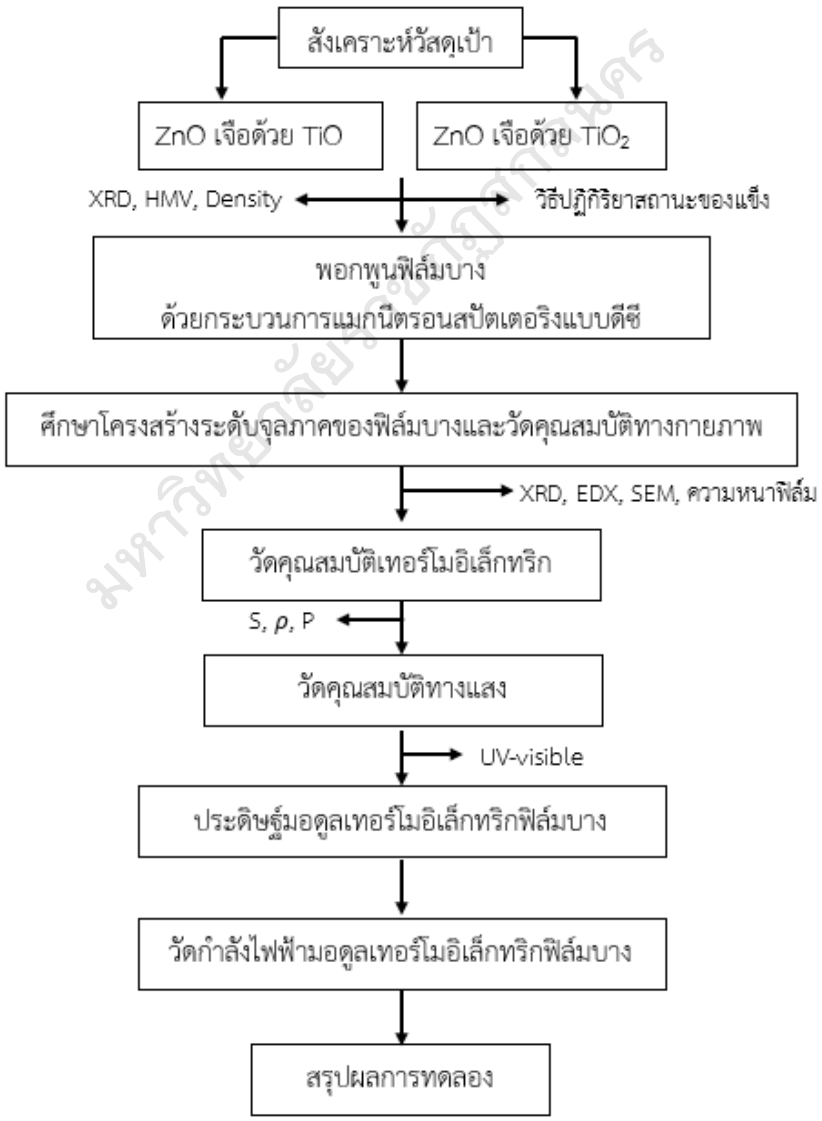
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทที่ 3 นี้ เป็นรายละเอียดวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย ได้แก่ การเตรียมวัสดุเป้า การเตรียมฟิล์มบาง การศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกฟิล์มบาง การประดิษฐ์และทดสอบโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกฟิล์มบาง ดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 12 ไดอะแกรมการทำวิจัย

การสังเคราะห์วัสดุเป้าสปัตเตอริง

การสังเคราะห์วัสดุเป้าสปัตเตอริงด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction; SSR) สำหรับทำเป้าสปัตเตอริง (sputtering target) มีรายละเอียดการสังเคราะห์วัสดุและทำเป้าสปัตเตอริง ดังนี้

1. การสังเคราะห์ผงวัสดุ ZnO เจือด้วย TiO_2

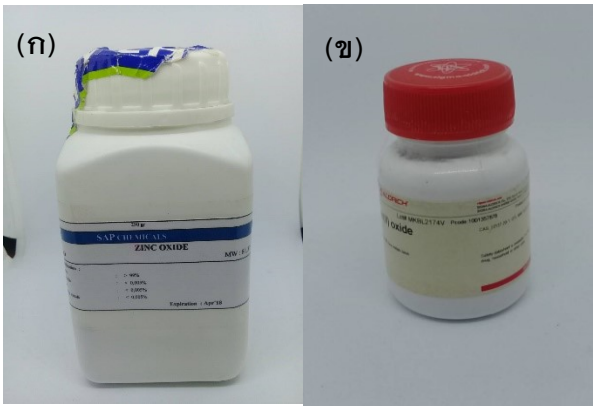
ในการสังเคราะห์ผงวัสดุ ZnO เจือด้วย TiO_2 ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งจากผงสารตั้งต้น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ความบริสุทธิ์ 99 % (SAP Chemicals, สหรัฐอเมริกา) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ความบริสุทธิ์ 98 %(ajax finechem pty ltd, ออสเตเลีย) แสดงดังภาพประกอบ13

ภาพประกอบ 13 ขวดสารตั้งต้น (ก) ซิงออกไซด์ (ZnO) (ข) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

นำผงสารตั้งต้น ZnO และ TiO_2 มาผสมในอัตราส่วนสารตั้งต้น ZnO (96.67 %) และ TiO_2 (3.33 %) รวมเป็น 30.0 g บดด้วยมือในโกรงบดสารบดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนได้ผงสารประกอบทั้งสองมีการกระจายตัวและผสมเข้ากัน

2. การสังเคราะห์ผงวัสดุ ZnO เจือด้วย TiO

ในการสังเคราะห์ผงวัสดุ ZnO เจือด้วย TiO ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งจากผงสารตั้งต้น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ความบริสุทธิ์ 99 % (SAP Chemicals, สหรัฐอเมริกา) และไทเทเนียมออกไซด์ (TiO) ความบริสุทธิ์ 99.99 % (sigma-aldaich, สหรัฐอเมริกา) แสดงดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 ขวดสารตั้งต้น (ก) ซิงออกไซด์ (ZnO) (ข) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO)

นำผงสารตั้งต้น ZnO และ TiO มาผสมในอัตราส่วนสารตั้งต้น ZnO (96.67 %) และ TiO (3.33 %) จำนวน 30.0 g บดด้วยมือในโกรงบดสารบดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนได้ผงสารประกอบทั้งสองมีการกระจายตัวและผสมเข้ากัน

3. การเตรียมเป้าสปัตเตอริง

นำผงสารตั้งต้น ZnO + TiO และ ZnO + TiO_2 ที่เตรียมได้ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งจำนวน 30 g มาอัดขึ้นรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm หนาประมาณ 3 mm ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกแกนเดี่ยวที่ความดัน 250 kg cm^2 แสดงดังภาพประกอบ 15 จากนั้นนำก้อนวัสดุที่อัดได้ไปเผาผลึกที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำมาทดสอบเฟสวัสดุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD6100, Shimadzu; Japan) เพื่อยืนยันความเป็นผลึกของวัสดุเป้าสปัตเตอริงสำหรับการเตรียมเทอร์โมอิเล็กทริกแบบฟิล์มบาง

ภาพประกอบ 15 การเตรียมเป้าสปัตเตอริง (ก) ส่วนประกอบโมลอัด (ข) การขึ้นรูปเป้าสปัตเตอริง

การวัดสมบัติทางกายภาพของวัสดุเป้า

1. การวัดความหนาแน่น

ความหนาแน่น คือ การเปลี่ยนแปลงของวัตถุดิบซึ่งระบุได้จากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น อาจทำให้เกิดผลเสียหายต่อการทำงานหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายได้ ซึ่งสามารถใช้การตรวจวัดความหนาแน่นของวัตถุดิบเพื่อยืนยันความบริสุทธิ์ของวัสดุได้ หากสารมีสิ่งอื่นที่ราคาถูกกว่าปลอมปนอยู่ ความหนาแน่นของวัสดุคอมโพสิตที่วัดได้จะแตกต่างจากสารบริสุทธิ์อาจมีผลกระทบต่อคุณลักษณะที่ระบุประสิทธิภาพหลักได้ อย่างเช่น ความแข็งแรงและความทนต่อการแตกหัก ตัวอย่างเช่น ฟองอากาศภายในสามารถทำให้ชิ้นส่วนบกพร่องได้ในที่สุด เมื่อมีการวางภายใต้แรงเค้น การสุ่มตัวอย่างชิ้นส่วนเป็นวิธีการที่ง่ายและคุ้มค่าในการเฝ้าติดตามคุณภาพอย่างต่อเนื่อง ขั้นตอนปฏิบัติทั่วไปในการวัดความหนาแน่นจากน้ำหนักในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ เทคนิคการลอยตัว หลักการแทนที่ และวิธีการที่นิยมใช้มากที่สุดคือเทคนิคการลอยตัวซึ่งใช้หลักการของอาร์คิมิดีส กล่าวคือ วัตถุที่จุ่มลงในของเหลวจะระบุการสูญเสียน้ำหนักที่ชัดเจนเทียบเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่วัตถุนั้น

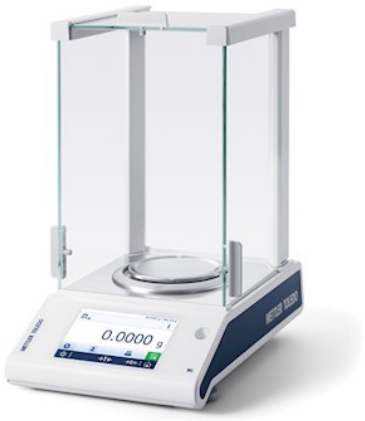
$$\rho = \frac{m}{V} \tag{9}$$

ρ คือ ความหนาแน่นของสาร (g/m^3)
m คือ มวลของวัสดุ (g)
V คือ ปริมาตรของวัสดุ (m^3)

$$V = lwh \tag{10}$$

l คือ ความยาว (cm)
w คือ ความกว้าง (cm)
h คือ ความสูง (cm)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร



ภาพประกอบ 16 เครื่องวัดความหนาแน่น (Mettler Toledo)

2. การวัดความแข็ง

ค่าความแข็งของวัสดุใช้สำหรับความแข็งของวัสดุ โดยนิยามของความแข็ง คือความทนของวัสดุต่อการเสียรูป มีวิธีการทดสอบความแข็งมีอยู่หลายวิธีที่ได้รับการยอมรับ แต่วิธีการที่ได้รับความความนิยมมากที่สุดคือเครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิคเกอร์ รุ่น HMV-2 เครื่องรุ่นนี้เป็นเครื่องที่มีระบบสลับเปลี่ยนน้ำหนักแบบอัตโนมัติ (Automatic weight Switching) ที่ทำให้การปฏิบัติงานทั้งหมดสามารถกระทำได้จากแผงสัมผัส (Touch Panel) ของเครื่องทดสอบจากการเลือกน้ำหนักการทดสอบถึงการเลือกเวลาทำการหยุดค้างของแรง (Load hold tine) อุปกรณ์ Electric turret (HMV-2) สลับเปลี่ยนอัตโนมัติระหว่างหัวกดและเลนส์ตา นอกจากนี้ยังสามารถดึงข้อมูลผ่าน windows เข้าสู่โปรแกรม excel ได้อีกด้วย

$$H_V = \frac{1.8544F}{D^2} \qquad (10)$$

F = แรงที่ใช้ในการกด (mN)

D = ขนาดของหลุดที่กด

ภาพประกอบ 17 เครื่องวัดความแข็ง (HMV)

3. การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ภาพประกอบ 18 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD-6100 Shimadzu, Japan

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

การเตรียมฟิล์มบางโดยใช้ระบบแมกนิตรอนสปัตเตอริง

1. ขั้นตอนการเตรียมวัสดุฐานรอง

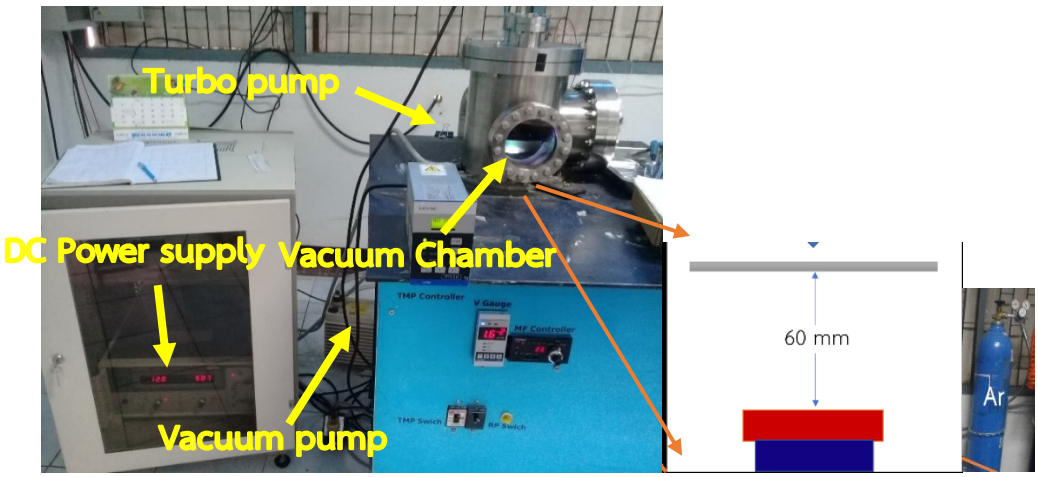
การเตรียมฟิล์มบางบนแผ่นฐานรองแก้ว ขนาด 37 x 25 mm ความหนา 1.05 mm ทำความสะอาดด้วยการล้างด้วยน้ำยาทำความสะอาด แล้วนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น อีก 2 รอบ เพื่อล้างคอรีนออกแล้วนำมาสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิคในน้ำกลั่น เป็นเวลา 15 นาที ในอซิโตน 15 นาที และสุดท้าย ใช้ลมเป่าให้แห้ง (เพิ่มขั้นตอนการทำความสะอาดเข้าไป)

2. ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเป้า

โดยใช้ระบบแมกนิตรอนสปัตเตอริงแบบดีซี ที่หน่วยปฏิบัติการวิจัยฟิล์มบาง ศูนย์ความเป็นเลศด้านพลังงานทางเลือก มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ประกอบด้วย เครื่องจ่ายไฟฟ้าแบบดีซี (dc power supply) ปืนแมกนิตรอนสปัตเตอริง (magnetron sputtering gun) และระบบสุญญากาศ (vacuum system) แสดงในภาพประกอบ 19 ส่วนตัวเป้าสปัตเตอริงทำจากผงวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ZnO เจือด้วย TiO และ ZnO เจือด้วย TiO_2 ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งแล้วทำการอัดผงวัสดุดังกล่าวในบลอกอัดแบบเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm ความหนา 3 mm โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกแกนเดี่ยวที่ความดัน 250 kg cm^2

3. ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง

การเตรียมฟิล์มในห้องสุญญากาศ (vacuum chamber and Turbo pump) ที่มีความดันเริ่มต้น (base pressure) $3.0x10^{-5}$ torr ภายใต้บรรยากาศแก๊สอาร์กอน (Ar 99.999%) และความดันการทำงานรวม (total working pressure) $1.6×10^{-2}$ torr ทำการปรับกระแส/ศักย์ไฟฟ้า สำหรับการพอกพูนฟิล์มบาง ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 120 mA และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 460-600 V สำหรับการพอกพูนฟิล์มบางเป้าการสปัตเตอริง โดยให้ฐานรองแก้ว อยู่ห่างจากเป้าสปัตเตอริง 60 mm และไม่มีการให้ความร้อนขณะทำการพอกพูน เวลาที่ใช้สำหรับการพอกพูนเป็น 5 min แสดงดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 ระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง

4. การศึกษาลักษณะบ่งชี้ของฟิล์มบาง

หลังจากที่ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางขนาด 24.0 x 24.0 mm และความหนาระดับนาโนเมตรบนฐานกระจก ด้วยระบบแมกนิตรอนสปัตเตอริงแบบดีซี สำหรับนำมาศึกษาลักษณะบ่งชี้และสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก ได้แก่ การก่อเกิดเฟสของฟิล์มบาง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD-6100 Shimadzu, Japan) แสดงดังภาพประกอบ 18 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้นมีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง พิจารณาจากน้ำหนักอะตอม (atomic weight) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แบบกระจายพลังงาน (energy dispersive spectrometer, EDS) ความหนาฟิล์ม (film thickness) ประมาณได้จากภาพภาคตัดขวาง (cross-sectional view) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) แสดงดังภาพประกอบ 20

4.1 การศึกษาลักษณะสัญฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็คตรอนกระเจิงกลับ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างจากการดึง โดย Energy Dispersive Spectrometry (EDS) เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ใน SEM ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

<u>การประยุกต์ใช้งาน</u>: นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็คตรอน กระเจิงกลับ(Back Scattered Electron) ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างที่ผ่านการดึงมา หรือเกิดความเสียหายมา

<u>ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดสอบ</u>: ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ หากเป็นแบบผงใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น หากเป็นของแข็ง ควรเตรียมมาโดยมีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วแต่ภาชนะที่รองรับด้วย (มีขนาดเล็กจะดีกว่า เนื่องจากตัวอย่างจะสามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนลงกราวด์ได้ดีกว่าป้องกันการCharging effects) ถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าอาจต้องมีการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองหรือคาร์บอน

ภาพประกอบ 20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1450VP)

4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

UV/VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่าง ๆ

ฟิล์มบาง ZnO เจือด้วย TiO และ ZnO เจือด้วย TiO_2 ซึ่งจากการพอกพูนฟิล์มบางนั้นสังเกตได้ด้วยตาเปล่าได้ว่ามีความโปร่งใสที่เหมาะสมซึ่งได้นำฟิล์มบางมาทำการทดสอบวัดประสิทธิภาพการส่องผ่านของแสงด้วยเครื่อง (UV-visible spectrophotometer) แสดงดังภาพประกอบ 18 โดยความยาวคลื่นที่ใช้ในการวัดจะอยู่ในช่วง 400 – 1100 nm ซึ่งเป็นแสงในช่วงที่ตาเรามองเห็นและนำผลที่วัดได้ไปคำนวนหาช่องว่างพลังงานในสมการที่

เปอร์เซ็นประสิทธิภาพการดูดกลืนแสง

$$\%T = \frac{P}{P_0} \times 100 \qquad (11)$$

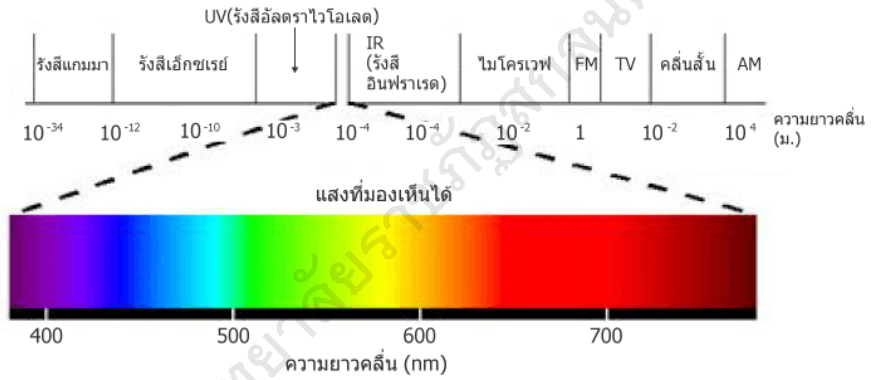
T = ประสิทธิภาพการส่องผ่าน

P = แสงที่ส่องผ่านวัสดุ

P_0= แสงที่ก่อนส่องผ่านวัสดุ

ประสิทธิภาพการดูดกลืนแสง

$$A = -\log \frac{P}{P_0} \quad = -\log T \qquad (12)$$



ภาพประกอบ 21 ความยาวคลื่นของแสงในช่วงต่าง ๆ

ภาพประกอบ 22 เครื่องวัดประสิทธิภาพการส่องผ่านของแสง (UV-visible spectrophotometer)

4.3 สมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกของฟิล์มบาง

การวัดและคำนวณสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริก (measurement and calculation of thermoelectric properties) ได้แก่ สัมประสิทธิ์ซีเบกและสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งการศึกษาสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกของฟิล์มบางที่เตรียมได้มีดังนี้

4.3.1. การวัดสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกฟิล์มบาง

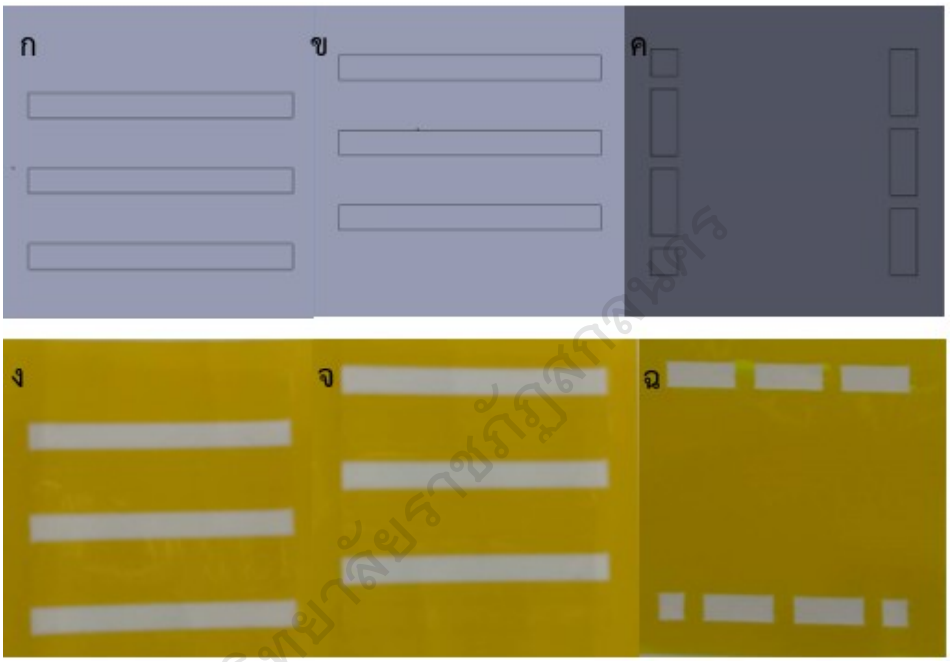
สำหรับการวัดสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกฟิล์มบาง ประกอบด้วยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกและค่ากำลังไฟฟ้า โดยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกของวัสดุฟิล์มบางจะใช้วิธีการวัดสองขั้ว ด้วยเครื่อง ZEM-3 series ภาพประกอบ 23 ตัวอย่างถูกทำให้ร้อนและเก็บไว้ที่อุณหภูมิที่กำหนดมันจะถูกทำให้ร้อนโดยเครื่องทำความร้อนในบล็อกด้านล่างเพื่อให้การไล่ระดับอุณหภูมิสัมประสิทธิ์ Seebeck ถูกวัดโดยการวัดอุณหภูมิบนและล่างของ T1 และ T2 ด้วยเทอร์โมคัปเปิลกดที่ด้านข้างของตัวอย่างแล้วตามด้วยการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเชิงความร้อน dE ระหว่างสายเดียวกันที่ด้านหนึ่งของเทอร์โมคัปเปิลความต้านทานไฟฟ้าวัดโดยวิธี dc สี่ขั้วซึ่งในปัจจุบันฉันจะใช้กับทั้งสองด้านของตัวอย่างในการวัดและกำหนดแรงดันไฟฟ้าตก dV ระหว่างสายเดียวกันของเทอร์โมคัปเปิล

ภาพประกอบ 23 ค่าสภาพนำฟ้า/ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า วัดด้วยเครื่อง ZEM-3 series

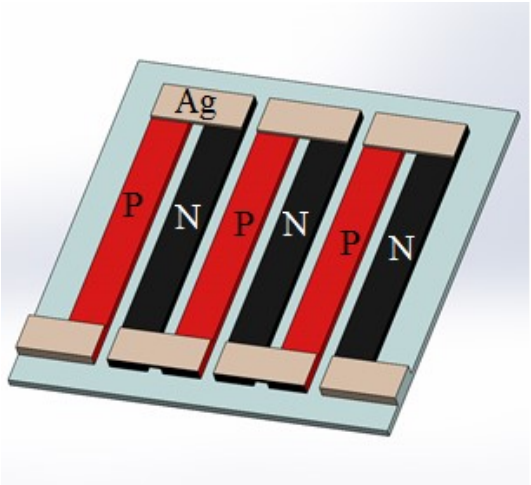
การประดิษฐ์และทดสอบการผลิตไฟฟ้าของมอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบฟิล์มบาง

1. การประดิษฐ์มอดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบฟิล์มบาง

สำหรับการพัฒนาเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบฟิล์มบาง ได้ออกแบบหน้ากาก (mask) ด้วยโปรแกรม Solid Work 2016 แสดงดังภาพประกอบ 24 (ก - ค) การพัฒนาเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบฟิล์มบาง (ง - จ) ซึ่งจะใช้แคปตอนเทปโดยใช้ขนาด 24.0×24.0 mm^2 หนา 0.65 μm แสดงดังภาพประกอบ 24



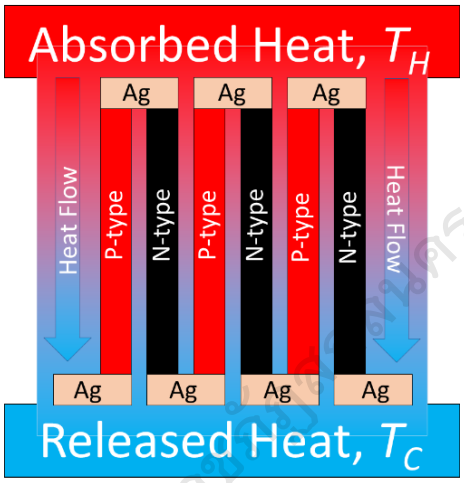
ภาพประกอบ 24 (ก) ออกแบบขาชนิด P, (ข) ออกแบบขาชนิด N, (ค) ออกแบบขั้วไฟฟ้า (ง), (จ), (ฉ) หน้ากากแคปตอนเทปสำหรับประดิษฐ์มอดูลเทอร์โมอิล็กทริกแบบฟิล์มบาง



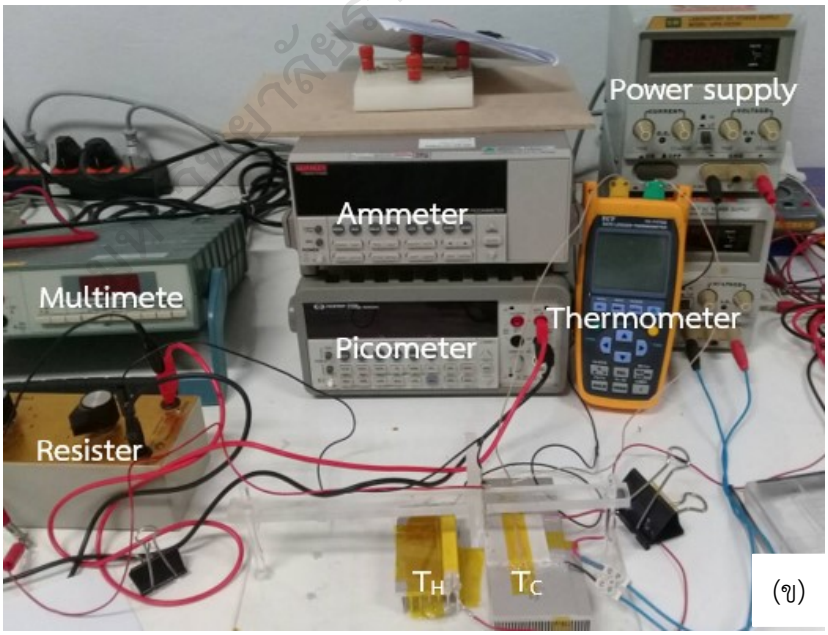
ภาพประกอบ 25 การประดิษฐ์เทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบฟิล์มบาง

2. การวัดประสิทธิภาพไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบฟิล์มบาง

การทดสอบการผลิตกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบฟิล์มบางที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในภาพประกอบ 26 (ก) โดยให้ความร้อนมีอุณหภูมิ T_H ด้านที่ต่อกันแบบอนุกรมทางไฟฟ้า อีกด้านหนึ่งซึ่งต่อกันแบบขนานทางความร้อนมีอุณหภูมิ T_C ที่อุณหภูมิห้อง และทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างอุณหภูมิ ($\Delta T = T_H - T_C$) กับความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) กระแสไฟฟ้า (I) และความต้านทานภายใน (R) โดยใช้หลักการส่งผ่านความร้อนตามระนาบฟิล์ม แสดงดังภาพประกอบ 26 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 26 (ก) หลักการวัดประสิทธิ์ภาพการวัดประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกแบบฟิล์มบาง (ข) ชุดสำหรับการวัดประสิทธิภาพ

ทำการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกมอดูลแบบฟิล์มบางโดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและค่าความต้านทานภายในที่วัดได้ มาคำนวณด้วยสมการ

$$P_{max} = \frac{V_o^2}{4R_{in}} \quad (13)$$

เมื่อ P_{max} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด

V_o คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด

R_{in} คือ ค่าความต้านทานภายใน

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร