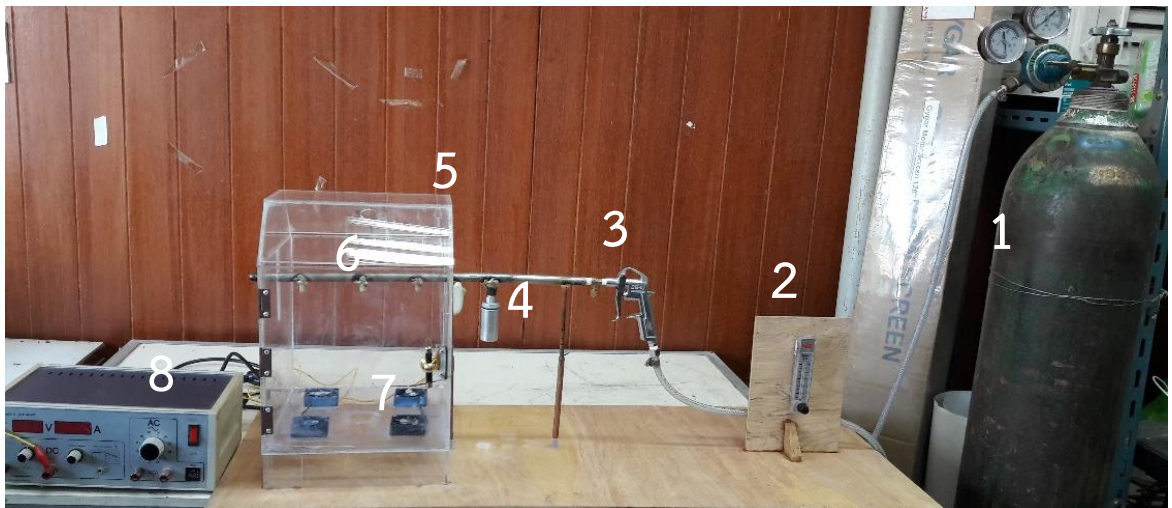


บทที่ 4 ผลการวิจัย

เริ่มทำการออกแบบและสร้างเครื่องฉีดพ่นสารผงอนุภาคระดับนาโนโดยออกแบบและสร้างให้มีความเหมาะสมของอัตราการเคลือบได้ แล้วทำการเคลือบโดยออกแบบเงื่อนไข อัตราการเคลือบ ลงบนกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง (FTO) เสร็จแล้วนำขั้วไฟฟ้าเวิร์กิ้งที่เคลือบแล้วไปตรวจวัดสมบัติต่างๆ ดังนี้ สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) สมบัติการสะท้อนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-vis spectrophotometer) วัดความหนาด้วยภาพถ่ายภาคตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพทางสัณฐาน และความหนาของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากการเตรียมชั้นกระจังแสงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคฉีดพ่น

4.1 ผลของการประดิษฐ์เครื่องเคลือบแบบฉีดพ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง



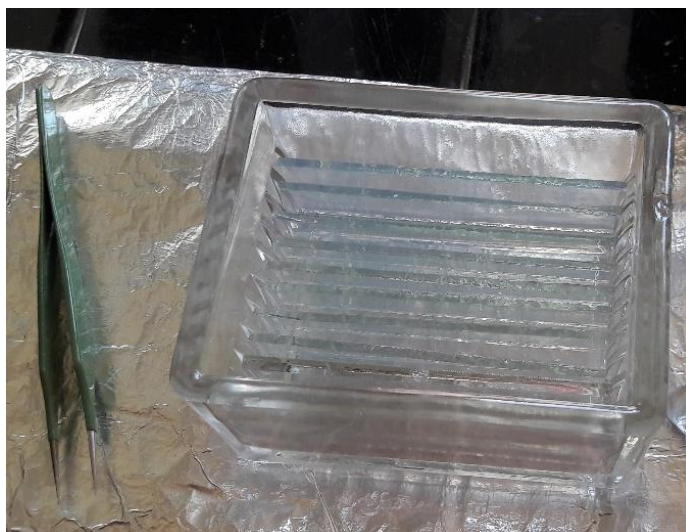
รูปที่ 4.1 ระบบฉีดพ่นจากการพัฒนาเครื่องเคลือบแบบฉีดพ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

จากรูปที่ 4.1 ผลการพัฒนาเครื่องเคลือบแบบฉีดพ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จะเห็นว่าหมายเลข 1คือถังแก๊สออกซิเจน (Oxygen) ใช้ความดันที่ 30

แรงปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ในการฉีดพ่นชั้นกระเจิงแสงโทเทเนียมไดออกไซด์ หมายเลข 2 คือ อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สที่ 4 ลิตรต่อนาที หมายเลข 3 คือปืนเป่าลมที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นวาล์วควบคุมฉีดพ่นชั้นกระเจิงแสงโทเทเนียมไดออกไซด์ หมายเลข 4 คือที่กระบอกใส่สารโทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้ในการฉีดพ่นชั้นกระเจิงแสงโทเทเนียมไดออกไซด์ โดยกระบอกมีความสูง 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร วัสดุทำจากอะลูมิเนียมหมายเลข 5 คือกล่องอะคริลิกที่ใช้ป้องกันไม่ให้อนุภาคสารโทเทเนียมไดออกไซด์ กระจายออกนอกกล่อง ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้วิจัย ขณะฉีดพ่นได้ โดยกล่องอะคริลิกมีความกว้าง 25 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร ความสูง 25 เซนติเมตร และฐานของกล่องอะคริลิกสูง 5 เซนติเมตร หมายเลข 6 คือหัวฉีดระดับนาโน มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 0.01 มิลลิเมตร วัสดุทำจากทองเหลือง หมายเลข 7 คือพัดลมระบายความร้อนของคอมพิวเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นฐานวางกระจกในการฉีดพ่นชั้นกระเจิงแสงโทเทเนียมไดออกไซด์ โดยขณะฉีดพ่นพัดลมแต่ละตัวจะวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้ ตัวที่ 1 (12 V, 0.12 A), ตัวที่ 2 (12 V, 0.12 A), ตัวที่ 3 (12 V, 0.11 A) และตัวที่ 4 (12 V, 0.11 A) หมายเลข 8 คือแหล่งจ่ายไฟฟ้า (power supply) ให้กับพัดลมระบายความร้อนของคอมพิวเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นฐานวางกระจก

4.2 ผลของขั้นตอนการเตรียมชั้นกระเจิงแสงโทเทเนียมไดออกไซด์

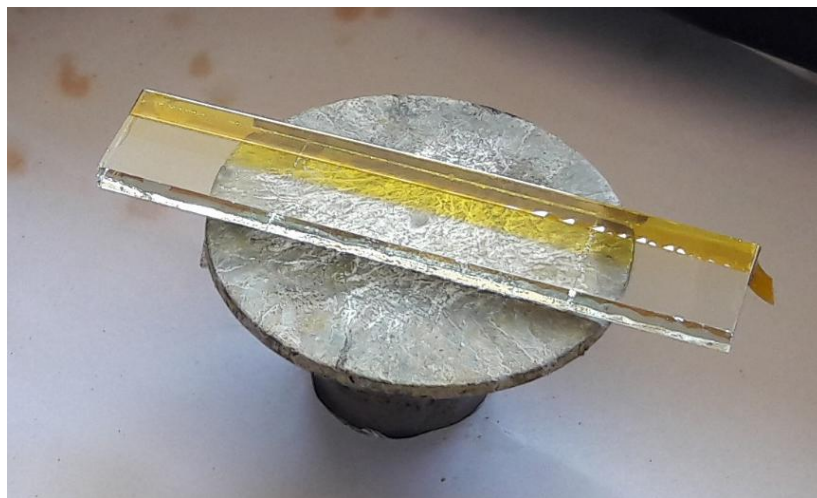
4.2.1 ผลจากการเตรียมกระจกนำไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 กระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการทำความสะอาด

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่ากระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการทำความสะอาด จะมีความใส ไม่มีคราบของสิ่งสกปรกปนเปื้อนที่กระจกนำไฟฟ้า เช่น คราบน้ำมัน คราบรอยนิ้วมือ คราบฝุ่น เป็นต้น เมื่อผ่านการทำความสะอาดแล้ว จากนั้นก็จะเก็บไว้ในภาชนะที่สะอาดปราศจากความชื้น เนื่องจากความชื้นจะมีผลกับการเคลือบชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้

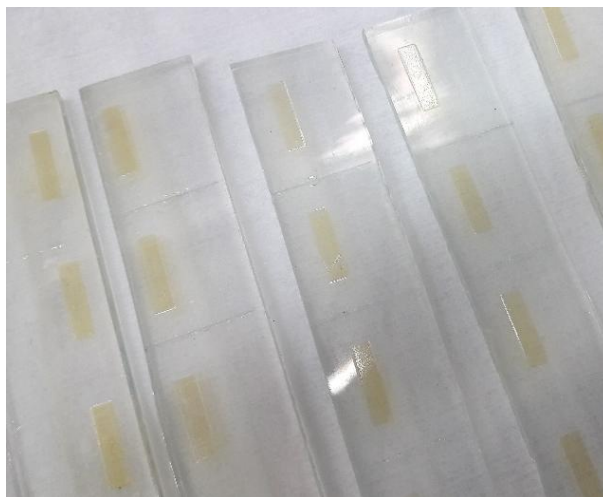
4.2.2 ผลจากการเคลือบชั้น Blocking Layer TiO_2 ด้วยเทคนิคสปิน (spin coating)



รูปที่ 4.3 กระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบชั้น blocking layer TiO_2 ด้วยเทคนิคสปิน

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่ากระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบด้วยชั้น blocking layer TiO_2 ด้วยเทคนิคสปิน จะมีความใส โปร่งแสง จากนั้นก็จะเก็บไว้ในภาชนะที่สะอาดปราศจากความชื้น เพื่อเตรียมทำการเคลือบชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคสกรีน (screen print) ต่อไป

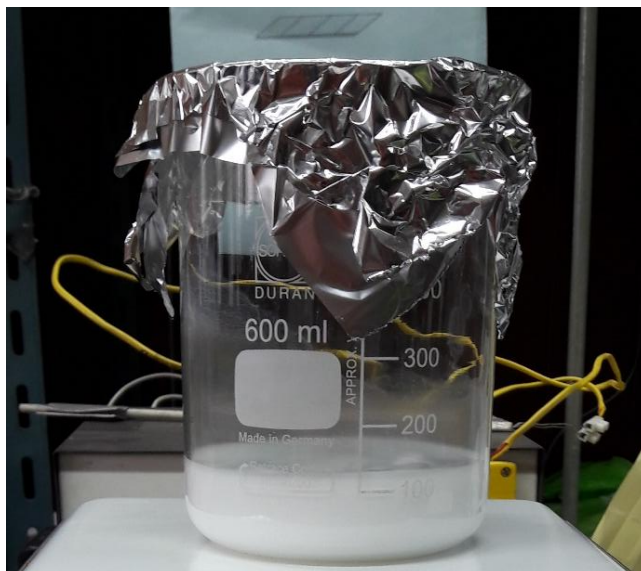
4.2.3 ผลจากการเคลือบชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคสกรีน (Screen print)



รูปที่ 4.4 กระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคสกรีน

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่ากระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ (PST-18NR : ขนาดอนุภาค 18 นาโนเมตร) ด้วยเทคนิคสกรีน (screen print) บริเวณที่ทำการสกรีนมีพื้นที่ขนาด 0.5 x 1 ตารางเซนติเมตร สารที่ใช้ทำการสกรีนจะมีลักษณะสีขาวขุ่นเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นก็จะเก็บไว้ในภาชนะที่สะอาดปราศจากความชื้น เพื่อเตรียมทำการเคลือบชั้นกระจกเงาไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการฉีดยาต่อไป

4.2.4 ผลจากการเตรียมสารละลายคอลลอยด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับฉีดยึดพ่นเพื่อทำชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 4.5 การเตรียมสารละลายคอลลอยด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับฉีดยึดพ่นเพื่อทำชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าสารละลายคอลลอยด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับฉีดยึดพ่นเพื่อทำชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ หลังจากทำการเตรียมสารจะได้สารที่มีสีขาวขุ่นที่ความเข้มข้น 0.75 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เมื่อเตรียมเสร็จก็จะเก็บไว้ในภาชนะที่สะอาดเพื่อเตรียมใช้ในการเคลือบชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการฉีดยึดพ่นต่อไป

4.2.5 ผลจากการเคลือบชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการฉีดยึดพ่น

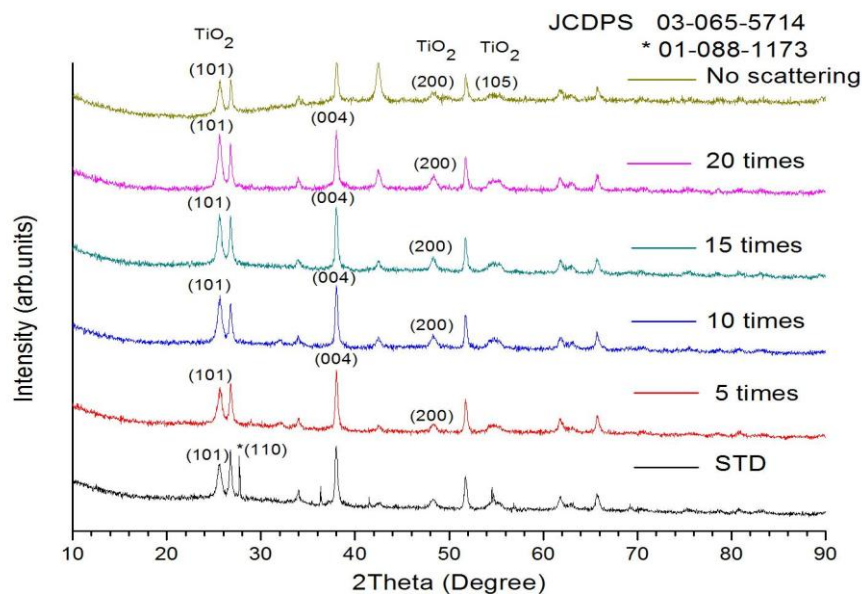


รูปที่ 4.6 กระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการฉีดยึดพ่น

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่ากระแสจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบชั้นกระเจิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการฉีดย่น จะมีอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ เกาะบนกระแสจกนำไฟฟ้าทั่วบริเวณ ยกเว้นบริเวณที่ติดเทปปิดขั้วไฟฟ้า ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ผ่านการฉีดย่นจะมีสีขาวขุ่น จากนั้นก็จะเก็บไว้ในภาชนะที่สะอาด เพื่อเตรียมทำการเผาต่อไป

4.3 ผลของการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้าง เชิงสัณฐาน เชิงแสง และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากการเตรียมชั้นกระเจิงแสงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคฉีดย่น

4.3.1 ผลของการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้าง (XRD)



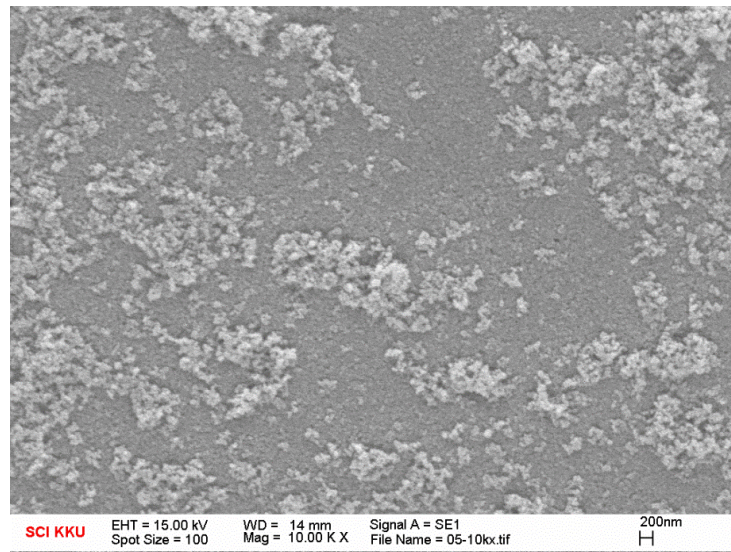
รูปที่ 4.7 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นรองรับกระแสจกนำไฟฟ้า (FTO)

จากลักษณะพีคหรือรูปแบบการเกิดความเข้มของการเลี้ยวเบน จากรูปที่ 4.7 พบว่า ลักษณะระนาบของไทเทเนียมไดออกไซด์ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบไม่มีชั้นกระเจิงแสง พบระนาบ (101) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 25.281$ องศา, ระนาบ (200) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 48.376$ องศาและระนาบ (105) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 53.888$ องศา ลักษณะระนาบของไทเทเนียมไดออกไซด์ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงฉีดย่นชั้นกระเจิงแสงที่ 5 ครั้ง พบระนาบ(101) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 25.686$ องศา, ระนาบ (200) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 48.791$ องศา และระนาบ (004) ที่

ตำแหน่ง $2\theta = 38.396$ องศา ลักษณะระนาบของไทเทเนียมไดออกไซด์ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงชนิดพ่นชั้นกระจังแสงที่ 10 ครั้ง พบระนาบ (101) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 25.686$ องศา, ระนาบ (200) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 48.791$ องศาและระนาบ (004) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 38.396$ องศา ลักษณะระนาบของไทเทเนียมไดออกไซด์ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงชนิดพ่นชั้นกระจังแสงที่ 15 ครั้งพบระนาบ (101) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 25.354$ องศา, ระนาบ (200) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 48.077$ องศา และระนาบ (004) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 37.785$ องศา ลักษณะระนาบของไทเทเนียมไดออกไซด์ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงชนิดพ่นชั้นกระจังแสงที่ 20 ครั้ง พบระนาบ (101) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 25.367$ องศา, ระนาบ (200) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 48.158$ องศาและระนาบ (004) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 37.909$ องศา ลักษณะระนาบของไทเทเนียมไดออกไซด์ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบเซลล์มาตรฐานพบระนาบ (101) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 25.281$ องศาและระนาบ (110) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 27.717$ องศา ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ (rutile) ซึ่งต่างจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเซลล์อื่นๆที่มีโครงสร้างแบบอนาเทส (anatase) เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบเซลล์มาตรฐานทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างหลังจากแช่สารสีย้อมมาตรฐาน จึงทำให้โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแบบเซลล์มาตรฐานมีโครงสร้างที่แตกต่างกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเซลล์อื่นๆ และส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลงด้วย จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแต่ละเงื่อนไขมีระนาบที่ตรงกัน ที่แสดงให้เห็นว่าสารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็นโครงสร้างแบบอนาเทสจริง

4.3.2 ผลของการวิเคราะห์สมบัติเชิงสัญญาณ

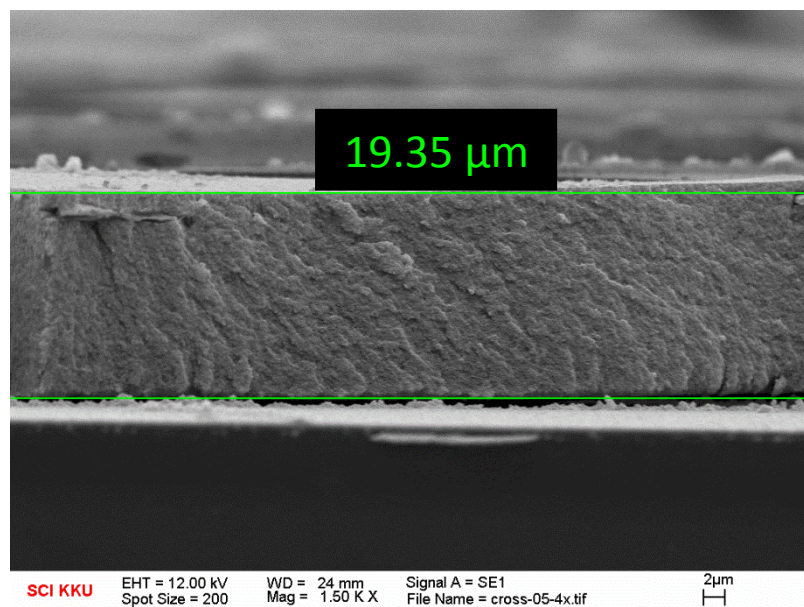
จากการศึกษาเงื่อนไขการฉีดพ่นเคลือบแบบแผ่นรองรับหมุนพบว่า เงื่อนไขการฉีดพ่นเคลือบแบบแผ่นรองรับหมุนเป็นจำนวน 5 ครั้ง ลักษณะของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า ขนาด 1.5×2 ตารางเซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงได้ ดังรูปที่ 4.8



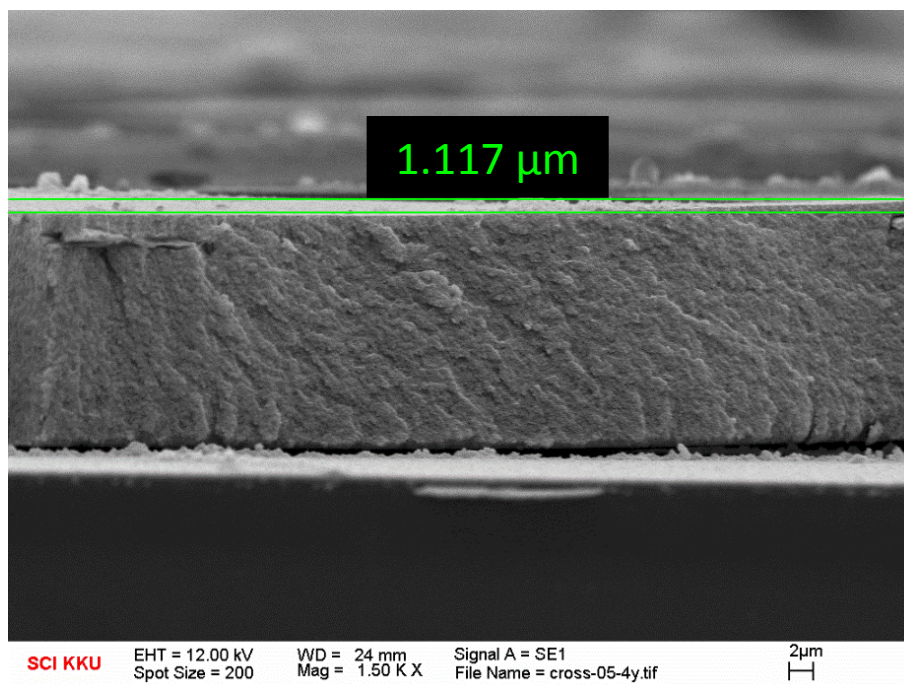
รูปที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นรองรับฉีตพ่นเคลือบที่ 5 ครั้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

เมื่อนำมาศึกษาด้านภาคตัดขวางของแผ่นรองรับฉีตพ่นเคลือบที่ 5 ครั้งแสดงได้ ดังรูปที่

4.9 - 4.10



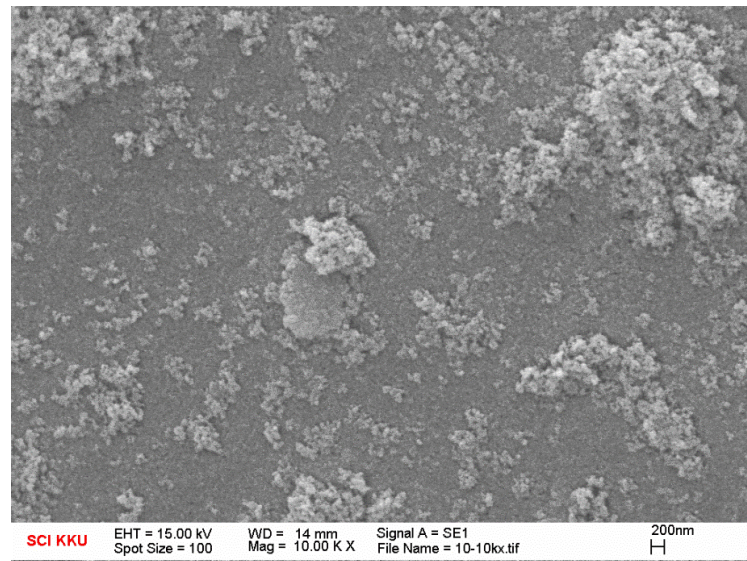
รูปที่ 4.9 ลักษณะภาคตัดขวางของแผ่นรองรับฉีตพ่นเคลือบที่ 5 ครั้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.10 ลักษณะภาคตัดขวางของแผ่นรองรับฉีดยึดพ่นเคลือบที่ 5 ครั้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

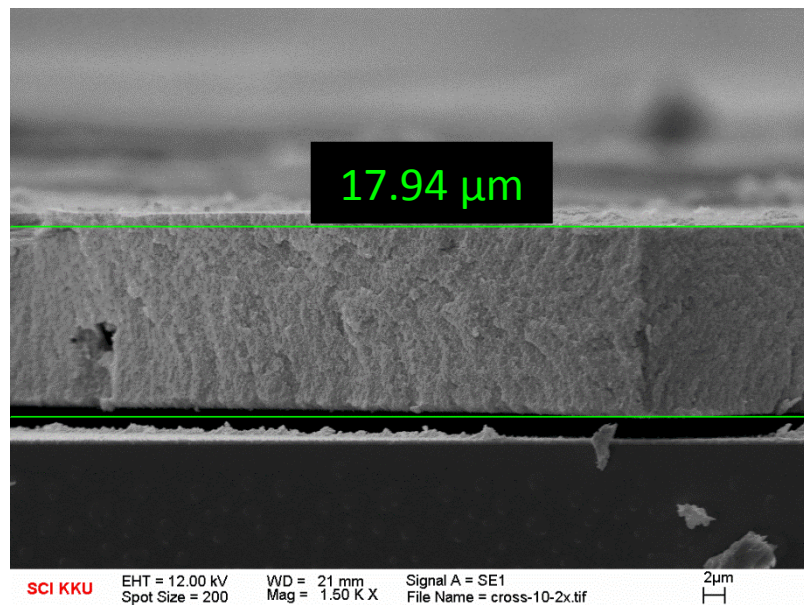
จากรูปที่ 4.9 -4.10 เป็นกระจกนำไฟฟ้าที่ทำการฉีดยึดพ่นเคลือบแผ่นรองรับแบบหมุนที่จำนวน 5 ครั้ง (แผ่นรองรับเดียวกันกับ รูปที่ 4.8) มีความหนาของชั้น blocking layer และ ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคสกรีน (screen print) ประมาณ 19.35 ไมโครเมตร รูปที่ 4.9 จะมีการเกาะตัวระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นรองรับ อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ปกคลุมค่อนข้างไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจึงไม่ทำให้เกิดรูพรุนระดับนาโนขึ้นมาจาก รูปที่ 4.10 มีความหนาของชั้นกระเจิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการฉีดยึดพ่นประมาณ 1.117 ไมโครเมตรจะมีการเกาะตัวระหว่างชั้นกระเจิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ และชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่อนข้างไม่กระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจึงทำให้เกิดอนุภาคระดับนาโนขึ้นน้อยมาก

จากการศึกษาเงื่อนไขการฉีดยึดพ่นเคลือบแผ่นรองรับแบบหมุนพบว่าเงื่อนไขที่แสดงให้เห็นการปกคลุมของชั้นกระเจิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ทั่วทั้งแผ่นรองรับที่ดีที่สุดคือ เงื่อนไขการฉีดยึดพ่นเคลือบแผ่นรองรับแบบหมุนที่จำนวน 10 ครั้ง ลักษณะของชั้นกระเจิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า ขนาด 1.5 x 2 ตารางเซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงได้ ดังรูปที่ 4.11

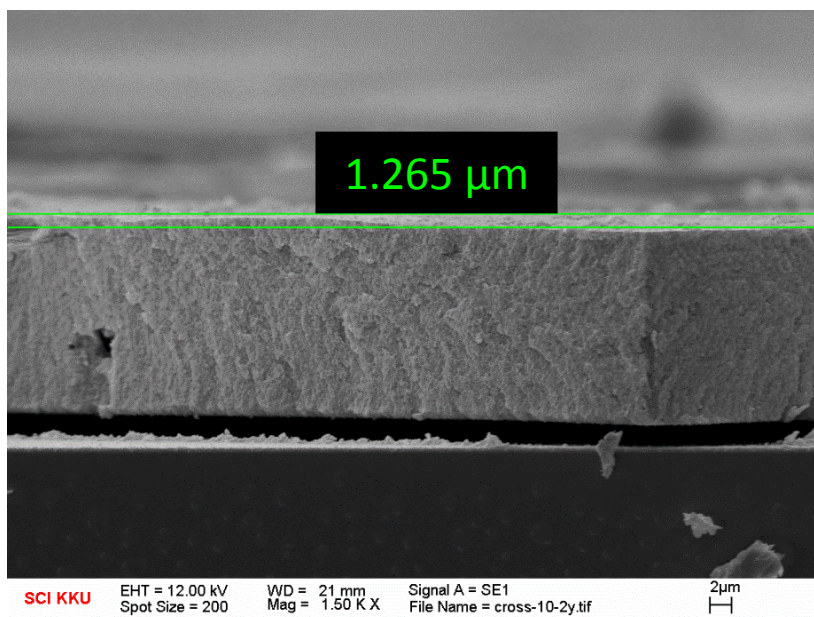


รูปที่ 4.11 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นรองรับฉีดยานเคลือบที่ 10 ครั้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

เมื่อนำมาศึกษาด้านภาคตัดขวางของแผ่นรองรับฉีดยานเคลือบที่ 10 ครั้งแสดงได้ดังรูปที่ 4.12- 4.13



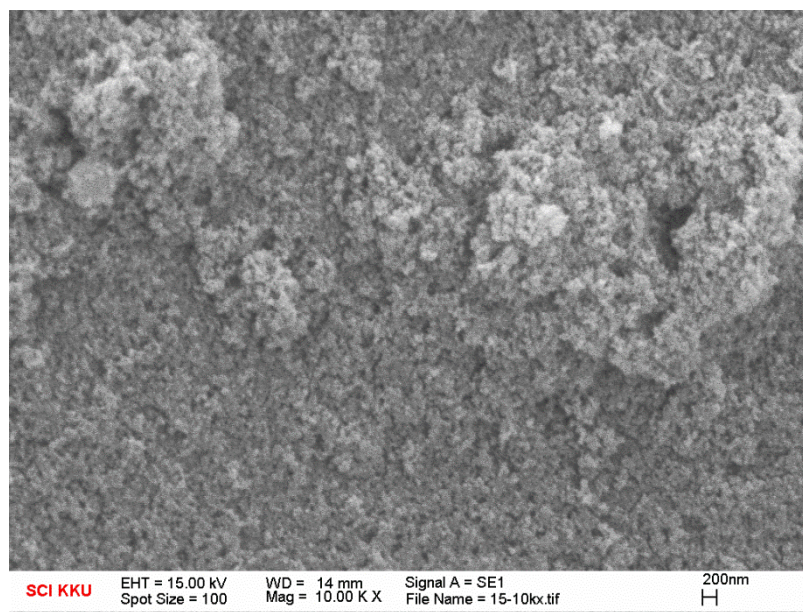
รูปที่ 4.12 ลักษณะภาคตัดขวางของแผ่นรองรับฉีดยานเคลือบที่ 10 ครั้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.13 ลักษณะภาคตัดขวางของแผ่นรองรับฉีดยกเคลือบที่ 10 ครั้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

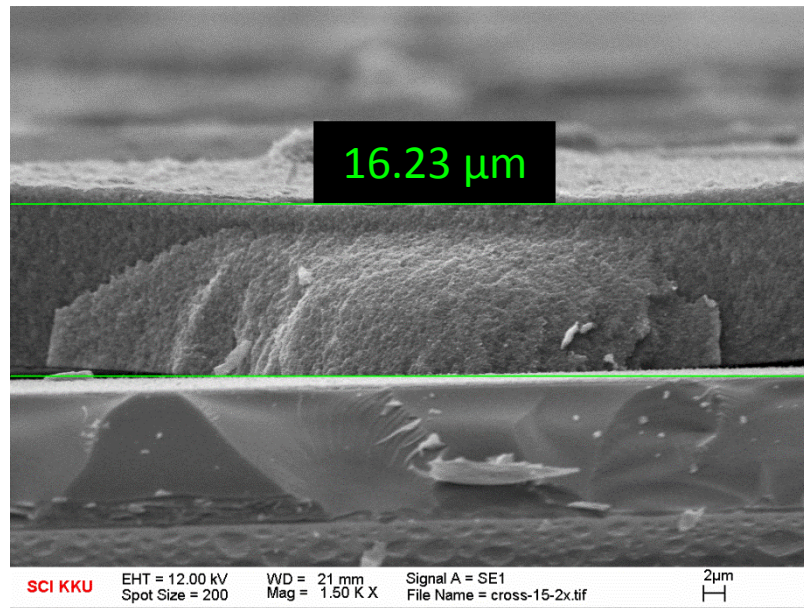
จากรูปที่ 4.12-4.13 เป็นกระเจงนำไฟฟ้าที่ทำการฉีดยกเคลือบแผ่นรองรับแบบหมุน ที่จำนวน 10 ครั้ง (แผ่นรองรับเดียวกันกับ รูปที่ 4.11) มีความหนาของชั้น blocking layer และ ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคสกรีนประมาณ 17.94 ไมโครเมตร รูปที่ 4.12 จะมีการเกาะตัวระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นรองรับ อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ปกคลุมค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจากรูปที่ 4.13 มีความหนาของชั้นกระเจิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคการฉีดยกประมาณ 1.285 ไมโครเมตร จะมีการเกาะตัวระหว่างชั้นกระเจิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ และชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่อนข้างกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจึงทำให้เกิดอนุภาคระดับนาโนขึ้นมากมีความหนาและมีขนาดของการยึดเกาะที่เหมาะสมจึงทำให้ไม่มีการหลุดลอกของชั้นกระเจิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีความหนาที่ที่เหมาะสมสำหรับการนำมาพัฒนาชั้นกระเจิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

จากการศึกษาเงื่อนไขการฉีดยกเคลือบแผ่นรองรับแบบหมุนพบว่าเงื่อนไขการฉีดยกเคลือบแผ่นรองรับแบบหมุนที่จำนวน 15 ครั้ง ลักษณะของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ เคลือบบนกระเจงนำไฟฟ้า ขนาด 1.5 x 2 ตารางเซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงได้ ดังรูปที่ 4.14

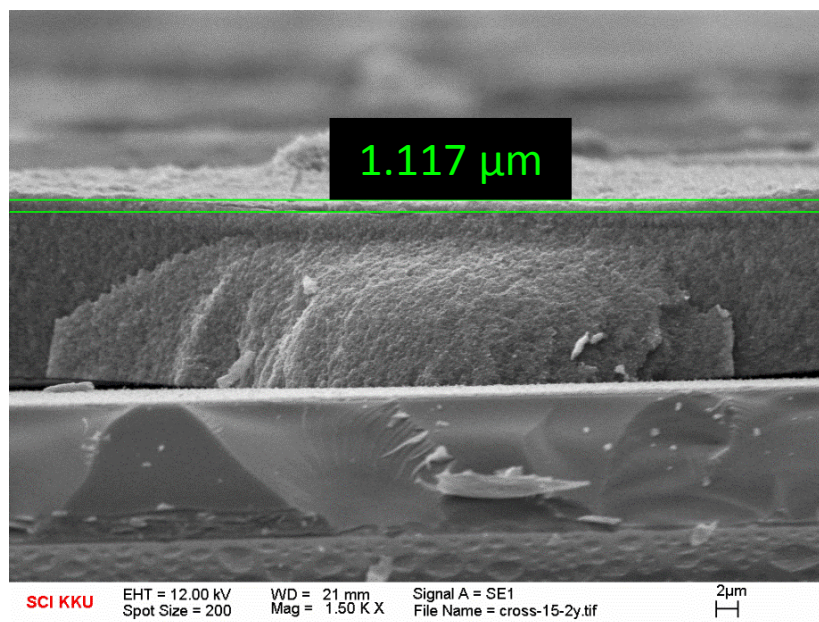


รูปที่ 4.14 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นรองรับฉีดยกเคลือบที่ 15 ครั้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

เมื่อนำมาศึกษาด้านภาคตัดขวางของแผ่นรองรับฉีดยกเคลือบที่ 15 ครั้ง แสดงได้ ดังรูปที่ 4.15 - 4.16



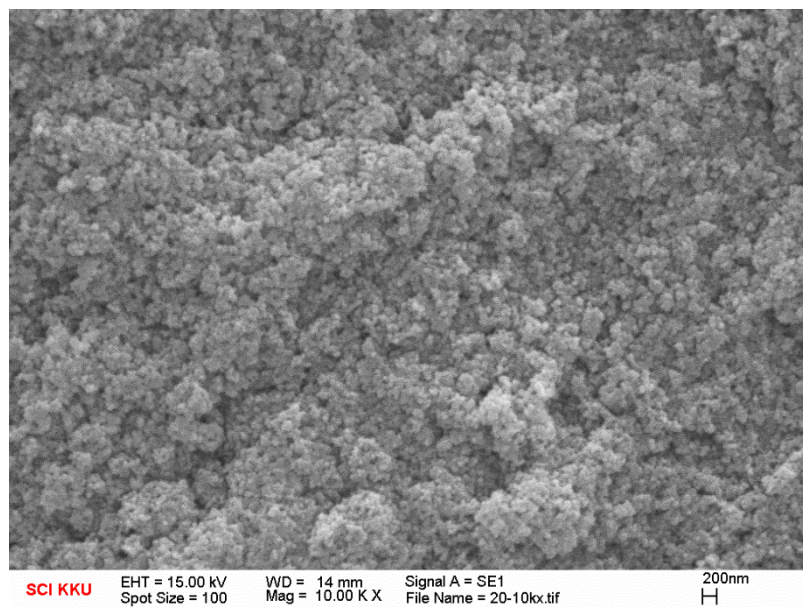
รูปที่ 4.15 ลักษณะภาคตัดขวางของแผ่นรองรับฉีดยกเคลือบที่ 15 ครั้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.16 ลักษณะภาคตัดขวางของแผ่นรองรับฉีดยกเคลือบที่ 15 ครั้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

จากรูปที่ 4.15-4.16 เป็นกระจกนำไฟฟ้าที่ทำการฉีดยึดแผ่นเคลือบแผ่นรองรับแบบหมุน ที่จำนวน 15 ครั้ง (แผ่นรองรับเดียวกันกับ รูปที่ 4.14) มีความหนาของชั้น blocking layer และ ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคสกรีน ประมาณ 16.23 ไมโครเมตร รูปที่ 4.15 จะมีการเกาะตัวระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นรองรับ อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ปกคลุมค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจึงทำให้เกิดรูพรุนระดับนาโนขึ้นมาก จาก รูปที่ 4.16 มีความหนาของชั้นกระจกเงาไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคการฉีดยึด ประมาณ 1.117 ไมโครเมตร จะมีการเกาะตัวระหว่างชั้นกระจกเงาไทเทเนียมไดออกไซด์ และชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่อนข้างกระจายซ้อนทับกันทั่วทั้งแผ่นจึงทำให้เกิดอนุภาคระดับนาโนที่เกิดการซ้อนทับกันขึ้นมาก ซึ่งมีความหนาและมีการยึดเกาะที่ไม่เหมาะสม

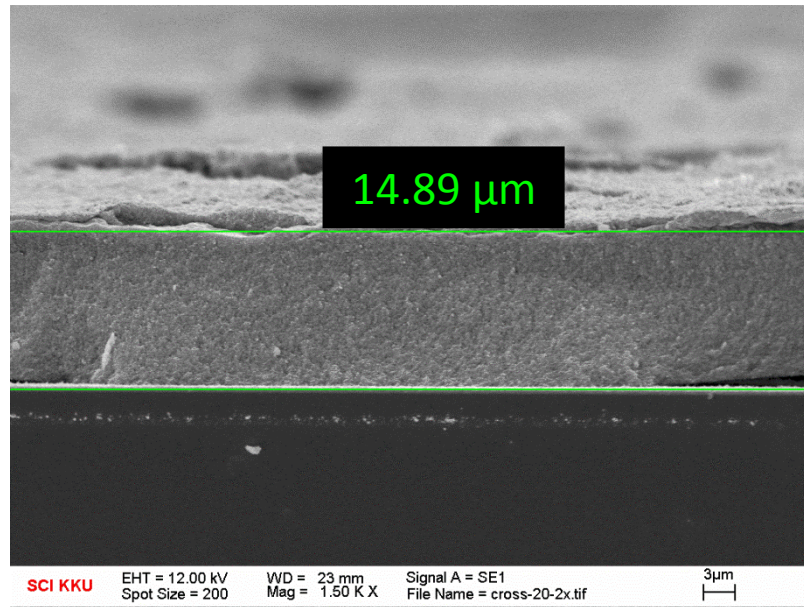
จากการศึกษาเงื่อนไขการฉีดยึดแผ่นเคลือบแผ่นรองรับแบบหมุนพบว่าเงื่อนไขการฉีดยึดแผ่นเคลือบแผ่นรองรับแบบหมุนที่จำนวน 20 ครั้ง ลักษณะของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า ขนาด 1.5 x 2 ตารางเซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงได้ ดังรูปที่ 4.17



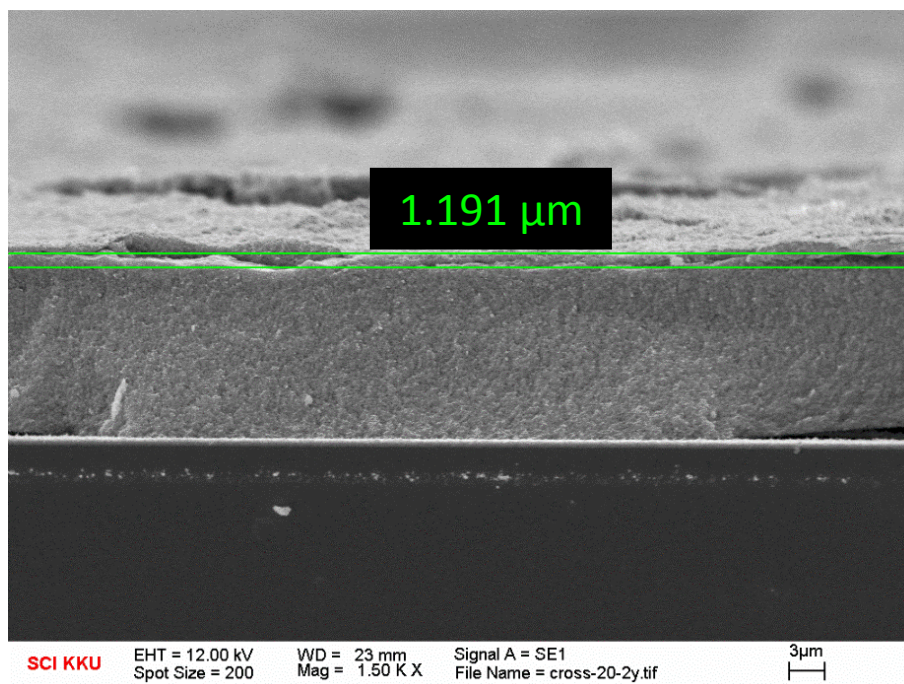
รูปที่ 4.17 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นรองรับฉีดยึดแผ่นเคลือบที่ 20 ครั้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

เมื่อนำมาศึกษาด้านภาคตัดขวางของแผ่นรองรับฉีดยกเคลือบที่ 20 ครั้ง แสดงได้ดังรูปที่

4.18 - 4.19



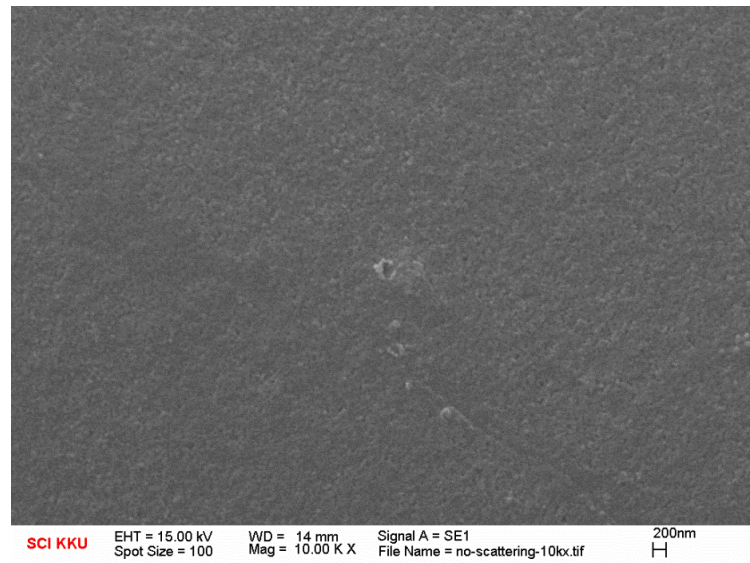
รูปที่ 4.18 ลักษณะภาคตัดขวางของแผ่นรองรับฉีดยกเคลือบที่ 20 ครั้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.19 ลักษณะภาคตัดขวาง (crosssection) ของแผ่นรองรับฉีดยกชั้นเคลือบที่ 20 ครั้ง วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

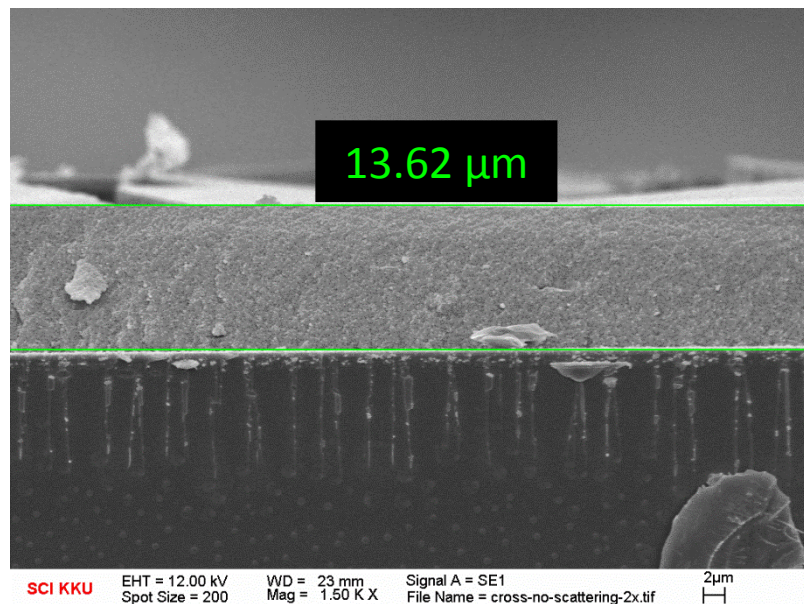
จากรูปที่ 4.18-4.19 เป็นกระจกนำไฟฟ้าที่ทำการฉีดยกชั้นเคลือบแผ่นรองรับแบบหมุน ที่จำนวน 20 ครั้ง (แผ่นรองรับเดียวกันกับ รูปที่ 4.17) มีความหนาของชั้น blocking layer และ ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคสกรีน ประมาณ 14.89 ไมโครเมตร รูปที่ 4.18 จะมีการเกาะตัวระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นรองรับ อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ปกคลุมค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจึงทำให้เกิดรูพรุนระดับนาโนขึ้นมาก จาก รูปที่ 4.19 มีความหนาของชั้นกระจกเงาไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคการฉีดยกชั้น ประมาณ 1.191 ไมโครเมตร จะมีการเกาะตัวระหว่างชั้นกระจกเงาไทเทเนียมไดออกไซด์ และชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่อนข้างกระจายซ้อนทับกันมากทั่วทั้งแผ่นจึงทำให้เกิดอนุภาคระดับนาโนที่เกิดการซ้อนทับกันขึ้นมาก มีความหนาและการยึดเกาะที่ไม่เหมาะสมจึงทำให้มีการหลุดลอกของชั้นกระจกเงาไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการศึกษาเซลล์ที่ไม่มีชั้นกระจกเงาไทเทเนียมไดออกไซด์ ลักษณะของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า ขนาด 1.5 x 2 ตารางเซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงได้ ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ลักษณะทางกายภาพของเซลล์ที่ไม่มีชั้นกระจกเงาไทเทเนียมไดออกไซด์ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

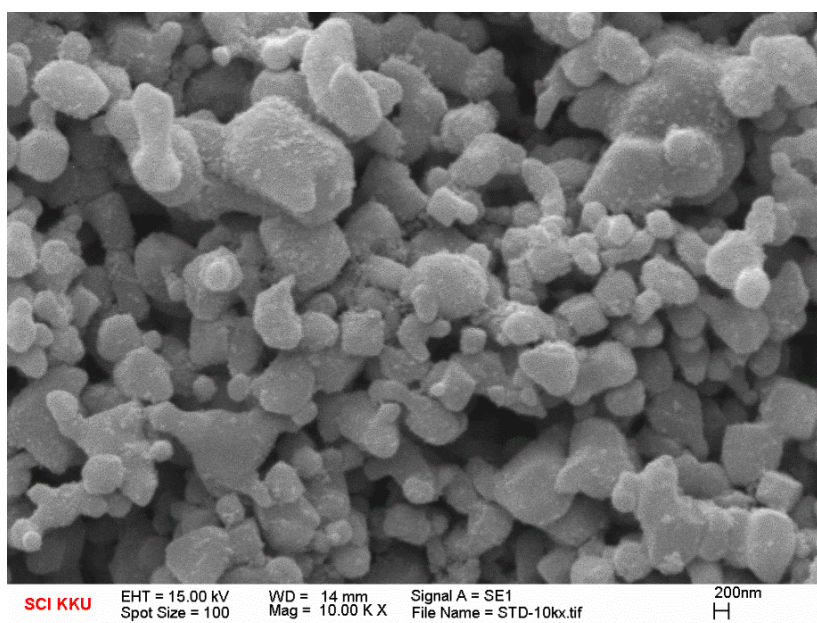
เมื่อนำมาศึกษาด้านภาคตัดขวางของเซลล์ที่ไม่มีชั้นกระจกเงาไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ลักษณะภาคตัดขวางของเซลล์ที่ไม่มีชั้นกระจกเงาไทเทเนียมไดออกไซด์ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

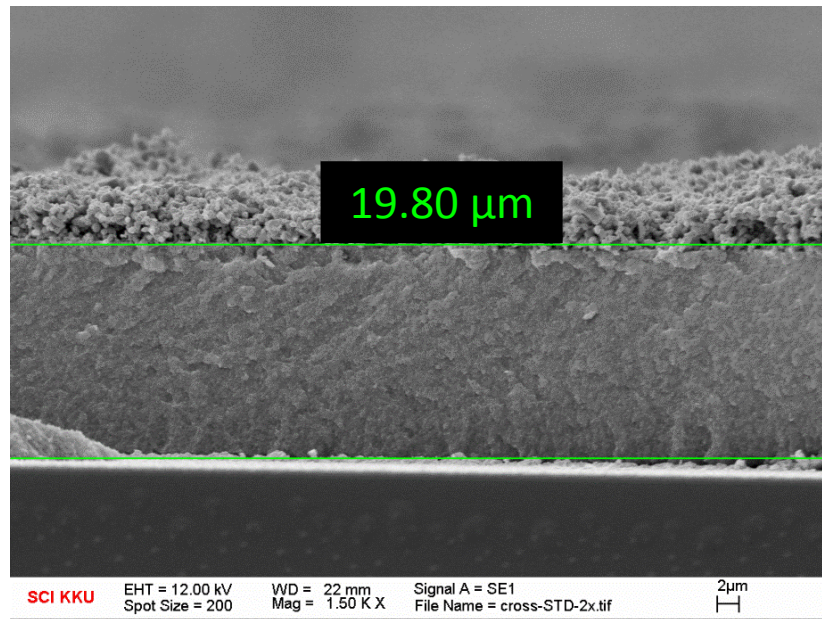
จากรูปที่ 4.21 เป็นกระจกนำไฟฟ้าของเซลล์ที่ไม่มีชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ (แผ่นรองรับเดียวกันกับ รูปที่ 4.20) มีความหนาของชั้น blocking layer และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคสกรีน ประมาณ 13.62 ไมโครเมตร จะมีการเกาะตัวระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นรองรับ อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ปกคลุมค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจึงทำให้เกิดรูพรุนระดับนาโนขึ้นมาก

จากการศึกษาเซลล์มาตรฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ ลักษณะของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าขนาด 1.5 x 2 ตารางเซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงได้ ดังรูปที่ 4.22

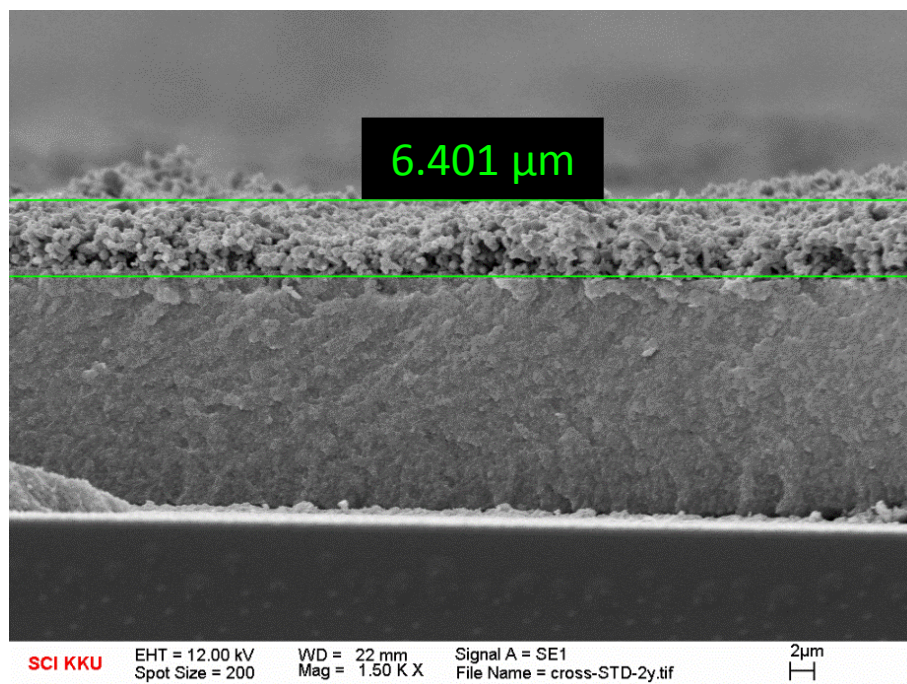


รูปที่ 4.22 ลักษณะทางกายภาพของเซลล์มาตรฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

เมื่อนำมาศึกษาด้านภาคตัดขวางของเซลล์มาตรฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงได้ ดังรูปที่ 4.23-4.24



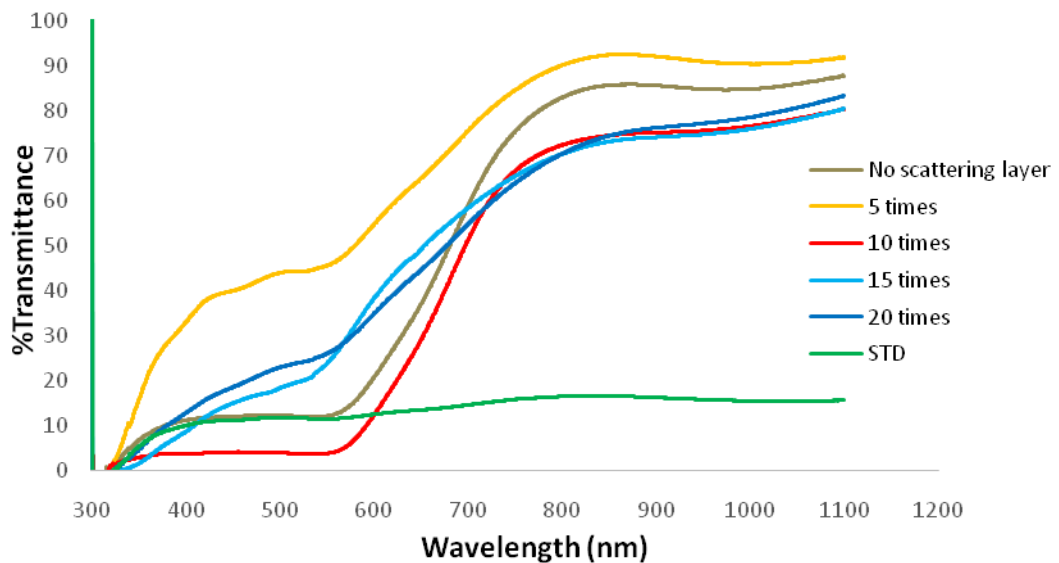
รูปที่ 4.23 ลักษณะภาคตัดขวางของเซลล์มาตรฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.24 ลักษณะภาคตัดขวางของเซลล์มาตรฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

จากรูปที่ 4.23 -4.24 เป็นกระจกนำไฟฟ้าของเซลล์มาตรฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ (แผ่นรองรับเดียวกันกับ รูปที่ 4.22) มีความหนาของชั้น blocking layer และชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคสกรีน ประมาณ 19.80 ไมโครเมตร รูปที่ 4.23 จะมีการเกาะตัวระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นรองรับ อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ปกคลุมค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจึงทำให้เกิดรูพรุนระดับนาโนขึ้นมาจากรูปที่ 4.24 มีความหนาของชั้นกระจกแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค สกรีน ประมาณ 6.401 ไมโครเมตร จะมีการเกาะตัวระหว่างชั้นกระจกแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ และชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่อนข้างกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจึงทำให้เกิดอนุภาคระดับนาโนขึ้นมา

4.3.3 ผลของการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสง

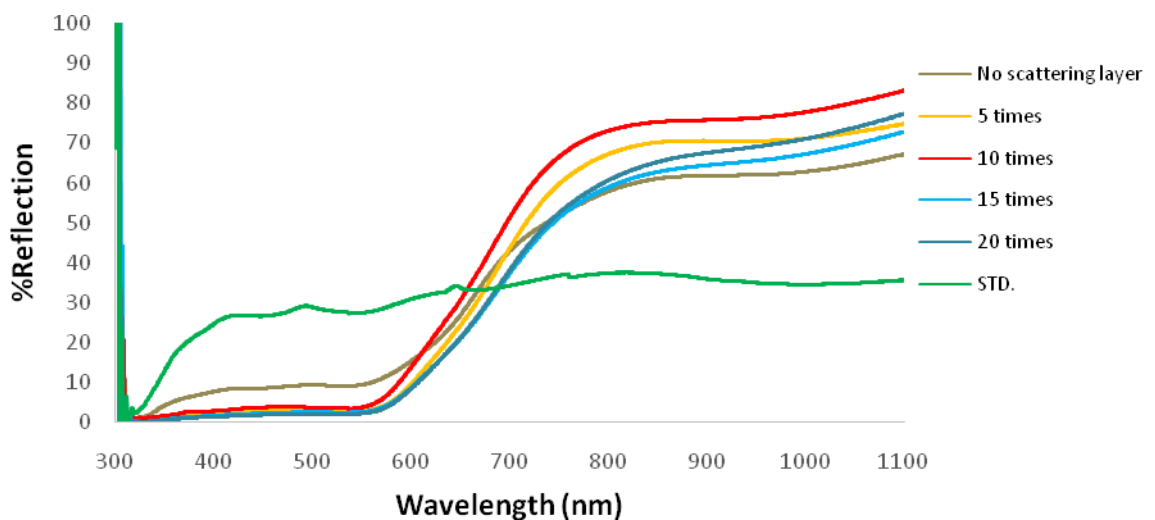


รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านกับความยาวคลื่น ที่ได้จากการเตรียมชั้นกระจกแสงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคฉีดพ่นในแต่ละเงื่อนไข

จากรูปที่ 4.25 จะเห็นว่าที่เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของชั้นกระจกแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ในช่วงแสงขาว (visible light) ที่เคลือบด้วยเงื่อนไขการฉีดพ่นที่ 10 ครั้งมีลักษณะที่ยอมให้แสงทะลุผ่านได้น้อยที่สุด ส่งผลให้พลังงานแสงตกกระทบลงบนเซลล์ได้มาก เซลล์สามารถดูดกลืนแสงได้ดี ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพสูงไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นกระจกแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ในช่วงแสงขาว ที่เคลือบด้วยเงื่อนไขการฉีดพ่นที่ 5, 15, 20 ครั้ง แบบไม่มีชั้นกระจกแสง และเซลล์

มาตรฐาน การฉีดยาที่ 10 ครั้งจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในการเตรียมชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

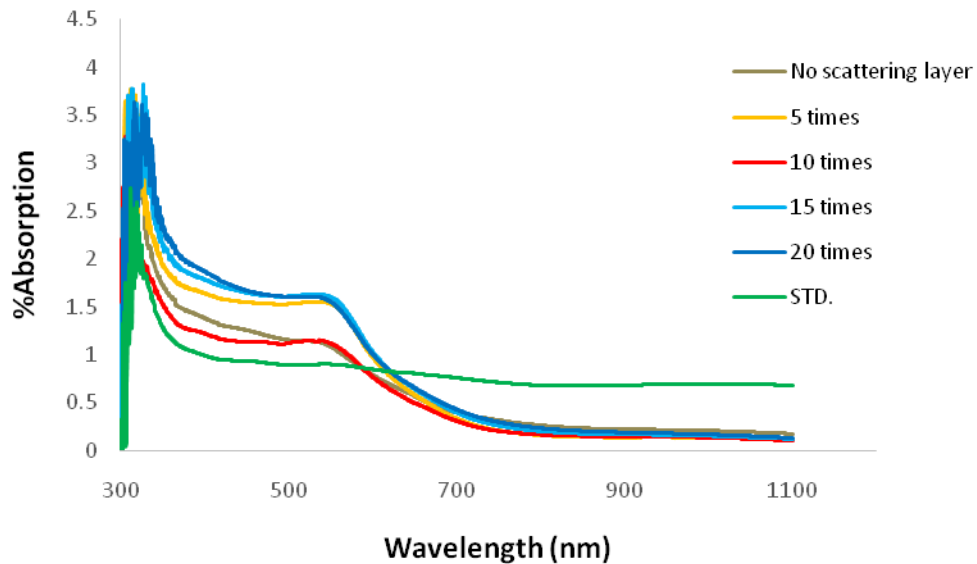
4.3.4 ผลของการวิเคราะห์สมบัติการสะท้อนของแสง



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสะท้อนกับความยาวคลื่น ที่ได้จากการเตรียมชั้นกระจังแสงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคฉีดยาในแต่ละเงื่อนไข

จากรูปที่ 4.26 จะเห็นว่าที่เปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ในช่วงแสงขาวที่เคลือบด้วยเงื่อนไขการฉีดยาที่ 10 ครั้ง มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนกลับที่ต่ำ ส่งผลให้พลังงานแสงเกิดการกระจังภายในเซลล์ที่สูงไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เคลือบด้วยเงื่อนไขการฉีดยาที่ 5, 15, 20 ครั้ง แบบไม่มีชั้นกระจังแสง และเซลล์มาตรฐาน การฉีดยาที่ 10 ครั้งจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในการเตรียมชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

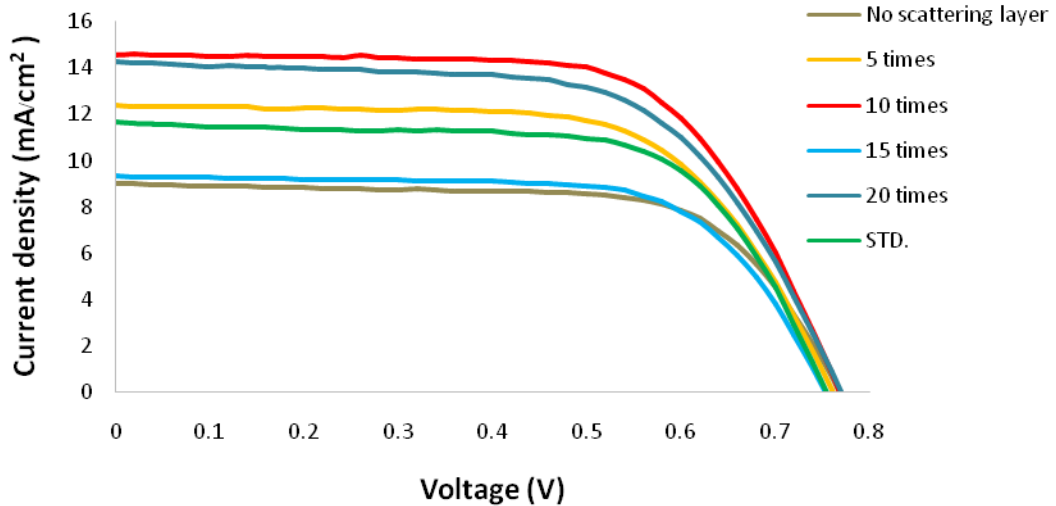
4.3.5 ผลของการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่น ที่ได้จากการเตรียมชั้นกระจิงแสงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคฉีดพ่นในแต่ละเงื่อนไข

จากรูปที่ 4.27 จะเห็นว่าที่เปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงของชั้นกระจิงแสงไททาเนียมไดออกไซด์ในช่วงแสงขาวที่เคลือบด้วยเงื่อนไขการฉีดพ่นที่ 10 ครั้ง มีเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงได้น้อย หมายความว่าชั้นกระจิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ มีการกระจิงของแสงทุกทิศทางจึงส่งผลให้มีการดูดกลืนแสงได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นกระจิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ ในช่วงแสงขาว ที่เคลือบด้วยเงื่อนไขการฉีดพ่นที่ 5, 15, 20 ครั้ง แบบไม่มีชั้นกระจิงแสง และเซลล์มาตรฐาน การฉีดพ่นที่ 10 ครั้ง จึงเหมาะกับการนำไปใช้ในการเตรียมชั้นกระจิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

4.3.6 ผลของการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และความหนาแน่นกระแส (J) ที่ได้จากการเตรียมชั้นกระจังแสงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคฉีดพ่นในแต่ละเงื่อนไข

จากรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าปริมาณความหนาแน่นของกระแสที่ได้จากการวัดประสิทธิภาพของเซลล์ที่ไม่มีชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่า $J_{sc} = 9.02$ มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร, $V_{oc} = 0.77$ โวลต์, ค่าพิวแฟคเตอร์ (FF) = 0.68 และค่าประสิทธิภาพ (η) = 4.72 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้จากเงื่อนไขการฉีดพ่นชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 5 ครั้ง มีค่า $J_{sc} = 12.40$ มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร, $V_{oc} = 0.76$ โวลต์, ค่าพิวแฟคเตอร์ (FF) = 0.65 และค่าประสิทธิภาพ (η) = 6.11 เปอร์เซ็นต์ การฉีดพ่นชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 10 ครั้ง มีค่า $J_{sc} = 14.57$ มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร, $V_{oc} = 0.77$ โวลต์, ค่าพิวแฟคเตอร์ (FF) = 0.65 และค่าประสิทธิภาพ (η) = 7.33 เปอร์เซ็นต์ การฉีดพ่นชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 15 ครั้ง มีค่า $J_{sc} = 9.33$ มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร, $V_{oc} = 0.75$ โวลต์, ค่าพิวแฟคเตอร์ (FF) = 0.68 และค่าประสิทธิภาพ (η) = 4.76 เปอร์เซ็นต์ การฉีดพ่นชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 20 ครั้ง มีค่า $J_{sc} = 14.27$ มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร, $V_{oc} = 0.77$ โวลต์, ค่าพิวแฟคเตอร์ (FF) = 0.62 และค่าประสิทธิภาพ (η) = 6.80 เปอร์เซ็นต์ การฉีดพ่นชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ของเซลล์มาตรฐาน มีค่า $J_{sc} = 11.65$ มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร, $V_{oc} = 0.75$ โวลต์, ค่าพิวแฟคเตอร์ (FF) = 0.67 และค่าประสิทธิภาพ (η) = 5.84 เปอร์เซ็นต์

จากการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง การฉีดพ่นชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 10 ครั้ง มีค่าประสิทธิภาพสูงสุด ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าความหนาแน่นของชั้นกระจังแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยการฉีดพ่นมีผลต่อการเตรียมชั้นกระจังแสงไทเทเนียม

ไดออกไซด์ ที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงและส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์อาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วย

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความแตกต่างของการเตรียมชั้นกระจิงแสงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคฉีดพ่นในแต่ละเงื่อนไข

เงื่อนไข	ความหนาของชั้น กระจิงแสง(μm)	I_{sc} (mA)	J_{sc} (mA/ cm^2)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
ฉีดพ่นที่ 5 ครั้ง	1.117	3.0996	12.3987	0.7604	0.6480	6.1106
ฉีดพ่นที่ 10 ครั้ง	1.265	3.6439	14.5757	0.7681	0.6547	7.3308
ฉีดพ่นที่ 15 ครั้ง	1.117	2.3310	9.3242	0.7526	0.6790	4.7658
ฉีดพ่นที่ 20 ครั้ง	1.191	3.5680	14.2721	0.7698	0.6194	6.8059
No scattering	-	2.2556	9.0227	0.7677	0.6807	4.7161
STD.	6.401	2.9119	11.6478	0.7543	0.6650	5.8437
หมายเหตุ : Input Power 100 mW/cm^2 , AM 1.5						