บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและทดลองเคลือบฟิล์มบาง ITO ลงบนวัสดุที่เป็นพลาสติกชนิด PEN โดยใช้เทคนิค Naturatron Sputtering สำหรับการทำฟิล์มบางดังกล่าว นอกจากนั้นยังได้ทดลองการเปลี่ยนแปลงพื้นผิววัสดุที่เป็นพลาสติกและพื้นผิวที่เป็นซิลิกอนออกไซด์โดยใช้เทคนิค Low-pressure high-frequency plasma chemical vapor deposition โดยสามารถเรียนรู้ได้ดังนี้

5.1.1 การสร้างฟิล์มบาง ITO ลงบนวัสดุที่เป็นพลาสติกชนิด PEN โดยใช้เทคนิค Naturatron Sputtering

การสร้างฟิล์บาง ITO โดยใช้เทคนิค Naturatron Sputtering กับวัสดุที่เป็นพลาสติกชนิด PEN นั้นจะทำให้ได้ชั้นฟิล์ม ITO ที่มีความหนาประมาณ 145 nm. โดยการทดลองดังกล่าวจะแบ่งการวิเคราะห์ด้วย EDX เป็นสองส่วนด้วยกันคือชั้นที่ 1 เป็นชั้นของพลาสติกชนิด PEN และชั้นที่ 2 เป็นชั้นของฟิล์มบาง ITO โดยที่ชั้นของพลาสติกแบบ PEN จะให้องค์ประกอบของ Si เป็น 0.051%, Sb เป็น 0.010%, Mn เป็น 0.007% และ $C_{10}H_8O_4$ เป็น 99.916% ซึ่งสังเกตได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่จะเป็นพลาสติกแบบ PEN นั่นเอง แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ที่ชั้นของ ITO จะพบว่าจะมีองค์ประกอบของอินเดียม (Indium, In) เป็น 95.774% และองค์ประกอบของซิงค์ (Zinn, Sn) เป็น 4.226% ซึ่งสามารถสังเกตได้จากตารางที่ 5.1 โดยตารางดังกล่าวเป็นสิ่งยืนยันได้เป็นอย่างดีว่าการใช้เทคนิค Naturatron Sputtering สามารถที่จะทำการสร้างฟิล์มบาง ITO ได้ นอกจากนั้นเทคนิคดังกล่าวยังทำให้ชั้นฟิล์มมีความเป็นผลึกและมีค่าความขรุขระที่ต่ำโดยค่าที่วัดได้จากการทดสอบอยู่ที่ประมาณ 0.39 nm ในขณะที่ขบวนการในการสร้างฟิล์ม ITO โดยใช้เทคนิค Naturatron Sputtering ยังไม่ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นในขั้นตอนของการ deposition ซึ่งจะมีผลทำให้พลาสติกเสียหายจากการหลอม ละลาย หรือไหม้อีกด้วย

ตารางที่ 5.1 ร้อยละของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวในชั้นของ PEN กับชั้นของ ITO

Layer 1	Polyethylene Naphthalate
	15.200 mg/cm^2
Si	0.051 %
Sb	0.010 %
Mn	0.007 %
$C_{10}H_8O_4$	99.916 %
Layer 2	Indium Tin Oxide
	84.747 µg/cm^2
In	95.774 %
Sn	4.226 %

5.1.2 การปรับปรุงสมบัติพื้นผิว SiO_2 โดยใช้เทคนิค Low-pressure high-frequency plasma chemical vapor deposition

การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของ SiO_2 โดยใช้เทคนิค Low-pressure high-frequency plasma chemical vapor deposition ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการตรวจสอบพื้นผิวโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สมบัติการชอบน้ำเป็น Contact angle meter และสมบัติทางเคมีพื้นผิวเป็น XPS โดยจากการทดลองการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวโดยทำการทรีตเมนต์ด้วยระบบพลาสมานั้น จะใช้แก๊สอาร์กอนกับแก๊สออกซิเจนผสมกันในอัตราการไหลที่ 10 L/min และ 0.5 L/min ตามลำดับ และใช้กำลังของพลาสมาเป็น 300 W. ในขณะที่ทำการทรีตเมนต์พื้นผิวเป็นเวลา 10 นาที ซึ่งมีสมบัติการชอบน้ำที่ดีอันเนื่องจากมุมที่กระทำกับพื้นผิวมีค่าเป็น 5.96 องศา ซึ่งถือว่าเป็นมุมที่ต่ำมาก และสมบัติการชอบน้ำนี้จะมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิว ซึ่งกล่าวได้ว่าผลจากการที่ทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาดังกล่าวจะมีผลทำให้อะตอมและโมเลกุลของแก๊สชนกันและแตกตัวเป็นราดิคอลและราดิคอลเหล่านี้จะเข้าไปทำปฏิกริยากับพื้นผิวทำให้สมบัติของพื้นผิวมีราดิคอลซึ่งทดสอบกับหยดน้ำจะทำให้น้ำมีการเปลี่ยนรูปจากมุมของหยดน้ำที่ลดลง (สมบัติชอบน้ำมากขึ้น) นอกจากนี้เรายังได้ตรวจสอบผลที่เกิดขึ้นอย่างละเอียดที่พื้นผิวดังกล่าวจากเครื่อง XPS จะพบว่าการใช้การผสมของแก๊สอาร์กอนกับออกซิเจนจะทำให้เกิดราดิคอลต่างๆ รวมทั้งปริมาณของพันธะเช่น C-H, C-O หรือ O-C=O ที่สูงกว่าการใช้แก๊สอาร์กอนทำการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวเพียงแก๊สเดียว จากราดิคอลที่อยู่ในห้องสุญญากาศได้เกิดปรากฏการณ์ Ionization, Excitation และ Dissociation ดังสมการ

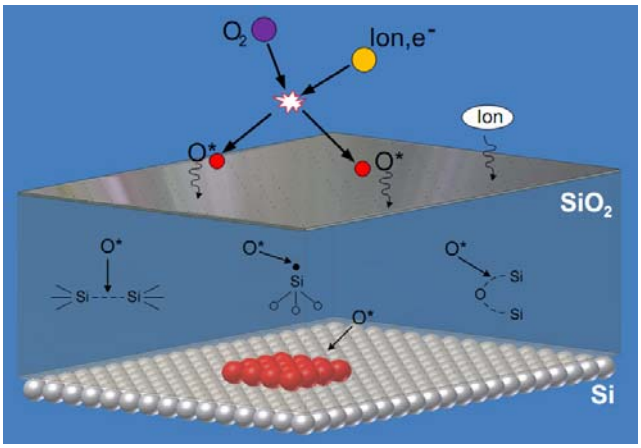
$$Ar+O_2+e \rightarrow Ar^*+O+O^*$$

$$e+O_2 \rightarrow e+O+O$$

$$e+O_2 \rightarrow e+O+O(^1D)$$

$$O(^1D)+O_2 \rightarrow O+O_2$$

นอกจากนั้นทางผู้วิจัยยังได้นำความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์พลาสมาดังกล่าว นำมาสร้างเป็นกลไกการเกิดการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของ SiO_2 ดังรูปที่ 5.1 โดยที่ราดิคอล หรือ O-atom จะเข้าไปสร้างพันธะกับพื้นผิวที่เป็นซิลิกอนทำให้มีเพิ่มสมบัติการออกซิเดชั่นของพื้นผิวมากขึ้น

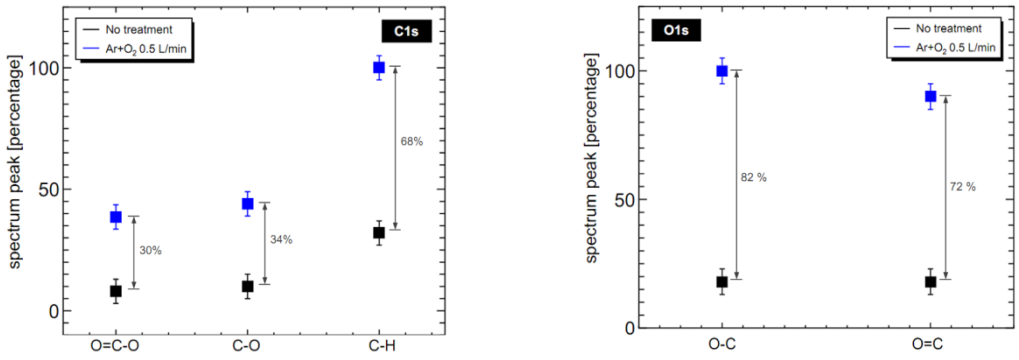


รูปที่ 5.1 กลไกของระบบ Low-pressure high-frequency plasma chemical vapor deposition บนพื้นผิว SiO_2

5.1.3 การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวพลาสติก PEN โดยใช้เทคนิค Low-pressure high-frequency plasma chemical vapor deposition

การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของพลาสติกแบบ PEN โดยใช้เทคนิค Low-pressure high-frequency plasma chemical vapor deposition ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการตรวจสอบพื้นผิวโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สมบัติการชอบน้ำเป็น Contact angle meter และสมบัติทางเคมีพื้นผิวเป็น XPS โดยจากการทดลองการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวโดยทำการทรีตเมนต์ด้วยระบบพลาสมานั้น จะใช้แก๊สอาร์กอนกับแก๊สออกซิเจนผสมกันในอัตราการไหลที่ 10 L/min และ 0.5 L/min ตามลำดับ และใช้กำลังของพลาสมาเป็น 300 W. ในขณะที่ทำการทรีตเมนต์พื้นผิวเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งมีสมบัติการชอบน้ำที่ดีอันเนื่องจากมุมที่กระทำกับพื้นผิวมีค่าเป็น 6.3 องศา ซึ่งถือว่าเป็นมุมที่ต่ำ และสมบัติการชอบน้ำนี้จะมี

ความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวเช่นเดียวกันกับแผ่นซิลิกอน โดยที่พื้นผิวดังกล่าวได้รับการตรวจสอบอย่างละเอียดจากเครื่อง XPS เพื่อหาปริมาณของธาตุที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าการใช้การผสมของแก๊สอาร์กอนกับออกซิเจนจะทำให้เกิดราดิคอลต่างๆ รวมทั้งปริมาณของพันธะเช่น C-H(C-C), C-O, O=C หรือ O=C-O ที่สูงกว่าพื้นผิวของ PEN แบบที่ไม่ได้รับการทรีตเมนต์ ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 5.2 ที่มีค่าความแตกต่างของปริมาณพันธะระหว่างการที่พื้นผิวได้รับการทรีตเมนต์กับไม่ได้รับการทรีตเมนต์ ทั้งสเปกตรัม O1s และ C1s โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สเปกตรัม O1s จะมีความแตกต่างสูงถึง 82% ซึ่งเป็นผลมาจากที่ราดิคอลที่เข้าไปทำพันธะกับโครงสร้างของพลาสติก PEN นั่นเอง

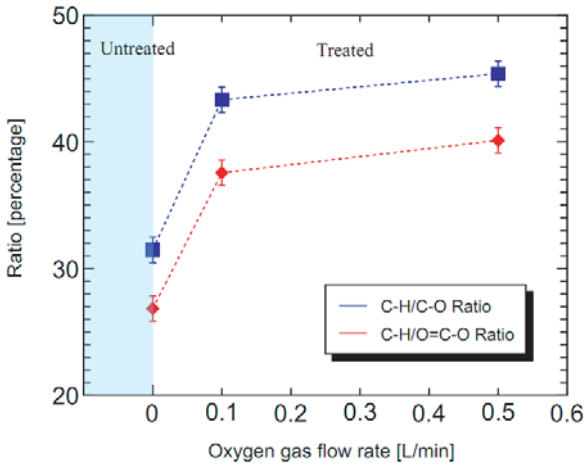


ก. ข.

รูปที่ 5.2 ร้อยละอัตราการเปลี่ยนแปลงพันธะในการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สอาร์กอนและออกซีเจนผสมกันกับไม่ได้รับการทรีตเมนต์

ก. C1s scan ข. O1s scan

นอกจากนี้ในรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของ C-H/C-O และ C-H/O=C-O ในส่วนของสเปกตรัม C1s เมื่อให้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่ที่ต่างกัน

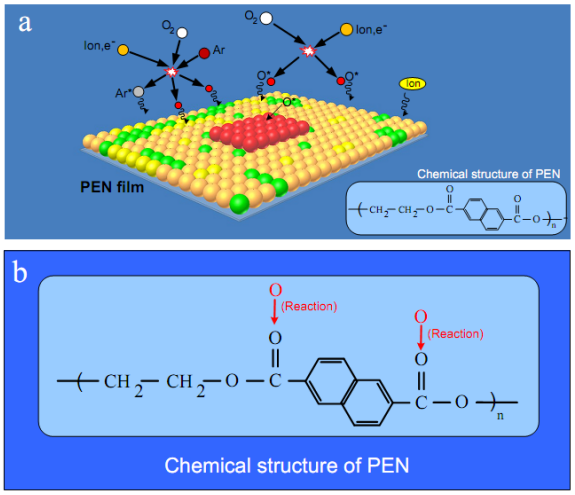


รูปที่ 5.3 อัตราส่วนของ C-H/C-O และ C-H/O=C-O เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของออกซิเจนบนพื้นผิวพลาสติก PEN

จากรูปที่ 5.3 ทำให้ทราบได้ว่าในกรณีของไม่ได้ทำการทรีตเมนต์พื้นผิวพลาสติก PEN อัตราส่วนของ C-H/C-O และ C-H/O=C-O มีค่าค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อได้รับการทรีตเมนต์จะมีค่าอัตราส่วนที่สูงขึ้นมาก นั่นหมายถึงการเกิดราดิคอลที่สูงขึ้นที่พื้นผิวและเช่นเดียวกันคือราดิคอลที่อยู่ในห้องสุญญากาศในระหว่างการทำพลาสมาได้เกิดปรากฏการณ์ Ionization, Excitation และ Dissociation ดังสมการ

$$e + O_2 \rightarrow e + O_2^+ + e$$
$$e + O_2^+ \rightarrow O + O$$
$$e + O \rightarrow e + O^*$$
$$e + O_2 \rightarrow e + O + O$$
$$e + Ar + O_2 \rightarrow Ar^* + O + O^*$$

นอกจากนั้นทางผู้วิจัยยังได้นำความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์พลาสมาดังกล่าว นำมาสร้างเป็นกลไกการเกิดการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของพลาสติก PEN ดังรูปที่ 5.4 โดยที่ราดิคอล หรือ O-atom จะเข้าไปสร้างพันธะกับพื้นผิวพลาสติก PEN ทำให้มีเพิ่มสมบัติการออกซิเดชั่นของพื้นผิวมากขึ้น โดยสังเกตได้จาก O radical ที่เข้าไปมีปฏิกิริยากับโครงสร้างเดิมของพลาสติกแบบ PEN จึงมีผลทำให้โครงสร้างเดิมของพลาสติกแบบ PEN มีการเปลี่ยนไป โดยที่สังเกตได้ว่าราดิคอลที่เกิดขึ้นกับพื้นผิวของพลาสติก PEN จะไม่ทำให้เกิดพันธะใหม่แต่จะไปเพิ่มปริมาณของราดิคอลในพื้นผิวแทนเนื่องจากที่โครงสร้างของพลาสติกมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากจนทำให้ราดิคอลต่างๆ ไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเดิมได้ เพียงแต่ราดิคอลเหล่านี้จะเข้าไปแทรกตัวหรือทำปฏิกิริยากับพันธะเดิม



รูปที่ 5.4 กลไกและโครงสร้างทางเคมีของแผ่นพลาสติก PEN

a) กลไกของระบบ Low-pressure high-frequency plasma chemical vapor deposition บนพื้นผิว PEN film

b) ปฏิกิริยาโครงสร้างทางเคมีของพื้นผิว PEN หลังจากได้รับการทรีตเมนต์

โดยการสร้างฟิล์มบาง ITO ลงบนวัสดุที่เป็นพลาสติกชนิด PEN จะสามารถนำไปใช้งานกับชั้น photoelectrode ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงได้ และการเปลี่ยนแปลงสมบัติของพื้นผิววัสดุที่เป็นพลาสติกและพื้นผิวที่เป็นซิลิกอนออกไซด์โดยใช้เทคนิค Low-pressure high-frequency plasma chemical vapor deposition จะสามารถนำเทคนิคดังกล่าวไปทำการเพิ่มสมบัติของการทำชั้นสารโลหะออกไซด์เช่น ITO, ZnO หรือ TiO_2 ได้เป็นอย่างดีเนื่องจากผลจากการใช้เทคนิคดังกล่าวสามารถที่จะเพิ่มราดิคอลที่เป็นออกซิเจนหรือคาร์บอนได้ ซึ่งส่งผลให้เกิดการออกซิเดชั่นที่ดีในการที่ทำชั้นสารโลหะออกไซด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สามารถนำพลาสติก PEN ที่สร้างฟิล์มบาง ITO จากเทคนิค Naturatron Sputtering ไปทำสอบหาค่าการส่งผ่านแสงและ V-I curve เพื่อที่จะใช้เป็น Photo electrode สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงต่อไป

2. สามารถสร้างฟิล์มบางที่หลากหลายเช่น ZnO หรือ TiO_2 บนแผ่นพลาสติก PEN จากเทคนิค Naturatron Sputtering สำหรับที่ใช้เป็นฟิล์มโลหะที่ยืดหยุ่นได้

3. สามารถเพิ่มการยึดติดระหว่างแผ่นพลาสติก PEN กับโลหะออกไซด์จากการใช้เทคนิค Low-pressure high-frequency plasma chemical vapor deposition ทำออกซิเจนพลาสมาทรีตเมนต์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ได้

4. สามารถสร้างฟิล์มบางจาก Low-pressure high-frequency plasma chemical vapor deposition ได้เช่นกันโดยต้องมีผงโลหะเพิ่มเข้าไปในระบบ

5. สามารถนำงานวิจัยชิ้นนี้ไปพัฒนาวัสดุที่ยืดหยุ่นในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ R2R ได้ ซึ่งจะส่งผลถึงราคาของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ำลง