บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองโครงงาน โดยในปีที่ 1 ของการวิจัย ได้ผลลัพธ์สำหรับโครงการย่อยที่ 1 คือ ได้อุปกรณ์เพื่อใช้ในการเตรียมสารเทอร์โมอิเลคตริค $Bi_x Sb_{2-x} Te_3$ ที่มีสมรรถนะสูงในระดับอุณหภูมิห้องโดยวิธีอัดเย็น และผลลัพธ์สำหรับโครงการย่อยที่ 2 คือ ห้องสุญญากาศสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง $Bi_x Sb_{2-x} Te_3$ มีผลสรุปดังนี้

1. จากผลการวิจัยโครงการย่อยที่ 1 พบว่า การสังเคราะห์สารเทอร์โมอิเลคตริค ด้วยวิธีหลอมการอัดเย็นสามารถ ให้สารที่ได้มีคุณสมบัติเป็นสารเทอร์โมอิเลคตริคได้ โดยเครื่องมือที่ใช้สามารถจัดสร้างเองได้

2. ได้เครื่องมือต้นแบบที่สามรถนำมาวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าได้ แต่ยังคงต้องปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้สะดวกและเที่ยงตรงมากขึ้น

3. สารที่สังเคราะห์ได้เมื่อนำไปเป็นสารตั้งต้นเพื่อเตรียมฟิล์มบางหรือ ผงนาโน และทำการตรวจสอบคุณสมบัติของสาร พบว่ายังคงมีสภาพและคุณสมบัติเป็นสารเทอร์โมอิเลคตริคเหมือนสารตั้งต้นเดิม ซึ่งเป็นสัญญาณที่ดีในการพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในโอกาสต่อไป

4. จากผลการวิจัยโครงการย่อยที่ 2 ระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้นตามขีดความสามารถ สามารถทำความดันได้ต่ำสุดอยู่ในช่วง 10^{-7} mbar แต่เมื่อทำการทดลองวัดจริงแล้วพบว่าสามารถทำความดันได้อยู่ในช่วง 10^{-6} mbar เท่านั้น ซึ่งอาจจะเกิดจากการรั่วของระบบบริเวณรอยต่อระหว่างข้อต่อของชิ้นส่วนต่างๆ ในระบบ หรือเป็นผลเนื่องจากความสะอาดของพื้นผิวภายในโถสุญญากาศร่วมด้วย ดังนั้นการที่สร้างระบบสุญญากาศที่สามารถปั๊มได้ที่ความดันต่ำมากๆนั้น จำเป็นจะต้องระมัดระวัดในขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเข้าด้วยกัน รวมทั้งความสะอาดของระบบด้วย เพื่อที่ให้ระบบสุญญากาศที่สร้างสามารถทำความดันที่ต่ำได้ในเวลาไม่มากเกินไป ทั้งนี้อาจจะต้องใช้การสูบอากาศหลาย ๆ รอบ ช่วยก่อนที่จะทำการทดลองจริง และจากผลการทดลองพบว่าในช่วง 10 ถึง 15 นาทีแรก การลดลงของความดันของระบบสุญญากาศจะมีการลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นช่วงที่ดิฟฟิวชันปั๊มกำลังเริ่มทำงานต่อเนื่องจากการปั๊มโดยใช้โรตารี่ปั๊ม ซึ่งทำความดันได้ต่ำสุดอยู่ในช่วง 10^{-2} ถึง 10^{-3} mbar เท่านั้น การเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็วนี้เกิดจากการที่ไอน้ำมันของดิฟฟิวชันปั๊มไปชนกับโมเลกุลของก๊าซยังค้างอยู่ในระบบซึ่งโรตารี่ปั๊มไม่สามารถปั๊มออกได้หมด ดังนั้นเมื่อเกิดการชนกันทำให้เกิดที่ว่างให้โมเลกุลที่ยังอยู่ภายในระบบสุญญากาศย้ายมาแทนที่

ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลย้ายจากภายในโถสุญญากาศผ่านดิฟฟิวชันปั๊ม สู่โรตารี่ปั๊ม และออกสู่บรรยากาศ การที่จะทำให้ได้ความดันที่ต่ำใกล้เคียงกับความสามารถที่เครื่องจะทำได้จริงนั้นอาจจะต้องใช้เวลาที่นาน สังเกตได้จากผลการทดลองหลังจาก 20 นาทีไปจนกระทั่งครบ 90 นาที การเปลี่ยนแปลงความดันจะมีการลดลงอย่างช้าๆ ดังนั้นการนำระบบสุญญากาศนี้ไปประยุกต์ใช้จะต้องพิจารณาช่วงความดันที่ต้องการใช้งานให้เหมาะสมกับเวลาที่ใช้สำหรับการเตรียมระบบด้วยเช่นกัน

5. การทดสอบการทำวัสดุนาโนจากเป้าสารเทอร์โมอิเลคตริค และทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟิล์มที่สามารถสังเคราะห์ได้ อันได้แก่ ความหนาของฟิล์มและโครงสร้างผลึก ในการวิจัย ได้ทำการทดสอบการเกิดวัสดุนาโนของสารเทอร์โมอิเลคตริคในบรรยากาศปกติ ก่อนที่จะนำเป้าของสารทดลองไปทำการทดสอบในระบบสุญญากาศ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเลเซอร์ที่ใช้กับเป้าที่ยิง เพื่อให้ได้ตัวแปรที่สำคัญสำหรับการคำนวณ นั่นคือพื้นที่ที่เกิดอันตรกิริยาบนผิวของเป้า จากการทดลองพบว่า ในระบบที่ยังไม่มีการเคลื่อนที่ของเป้า เมื่อเพิ่มความกว้างของพัลส์จะทำให้พื้นที่ของบริเวณกระทบร้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อยิงบนเป้าที่มีการหมุนบริเวณกระทบร้อนจะมีลักษณะเป็นแนวยาวไปตามแนวเส้นสัมผัสของการเคลื่อนที่แบบวงกลม ซึ่งสิ่งที่หลุดออกมาคืออนุภาคระดับนาโนเมตรซึ่งยังคงแสดงโครงสร้างแบบเดียวกับเป้า มีความต่างเพียงเล็กน้อยในส่วนของพีค ที่ตำแหน่ง $2\theta = 28$ องศา ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการที่สารอยู่ในสภาพของการเป็นอนุภาคระดับนาโนเมตร ความสามารถในการวิเคราะห์เพื่อแยกองค์ประกอบของสารจะมีความใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ธาตุเชิงเดี่ยวมากขึ้น เนื่องจากจำนวนโมเลกุลที่อยู่ภายในอนุภาคนั้นมีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับเป้า ในขณะที่ภาพรวมของพีคที่ปรากฏทั้งหมดของอนุภาคที่เตรียมได้ของเป้า และสารอ้างอิงนั้น ยังคงแสดงผลในทำนองเดียวกันทั้งหมด นั่นคือแสดงโครงสร้างแบบ rhombohedra เมื่อนำระบบดังกล่าวไปทำการทดสอบการทำฟิล์มเบื้องต้นในสุญญากาศ พบว่าการเตรียมฟิล์มโดยใช้ YAG เลเซอร์ยิงลงบนเป้าเมื่อใช้จำนวนพัลส์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของฟิล์มมากขึ้น รวมทั้งทำให้ผลของค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นของประจุพาหะเพิ่มขึ้น แต่โครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD นั้นยังคงแสดงผลออกมาในทำนองเดียวกัน คือ ยังคงแสดงโครงสร้างอยู่ในรูปของ rhombohedra แบบเดียวกับเป้าที่ใช้ สิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเช่นเมื่อใช้จำนวนพัลส์ที่ต่างกันคือสัญญาณที่วัดได้จากฟิล์มที่เตรียมด้วยจำนวนพัลส์ที่น้อย จะมีความบางกว่าทำให้การวัดโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD วัดสัญญาณได้น้อยกว่า ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมด้วยจำนวนพัลส์ที่สูงขึ้น ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น สัญญาณที่วัดได้จากเครื่อง XRD ก็จะมีความชัดเจนมากขึ้น ทำให้สามารถระบุองค์ประกอบได้ชัดเจนยิ่งขึ้นได้

6. จากการทดสอบวัดชนิดความเป็นสารกึ่งตัวนำของเม็ดสารตัวอย่างจากกระบวนการอัดเย็น โดยการให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านทั้งสองของเม็ดสาร และตรวจจับด้วยมัลติมิเตอร์พบว่า $Bi_{1.6}Sb_{0.4}Te_3$ แสดงคุณสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น ส่วน $Bi_{0.45}Sb_{1.55}Te_3$ แสดงคุณสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี

7. การทดสอบการทำฟิล์มเบื้องต้นที่ระยะห่างต่างๆกันของ substrate พบว่าระยะห่างของ substrate ที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของฟิล์มที่ได้ โครงสร้างที่วิเคราะห์ได้ยังคงแสดงผลในทำนองเดียวกับเป้าที่ใช้ แต่สิ่งที่เปลี่ยนแปลงคือสมบัติทางไฟฟ้า นั่นคือ เมื่อระยะห่างของ substrate ลดลง ความหนาฟิล์มจะเพิ่มขึ้น ค่า mean free path จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าซึ่งจะมีค่าลดลง และทำให้ค่าสภาพความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพซึ่งแปรผันตรงกับค่าสภาพความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นสำหรับการทำฟิล์มเทอร์โมอิเล็กทริกจะต้องมีความหนาที่เหมาะสมช่วงหนึ่งจึงจะทำให้ฟิล์มที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด การที่จะทำให้ได้ฟิล์มได้ขนาดตามที่ต้องการนั้นจำเป็นจะต้องควบคุมตัวแปรที่เกี่ยวข้องซึ่งเกิดจากความสามารถในการควบคุมระบบสุญญากาศเป็นพื้นฐานนั่นเอง

8. จากการทดลองวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Bi_{0.6}Sb_{1.4}Te_3$ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องด้วยเครื่องมือที่สร้างขึ้น ด้วยวิธีของ Van der Pauw ในห้องทดลอง ในช่วงอุณหภูมิ 29.9-60.1 องศาเซลเซียส และกำหนดให้กระแสที่ไหลผ่านสารตัวอย่างที่มีค่าคงที่ (constant current source) มีขนาด 1 mA โดยมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเป็น 0.198 Ω.cm ที่ช่วงอุณหภูมิ27.9-28.1 ºC และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 30..1º C - 34.9º C โดยมีค่าเฉลี่ยของสภาพความต้านทานไฟฟ้า ลดลงจาก 0.198 Ω.cm เป็น 2.11E-3 Ω.cm ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ในช่วงอุณหภูมิ 34.9º C จะกระทั่งถึง 60.1 oC ซึ่งมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยเป็น 1.55E-03 Ω.cm พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสภาพความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่าในช่วงแรก มาก (27.9º C ถึง 34.9º C) เมื่อคิดการเปลี่ยนปลงสภาพความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วง 34.9º C ถึง 60.1 oC จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิ 34.9 º C เท่ากับ 26.47%

5.2 ปัญหา และอุปสรรค

1. เนื่องจากในการวิจัยยังขาดเครื่องมือที่ใช้การตรวจสอบคุณสมบัติเทอร์โมอิเลคตริคของสารที่สังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ เมื่อสังเคาระห์สารได้แล้วต้องส่งไปวัดที่ห้องปฏิบัติการอื่น ทำให้เกิดความ

ความล่าช้าในการทำงาน ทางทีมวิจัยจะพยายามหาทางในการสร้างเครื่องมือที่ใช้วัดทางอ้อมและนำมาคำนวณหาค่า figure of merit ต่อไป

2. การสร้างระบบสุญญากาศที่ออกแบบเองนั้น ชิ้นส่วนที่หามาเพื่อประกอบเป็นระบบค่อนข้างหายากและมีราคาแพง ทำให้การสร้างระบบเป็นไปได้ช้าแต่ก็ประสบผลสำเร็จ

5.3 แผนงานที่จะดำเนินต่อไป

หากได้รับการสนับสนุนก็จะมีความคล่องตัวในการดำเนินการให้เป็นไปตามแผนในระยะที่สองซึ่งจะเป็นการออกแบบและสร้างโมดูลที่เหมาะสมกับการใช้งานในประเทศ คาดว่าจะมีผลลัพธ์ในรูปของโมดุลต้นแบบเพื่อการประยุกต์ใช้ได้อย่างแน่นอน โดยมีแผนงานดังนี้

1. ออกแบบโมดูลทั้งแบบของแข็งและแบบฟิลม์เพื่อประยุกต์ใช้งานจริง
2. ทดสอบประสิทธิภาพในการเปลี่ยนความร้อนให้เป็นไฟฟ้าของโมดูลที่สร้างขึ้น
3. ทดสอบประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าให้เป็นความร้อน-ความร้อนของโมดูล
4. วิเคราะห์ผล
5. สรุปการวิจัย+รายงานผล