



อิทธิพลของอุณหภูมิที่อบต่อสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์  
แบบบิตงอได้เตรียมโดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง  
กมลมาศ สิงคเสลิต<sup>1\*</sup>, อาภาภรณ์ สกุกการะเวก<sup>2</sup> และราชศักดิ์ ศักดานุภาพ<sup>3</sup>

Effect of Annealing Temperature on Thermoelectric Properties of Flexible Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>  
Thin Film Prepared by RF Magnetron Sputtering

Kamolmad Singkaselit<sup>1\*</sup>, Aparporn Sakulkalavek<sup>2</sup> and Rachsak Sakdanuphab<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

<sup>2</sup>วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

<sup>1</sup>Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

<sup>2</sup>College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

\* Corresponding author. E-mail address: go\_odgracious@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์ (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>) เคลือบลงบนวัสดุรองรับโพลีอิมิต โดยใช้เทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง (RF magnetron sputtering) สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของฟิล์มถูกนำมาศึกษาภายใต้อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ โดยนำฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิแตกต่างกันตั้งแต่อุณหภูมิ 300, 350 และ 400 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โครงสร้างผลึกและโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์มถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง (FESEM) ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มถูกวัดตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 150 °C ด้วยเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและ ค่าสภาพนำไฟฟ้า (ZEM3) ผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและค่าสภาพนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้น โดยการอบที่ 400 °C จะมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์สูงสุดคือ  $1.41 \times 10^{-3} \text{ W/m K}^2$  วัดที่อุณหภูมิ 150 °C

คำสำคัญ: บิสมัทเทลลูไรด์ โพลีอิมิต เทอร์โมอิเล็กทริก อาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง

Abstract

Bismuth telluride (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>) thermoelectric thin films were deposited on polyimide substrate by RF magnetron sputtering technique. The structural and thermoelectric properties of the films were investigated under the annealing temperatures. As-deposited films were annealed in the vacuum chamber with the N<sub>2</sub> flow gases at three different temperatures of 300, 350, and 400 °C for 1 hour. The crystal structures and microscopy of the films were characterized by X-ray diffraction (XRD) and Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM), respectively. Seebeck coefficient and electrical conductivity of the films were simultaneously measured at room temperature and up to 150 °C by dc four-terminal method (ZEM3). It was found that the Seebeck coefficient and electrical conductivity increased with increasing temperature. The film annealed at 400 °C has a maximum PF value of  $1.41 \times 10^{-3} \text{ W/m.K}^2$  at the applied temperature of 150 °C.

Keywords: Bismuth telluride, Polyimide, Thermoelectric, RF magnetron sputtering

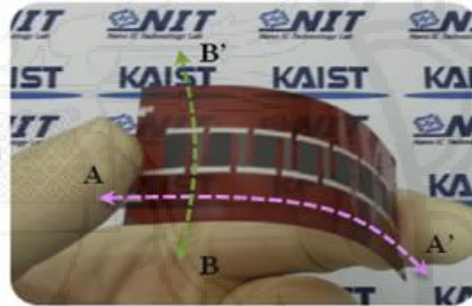
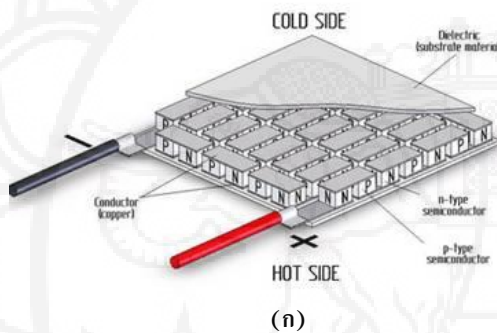
บทนำ

ภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาที่สำคัญและจะทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ สาเหตุหลักมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

ต่างๆ เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น โดยที่เชื้อเพลิงเหล่านี้ในวันจะยิ่งหายากและมีราคาแพง นักวิจัยจึงได้พยายามหาพลังงานทางเลือกใหม่ที่ช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุ

เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric material) คือวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ การประกอบวัสดุ เทอร์โมอิเล็กทริกให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้นั้นเรียกว่าเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล(Thermoelectric module) โดยการนำสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) และชนิดพี (P-type) ขึ้นเล็ก ๆ มาต่อกันเป็นคู่ ๆ วางสลับกันโดยมีแผ่นเซรามิกประกบทั้งสองด้าน เมื่อนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมาสัมผัสกับแหล่งความร้อนและต่อกับโหลดภายนอกจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ข้อดีของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกคือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหวจึงไม่เกิดเสียงดัง ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

ต่ำ และที่สำคัญเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม Terry (2001); Riffat and Xiaoli (2003); Rowe (1999). อย่างไรก็ตามเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ใช้กันในปัจจุบันจะไม่สามารถสัมผัสกับแหล่งความร้อนที่มีรูปร่างโค้งหรือผิวขรุขระ (เช่น ท่อไอเสียรถยนต์ ความร้อนจากร่างกายมนุษย์) ได้ เนื่องจากมีลักษณะทางกายภาพที่แข็งจึงไม่สามารถบิดงอได้ (ดังรูปที่ 1(ก)) ปัญหาดังกล่าว จึงเป็นปัญหาหลักที่ทำให้การประยุกต์ใช้งานมีขีดจำกัด ปัจจุบันจึงมีแนวคิดที่จะผลิตเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบบิดงอได้ (Flexible) ดังรูปที่ 1 (ข) เพื่อสามารถประยุกต์ใช้กับแหล่งความร้อนรูปแบบต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ Goncalves et al. (2007)



รูปที่ 1 (ก) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ใช้ในปัจจุบัน Kumpeerapun (2009)

(ข) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบบิดงอได้ Isaac (2014)

ประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกถูกกำหนดด้วยค่า ZT (Thermoelectric figure of merit) แสดงดังสมการ (1)

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{K} T \quad (1)$$

เมื่อ S คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient, V/K)

$\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity,  $\Omega \cdot m^{-1}$ )

K คือ สภาพนำความร้อน (Thermal conductivity, W/mK)

T คือ อุณหภูมิ (Temperature, K)

จากสมการที่ (1) จะพบว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีนั้นจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและสภาพนำไฟฟ้าสูง แต่สภาพนำความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจะแปรผกผันกับความหนาแน่นพาหะ (Carrier concentration) ในขณะที่สภาพนำไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับความหนาแน่นพาหะ ในทางปฏิบัติจึงไม่สามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคและค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นพร้อมกันได้ ดังนั้นจึงต้องหาวัสดุที่มีมิติต่ำ (Low dimensional) เพื่อให้มีสภาพการนำความร้อน (K) ที่น้อยลง Alexander (2000) จึงจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้

บิสมัทเทลลูไรด์ ( $Bi_2Te_3$ ) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนความร้อนเป็นไฟฟ้าเนื่องจากมีค่า ZT สูงที่อุณหภูมิห้อง Julian Goldsmid (2014) ปัจจุบันมีการสังเคราะห์  $Bi_2Te_3$  อยู่หลายวิธีทั้งการเตรียมแบบก้อนผลึก (Bulk) และแบบฟิล์มบาง (Thin



film) Xinfeng, Xenjie, Han, Wenyu, and Qingjie (2007) ซึ่งการเตรียมแบบฟิล์มบางจะทำให้ได้วัสดุที่มีมิติต่ำ Heremans (2005) จากการศึกษาพบว่า การเตรียมโดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอรริงจะเป็นวิธีที่เหมาะสมเนื่องจากสามารถควบคุมโครงสร้างและความหนาของฟิล์มบาง ตลอดจนสามารถเตรียมฟิล์มให้มีพื้นที่ใหญ่ (Large scale) เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ Yuan et al. (2011)

งานวิจัยนี้สนใจเตรียมฟิล์มบาง  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอรริงลงบนวัสดุที่สามารถโค้งงอได้ ในที่นี้เลือกโพลีอิมิด (Polyimide, PI) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีค่าสภาพนำความร้อนค่อนข้างต่ำเท่ากับ  $0.12 \text{ W/(m.K)}$  ทนต่ออุณหภูมิได้สูงและมีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion) ที่ใกล้เคียงกับ  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  Summary of Properties for Kapton Polyimide Films. (2012) โดยตัวแปรที่จะศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ (Annealing temperature) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง  $300^\circ\text{C} - 400^\circ\text{C}$  การอบจะกระทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน จากนั้นจะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ตอบสนองสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของฟิล์มบาง  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$

#### วิธีการศึกษาและวัสดุอุปกรณ์

ฟิล์มบางบิสมีสเทลลูไรด์ถูกเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นโพลีอิมิด โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอรริง โดยใช้เป้าบิสมีสเทลลูไรด์ (99.99%) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว มีระยะห่างระหว่างเป้าและวัสดุรองรับ 50 mm. โดยก่อนนำชิ้นงานไปติดตั้ง ได้นำแผ่นโ

ลียมิตไปอัลตราโซนิกในแอลกอฮอล์เป็นเวลา 15 นาที เพื่อขจัดสิ่งสกปรกและทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงาน กำหนดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้เป้า  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  คือ 45 วัตต์ มีความดันพื้นใน การเคลือบ  $2 \times 10^{-5} \text{ mbar}$  และความดันที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มคือ  $5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  โดยใช้ก๊าซอาร์กอน เวลาในการเคลือบ 30 นาที จากนั้นจึงนำไปอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ( $300, 350$  และ  $400^\circ\text{C}$ ) ภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ( $6 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ ) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ฟิล์มบางที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก โดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8-Discover) ซึ่งใช้รังสีเอกซ์  $\text{CuK}\alpha$  ความยาวคลื่น  $1.54056$  อังสตรอม, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM รุ่น JSM-7001F) โดยใช้หัววัด Secondary Electron Detector ถ่ายภาพออกมาในโหมด Secondary Electron Image (SEI) และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDS) โดยแสดงผลเป็นสเปกตรัมพลังงานของธาตุต่างๆ ร่วมกับระบุสัดส่วนปริมาณของแต่ละส่วนประกอบและ วัดสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของฟิล์มโดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Seebeck Coefficient/ Electrical Resistance Measurement System, ZEM-3 ยี่ห้อ ULVAC-RIKO)

#### ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา



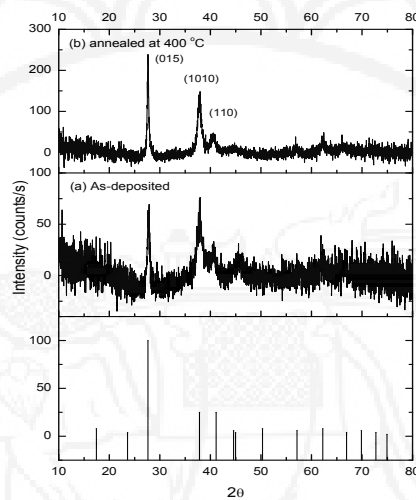
รูปที่ 2 (a) ภาพถ่ายแผ่นโพลีอิมิดและ (b) โพลีอิมิดที่เคลือบด้วยฟิล์มบิสมีสเทลลูไรด์

จากรูปที่ 2 (a) แสดงภาพถ่ายแผ่นโพลีอิมิดก่อนเคลือบฟิล์มบางบิสมีสเทลลูไรด์ พบว่ามีลักษณะเป็นสี

เหลืองทองและเมื่อนำมาเคลือบด้วยฟิล์มบิสมีสเทลลูไรด์ พบว่ามีสีเงิน ดังแสดงในรูปที่ 2(b)

ฟิล์มบางบิสมัทเทลูไรด์ถูกนำไปทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) จากรูปที่ 3 พบว่าเมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางบิสมัทเทลูไรด์ จะแสดงระนาบของโครงสร้างผลึกที่พบ คือ (015), (1010) และ (110) ตรงกับมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $27.66^\circ$ ,  $37.83^\circ$  และ  $41.15^\circ$  ตามลำดับ โดยเทียบกับฐานข้อมูล JCPDF 15-0863 และนอกจากนี้ยัง

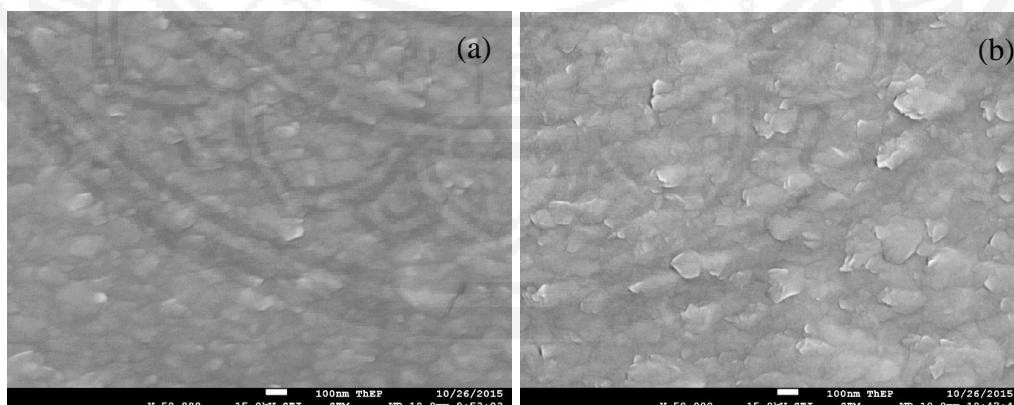
พบว่าจากการคำนวณขนาด ของผลึก (grain size) ของฟิล์มบางบิสมัทเทลูไรด์ พบว่าขนาดของผลึกของฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบและอบที่อุณหภูมิ  $300-400^\circ\text{C}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $5.52 - 28.51\text{ nm}$  แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเป็นบิสมัทเทลูไรด์ที่สมบูรณ์มากขึ้น ดังรูปที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xing, Hngcai, Ning, and Lei (2013) เมื่อทำการอบฟิล์มบางบิสมัทเทลูไรด์ที่อุณหภูมิ  $150-350^\circ\text{C}$  ขนาดของผลึกจะใหญ่ขึ้น



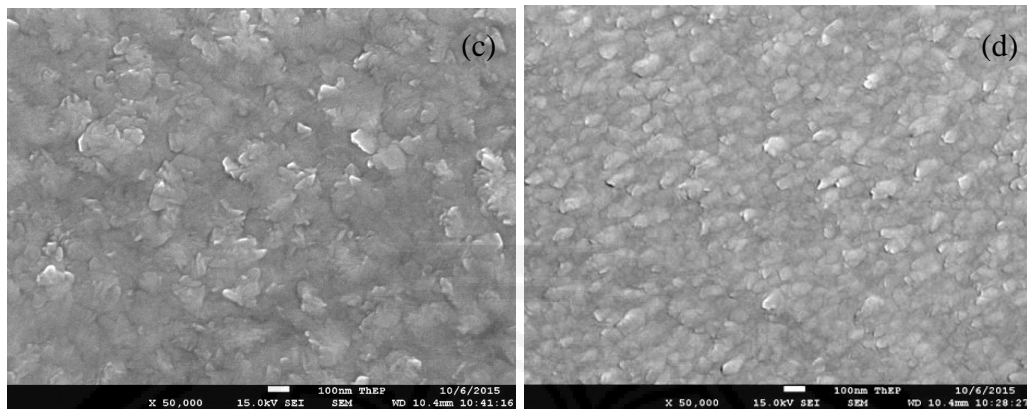
รูปที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางบิสมัทเทลูไรด์ (a) As-deposited (b) อบที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  โดยเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDF 15-0863)

ฟิล์มบางบิสมัทเทลูไรด์ถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ความละเอียดสูง (FESEM) รุ่น JSM-7001F ด้วยกำลังขยายระดับ 50,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4



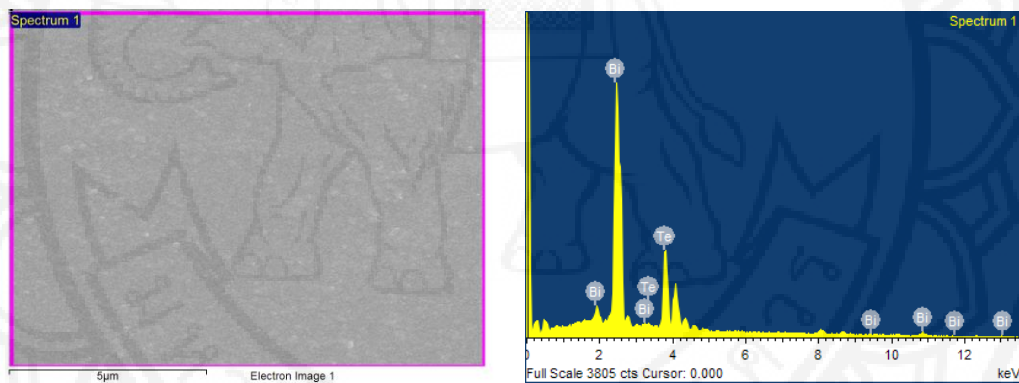
รูปที่ 4 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางบิสมัทเทลูไรด์จากเครื่อง FESEM อบที่อุณหภูมิต่างๆ (a) As-deposited (b)  $300^\circ\text{C}$  (c)  $350^\circ\text{C}$  (d)  $400^\circ\text{C}$



รูปที่ 4 (ต่อ)

โดยรูปที่ 4(a), 4(b), 4(c) และ 4(d) แสดงพื้นผิวของฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบ อบที่อุณหภูมิ 300 °C อบที่อุณหภูมิ 350 °C และอบที่อุณหภูมิ 400 °C ตามลำดับ จากรูปพบว่าฟิล์มจะแสดงรูปร่างของเกรนแบบ หกเหลี่ยมที่ชัดเจนเมื่ออบที่อุณหภูมิ 300-350 °C และเมื่อ

อุณหภูมิของการอบเป็น 400 °C ลักษณะของพื้นผิวจะเรียบมากขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้น ผลึกของฟิล์มบางส่วนจะเกิดการหลอมรวมกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xing et al. (2013)



รูปที่ 5 แสดงสเปกตรัมพลังงานของฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์

รูปที่ 5 แสดงการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) ของฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์โดยอัตราส่วนของ Bi : Te ของฟิล์มที่นำไปอบที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1 จากตารางที่ 1 พบว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านกระบวนการอบจะมีอัตราส่วนของ Bi : Te เป็น 2.53 : 2.47 ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวจะแตกต่างจากอัตราส่วนของ Bi : Te ของเป้าสารเคลือบ (Bi : Te = 2 : 3) ซึ่งเกิดจากอัตราการเคลือบของอะตอม Bi สูงกว่าอะตอม Te Ar Sputter Yields. (2005) เมื่อนำฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 300 -

400 °C พบว่าฟิล์มจะมีอัตราส่วนของ Bi : Te ใกล้เคียงอัตราส่วน 2 : 3 มากขึ้นเพราะจากจุดหลอมเหลวของ Bi ซึ่งเท่ากับ 271.3 °C Bismuth. (2015) จุดหลอมเหลว  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 = 586 \text{ }^\circ\text{C}$  Bismuth telluride. (2015) เมื่อนำไปอบในช่วงอุณหภูมิ 300-400 °C จะทำให้อะตอมของ Bi ระบายออกไป ทำให้ได้อัตราส่วนของ Bi : Te ใกล้เคียงกับ 2 : 3 จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ากระบวนการอบฟิล์มจะช่วยปรับอัตราส่วนของ Bi : Te ให้ใกล้เคียงกับ  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  มากขึ้น

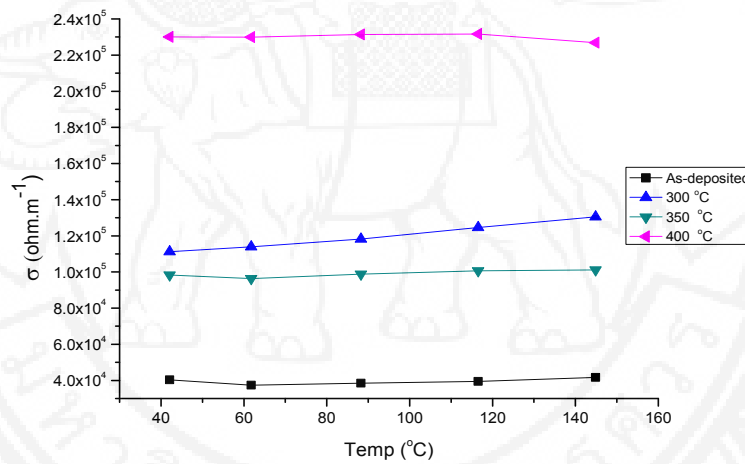


ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนขององค์ประกอบธาตุของฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์อบที่อุณหภูมิต่างๆ

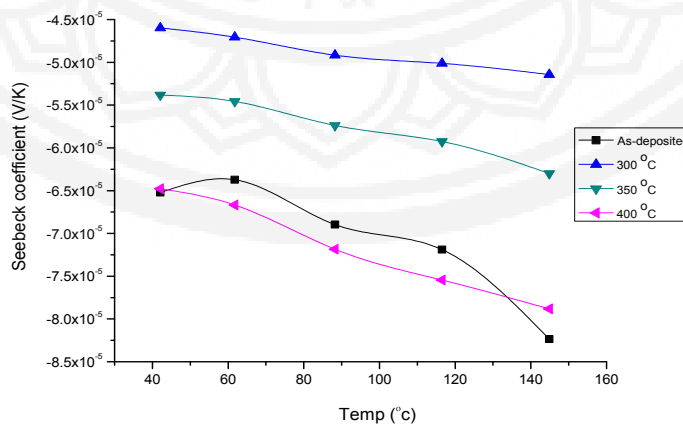
Annealing Temperature (°C)	Bi/Te atomic ratio
As-deposited	2.53/2.47
300	2.35/2.65
350	2.28/2.72
400	2.13/2.87

ฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์ถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค และ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ZEM3) ถูกวัดตั้งแต่ อุณหภูมิห้องถึง 150 °C จากรูปที่ 6 พบว่า เมื่ออุณหภูมิ การอบเพิ่มขึ้น การนำไฟฟ้าจะดีขึ้น อาจเนื่องมาจากความ เป็นผลึกของฟิล์มสูงขึ้น ส่งผลให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น จาก รูปที่ 7 จะพบว่าฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์อบที่ 400 °C มี ค่าสภาพนำไฟฟ้าดีที่สุด เท่ากับ  $2.30 \times 10^5 \Omega\text{m}^{-1}$  วัด

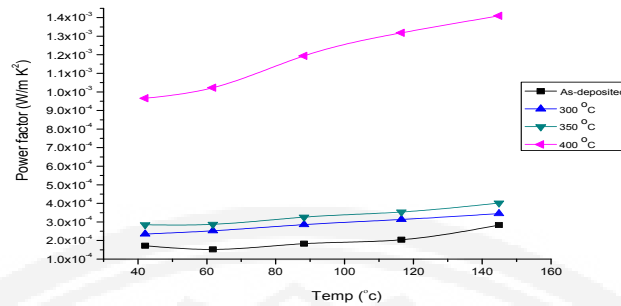
ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang and Wei-ling (2009) เมื่อทำการอบฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์ที่อุณหภูมิ 100-300 °C ภายใต้อากาศแห้งของก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์อบที่อุณหภูมิสูงสุด (300 °C) มีค่าสภาพนำไฟฟ้าดีที่สุด เท่ากับ  $7.1 \Omega\text{m}^{-1}$  วัดที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 6 ค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์ อบที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของฟิล์มบางบิสมัทเทลลูไรด์ อบที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 8 ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของฟิล์มบางบิสม์สเทลลูไรด์ อบที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 7 แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของฟิล์มบางบิสม์สเทลลูไรด์ ทำการวัดตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 150 °C พบว่าทุกช่วงอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคแสดงค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงพฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยมีพาหะอิสระส่วนมากเป็นอิเล็กตรอน ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจะแปรผกผันกับปริมาณความหนาแน่นของพาหะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะที่มากขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคลดลง ในงานวิจัยนี้พบว่าฟิล์มบางบิสม์สเทลลูไรด์อบที่อุณหภูมิ 400 °C จะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคต่ำสุด คือ  $-7.88 \times 10^{-5}$  V/K

รูปที่ 8 แสดงค่าแฟกเตอร์กำลังไฟฟ้า (PF) ของฟิล์มบางบิสม์สเทลลูไรด์ อบที่อุณหภูมิต่างๆ โดยค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์นี้ คำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (S) และค่าสภาพการนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) พบว่าฟิล์มบางบิสม์สเทลลูไรด์อบที่อุณหภูมิ 400 °C จะมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ คือ  $9.65 \times 10^{-4}$  W/m K<sup>2</sup> ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์สูงสุด คือ  $1.41 \times 10^{-3}$  W/m K<sup>2</sup> ที่อุณหภูมิ 150 °C ในขณะที่ฟิล์มอบที่อุณหภูมิ 300-350 °C และฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบ จะมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์อยู่ในช่วงไม่เกิน  $4 \times 10^{-4}$  W/mK<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Huang and Wei-ling (2009) เมื่ออบฟิล์มบางบิสม์สเทลลูไรด์ที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์สูงสุดเท่ากับ  $4 \times 10^{-4}$  W/mK<sup>2</sup>

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการเคลือบฟิล์มบางบิสม์สเทลลูไรด์โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงลงบนวัสดุรองรับโพลีอิมมิด เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่อบต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก โดยอบที่อุณหภูมิ แตกต่างกันตั้งแต่อุณหภูมิ 300 °C 350 °C และ 400 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้าง พบว่าเมื่อทำการอบฟิล์มบางบิสม์สเทลลูไรด์ที่อุณหภูมิ 400 °C ฟิล์มจะมีโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์มากขึ้น มีขนาดของเกรนที่เพิ่มขึ้นและจะมีความหนาแน่นมากกว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบและอบที่อุณหภูมิ 300-350 °C ส่งผลให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้น จากการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) ของฟิล์มบางบิสม์สเทลลูไรด์ พบว่ากระบวนการอบฟิล์มจะปรับอัตราส่วนของ Bi : Te ให้ใกล้เคียงกับ Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> มากขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่การอบที่ 400 °C จะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคต่ำสุด คือ  $-7.88 \times 10^{-5}$  V/K ในขณะที่มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์สูงสุด คือ  $1.41 \times 10^{-3}$  W/m K<sup>2</sup> วัดที่อุณหภูมิ 150 °C จากค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์จะเห็นว่า ฟิล์มบางบิสม์สเทลลูไรด์ที่เหมาะสมจะนำไปใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก คือ ฟิล์มบางบิสม์สเทลลูไรด์อบที่อุณหภูมิ 400 °C

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้ ประจำปี 2559 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



## เอกสารอ้างอิง

- Alexander, B. (2000). Thermal Properties of Semiconductor Low-dimensional Structures. *Phys. Low-Dim. Structures*, 1/2, 1-43.
- Ar Sputter Yields. (2005). Retrieved from <http://www.npl.co.uk/upload/pdf/arsputtergroups45.pdf>
- Bismuth. (2015) Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth>
- Bismuth telluride. (2015) Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth\\_telluride](https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth_telluride)
- Goncalves, L. M., Rocha, J. G., Couto, C., Alpuim, P., Gao Min, Rowe, D. M., & Correia, J. H. (2007). Fabrication of flexible thermoelectric microcoolers using planar thin-film technologies. *Journal of micromechanics and microengineering*, 17, 168-173.
- Heremans, J. P. (2005). Low-dimensional Thermoelectricity. *Acta physica polonica a*, 180, 609-632.
- Huang, H., & Wei-ling, L. (2009). Influence of annealing on thermoelectric properties of bismuth telluride films grown via radio frequency magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 517, 3731-3734.
- Isaac, L. (2014). Retrieved from <http://www.electronicnews.com.au/news/researchers-improve-thin-film-energy-harvester-eff>
- Julian Goldsmid, H. (2014). Bismuth Telluride and Its Alloys as Materials for Thermoelectric Generation. *Materials*, 7, 2577-2592.
- Kumpeerapun, T. (2009). *Thermoelectric*. Retrieved from <http://webstaff.kmutt.ac.th/~ivorthip/TE>
- Riffat, S. B., & Xiaoli, M. (2003). Thermoelectric: A review of present and potential applications. *Applied thermal Engineering*, 23, 913-935.
- Rowe, D. M. (1999). Thermoelectrics, an environmentally-friendly source of electrical power. *Renewable Energy*, 16, 1251-1256.
- Summary of Properties for Kapton Polyimide Films. (2012). Retrieved from <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-summary-of-properties.pdf>
- Terry, M. (2001). *Recent Trends in Thermoelectric Materials Research II*. USA: San Diego.
- Xing, W., Hngcai, H., Ning, W., & Lei, M. (2013). Effects of annealing temperature on thermoelectric properties of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> films prepared by co-sputtering. *Journal of applied surface science*, 276, 539-542.
- Xinfeng, T., Xenjie, X., Han, L., Wenyu, Z., & Qingjie, Z. (2007). Preparation and thermoelectric transport properties of high-performance p-type Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> with layered nanostructure. *Journal of applied physics letters*, 90, 012102.
- Yuan, D., Hui-min, L., Yao, W., Zhi-wei, Z., Ming, T., & Jiao-lin, C. (2011). Growth and transport properties of oriented bismuth telluride films. *Journal of alloys and compounds*, 509, 5683-5687.