลลิโวลต์

T เป็น อุณหภูมิในหน่วย องศาเซลเซียส

และ c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6,c_7, และ c_8 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ค่าคงตัว

ถ้า กำหนด อุณหภูมิ T_{hot}เป็น อุณหภูมิ T_1 ณ ตำแหน่ง V_A+ จะหาได้จาก แรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนี้ คือ $V_{T1} = V_3 + V_{Tref}$ โดยที่

$$T_1 = c_0 + c_1 V_{T_1} + c_2 V_{T_1}^2 + c_3 V_{T_1}^3 + \cdots + c_i V_{T_1}^i \quad (8)$$

เมื่อ T_1เป็นอุณหภูมิในหน่วย องศาเซลเซียส V_{T1} เป็นแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิล ในหน่วย มิลลิโวลต์ c_0,c_1,…, c_iเป็นสัมประสิทธิ์ ลำดับที่ 0 ถึง i เมื่อ i เป็นจำนวนเต็ม

ความแตกต่างอุณหภูมิ ΔT จะหาได้จาก

$$\Delta T = (v_1 - v_2)/\alpha_T \quad (9)$$

เมื่อ α_T เป็น สัมประสิทธิ์ซีเบคเทอร์โมคัปเปิล ชนิด T

ถ้า กำหนด อุณหภูมิ T_{cold} ณ ตำแหน่ง V_A- เป็น อุณหภูมิ T_2 จะได้ว่า

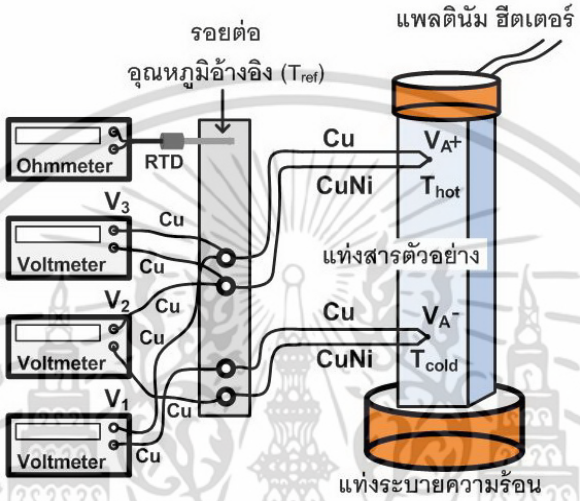
$$T_2 = T_1 - \Delta T \quad (10)$$

อุณหภูมิของชิ้นงานสารตัวอย่าง จึงเป็น อุณหภูมิเฉลี่ย T_{avg}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{avg} = (T_1+T_2)/2 \qquad (11)$$

3. ภายหลังวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้า และ สภาพนำทางไฟฟ้า ของชิ้นงานสารตัวอย่างสิ้นสุดลง จะทำการวัด สัมประสิทธิ์ซีเบคของชิ้นงานสารตัวอย่าง ด้วยการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารตัวอย่าง

จากรูปที่ 4 เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลทางความร้อนผ่านกระแสพัลส์เข้าสู่ แพลตินัมฮีตเตอร์ จะเป็นการกระตุ้นชิ้นงาน ให้มีความแตกต่างอุณหภูมิ $\Delta T=T_1-T_2$ ระหว่างตำแหน่งอุณหภูมิ T_{hot} และอุณหภูมิ T_{cold} เกิดความแตกต่างแรงดัน ΔV= ระหว่าง ตำแหน่งแรงดัน V_{A+} และ V_{A-} โดยที่ แรงดันไฟฟ้า V_1 จะมีค่าเป็น

$$V_1 = (\alpha_{sample} - \alpha_{cu})\Delta T \qquad (12)$$

ค่าที่ได้ของ V_1 จะถูกนำไปพล็อตกราฟ เป็นค่า ในแกน X

ค่าของ V_2 เป็นแรงดันจะมีค่าเป็น

$$V_2 = (\alpha_{sample} - \alpha_{CuNi})\Delta T \qquad (13)$$

นำสมการที่ (12)-สมการที่ (13) จะเป็น ดังสมการที่ (5)

$$V_1 - V_2 = (\alpha_{sample} - \alpha_{Cu})\Delta T - (\alpha_{sample} - \alpha_{CuNi})\Delta T$$
$$= (\alpha_{CuNi} - \alpha_{Cu})\,\Delta T$$
$$= -\alpha_T \Delta T \qquad (14)$$

ค่าที่ได้ ของ $V_1 - V_2$ จะถูกนำไปพล็อตกราฟ เป็นค่า ในแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น กราฟระหว่าง V_1 และ V_1- V_2 จะมี ความชัน เป็น m และในช่วง ที่มีความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นมากที่สุด จะได้ว่า

$$m = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = -\frac{\alpha_T}{(\alpha_{sample} - \alpha_{Cu})} \quad (15)$$

$$\alpha_{\text{sample}} = -\frac{\alpha_T}{m} + \alpha_{Cu} \quad (16)$$

เมื่อ α_T คือ สัมประสิทธิ์ซีเบคของ เทอร์โมคัปเปิลชนิด T

α_{sample} คือ สัมประสิทธิ์ซีเบคของสารตัวอย่าง

α_{Cu} คือ สัมประสิทธิ์ซีเบคของสายทองแดง

ในกรณีที่อุณหภูมิในช่วง 400 ถึง 1200K จะใช้หลักการเดียวกัน แต่เทอร์โมคัปเปิลจะเปลี่ยนเป็น ชนิด S และระบบใส่สารตัวอย่างเป็นระบบแก๊สเฉื่อย [15-18]

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล Roeser และ Wensel [12] ที่ได้ทำการวิจัยเอาไว้ในปี 1941 Moore, และคณะ [13] และ Laubitz [14] ที่ได้ทำการวิจัยเอาไว้ในปี 1967 แสดงได้ดังรูปที่ 5 โดยที่ สภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ_T) ในหน่วย ไมโครโอห์ม-เซนติเมตรที่ได้จากการวิจัยเมื่อนำมาทำ Curve fitting จะเป็นไปตามสมการที่ (17)

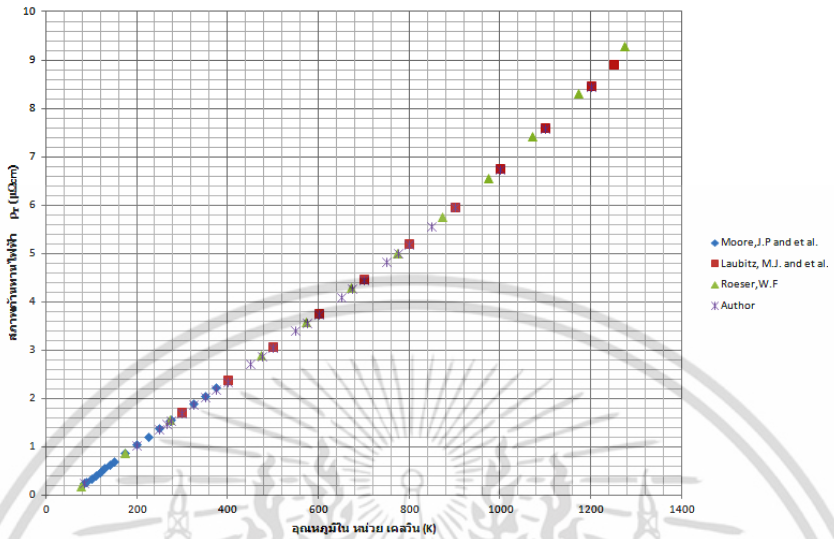
$$\rho_T = -0.3191 + 6.8x10^{-3}T - 6.0x10^{-7}T^2 + 8.0x10^{-10}T^3 \quad (17)$$

และ สภาพนำทางไฟฟ้าที่เป็นส่วนกลับของ สภาพต้านทานทางไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 6 สำหรับสัมประสิทธิ์ซีเบค α_T ในหน่วย ไมโครโวลต์ต่อเคลวิน จะเป็นไปตามสมการที่ (18)

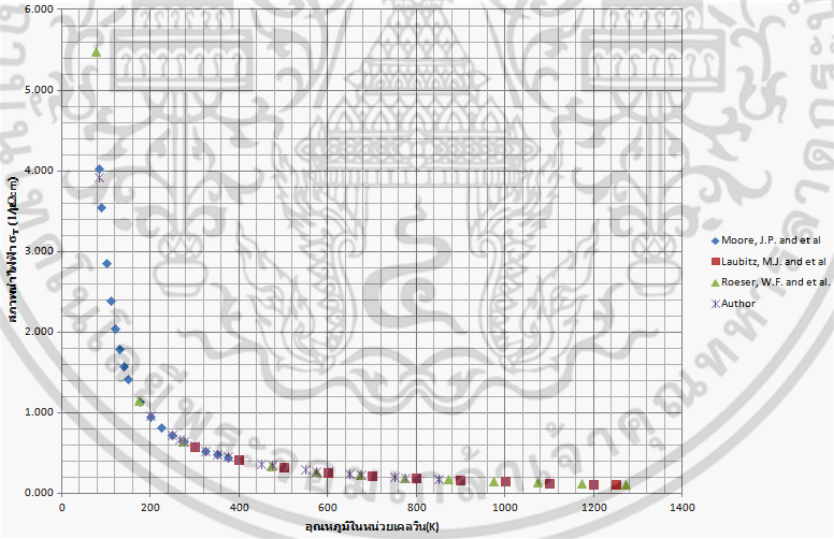
$$\alpha_T = 1.9653 - 1.49x10^{-2}T + 9.0x10^{-5}T^2 - 2.0x10^{-7}T^3 + 2.0x10^{-10}T^4 - 1.0x10^{-13}T^5 + 3.0x10^{-17}T^6 \quad (18)$$

เมื่อ T เป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน สัมประสิทธิ์ซีเบคที่อุณหภูมิสูงๆ จะแปรผันตาม สมการโพลิโนเมียลอันดับสูงๆ อันเนื่องมาจากอิเล็กตรอน มี correlation ต่อกันสูงๆโดยที่สัมประสิทธิ์ซีเบค ของชิ้นงานสารตัวอย่าง ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากงานวิจัย เมื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของ Rudnitskii [15] ได้ทำการวิจัยเอาไว้ในปี 1956 Cusack และ Kendall [16] ได้ทำการวิจัยเอาไว้ในปี 1958 และ Roberts [17] ได้ทำการวิจัยเอาไว้ในปี 1977 จะแสดงดังรูปที่ 7 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

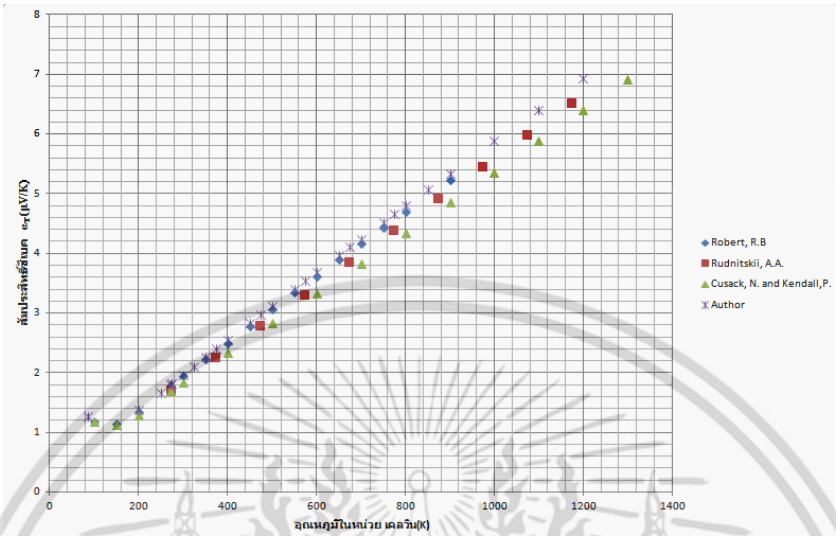


รูปที่ 5 แสดงกราฟสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ_T ที่แปรผันตามอุณหภูมิ ในหน่วย ไมโครโอห์ม-เซนติเมตร



รูปที่ 6 แสดงกราฟสภาพนำไฟฟ้า $\sigma_T=1/\rho_T$ ในหน่วย 1/ไมโครโอห์ม-เซนติเมตร

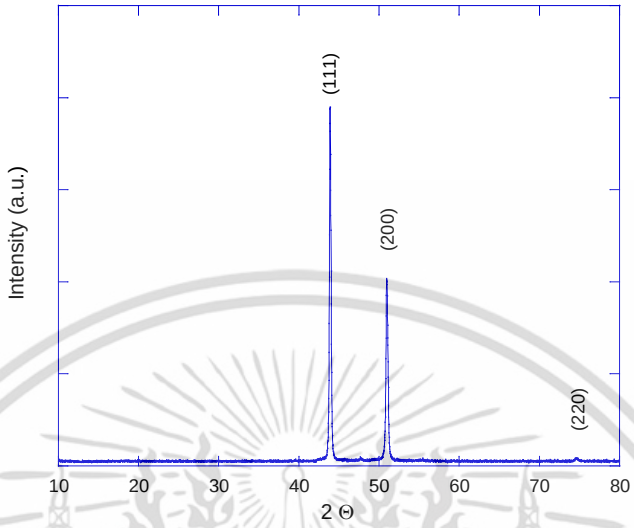
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 กราฟของ สัมประสิทธิ์ซีเบคในหน่วยไมโครโวลต์/เคลวินที่แปรผันตามอุณหภูมิ

จากผลการวิจัยจะเห็นว่า ค่าสภาพนำไฟฟ้า และสัมประสิทธิ์ซีเบคของทองแดงที่ใช้เป็นสารตัวอย่าง จะมีค่าใกล้เคียงและมีค่าแนวโน้มกับค่าอ้างอิงจากนักวิจัยกลุ่มต่างๆ นั้นแสดงว่าทองแดงที่ใช้เป็น สารตัวอย่าง มีความบริสุทธิ์สูงมากๆ และทองแดงที่บริสุทธิ์นี้ มักถูกนำไปเป็น ขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงเพื่อใช้ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของวัสดุอื่นๆ ต่อไป การวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคของทองแดง ที่มีค่าต่ำมาก ๆ นี้ จำเป็นที่จะต้องใช้ เทคนิคการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคสี่ขั้ว ซึ่งจะลดสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบการวัดได้เป็นอย่างดีและลดปัญหาความต้านทานของลวดสายตัวนำ เนื่องจากใช้สายเทอร์โมคัปเปิลเป็นสายวัดพร้อมกันกับมีฉนวนกั้นทางความร้อนจากภายนอกในระบบเดียวกัน จึงป้องกันสัญญาณรบกวน ที่เกิดจากอุณหภูมิที่ต่างกันได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ สายวัดแต่ละเส้น ก่อนที่จะนำเข้าสู่ วงจรขยายสัญญาณและดิจิตอลมัลติมิเตอร์ จะถูกพักไว้ที่ รอยต่ออ้างอิง เพื่อให้มีอุณหภูมิเดียวกัน (T_{ref}) สัญญาณรบกวนจะถูกหักล้างกันไป เหลือเพียงสัญญาณที่ต้องการเข้าสู่ระบบ นอกจากนี้การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการข้างต้นจะเป็นวิธีการที่ วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง แม่นยำและรวดเร็ว นอกจากนี้เมื่อนำชิ้นงานสารตัวอย่างไปตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าสารตัวอย่างเป็นทองแดงเฟสเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 8 และเมื่อนำไปตรวจสอบหาองค์ประกอบของตัวอย่างพบว่าประกอบด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ (XRF) ทองแดง (Cu) ร้อยละ 99.12 ที่เหลือร้อยละ 0.88 เป็นธาตุอื่นๆ ผลการตรวจสอบนี้ยืนยันความบริสุทธิ์ของชิ้นงานสารตัวอย่างได้ว่าแท่งโลหะที่ใช้เป็นทองแดงบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของตัวอย่างชิ้นงาน

4.สรุปผลการทดลอง

ในการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของทองแดงสามารถที่จะใช้ หลักการ การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า และวัดค่าสัมประสิทธิ์ ของวัสดุได้ ถึงแม้ว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ ซีเบคของโลหะจะมีค่าน้อยมากๆ แต่ด้วย เทคนิคการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบค 4 โพรบ ทำให้สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ด้วยการเทียบเคียงกับ ฐานข้อมูลของ Roeser และ Wensel [12] , Moore และคณะ [13] ,Laubitz [14] Rudnitskii [15] , Cusack และ Kendall [16] Robert [17] ด้วยหลักการเดียวกันนี้ ชุดเครื่องที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถที่จะตรวจสอบความบริสุทธิ์ของสารอื่นๆได้เช่นเดียวกัน และยังสามารถนำไปใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ซีเบค ของวัสดุ ณ อุณหภูมิต่างๆ ได้เป็น เป็นอย่างดี ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยต่างๆในประเทศไทย

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของโลหะทองแดงด้วยเครื่องมือวัดสภาพนำไฟฟ้าร่วมกับเครื่องมือสัมประสิทธิ์ซีเบคของสสารนี้ จักขอบพระคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้สนับสนุนการดำเนินงานสำเร็จลงได้ด้วยดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมอุตสาหกรรมพื้นฐาน และการเหมืองแร่ , 2552. การตรวจแร่อย่างง่าย. พิมพ์ครั้งที่ 1, หจก. ไอเดียร์ สแควร์. [Department of Primary Industries and Mines, 2009. Simple Investigation of Mines. 1st ed. Idea Square Co.Ltd. (in Thai)]

[2] Telkes, M., 1993. *Thermoelectric Power and Electrical Resistivity of Minerals.* [online] Available at : <http://www.minsocam.org/ammin/AM35/AM35_536.pdf> [Accessed 26 July 2012].

[3] Rowe, D., 2006. Thermoelectrics Handbook Macro to Nano, 1st ed. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton.

[4] Danielson, L., 1996. *Measurement of the Thermoelectric Properties of Bulk and Thin Film Materials.* [online] Available at: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/663573-S3SuWo/webviewable/663573.pdf>[Accessed 26 July 2012].

[5] Schroder, D. K., 1998. Semiconductor Material and Device Characterization. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc.USA.

[6] Hillhouse, H.W. and Tuominen, M.T. 2001.Modeling the thermoelectric transport properties of wires embedded in oriented microporous and mesoporous films. *Microporous and Mesoporous Materials,*47 ,39-50.

[7] Mott, N. F. and Jones, H., 1936. The Theory of the Properties of Metals and Alloys. 1st ed. Oxford University Press (Clarendon), London.

[8] Ziman, J. M., 1960.Electrons and Phonons. 1st ed. Oxford University Press (Clarendon), London.

[9] Blatt, F. J., Shroeder, P.A., Foiles, C.L., and Greig, D., 1976. Thermoelectric Power of Metals. 1st ed. Plenum Press, New York.

[10] Barnard, R. D., 1972. Thermoelectricity in Metals and Alloys.1st ed. Taylor & Frances, London.

[11] Foiles, C. L., 1985. Thermopower of pure metals and dilute alloys, in Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. New Series. Group 111, v.15, Metals, Springer-Verlag, New York.

[12] Roeser, W.F. and Wensel, H.T., 1941.Temperature, its measurement and control . *Science and Industry*, 1, 1312

[13] Moore, J.P., McElroy, D.L., and Graves, D.S. ,1967. *Can. J. Phys.,* 45, 3849.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] Laubitz, M.J. ,1967. *Can. J. Phys.*, 45, 3677.

[15] Rudnitskii, A. A.,1956. Therrnoelektricheskie Svoistva Blagorodnykh Metallov i ikh Splavov (Thermoelectric Properties of Noble Metals and their Alloys), Izdatelstvo Akademii Nauk USSR, Moscow.

[16] Cusack, N. and Kendall, P., 1958. The absolute scale of thermoelectric power at high temperature. *Proc. Phys. SOC.*, 72, 898.

[17] Roberts, R. B., 1977. The absolute scale of thermoelectricity, *Philos. Mag*., 36, 91.

[18] Hodge, J.D., 1976. Thermoelectric power measurements in wustite . Ph.D. Thesis, University of Utah.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้