



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การวิจัยและพัฒนาชั้นเคลือบโลหะบนพลาสติกโดยการเคลือบด้วยไอกายภาพ

Research and Development of Metal Coating on Plastic by Physical Vapor Deposition

โดย

โดย รองศาสตราจารย์ ดร.สุรสิงห์ ไชยคุณ และ คณะ

พฤศจิกายน 2558

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การวิจัยและพัฒนาชั้นเคลือบโลหะบนพลาสติกโดยการเคลือบด้วยไอกายภาพ

Research and Development of Metal Coating on Plastic by Physical Vapor Deposition

คณะผู้วิจัย

1. รองศาสตราจารย์ ดร.สุรสิงห์ ไชยคุณ
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์
3. ดร.อดิสร บุรณวงศ์
4. ดร.ธนัสถา รัตนะ
5. ดร.วิเชียร ศิริพรม
6. นส.จินดาวรรณ ธรรมปรีชา

สังกัด

มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

ชุดโครงการวิจัยด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเพื่อวิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs)

สนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)



บทสรุปผู้บริหาร

โครงการวิจัยเรื่อง “การวิจัยและพัฒนาชั้นเคลือบโลหะบนพลาสติกโดยการเคลือบด้วยไอกายภาพ” เป็นโครงการวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ ชุดโครงการวิจัยด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเพื่อวิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 สัญญาเลขที่ RDG5750044 มีบริษัท ออฟเท็ค จำกัด เป็นภาคเอกชนผู้กำหนดโจทย์วิจัย และมีโครงการวิจัยย่อย 3 โครงการวิจัย ได้แก่ (1) การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค (2) การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสเปตเตอร์ริง และ (3) การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน โดยมีผลการศึกษาโดยสรุปดังนี้

โครงการวิจัยย่อยที่ 1 โครงการสามารถออกแบบสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค สำหรับเคลือบฟิล์มบางโลหะบนวัสดุรองรับแบบแผ่นเรียบได้ ซึ่ง โดยแหล่งกำเนิดสารเคลือบที่สร้างขึ้นทำจากสเตนเลสเป็นทรงกระบอก ระบายความร้อนด้วยน้ำ ผลทดสอบพบว่าสามารถเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมบนวัสดุแผ่นเรียบได้ โดยความดันที่เหมาะสมมีค่าในช่วง 5×10^{-4} - 1×10^{-3} mbar และกระแสอาร์คเท่ากับ 90 Amp ทั้งนี้ควรมีการพัฒนากระบวนการเพื่อคัดกรองภาชนะขนาดใหญ่ก่อนการเคลือบ และพัฒนาวิธีอาร์คแบบอัตโนมัติเพื่อให้สร้างสารเคลือบได้ตลอดเวลา ควรศึกษาผลของพารามิเตอร์การเคลือบต่อการยึดติดของฟิล์ม รวมถึงพัฒนาชุดจับชิ้นงานเพื่อทำให้การเคลือบเกิดขึ้นสม่ำเสมอรวมถึงสามารถสามารถเคลือบชิ้นงานที่มีรูปร่าง 3 มิติได้

โครงการวิจัยย่อยที่ 2 พบว่าผิวของชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มโลหะด้วยเทคนิคสเปตเตอร์ริงยังคงมีริ้วรอยของผิวเดิมก่อนเคลือบ เนื่องจากเทคนิคสเปตเตอร์ริงเป็นการสะสมเรียงตัวและพอกพูนเป็นชั้นของสารเคลือบในระดับอะตอม ฟิล์มที่ได้มีความหนาในระดับนาโนเมตรจึงไม่เป็นการสร้างผิวใหม่ปิดทับรอยขีดข่วน ทั้งนี้ การปรับผิวของวัสดุก่อนเคลือบก็มีผลต่อลักษณะปรากฏของชิ้นงานโดยการปรับผิวแบบมันหลังเคลือบจะมีการสะท้อนแสงดีส่วนการปรับผิวแบบด้านการสะท้อนแสงไม่ดี นอกจากนี้การปรับผิวยังช่วยปิดรอยขีดข่วนของชิ้นงานก่อนเคลือบอีกด้วย ทั้งนี้ควรมีการศึกษาผลของการปรับผิวก่อนเคลือบเพิ่มเติม และควรมีการทดลองเคลือบชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ เช่น ชิ้นงานที่มีรูปร่าง 3 มิติ หรือ มีขนาดใหญ่

โครงการวิจัยย่อยที่ 3 ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มที่เคลือบได้ทุกเงื่อนไขเนียนเรียบ สีส่องผ่านแสงได้ดี มีโครงสร้างผลึกแบบออสถุเนียนทั้งหมด ฟิล์มที่ได้ทั้งหมดมีอะลูมิเนียมและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในอัตราส่วน 35:65 ฟิล์มมีความหนาประมาณ 0.14-0.18 μm ฟิล์มที่เตรียมได้มีความสามารถในการดูดซับได้ดีแต่ยังไม่ดีเพราะฟิล์มบางเกินไป ทั้งนี้ การเตรียมฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์เพื่อให้เกิดโครงสร้างผลึกต้องใช้พลังงานสูง อาจไม่เหมาะกับการเคลือบพลาสติก แต่ฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบออสถุเนียนซึ่งเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้องก็มีสมบัติการต้านทานการดูดซับได้ ควรศึกษาผลของการปรับผิวก่อนเคลือบในลักษณะต่างๆ เพิ่มเติม รวมถึงทดลองเคลือบบนชิ้นงานอื่น

สำหรับผลลัพธ์จากของโครงการวิจัย มีดังนี้คือ

1. บทความวิจัย จำนวน 3 เรื่อง ได้แก่

- 1.1 สุรสิงห์ ไชยคุณ, ธนัสถา รัตนะ, อติศร บุรณวงศ์, นิรันดร์ วิทิตอนันต์. 2559. การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติครั้งที่ 7 “ยกระดับงานวิจัย เพื่อก้าวสู่มหาวิทยาลัยระดับโลก”. 25-26 มีค 59.

ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา กรุงเทพมหานคร

- 1.2 อติศร บุรณวงศ์, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, จินดาวรรณ ธรรมปรีชา, สุรสิงห์ ไชยคุณ. 2559. การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสเปตเตอร์ริง. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏหมู่บ้านจอมบึงวิจัย ครั้งที่ 4 “สร้างองค์ความรู้ สู่การพัฒนา นำพาสังคม”. 1 มีค 59. ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง จ.ราชบุรี

- 1.3 นิรันดร์ วิทิตอนันต์, วิเชียร ศิริพรม, อติศร บุรณวงศ์, สุรสิงห์ ไชยคุณ. 2559. การเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติครั้งที่ 7 “ยกระดับงานวิจัย เพื่อก้าวสู่มหาวิทยาลัยระดับโลก”. 25-26 มีค 59. ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา กรุงเทพมหานคร

2. การผลิตบุคลากร จำนวน 3 คน (นิสิต ปริญญาโท วท.ม.(ฟิสิกส์)) ได้แก่

- 2.1 ชื่อ-นามสกุล นายอำพล ทัมบุตร
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีอีพอกซีแมกนีตรอนโคสเปตเตอร์ริง

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์

- 2.2 ชื่อ-นามสกุล นายทศพล ศรีเจริญ
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของพารามิเตอร์การเคลือบต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโครเมียมเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีอีพอกซีแมกนีตรอนโคสเปตเตอร์ริง

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์

- 2.3 ชื่อ-นามสกุล นางสาวพรพิมล ธัญญะภูมิ
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโครเมียมเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบด้วยวิธีอีพอกซีแมกนีตรอนโคสเปตเตอร์ริง

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์

3. การบริการวิชาการ/ถ่ายทอดเทคโนโลยี/ความเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรม

การให้ความอนุเคราะห์ผู้สนใจ เข้าเยี่ยมชมกิจกรรมของโครงการวิจัยฯ จำนวน 3 ครั้ง

การเข้าร่วมจัดนิทรรศการแสดงผลงานวิจัย จำนวน 3 ครั้ง

การเป็นวิทยากรบรรยายเผยแพร่ความรู้จากงานวิจัย จำนวน 2 ครั้ง

การวิจัยและพัฒนาชั้นเคลือบโลหะบนพลาสติกโดยการเคลือบด้วยไอกายภาพ

สุรสิงห์ ไชยคุณ, อติศร บุรณวงศ์, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, ธนัสภา รัตน์ะ,

วิเชียร ศิริพรม, จินดาวรรณ ธรรมปรีชา

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาและพัฒนาเทคนิคในการเตรียมชั้นเคลือบโลหะบนแผ่นพลาสติก ประกอบด้วยโครงการวิจัยย่อย 3 โครงการ ดังนี้ (1) “การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คสำหรับเคลือบฟิล์มบางโลหะบนพลาสติก” เป็นการสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค (2) “การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสปัตเตอริง” เน้นการเคลือบฟิล์มโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยวิธีสปัตเตอริงและ (3) “การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน” เน้นการเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์เพื่อใช้เป็นชั้นป้องกันการขีดข่วนของพลาสติก มีผลการศึกษาดังนี้ (1) สามารถสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คได้ โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระตุ้นให้เกิดการอาร์คคือใช้ความดันภายในห้องเคลือบในช่วง 5×10^{-4} - 1×10^{-3} mbar และกระแสไฟฟ้ามามีค่าเท่ากับ 90 Amp ผลการทดสอบการเคลือบพบว่าแหล่งกำเนิดสารเคลือบที่สร้างขึ้นสามารถเตรียมชั้นเคลือบของอะลูมิเนียมได้แต่การยึดติดยังไม่ดีนัก (2) สามารถการเคลือบโลหะบนพลาสติกได้ การเคลือบในสุญญากาศโดยวิธีสปัตเตอริงนั้นการเกิดฟิล์มมีลักษณะเป็นการสะสมพอกพูนของสารเคลือบในระดับอะตอม ทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีความหนาในระดับนาโนที่สำคัญชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นบางมากจนไม่สามารถปิดริ้วรอยบนผิวหน้าของชิ้นงานได้ จึงจำเป็นต้องปรับผิวก่อนเคลือบ งานวิจัยนี้ได้ปรับผิว 2 แบบ คือ แบบมันและแบบด้าน โดยชั้นเคลือบบนชิ้นงานปรับผิวแบบมันไม่แสดงริ้วรอยการขีดข่วนของผิวชิ้นงานเดิมและให้การสะท้อนแสงมันเงาดี ตามลักษณะของฟิล์มโลหะเดิม ส่วนชิ้นงานที่ปรับผิวแบบด้านชั้นเคลือบที่ได้ไม่แสดงริ้วรอยการขีดข่วนของผิวชิ้นงานเดิมและไม่สะท้อนแสงตามลักษณะของการปรับผิวก่อนเคลือบ และ (3) ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกแบบออสถูนาทุกเงื่อนไขการเคลือบ ฟิล์มมีลักษณะใสส่งผ่านแสงได้ดี มีความหนาประมาณ 0.14-0.18 μm ทั้งนี้เมื่อทดลองเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ตามเงื่อนไขที่ได้ห้ไปบนฟิล์มอะลูมิเนียมที่อยู่บนพลาสติกแล้วนำไปทดสอบการขีดข่วน พบว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เตรียมได้เกิดรอยขีดข่วนน้อยกว่าฟิล์มอะลูมิเนียม

Research and Development of Metal Coating on Plastic by Physical Vapor Deposition

Surasing Chaikyakun, Adisorn Buranawong, Nirun Witit-anun, Tanattha Rattana,

Wichian Siriprom, Jindawan Thammapreecha

Abstract

The main objectives of this research work were to study and develop preparation technique for metal coating on plastic sheet. The project were composed of 3 sub-projects as follows (1) “Design and Construction of Cathodic Arc Source for Metal Thin Film Coating on Plastic”. which was constructed cathodic arc source for create deposited material, (2) “Coating of Metal Thin Film on Plastic Sheet by Sputtering Technique” which was focus the deposited metal layer on plastic by sputtering method and (3) “Preparation and Characterization of Aluminium Oxide Thin Film for Protective Coating Application” which was focus the preparation aluminium oxide thin film for protective coating of plastic. The results show that; (1) the cathodic arc source for produced deposited material was successfully constructed. The optimum conditions to activated arc source were pressure in the range of 5×10^{-4} - 1×10^{-3} mbar and current of 90 Amp. The aluminium coatings on flat substrate with poor adhesion were successfully prepared from cathodic arc source, (2) it was successfully to deposite the metal on platic. The vacuum coating, sputtering method, the formation of films were in the atomic scale resulting very thin coating with thickness in nanometer. The thickness of coating was thin which not adequated to cover surface substrate. Therefore, it was nesscessary to pretreatment substrate before coating. The two types of substrates pretreatment as gloss and matted were used. The scrath pattern disappear for coating on gloss treatment of raw substrate with good reflection like metal films characteristic whereas scatch pattern on matted treatment wasn’t showed on raw substrate and not reflected through the characteristic of the pretreatment substrate before deposition and (3) the crystal structure of aluminium oxide thin films were amorphous structure for all deposited conditions. The good transparent with thickness of 0.14-0.018 μm were observed. When deposite the aluminium oxide thin films on aluminium films which prepared on platic and then evaluated by scratch testing, the less scarch of aluminium oxide thin films comparing to the aluminium films were investigated.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย “การวิจัยและพัฒนาชั้นเคลือบโลหะบนพลาสติกโดยการเคลือบด้วยไอกายภาพ” (Research and Development of Metal Coating on Plastic by Physical Vapor Deposition) เป็นโครงการวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ ชุดโครงการวิจัยด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเพื่อวิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 สัญญาเลขที่ RDG5750044 โดยมีบริษัท ออพเท็ค จำกัด เป็นภาคเอกชนผู้กำหนดโจทย์วิจัย มีโครงการวิจัยย่อย 3 โครงการวิจัย ได้แก่ (1) การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค (2) การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสเปตเตอริง และ (3) การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ กรรมการและผู้ทรงคุณวุฒิ ของ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ ชุดโครงการวิจัยด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเพื่อวิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำหรับคำแนะนำต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ในการปรับปรุงและพัฒนาโครงการวิจัยให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณบุคลากรและเจ้าหน้าที่ของ วช. ตลอดจนผู้ประสานงานและเจ้าหน้าที่ของชุดโครงการวิจัยด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเพื่อวิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) (สกว.) สำหรับคำแนะนำและการอำนวยความสะดวกในการติดต่อด้านต่าง ๆ ที่ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สำหรับสถานที่อุปกรณ์ เครื่องมือและสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ขณะดำเนินงานของแผนงานวิจัยนี้

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	i
บทคัดย่อ	iii
Abstract	iv
กิตติกรรมประกาศ	v
สารบัญ	vi
บทที่ 1 บทนำรวม	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค	
บทสรุปผู้บริหาร	4
บทคัดย่อ	5
Abstract	5
2.1 บทนำ	6
2.2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	8
2.3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	14
2.4 ผลและอภิปรายผล	14
2.5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	29
2.6 เอกสารอ้างอิง	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสปีดเทอริง	
บทสรุปผู้บริหาร	31
บทคัดย่อ	32
Abstract	32
3.1 บทนำ	33
3.2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	35
3.3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	39
3.4 ผลและอภิปรายผล	42
3.5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	53
3.6 เอกสารอ้างอิง	54
บทที่ 4 การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน	
บทสรุปผู้บริหาร	55
บทคัดย่อ	56
Abstract	56
4.1 บทนำ	57
4.2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	58
4.3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	65
4.4 ผลและอภิปรายผล	67
4.5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	87
4.6 เอกสารอ้างอิง	88
ภาคผนวก	
บทความสำหรับเผยแพร่	91
ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการ	93
ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ	95
ประวัตินักวิจัย	104

บทที่ 1

บทนำรวม

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

พลาสติกจัดเป็นวัสดุก้าวหน้าชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาถูก มีน้ำหนักเบาเหมาะ สำหรับใช้งานในหลายรูปแบบ อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปได้ง่ายทั้งแบบพื้นฐานไปจนถึงรูปทรงที่มีความสลับซับซ้อน พลาสติกแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ตามลักษณะการใช้และสมบัติที่แตกต่างกันอีกหลายประเภทซึ่งแต่ละประเภทก็มีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกัน ถึงแม้พลาสติกจะเป็นวัสดุที่น่าสนใจด้วยเหตุผลต่างๆ แต่พลาสติกก็มีข้อจำกัดบางประการเนื่องจากพลาสติกมีความอ่อนนุ่มทำให้ไม่ทนทาน ไม่ทนการขีดข่วนจึงเป็นรอยได้ง่าย อีกทั้งยังไม่ทนต่อสารเคมี และที่สำคัญมีข้อจำกัดเกี่ยวกับสีของพลาสติกซึ่งมีอยู่ไม่มากนัก ทำให้การใช้ในงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มที่ใช้ด้านความสวยงาม จำเป็นต้องมีการปรับปรุงผิวหน้าของพลาสติกโดยการเคลือบ ซึ่งทำได้หลายวิธี เช่น การทาสี (painting) หรือ การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) แต่ที่นิยมใช้คือการเคลือบด้วยชั้นเคลือบโลหะ หรือ เซรามิก โดยการเคลือบด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าเพื่อให้ผิวของชิ้นงานมีสมบัติตามต้องการ

ทั้งนี้การปรับปรุงผิววัสดุเพื่อความสวยงามเป็นวิธีในการการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าประเภทต่าง ๆ ซึ่งอาจทำได้โดยการทาสีปิดผิวหน้าของวัสดุหรือการชุบเคลือบชิ้นงานด้วยวิธีต่าง ๆ โดยวิธีการที่นิยมใช้ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันคือ การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) แต่อย่างไรก็ดีแม้ว่าวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าจะมีราคาถูกและสามารถเคลือบชิ้นงานได้จำนวนมากในแต่ละครั้ง แต่วิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าก็ยังมีข้อเสียสำคัญ 2 ประการ คือ (1) สารเคลือบหลุดลอกจากผิวของวัสดุได้ง่าย และ (2) มีสารละลายเคมีเหลือใช้หลังกระบวนการเคลือบจำนวนมาก โดยสารละลายเคมีเหล่านี้ส่วนประกอบหลักมักเป็นโลหะหนักซึ่งเมื่อทิ้งลงในแหล่งน้ำก็จะก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำต่อไป ทำให้มีการวิจัยและพัฒนากระบวนการเคลือบใหม่ขึ้นมาใช้ทดแทนคือ การเคลือบด้วยไอกายภาพ (Physical Vapor Deposition ; PVD) ซึ่งจะให้ชั้นเคลือบในลักษณะฟิล์มบางที่มีความหนาน้อยมาก

การเคลือบด้วยไอกายภาพ มีข้อได้เปรียบหลายด้าน เพราะให้ชั้นเคลือบคุณภาพสูง การยึดติดดี กระบวนการเคลือบเกิดขึ้นในสุญญากาศ ไม่มีการใช้สารละลายเคมี ทำให้การเคลือบด้วยไอกายภาพ ได้รับการยอมรับว่าเป็นกระบวนการเคลือบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (environmentally friendly) นอกจากนี้ การเคลือบด้วยไอกายภาพยังสามารถคุมตัวแปรในกระบวนการเคลือบซึ่งมีผลต่อสมบัติของชั้นเคลือบที่ได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถขยายผลสู่ระดับอุตสาหกรรมอย่างไม่มียุ่งยากอีกด้วย ทั้งนี้การเคลือบในสุญญากาศยังสามารถแบ่งเป็นวิธีการย่อย ๆ ได้อีกหลายวิธี เช่น วิธีสปัตเตอริง วิธีระเหยสาร วิธีอาร์ค วิธีเพลทด้วยไอออน ฯลฯ ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกันออกไปอีกทั้งยังเหมาะสำหรับชิ้นงานที่แตกต่างกัน

บริษัท ออฟเท็ค จำกัด เป็นบริษัทผลิตแว่นตาว่ายน้ำ (OEM) ให้กับแบรนด์ต่าง ๆ ทั้งในและต่างประเทศ เช่น SPEEDO, ARENA, NIKE, INTERSPORT และบริษัท ในเครือ ICC, TRIUMPH, BONA รวมถึงผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่ทำจากพลาสติก ซึ่งมีการใช้เทคนิคการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร ในการเตรียมชั้นเคลือบสวยงามสำหรับผลิตภัณฑ์บางชนิดของบริษัท ได้มีโอกาสเข้าศึกษาเยี่ยมชมกิจกรรม การวิจัยและพัฒนาของคณะผู้วิจัยหลายครั้ง ตลอดจนได้เข้าร่วมการอบรม เรื่องการเคลือบในสุญญากาศ สำหรับประยุกต์ทางอุตสาหกรรม ซึ่งจัดขึ้นโดยคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา โดยมีคณะผู้วิจัยเป็น วิทยากร เมื่อวันที่ 4 กย. 56 มีความสนใจที่จะนำองค์ความรู้ที่เกิดจากการวิจัยด้านเทคโนโลยีการเคลือบ ในสุญญากาศ ของคณะนักวิจัยจาก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ของ บริษัทฯ เพื่อพัฒนาและปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ของบริษัท ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนา ผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ๆ ของบริษัท ทั้งนี้โจทย์วิจัยที่ บริษัท ออฟเท็ค จำกัด เสนอให้กับคณะผู้วิจัยคือ ทำอย่างไร จึงจะเคลือบผิวพลาสติกให้มีความสวยงามด้วยชั้นเคลือบโลหะ ความท้าทายในโจทย์วิจัยนี้คือ การเคลือบ ผิวพลาสติกซึ่งไม่นำไฟฟ้าด้วยชั้นเคลือบโลหะ แทนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

จากรายละเอียดต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น บริษัท ออฟเท็ค จำกัด และ คณะผู้วิจัยฯ ได้นำมาพัฒนาเป็น แผนงานวิจัย เพื่อขอรับการสนับสนุน จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปี งบประมาณ 2557 ในแผนงานวิจัยเรื่อง “การวิจัยและพัฒนาชั้นเคลือบโลหะบนพลาสติกโดยการเคลือบ ด้วยไอกายภาพ” (Research and Development of Metal Coating on Plastic by Physical Vapor Deposition Techniques) โดยภาคอุตสาหกรรมที่ร่วมโครงการคือ บริษัท ออฟเท็ค จำกัด ซึ่งเป็นผู้ร่วม โครงการและกำหนดโจทย์วิจัย ตลอดจนให้การสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องเคลือบ ชิ้นงานพลาสติกสำหรับ ทดลองเคลือบและเครื่องมือทดสอบชิ้นงาน โดยงานวิจัยนี้ครอบคลุมการออกแบบสร้างเครื่องมือ ไปจนถึง การพัฒนาเทคนิคและชั้นเคลือบโลหะสำหรับใช้เคลือบพลาสติกให้มีลักษณะเงางามคล้ายผิวของโลหะตาม ต้องการ โดยในแผนงานนี้ประกอบด้วยโครงการย่อย 3 โครงการ ดังนี้ (1) “การออกแบบและสร้าง แหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คสำหรับเคลือบ ฟิล์มบางโลหะบนพลาสติก” เป็นการสร้าง แหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ครวมถึงพัฒนาเทคนิคการเตรียมชั้นเคลือบโลหะบนแผ่นพลาสติก (2) “การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสปัตเตอริง” เน้นการเคลือบชั้นเคลือบโลหะบน แผ่นพลาสติกด้วยวิธีสปัตเตอริง และ (3) “การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอลูมิเนียม ออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน” เน้นการเตรียมชั้นเคลือบของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์เพื่อใช้ เป็นชั้นป้องกันการดูดซึมน้ำเป็นรอยของพลาสติก ทั้งนี้แผนงานวิจัยนี้นอกจากเป็นการนำความรู้พื้นฐานจาก งานวิจัย ขยายสู่ภาคอุตสาหกรรมแล้ว ยังแสดงถึงความร่วมมือของภาคอุตสาหกรรมและคณะผู้วิจัย โดย การสนับสนุนของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน ตลอดจนอาจทำให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นของประเทศอีกด้วย โครงการนี้เป็น การศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการวิจัยเพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานสำคัญก่อนนำไปขยายผลระดับอุตสาหกรรมซึ่ง เป็นจุดเริ่มของการพัฒนาเทคโนโลยีแบบพึ่งพาตนเองของประเทศในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาและสร้างองค์ความรู้ เกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติก โดยการเคลือบด้วยไอกายภาพสำหรับอุตสาหกรรมพลาสติก
2. เพื่อพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโลหะบนพลาสติกโดยการเคลือบด้วยไอกายภาพสำหรับประยุกต์ใช้งานต่างๆ เช่น การเคลือบแข็ง (hard coating) การเคลือบสวยงาม (decorative coating) การเคลือบชั้นป้องกัน (protective coating)
3. เพื่อพัฒนาบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถด้านการเคลือบฟิล์มบางโลหะบนพลาสติกโดยการเคลือบด้วยไอกายภาพสำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการวิจัยหลักของแผนงานวิจัยนี้ครอบคลุมทั้งในด้านการพัฒนาอุปกรณ์ เครื่องมือสำหรับเตรียมฟิล์มบางตลอดจนศึกษากระบวนการเตรียมฟิล์มบางโลหะบนพลาสติก ได้แก่ (1) การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คสำหรับเคลือบฟิล์มบางโลหะบนวัสดุแผ่นเรียบ (2) การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนพลาสติกด้วยเทคนิคสเปตเตอร์ ส่วนนี้เน้นการพัฒนาเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยวิธีสเปตเตอร์ เพื่อปรับผิวพลาสติกให้มีลักษณะโลหะก่อนนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ (3) การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน ผลการวิจัยส่วนนี้คือ การพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นป้องกัน เนื่องจากใส มีความแข็งแรงสูง โดยกลุ่มเป้าหมายที่จะได้รับประโยชน์จากผลงานวิจัยนี้คือ โรงงานอุตสาหกรรม หรือหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนที่ใช้การเคลือบในสุญญากาศในกระบวนการผลิตหรือการวิจัย ตลอดจนสถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยที่จำเป็นต้องใช้ เครื่องเคลือบระบบสเปตเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มที่ทำวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยี

สำหรับผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดจากงานวิจัยนี้คือ สามารถพัฒนากระบวนการเคลือบฟิล์มบาง เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงผิวของวัสดุในภาคอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ช่วยเพิ่มชนิดผลิตภัณฑ์ให้เกิดความหลากหลายจากการปรับปรุงผิวของวัสดุเพื่อการแข่งขัน ทำให้เกิดการจ้างงานเพิ่มขึ้น และที่สำคัญคือ เทคโนโลยีการเคลือบในโครงการนี้เป็นวิธีที่ไม่สร้างปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงยังให้ชั้นเคลือบในลักษณะฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีกว่าวิธีเคลือบอื่น ๆ อีกด้วย

บทที่ 2

โครงการวิจัยย่อยที่ 1

การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค

บทสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)

โครงการวิจัยเรื่อง “การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค” เป็นโครงการวิจัยย่อยที่ 1 ในแผนงานวิจัย เรื่อง “การวิจัยและพัฒนาชั้นเคลือบโลหะบนพลาสติกโดยการเคลือบด้วยไอกายภาพ” ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ ชุดโครงการวิจัยด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเพื่อวิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 สัญญาเลขที่ RDG5750044 มีผลโดยสรุปดังนี้ สามารถออกแบบสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คสำหรับเคลือบฟิล์มบางโลหะบนวัสดุรองรับแบบแผ่นเรียบได้ โดยแหล่งกำเนิดสารเคลือบที่สร้างขึ้นทำจากสแตนเลส เป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76 mm ระบายความร้อนด้วยน้ำ ผลทดสอบพบว่าสามารถเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมบนวัสดุแผ่นเรียบได้ โดยความดันที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง $5 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$ mbar และกระแสอาร์คเท่ากับ 90 Amp สำหรับข้อเสนอแนะของโครงการคือควรมีการพัฒนาระบบกรอง (filter) เพื่อคัดอนุภาคขนาดใหญ่ (macro particle) ออกก่อนการเคลือบ และพัฒนาวิธีอาร์คแบบอัตโนมัติเพื่อให้สร้างสารเคลือบได้ตลอดเวลา นอกจากนี้ยังควรศึกษาถึงพารามิเตอร์ในการเคลือบที่ทำให้การยึดติดของฟิล์มดีขึ้น รวมถึงพัฒนาชุดจับชิ้นงานเพื่อทำให้การเคลือบเกิดขึ้นสม่ำเสมอถึงสามารถสามารถเคลือบชิ้นงานที่มีรูปร่าง 3 มิติได้ สำหรับผลลัพธ์จากของโครงการวิจัยย่อยที่ 1 มีดังนี้คือ

1. บทความวิจัยเรื่อง “การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค” เสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติครั้งที่ 7 “ยกระดับงานวิจัย เพื่อก้าวสู่มหาวิทยาลัยระดับโลก”, 25-26 มีค 59, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา กรุงเทพมหานคร

2. การผลิตบุคลากร :นิสิต ปริญญาโท วท.ม.(ฟิสิกส์) 1 คน คือ

ชื่อ-นามสกุล นายอำพล ชิมบุตร

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนโคสปีดเตอริง

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์

3. การบริการวิชาการ/ถ่ายทอดเทคโนโลยี/ความเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรม

การให้ความอนุเคราะห์ผู้สนใจ เข้าเยี่ยมชมกิจกรรมของโครงการวิจัยฯ จำนวน 3 ครั้ง

การเข้าร่วมจัดนิทรรศการแสดงผลงานวิจัย จำนวน 3 ครั้ง

การเป็นวิทยากรบรรยายเผยแพร่ความรู้จากงานวิจัย จำนวน 2 ครั้ง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คสำหรับเคลือบฟิล์มบางโลหะบนวัสดุรองรับแบบแผ่นเรียบ แหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คที่สร้างขึ้นทำจากสแตนเลส มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 76 mm ระบายความร้อนด้วยน้ำ ด้านหลังของสารเคลือบติดแม่เหล็กแบบ NdFeB สำหรับคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในกระบวนการอาร์ค โดยการอาร์คใช้แท่งทังสเตนซึ่งต่อกับวงจรทริกเกอร์ (trigger) สำหรับจุดการอาร์ค ผลทดสอบการทำงานของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คที่สร้างขึ้น โดยเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียม (Al) บนวัสดุแผ่นเรียบ เมื่อแปรค่าความดันขณะเคลือบและกระแสอาร์คต่างกันพบว่าแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คที่สร้างขึ้นสามารถเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมบนกระจกแผ่นเรียบได้ โดยความดันที่เหมาะสมสำหรับเคลือบมีค่าอยู่ในช่วง 5×10^{-4} - 1×10^{-3} mbar และกระแสอาร์คเท่ากับ 90 Amp

Abstract

The cathodic arc source for deposited metal thin films on flat substrate was designed and constructed in this work. The home-made cathodic arc source was made from cylindrical stainless with diameter of 76 mm which cooling by water. The NdFeB magnet was installed behind the deposited material to control electron movement in arc process. The tungsten rod was connected to trigger circuit to arc activation. The aluminium (Al) metal films were deposited on flat glass substrate by varying the total pressures and arc currents to evaluate the cathodic arc source in this work. The results revealed that the Al films were successfully deposit on flat substrate by home-made cathodic arc source. The optimum coating conditions of home-made cathodic arc source was total pressure which between 5×10^{-4} - 1×10^{-3} mbar and 90 A for arc current.

2.1 บทนำ

2.1.1 ความสำคัญและที่มา

การปรับปรุงผิววัสดุเพื่อความสวยงามเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าประเภทต่างๆ อาจทำได้โดยการทาสีผิววัสดุหรือชุบเคลือบชิ้นงานด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งวิธีการที่นิยมคือ การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) แม้ว่าวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้ามีราคาถูกและสามารถเคลือบได้จำนวนมากในแต่ละครั้ง แต่ยังมีข้อเสียสำคัญ 2 ประการ คือ (1) สารเคลือบหลุดลอกจากผิววัสดุได้ง่าย และ (2) มีสารละลายเคมีเหลือใช้จำนวนมากโดยสารละลายเคมีเหล่านี้มีส่วนประกอบของโลหะหนัก ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาการเคลือบใหม่มาใช้ทดแทนคือ การเคลือบด้วยไอกายภาพ ซึ่งมีข้อดีหลายด้าน เช่น ให้ชั้นเคลือบคุณภาพสูง มีการยึดติดดี เป็นกระบวนการเคลือบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (environmental friendly) ในต่างประเทศมีการพัฒนาจนสามารถใช้จริงในเชิงอุตสาหกรรม สำหรับในประเทศไทยพบว่ามียางงานอุตสาหกรรมหลายแห่งนำเข้าเครื่องมือมาใช้บ้างแล้ว แต่ยังมีปัญหา เช่น ราคาของเครื่องเคลือบซึ่งมีราคาสูงมาก รวมถึงข้อจำกัดด้านความพร้อมของบุคลากรที่มีความรู้ด้านนี้

จากการสำรวจในเบื้องต้นของคณะผู้วิจัยพบว่า เครื่องเคลือบในสุญญากาศด้วยไอกายภาพที่ใช้ในประเทศไทย ส่วนใหญ่เป็นเครื่องเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร (Evaporation) ซึ่งนำเข้าจากประเทศจีน การเคลือบด้วยวิธีระเหยสารมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก ราคาเครื่องเคลือบไม่สูงมากนัก แต่ชั้นเคลือบที่ได้มีคุณภาพต่ำ อย่างไรก็ตามมีบางโรงงานที่นำเครื่องเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เข้ามาใช้ วิธีนี้มีข้อดีคือให้ชั้นเคลือบคุณภาพสูงและสามารถควบคุมคุณภาพของชั้นเคลือบที่ได้ง่ายกว่าวิธีระเหยสาร แต่มีข้อเสียด้านราคาคือเครื่องเคลือบทั้งระบบมีราคาสูงมากรวมถึงมีขั้นตอนเคลือบที่ซับซ้อนกว่าวิธีระเหยสาร

การเคลือบผิววัสดุที่ต้องการให้ชิ้นงานมีความสวยงามนั้นมักเป็นการเคลือบด้วยชั้นโลหะหรือชั้นเคลือบเซรามิคเพื่อให้ผิวของวัสดุมีความสวยงามเป็นหลัก ซึ่งเคลือบด้วยสารเคลือบเดี่ยวเช่น เงิน ทองคำ หรือ การเคลือบด้วยสารประกอบเช่น ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ซึ่งมีสีทอง ฯลฯ รวมถึงการเคลือบแบบชั้นเดียว (single layer) หรือการเคลือบแบบหลายชั้น (multilayers) สำหรับเครื่องเคลือบที่นิยมใช้มีทั้งแบบการเคลือบ ด้วยวิธีระเหยสารและแบบการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง แต่ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องเคลือบระบบสปัตเตอริง และ เครื่องเคลือบระบบระเหยสารด้วยการอาร์ค (Arc Vapor Deposition) เช่น Vacuum Arcs, Gaseous Arcs, Anodic Arcs และ Cathodic Arcs แต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน

ทั้งนี้หากเปรียบเทียบวิธีการเคลือบด้วยโอกายภาพ ทั้ง 3 วิธี พบว่า การเคลือบด้วยวิธีระเหยสารเป็นวิธีที่ง่าย ประหยัด แต่ชั้นเคลือบมีคุณภาพต่ำที่สุด เหมาะสำหรับการเคลือบชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่มีราคาไม่สูงมากนัก ส่วนการเคลือบด้วย วิธีสเปตเตอริงเป็นวิธีเคลือบที่ยากที่สุด ราคาแพง แต่ชั้นเคลือบที่ได้มีคุณภาพสูงสุด แต่เป่าสารเคลือบต้องนำไฟฟ้า การเคลือบด้วยวิธีสเปตเตอริงเหมาะสำหรับเคลือบชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่มีราคาสูง ขณะที่การเคลือบด้วยวิธีคาโทดิกอาร์คเป็นวิธีเคลือบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนเกินไป ชั้นเคลือบที่ได้มีคุณภาพปานกลางการยึดติดดี ชิ้นงานไม่จำเป็นต้องนำไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถเคลือบชิ้นงานที่มีคุณภาพได้จำนวนมากในแต่ละครั้งด้วย ทำให้ภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ที่ต้องการชั้นเคลือบคุณภาพปานกลางเลือกใช้ การเคลือบด้วยวิธีคาโทดิกอาร์ค เป็นหลัก

บริษัท ออฟเท็ค จำกัด เป็นบริษัทในกลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกที่ผลิตสินค้าจากพลาสติก โดยมีผลิตภัณฑ์หลักคือ แวนตาเวย์น้ำ ซึ่งผลิตในลักษณะ OEM ให้กับแบรนด์ต่าง ๆ ทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์บางชนิดจำเป็นต้องมีการเคลือบ ซึ่งเดิม บริษัท ออฟเท็ค จำกัด ใช้การเคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยเครื่องเคลือบที่นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังต้องพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศ ทั้งนี้ บริษัท ออฟเท็ค จำกัด ได้มีโอกาสเดินทางไปศึกษาเยี่ยมชมกิจกรรมการวิจัยและพัฒนาของคณะผู้วิจัยหลายครั้ง ตลอดจนได้เข้าร่วมกิจกรรมต่าง ๆ ที่คณะผู้วิจัยจัดขึ้น มีแนวคิดที่จะพัฒนาเทคนิคกระบวนการเคลือบเพื่อให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ของบริษัท เป็นการเฉพาะและจากการประสานงานร่วมกับคณะผู้วิจัย บริษัท ออฟเท็ค จำกัด จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนากระบวนการเคลือบผลิตภัณฑ์อื่นที่ทำจากพลาสติกด้วยวิธีคาโทดิกอาร์ค โดยผลงานวิจัยที่ได้นี้จะทำให้บริษัทได้ข้อมูลและเทคนิคในการเตรียมชั้นเคลือบโลหะบนพลาสติกเพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตและการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ของบริษัทต่อไป รายงานนี้เป็นผลการศึกษาของโครงการวิจัยเรื่อง “การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คสำหรับเคลือบฟิล์มบางโลหะบนพลาสติก” (Design and Construction of Cathodic Arc Source for Coating Metal Thin Film on Plastic) โดยมี บริษัท ออฟเท็ค จำกัด เป็นภาคเอกชนผู้ร่วมโครงการและกำหนดโจทย์วิจัย ตลอดจนสนับสนุนอุปกรณ์พื้นฐานบางส่วน และชิ้นงานสำหรับทดลอง

2.1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมชั้นเคลือบโลหะด้วยเทคนิคคาโทดิกอาร์ค

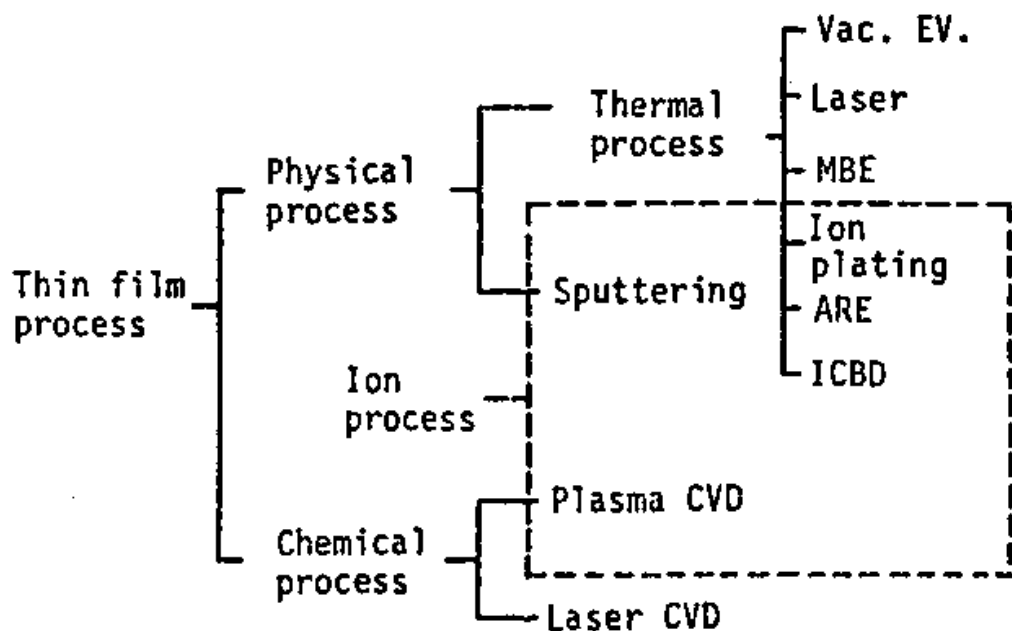
2.2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การเคลือบในสุญญากาศ

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี คศ.1852 โดยแนวคิดพื้นฐานแล้ว การเคลือบฟิล์มบางก็คือ การเรียงตัว (fabricated) โดยการสะสม (deposition) ของสารเคลือบในลักษณะของอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (substrate) จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบาง โดยฟิล์มที่ได้บางมาก (ระดับไมครอน) ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางในงานด้านต่างๆ มากมาย เช่น อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำและฟิล์มตัวต้านทาน หรือ อุปกรณ์ทางแสง เช่น เลนส์ กระจกเลเซอร์ กระจกสะท้อนแสง กระจกกรองแสงเฉพาะบางช่วงความถี่ เป็นต้น (Wasa & Hayakawa, 1992)

การเคลือบฟิล์มในสุญญากาศบางอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท (รูปที่ 2-1) ได้แก่

1. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (chemical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (new species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี plasma CVD และ วิธี laser CVD เป็นต้น
2. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (physical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร (evaporation) และ วิธีสปัตเตอริง (sputtering) เป็นต้น



รูปที่ 2-1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ (Wasa & Hayakawa, 1992)

การเคลือบด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์นั้น อาศัยหลักการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับแล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางซึ่งเกิดขึ้นภายใต้ภาวะสุญญากาศ แบ่งเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ (พิเชษฐ ลิมสุวรรณ และธันสธา รัตน์, 2547; Wasa & Hayakawa, 1992)

1. การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศ (ความดันประมาณ 10^{-6} mbar) ทำได้โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ ซึ่งไอของสารเคลือบนี้จะฟุ้งไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนได้เป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไป การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยากคือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้า สำหรับข้อเสียของการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับจะไม่สูงนักจึงต้องอาศัยกระบวนการอบด้วยความร้อนหรือวิธีอื่นช่วยให้การยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้ อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ

2. การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง ซึ่งคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงโดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ กระบวนการนี้อ่อนกว่าที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ และเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า

2.2.2 การเคลือบด้วยวิธีคาโทดิกอาร์ค

การอาร์คในสุญญากาศเป็นกระบวนการพลาสมาดีสชาร์จ (plasma discharge) ที่ใช้ความต่างศักย์ต่ำและกระแสสูงซึ่งเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นโลหะ (metallic electrode) ในสุญญากาศ สำหรับแนวคิดการเคลือบด้วยการอาร์คในสุญญากาศนั้นถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Thomas Edison ซึ่งได้รับสิทธิบัตร ในปี ค.ศ. 1892 ทั้งนี้การอาร์คในสุญญากาศได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการเคลือบอุปกรณ์ต่างๆ ในลักษณะของฟิล์มบาง ตัวอย่าง เช่น การเคลือบฟิล์มคาร์บอนโดย Bradley ใช้แท่งคาร์บอน 2 แท่งเป็นแหล่งกำเนิดในการอาร์คคาร์บอนในปี ค.ศ. 1954 นอกจากนี้ปี ค.ศ. 1956 Blue และ Danielson ได้รายงานถึงสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มคาร์บอนที่เคลือบด้วยการอาร์คในสุญญากาศ ทั้งนี้ในส่วน of โลหะและการเคลือบแข็ง (hard coating) ชนิดอื่นก็ได้รับความสนใจเช่นกันในช่วงทศวรรษที่ 1960 จากกลุ่มวิจัยต่างๆทั่วโลก สำหรับ

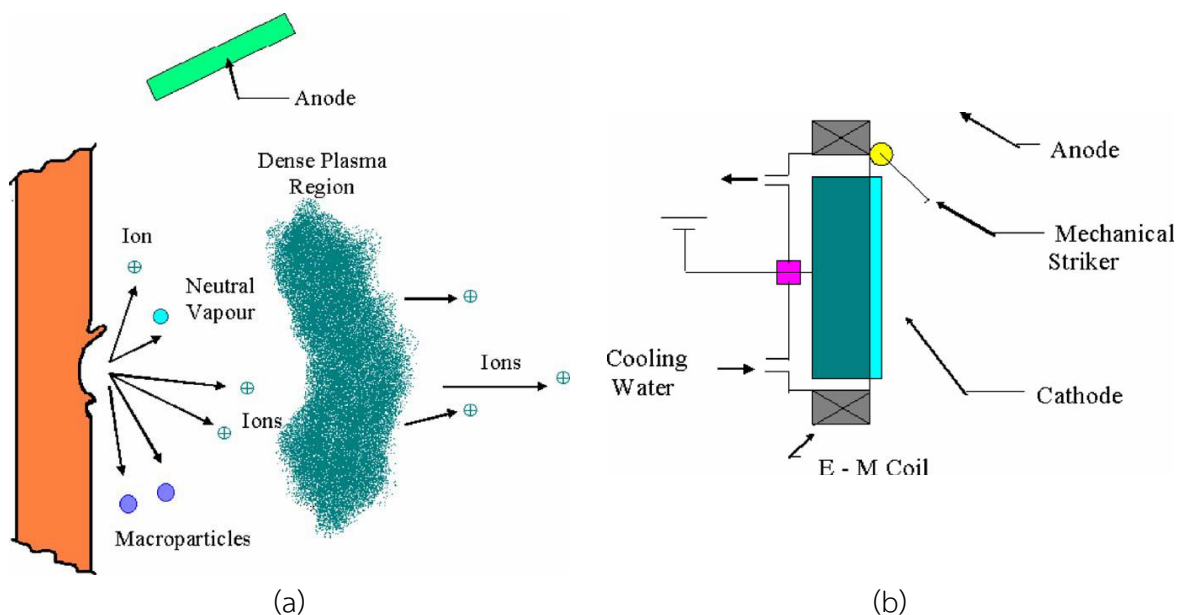
การศึกษาสมบัติของชั้นเคลือบโลหะด้วยการอาร์คในสุญญากาศยุคใหม่เริ่มขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1965 โดย Kikushi และคณะ หลังจากนั้นได้มีกลุ่มวิจัยอีกจำนวนมากได้เริ่มดำเนินการวิจัยต่อไปเพื่อทำความเข้าใจกระบวนการคาร์โทดิกอาร์ค (cathodic arc) และกระบวนการพลาสมา โดยนำไปประยุกต์ใช้โดยตรงกับการเคลือบในลักษณะของการเคลือบแข็ง ถัดมาในช่วงกลางทศวรรษที่ 1970 นักวิทยาศาสตร์จากสหภาพโซเวียตได้เข้ามาวิจัยเรื่องดังกล่าวและนำการเคลือบสารประเภทไนไตรด์ด้วยวิธีรีแอคทีฟ (reactive deposition of nitrides) ไปประยุกต์ใช้หลายด้าน รวมถึงแหล่งกำเนิดการอาร์ค (arc source) หลายแบบที่ได้รับการจดสิทธิบัตรในช่วงทศวรรษที่ 1970 และ 1980

ในปี ค.ศ. 1978 มีการนำการอาร์คในสุญญากาศไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถแทรกเตอร์และอุตสาหกรรมเครื่องจักรเป็นครั้งแรก และได้พัฒนาอุปกรณ์สำหรับการเคลือบในสุญญากาศเพิ่มขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 1980 อีกด้วย ในปัจจุบันจึงมีบริษัทขนาดเล็กและขนาดใหญ่จึงให้ความสนใจในการใช้ประโยชน์และติดตั้งอุปกรณ์คาร์โทดิกอาร์คในสุญญากาศ (cathodic vacuum arc) โดยทั่วไปแล้วจึงมีการนำคาร์โทดิกอาร์คในสุญญากาศไปประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถทำให้การเคลือบแข็งนั้นมีคุณภาพสูง ซึ่งสำคัญต่อการลดแรงเสียดทานและการสึกหรอของอุปกรณ์เครื่องกล รวมถึงชิ้นส่วนเครื่องจักรอีกด้วย ทั้งนี้การเคลือบแข็งสามารถลดแรงเสียดทาน ระหว่างผิวเกียร์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เคลือบเพื่อการตกแต่งอีกด้วย เช่น ไททาเนียมไนไตรด์ และ โครเมียมไนไตรด์ ถึงแม้ว่าสารชนิดดังกล่าวจะใช้ในการเคลือบแข็งก็ตาม

อย่างไรก็ตามการอาร์คในสุญญากาศนั้นทำให้เกิดอนุภาคขนาดใหญ่ หรือที่เรียกว่า macroparticle ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญของการเคลือบด้วยเทคนิคการอาร์ค เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่เหล่านี้จะทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ (devices) หรือ ชิ้นเคลือบ ดังนั้นจึงมีกลุ่มวิจัยและพัฒนาที่ได้ใช้การติดตั้งฟิลเตอร์ในแบบต่างๆ เพื่อกำจัด macroparticle ได้สำเร็จอยู่หลายกลุ่ม ซึ่งส่งเสริมการประยุกต์ใช้การอาร์คในสุญญากาศเคลือบฟิล์มบางและขยายไปสู่โรงงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (electronics) และ ฮาร์ดดิสก์ (harddisk) โดยช่วง 20 ปีที่ผ่านมา ฟิล์มบางเตตระฮีดรอล คาร์บอนแบบอสัณฐาน (tetrahedral amorphous carbon) (ta-C) ที่เคลือบด้วยการอาร์คในสุญญากาศนั้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยในอะตอมของคาร์บอนในฟิล์มบางที่เคลือบได้มีเศษส่วน sp^3 สูงถึง 87% ซึ่งทำให้มีสมบัติที่เป็นประโยชน์คือมีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างผลึกของเพชร เช่น มีความแข็งสูง มีค่า Young's modulus (young modulus) ต่ำ มีเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) และมีสภาพต้านทานทางไฟฟ้า (electrical resistivity) ต่ำ อย่างไรก็ตามยังมีสมบัติเฉพาะอีกหลายอย่างเช่น พื้นผิวมีความขรุขระน้อยมาก สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำและมีการส่งผ่านแสงในช่วงสเปกตรัมที่กว้าง ทั้งนี้เนื่องจากความสะอาดของเทคนิคการเคลือบนี้ทำให้สามารถเคลือบโลหะหลายๆชนิดเช่น Al Ti W Si Fe และ Co ได้พร้อมกันดังนั้นจึงสร้างฟิล์มสารประกอบคาร์บอนแบบอสัณฐาน (amorphous carbon composite film) ได้ นอกจากนี้กลุ่มของโลหะออกไซด์ (metal oxide) ก็เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่สำคัญมากในทางวัสดุเนื่องจากมีลักษณะใส มีเสถียรภาพทางกลและเคมีพร้อมกับมีดัชนีหักเหอยู่ในช่วงกว้าง ทำให้การเปลี่ยนแปลงสมบัติ

ทางแสงโลหะออกไซด์ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายทั้งในด้านทัศนศาสตร์ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (microelectronics) ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronics) เช่นเดียวกับการนำไปใช้ในด้านเซนเซอร์ (sensor) และการเคลือบเพื่อป้องกันผิว (protective coating)

สำหรับหลักการของเทคนิคคาโทดิกอาร์ค รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมของการอาร์คในสุญญากาศ โดยรูปที่ 2-2 (a) กระแสจะเข้ามารวมกันตรงบริเวณที่ไม่ต่อเนื่องกันบางส่วน โดยเรียกบริเวณดังกล่าวว่าจุดของการอาร์ค หรือ cathodic spot และเมื่อการอาร์คถูกกระตุ้นโดยตัวจุดเชิงกล (mechanical striker) ดังแสดงในรูปที่ 2-2(b) โดย cathodic spot เป็นตัวเพิ่มแหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอน อะตอมของโลหะและหยดขนาดไมครอนของวัสดุที่เป็นคาโทด (cathode material) ที่มีความหนาแน่นของกระแส กำลังและพลาสมาสูง การอาร์คของคาร์โทดิกอาร์คในสุญญากาศ cathodic spot ที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะเฉพาะพื้นฐานการดีสชาร์จของการอาร์คในสุญญากาศ (vacuum arc discharge) ซึ่งเคลื่อนย้ายผ่านผิวของคาโทดแบบสุ่มในบริเวณที่ไม่มีสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าจากภายนอก สำหรับค่าคงที่เวลาของ cathode spot อยู่ในช่วง sub-microsecond และส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในระดับไมครอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุและสภาพพื้นผิว



รูปที่ 2-2 ไดอะแกรมของการอาร์คในสุญญากาศ

การอาร์คพลาสมาในสุญญากาศ (vacuum arc plasma) ทำให้เกิด cathodic spot ที่ไม่อยู่นิ่งกับที่ โดยมีความหนาแน่นกระแสสูงอยู่ในระดับ 10^6 ถึง 10^8 A/cm² ทั้งนี้ความหนาแน่นกระแสสูงนั้นจะถูกรวมอยู่กับความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (power density) ที่มีค่าสูงมากในระดับ 10^{13} W/m² วัสดุที่เป็นคาโทดนั้นไอออไนซ์ (ionize) พลาสมาได้ทั้งหมด นอกจากนี้พบว่าความหนาแน่นกระแสในบริเวณใกล้กับคาโทดมีค่าสูงตั้งแต่ 10^{20} ถึง 10^{21} m⁻³ และลดลงอย่างรวดเร็วเป็น 10^{17} ถึง 10^{18} m⁻³ เมื่อห่างจากบริเวณ cathode spot ออกไป 30 cm ทั้งนี้พลาสมาขยายตัวจากบริเวณ cathode spot ไปสู่บริเวณที่เป็นสุญญากาศ ไปสู่ส่วนที่รวมตัวเป็นแหล่งกำเนิดไอออน (ion source embodiment) จนถึงระบบแยกไอออน (ion extractor) ซึ่งในส่วนการขยายตัวของพลาสมาได้ถูกศึกษาในทางทฤษฎีเกี่ยวกับ free-boundary plasma jet นอกจากนี้การสร้างพลาสมาและการเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนที่ cathode spots เป็นสิ่งสำคัญในการทำงานของการดิสชาร์จของการอาร์คในสุญญากาศ

การสร้างลำไอออนที่มีกำลังจากพลาสมาด้วยชุดของ extractor electrodes นั้นถูกศึกษาในกรณีเมื่อพลาสมาเกิดการ drift free ก็คือเมื่อความเร็วลอยเลื่อนของไอออน (ion drift velocity) มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความเร็วอะคูสติกของไอออน (ion acoustic velocity) ทั้งนี้พลาสมาเกือบทุกชนิดจะทำให้เกิดการ drift free และสร้างสภาวะให้เกิดลำไอออนได้มากกว่า อย่างไรก็ตามพลาสมาของโลหะที่เกิดจากการดิสชาร์จของการอาร์คในสุญญากาศนั้นเป็นข้อยกเว้นในกรณีนี้ เนื่องจากพลาสมาของโลหะที่เกิดตรงบริเวณ cathode spot จะขยายตัวอย่างรวดเร็วจากคาโทดไปยังบริเวณสุญญากาศรอบๆ ด้วยไอออนที่มีความเร็วอัลตราอัลตราโซนิกโดยมีค่าอยู่ในช่วง 1×10^4 ถึง 3×10^4 m/s² เมื่อเทียบกับความเร็วเสียงของไอออน (ion sound velocity) ทั้งนี้ช่วงของความเร็วไอออนจะเกี่ยวข้องกับพลังงานของไอออนซึ่งมีค่าประมาณ 18-160 eV โดยค่านี้จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นหัวคาโทดและมวลไอออน (ion mass) ของคาโทดอีกด้วย ซึ่งเป็นปัจจัยหลักเนื่องจากการ coupling ของอิเล็กตรอนกับไอออน สำหรับไอออนพลังงานสูงเป็นลักษณะของการดิสชาร์จของการอาร์คในสุญญากาศและสำคัญมากต่อสมบัติของวัสดุที่ถูกเคลือบออกมาเป็นฟิล์ม โดยการควบแน่นของอะตอมที่ตกเคลือบที่มีพลังงานสูง เพื่อให้ฟิล์มเกิดขึ้นมาได้โดยทำให้อะตอมบนพื้นผิวมี mobility มากขึ้น และเกิดการยึดเกาะจนส่งผลให้ฟิล์มคุณภาพสูงในที่สุด สำหรับปรากฏการณ์ทั้งหมดนี้เป็นแบบเดียวกันกับการเคลือบโดยใช้ลำไอออน (ion beam assisted deposition; IBAD) ทั้งนี้การควบคุมพลังงานของไอออน เช่น การไบแอสวัสดุรองรับก็มีประโยชน์ต่อลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของฟิล์มเช่นกัน

นอกจากนี้ไอออนพลังงานสูง การไอออไนซ์เข้มข้นสูงและสถานะประจุแบบ multiple ของไอออนนั้นเป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดของกระบวนการเคลือบในสุญญากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นหัวคาโทดเป็นอย่างมาก โดยปกติวัสดุที่ใช้เป็นหัวคาโทดที่อยู่ในพลาสมาจะถูกไอออไนซ์ทั้งหมดและเกิดเศษส่วนของประจุไอออนแบบ multiple มาก ทั้งนี้การกระจายตัวของสถานะประจุของไอออนมีผลมาจากสนามแม่เหล็ก กระแสทรานเซียน (current transient) หรือพลังงานที่ใส่เข้าไป ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของ arc burning voltage อีกด้วย ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของสถานะประจุ

ของไอออนในการคาโทดอาร์คพลาสมา (cathodic arc plasma) ด้วยเทคนิค time-of-flight mass spectrometry และ เทคนิค quadrupole mass spectrometry โดย Brown และคณะ ได้วัดการกระจายตัวของสถานะประจุของไอออนของธาตุซึ่งนำไปใช้เป็นคาโทดที่นำไฟฟ้ามากที่สุดทั้ง 50 ชนิดและ Ander ได้รวบรวมในรูปแบบของตารางธาตุวัสดุและสมบัติต่างๆของพลาสมา โดยทั่วไปแล้วไอออนที่ออกมาจะมีลักษณะที่เป็น multiple charge states อยู่ในช่วงตั้งแต่ $1+$ ถึง $6+$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ค่าเฉลี่ยของสถานะประจุของไอออนนั้นอยู่ระหว่าง $2+$ ถึง $3+$ และจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อวัสดุมีจุดหลอมเหลวสูง นอกจากนี้ยังพบว่าสถานะประจุของไอออนจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นโดยใช้กระแสในการอาร์คสูงถึงในช่วงกิโลแอมป์ ผลดังกล่าวเกิดขึ้นมาจากสนามแม่เหล็กของกระแสในการอาร์คเอง อย่างไรก็ตามในกรณีที่ใช้กระแสของกระบวนอาร์คในสุญญากาศต่ำซึ่งจะไม่มีผลต่อสถานะประจุของไอออน อีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้สถานะประจุของไอออนเพิ่มขึ้นคือการสร้างการอาร์คดิสชาร์จใน ion source ของการอาร์คในสุญญากาศโดยใช้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มเหมาะสม โดยทั่วไปโดยประมาณจะมีค่ามากกว่า 0.1 T และยังพบว่าการกระจายของสถานะประจุของไอออนของ vacuum arc ion source นั้นสัมพันธ์กับการให้ความต่างศักย์ในการอาร์ค นอกจากนี้การเพิ่มสถานะประจุของไอออนยังทำได้โดยเพิ่มความต่างศักย์ในการอาร์คและนำกระบวน transient มาให้เกิดประโยชน์ร่วมกับกระแสของ arc spike

ทั้งนี้ยังพบว่าโมดที่ใช้ในการทำงานของการอาร์คพลาสมาในสุญญากาศโดยทั่วไปมี 2 โมดคือ โมดต่อเนื่องและโมดที่เป็นพัลส์ ซึ่ง Sanders และ Anders ได้อธิบายรายละเอียดระหว่างโมดทั้ง 2 เพื่อใช้ในการนำไปประยุกต์ตามต้องการ โดยทั่วไปแล้วโมดต่อเนื่องหรือกระแสดร่งนั้นจะเหมาะสำหรับการเคลือบที่ต้องการอัตราเคลือบที่สูงและพื้นที่ในการเคลือบใหญ่ โดยฟิล์มบางที่ได้จะหนาซึ่งเป็นหัวใจของโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับโมดที่เป็นพัลส์นั้นอัตราการเคลือบจะต่ำเนื่องจาก small duty factor แต่มีข้อได้เปรียบในการเคลือบฟิล์มคาร์บอนและฟิล์มออกไซด์ที่มีความบางมากๆได้ นอกจากนี้ Triggering ของการอาร์คในสุญญากาศก็เป็นเรื่องหนึ่งที่น่าสนใจเช่นกัน โดยการ Trigger มีอยู่หลายประเภท เช่น แบบ manual แบบไฟฟ้า แบบ electromechanically นั้นค่อนข้างเหมือนกันเรื่องของการสร้างกระแสไฟฟ้าในกระบวนอาร์คในสุญญากาศและยังขึ้นกับตัวแปรและโมดในการทำงานของแหล่งกำเนิด ซึ่งอาจจะเป็นลำไอออนที่เกิดขึ้น gas-breakdown ที่เกิดขึ้น หรือ surface breakdown ที่เกิดขึ้น

2.3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้คือ

1. การปรับแต่งเครื่องเคลือบในสุญญากาศ กิจกรรมนี้เป็นการจัดเตรียม/ปรับแต่งเครื่องเคลือบให้พร้อมทำงานการติดตั้ง ส่วนการเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คพร้อมชุดควบคุม อย่างไรก็ตามก็ตีระหว่างดำเนินการอาจมีการปรับแต่งเครื่องเป็นระยะตามความเหมาะสม

2. การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค ขั้นนี้เป็นการออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค ซึ่งประกอบด้วย หัวอาร์คพร้อมภาคจ่ายไฟฟ้า และ ชุดควบคุมการทำงาน โดยเน้นให้เหมาะสำหรับนำมาใช้เคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติก ซึ่งรวมถึงการทดสอบและปรับแต่ง

3. การทดสอบการทำงานของแหล่งกำเนิดสารเคลือบ ขั้นนี้เป็นการทดสอบ การทำงานของแหล่งกำเนิดสารเคลือบที่สร้างขึ้น ในส่วนของความดันและกระแสไฟฟ้า รวมถึงการเคลือบฟิล์มโลหะ

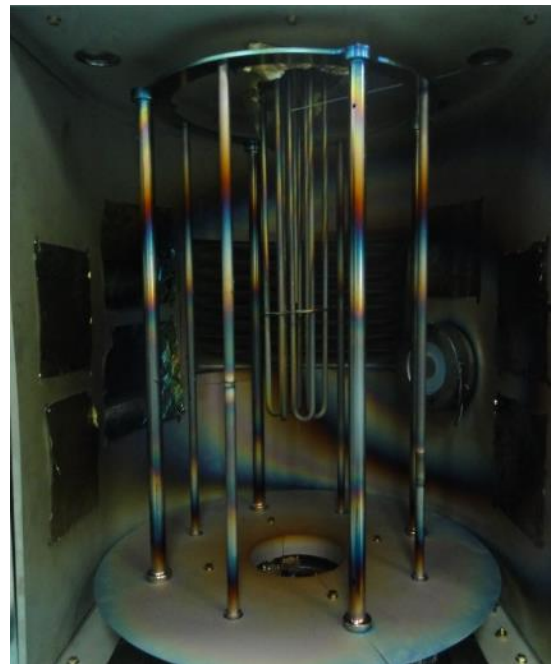
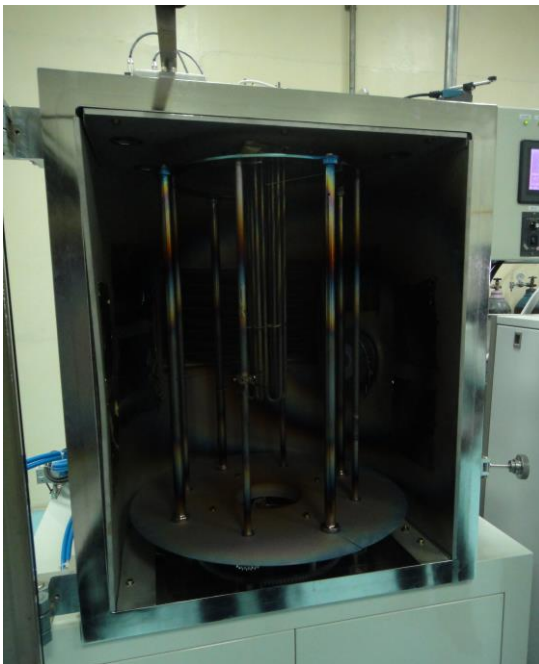
2.4 ผลและอภิปรายผล

2.4.1 การจัดเตรียม/ปรับแต่งเครื่องเคลือบในสุญญากาศ

แหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คที่สร้างในโครงการ ออกแบบและสร้างไว้สำหรับใช้กับเครื่องเคลือบของ บริษัท ออฟเท็ค จำกัด (รูปที่ 2-3) โดยในระหว่างการสร้างและทดสอบ คณะผู้วิจัยได้ใช้ระบบสุญญากาศที่ซึ่งสร้างโดย ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย (รูปที่ 2-4) ในการทดสอบการทำงานทั้งหมด



(a)

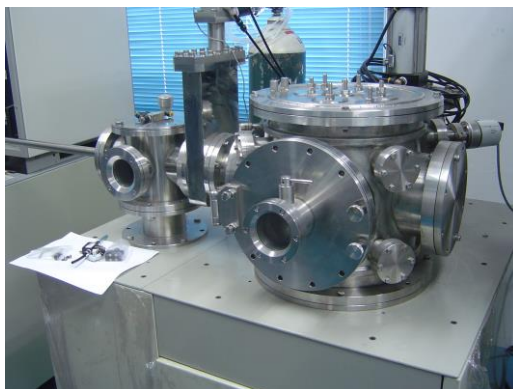
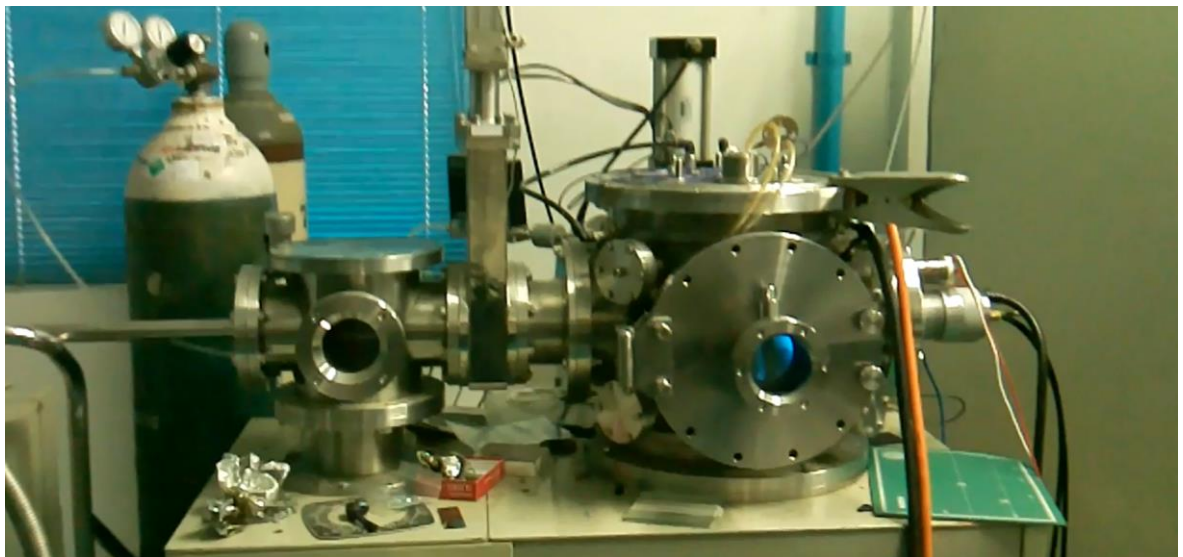
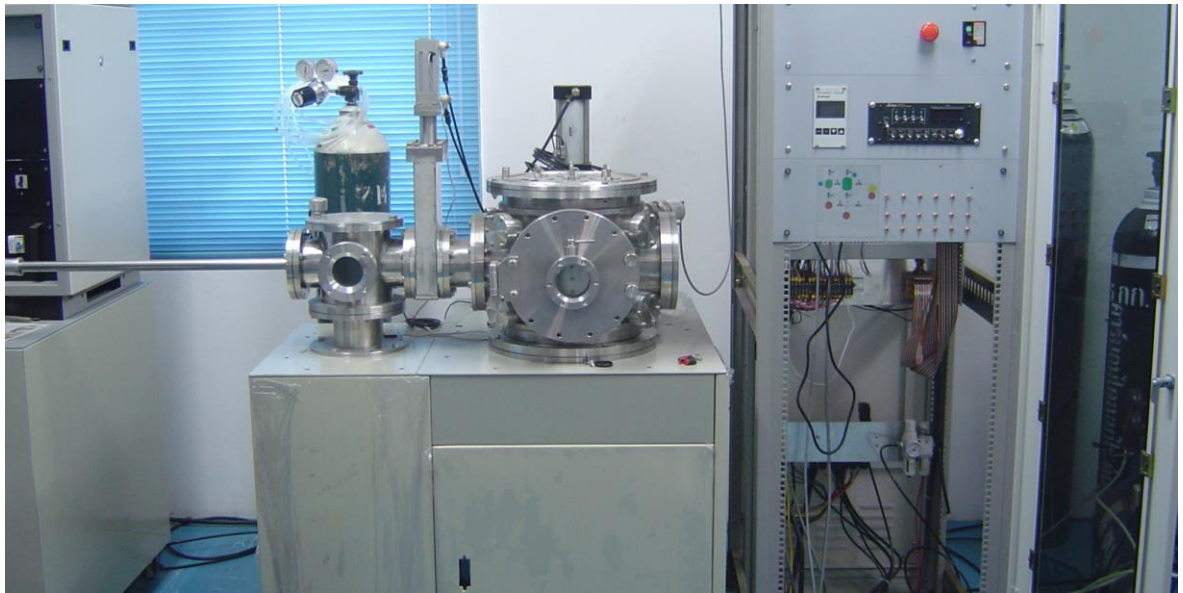


(b)

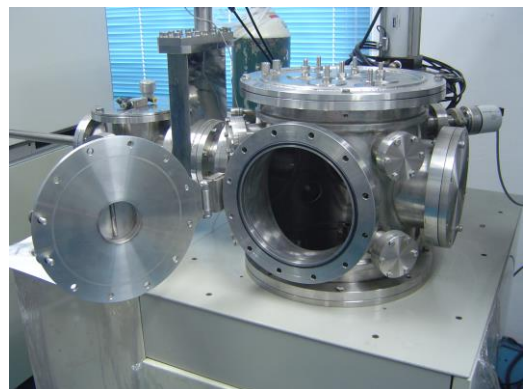
รูปที่ 2-3 เครื่องเคลือบของ บริษัท ออฟเท็ค จำกัด ที่ใช้ในโครงการ

(a) ลักษณะของห้องเคลือบและชุดควบคุม

(b) ภายในห้องเคลือบ แสดงแท่นจับชิ้นงานและชุดให้ความร้อน



(e)

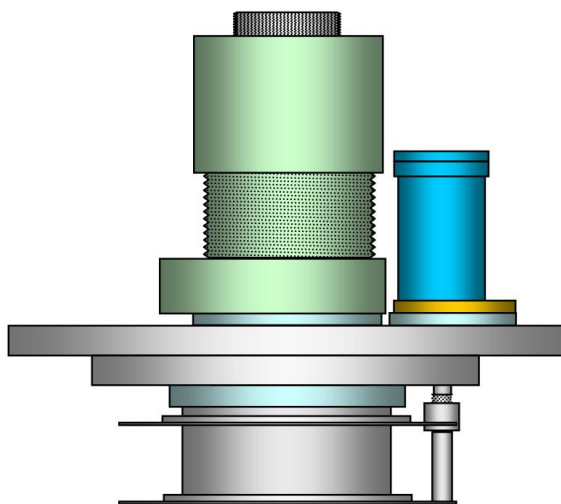


(f)

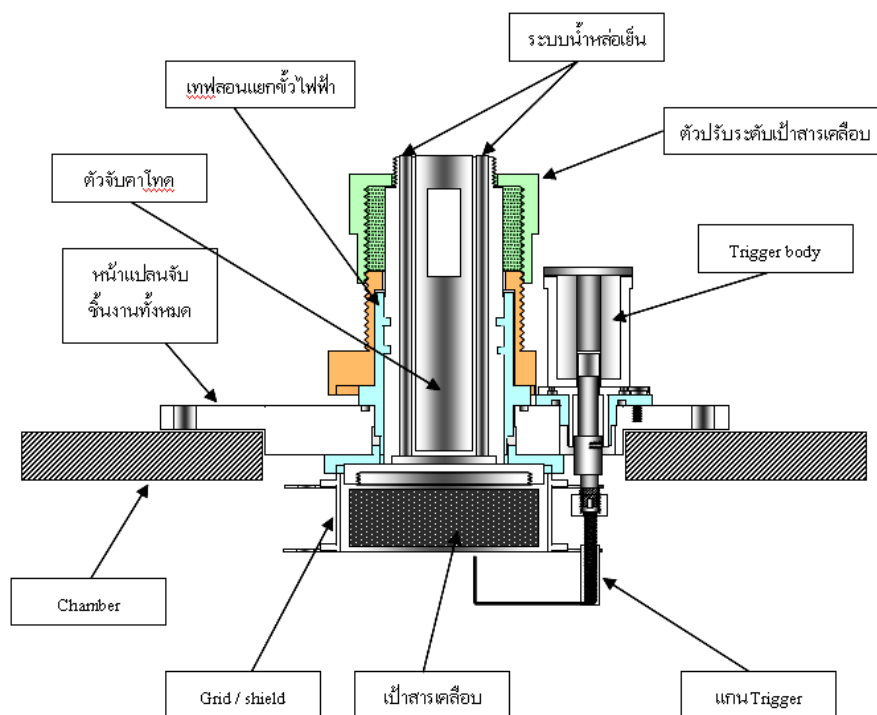
รูปที่ 2-4 ระบบสุญญากาศที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของแหล่งกำเนิดสารเคลือบที่สร้างในโครงการ

2.4.2 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค

1. แนวคิดในการออกแบบและหลักการทำงาน แหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คที่สร้างขึ้น ประกอบด้วยชุดคาโทดิกอาร์ค พร้อมวงจรควบคุม และภาคจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (ลักษณะและรายละเอียดแสดงในรูปที่ 2-5) โดยคาโทดิกอาร์คที่สร้างขึ้นใช้สแตนเลสเป็นวัสดุหลัก ด้านหลังของเป้าสารเคลือบติดแม่เหล็กสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน การจุดการอาร์คใช้แท่งทั้งสแตนซึ่งต่อกับวงจรควบคุมชุดจุดการอาร์ค (trigger) (รูปที่ 2-5 - รูปที่ 2-6)



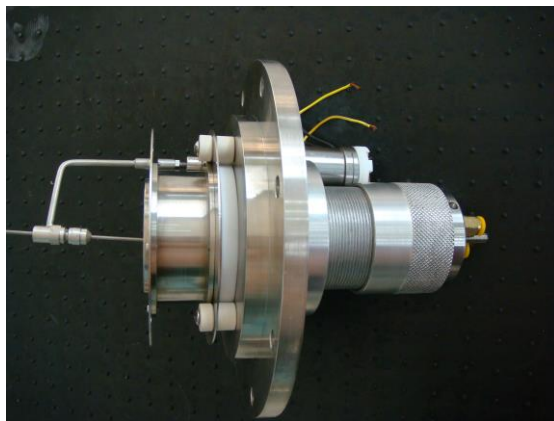
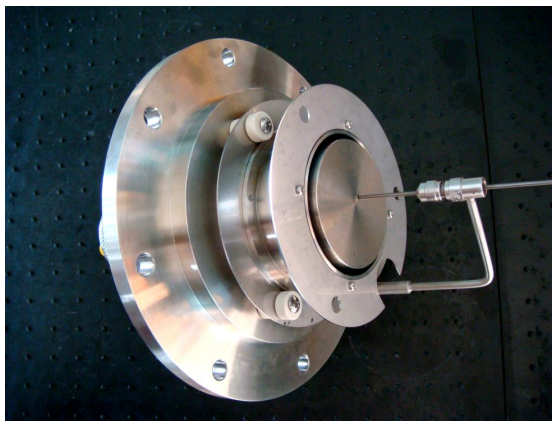
รูปที่ 2-5 ลักษณะภายนอกของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คที่ออกแบบ



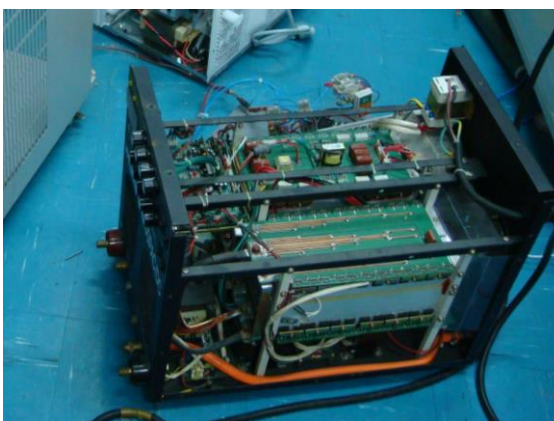
รูปที่ 2-6 ลักษณะและรายละเอียดของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คที่ออกแบบ

2. การสร้างหัวคาโทดิกอาร์ค โครงการได้สร้างส่วนประกอบและชิ้นส่วนต่างๆ ของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค (ชุดคาโทดิกอาร์ค) ตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คสร้างขึ้นในโครงการมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วนได้แก่ ชุดคาโทดิกอาร์ค ระบบน้ำหล่อเย็น และ ภาชนะจ่ายไฟฟ้าแรงสูง โดยชุดคาโทดิกอาร์ค (รูปที่ 2-7) ทำหน้าที่ในการสร้างสารเคลือบจากสารเคลือบตั้งต้นที่อยู่ในสถานะของแข็ง (Solid) ให้อยู่ในสถานะไอ (Vapor) จากกระบวนการอาร์คแล้วไอของสารเคลือบที่เกิดขึ้นจะฟุ้งกระจายไปทั่วห้องเคลือบ โดยไอของสารเคลือบซึ่งมีพลังงานที่เกิดขึ้นนี้มีบางส่วนที่ฟุ้งกระจายไปสัมผัสและควบแน่น (Condense) และเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นของแข็ง ซึ่งฟอร์มตัวเป็นชั้นบาง ๆ ของสารเคลือบในลักษณะของฟิล์มบางบนผิวหน้าของวัสดุรองรับ ชุดคาโทดิกอาร์คที่สร้างขึ้นนี้ทำจากสแตนเลส มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ออกแบบไว้สำหรับติดตั้งเป่าสารเคลือบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 76 mm ทั้งนี้ในระหว่างการทำงาน (การอาร์คให้สารเคลือบกลายเป็นไอ) จะเกิดความร้อนที่ผิวหน้าของเป่าสารเคลือบ ดังนั้นเพื่อป้องกันการหลอมละลายของเป่าสารเคลือบจึงต้องมีระบบระบายความร้อนแก่ชุดคาโทดิกอาร์ค โดยออกแบบให้ชุดคาโทดิกอาร์คในงานวิจัยระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นจากระบบน้ำหล่อเย็น (รูปที่ 2-8) นอกจากนี้เพื่อให้การเคลื่อนที่ ของอิเล็กตรอนจากขั้วทั้งสแตนของชุดจุดการอาร์ค (Trigger) มีการเคลื่อนที่ไปโดยรอบทั่วผิวหน้าของ เป่าสารเคลือบ ผู้วิจัยได้ติดตั้งแม่เหล็กชนิด NdFeB สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ในส่วนของการจุดการอาร์คของชุดคาโทดิกอาร์คจะใช้แท่งทั้งสแตนซึ่งต่อกับวงจรควบคุมชุดจุดการอาร์ค ซึ่งต่ออยู่กับภาชนะจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (รูปที่ 2-9)

สำหรับแนวคิด/หลักการการทำงานของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คอธิบายได้ดังนี้ เมื่อห้องเคลือบลดความดันอยู่ในระดับที่ต้องการแล้ว การทำงานของแหล่งกำเนิดสารเคลือบเริ่มเมื่อ วงจรควบคุมการจุดการอาร์ค (Arc Igniter Control) ทำให้ trigger เลื่อนไปแตะหน้าเป่าสารเคลือบเป็นเวลาประมาณ 0.3 วินาที จากนั้น trigger จะเลื่อนออกจากหน้าเป่า (ความต่างศักย์และกระแส มีค่าประมาณ 70 V , 25 A ตามลำดับ) ขณะนั้นจะมีอิเล็กตรอนจาก trigger หรือ เคลื่อนที่จากปลายแท่ง trigger ซึ่งทำจากทั้งสแตนไปยังเป่าสารเคลือบแล้วทำให้เกิดการอาร์ค โดยลักษณะหรือ ทิศทางการไหล หรือ เคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากปลายแท่ง trigger จะไม่มีทิศทางที่แน่นอน แต่มีลักษณะเคลื่อนที่วนไปรอบๆ หน้าเป่าสารเคลือบตามอำนาจของสนามแม่เหล็กที่ติดตั้งอยู่ด้านหลังของเป่าสารเคลือบ สารเคลือบที่หลุดออกจากหน้าเป่าสารเคลือบจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนจากปลายแท่ง trigger ไปเคลื่อนที่ไปสัมผัส โดยจุดที่อิเล็กตรอนสัมผัสจะเกิดความร้อนในระดับที่ทำให้เป่าสารเคลือบระเหยแล้วหลุดออกมาในรูปของไอสารเคลือบ ซึ่งฟุ้งกระจายไปทั่วทั้งห้องเคลือบ



รูปที่ 2-7 ลักษณะของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คที่ออกแบบและสร้าง



รูปที่ 2-8 ภาคว่างไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค

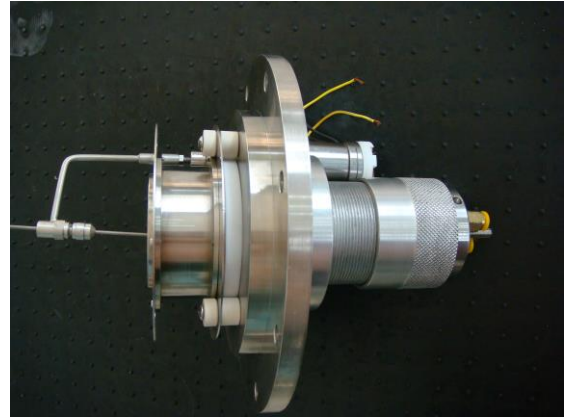
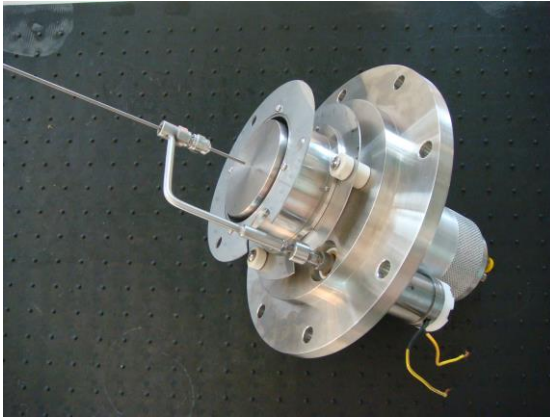


รูปที่ 2-9 ระบบน้ำหล่อเย็นของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค

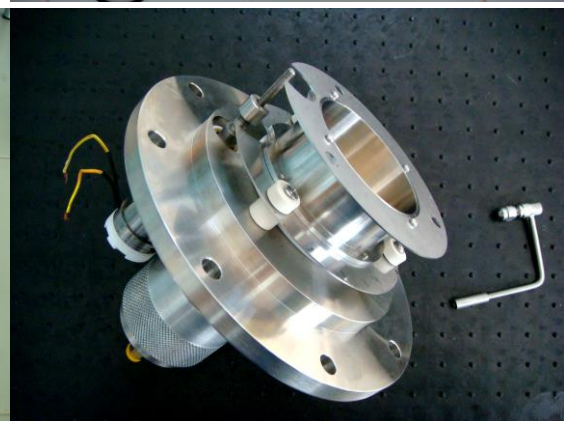
รูปที่ 2-16 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่เคลือบ และ แหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คที่ติดตั้งอยู่ในห้องเคลือบ ส่วนรูปที่ 2-17 แสดงการทำงาน/เปรียบเทียบลักษณะของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คก่อนและหลังใช้งาน ส่วนรูปที่ 2-18 แสดงลักษณะการอาร์คของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คขณะทำงาน



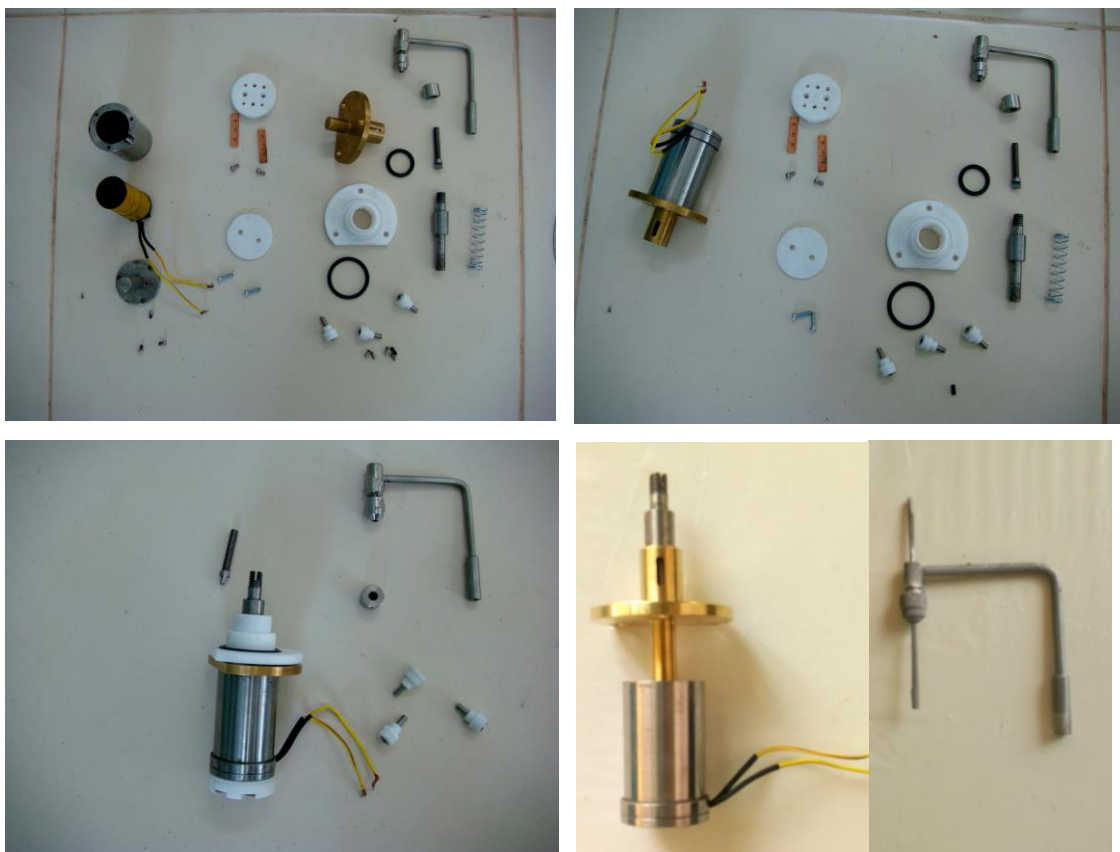
20



รูปที่ 2-11 ลักษณะของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คเมื่อประกอบแล้ว



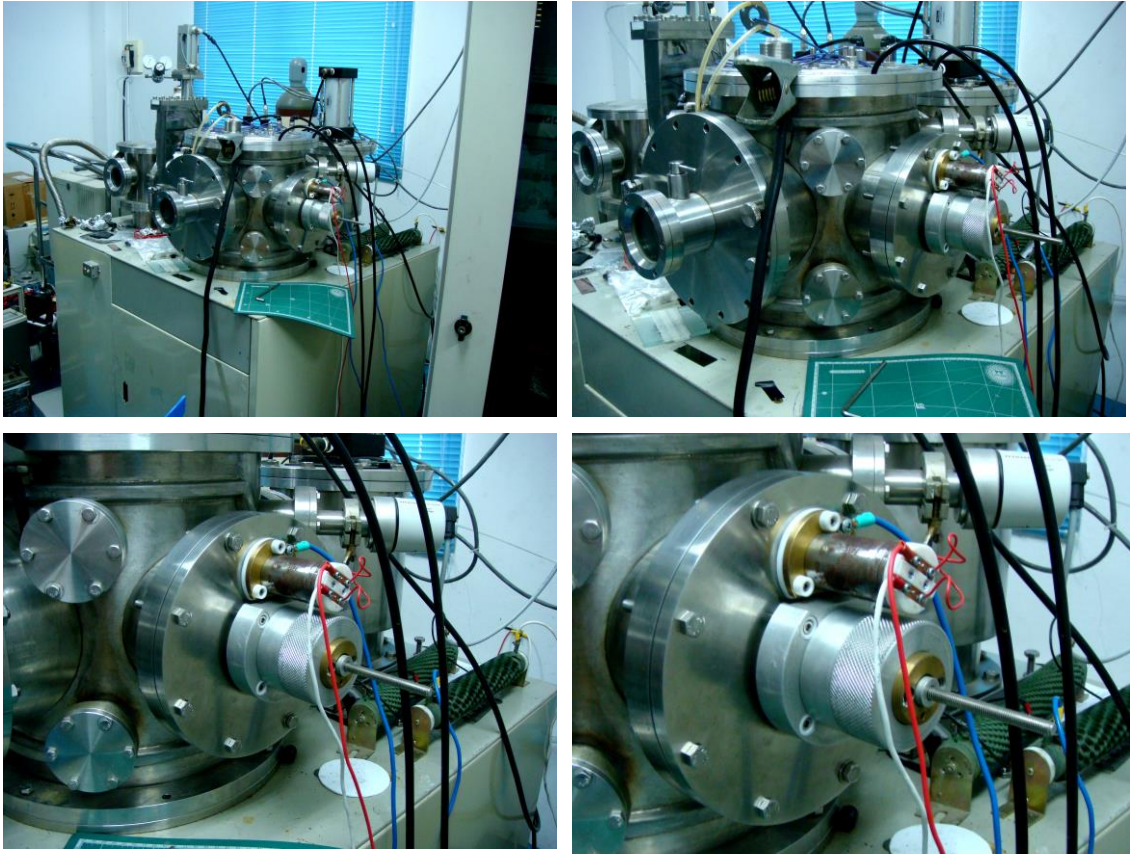
รูปที่ 2-12 ส่วนประกอบและลักษณะของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค



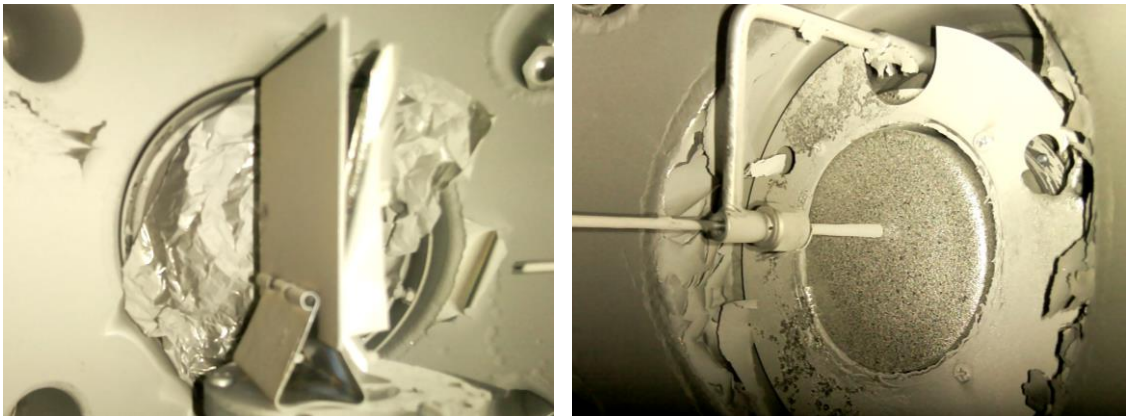
รูปที่ 2-13 ส่วนประกอบและลักษณะของ trigger สำหรับเริ่มการอาร์ค
ของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค



รูปที่ 2-14 ลักษณะสารเคลือบของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค



รูปที่ 2-15 การติดตั้งแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คเข้ากับห้องเคลือบ



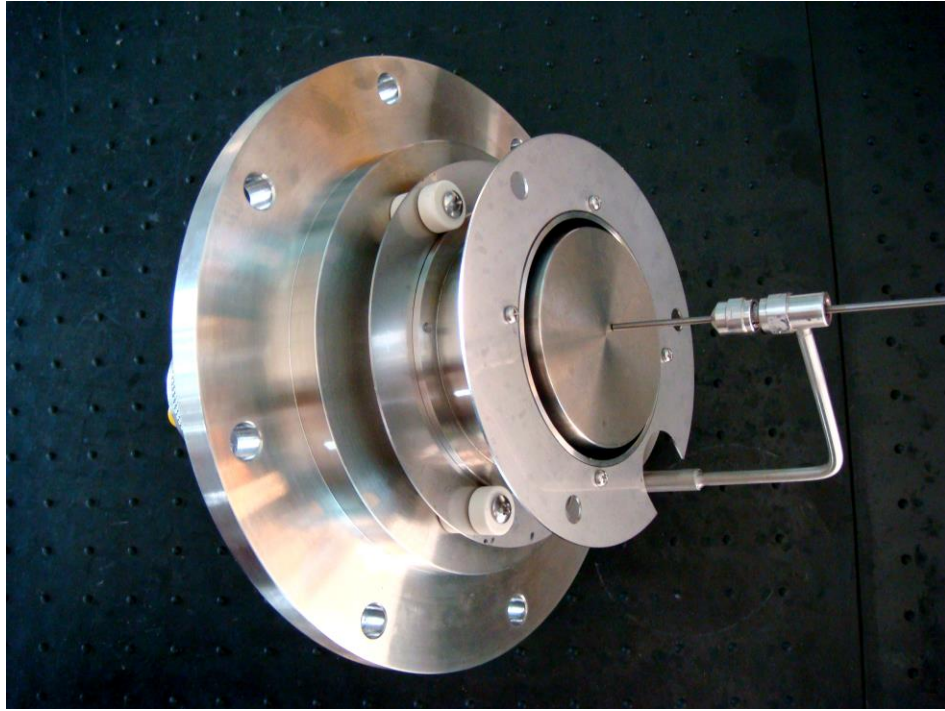
(a)

(b)

รูปที่ 2-16 ลักษณะของชิ้นงานที่เคลือบและแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คที่ติดตั้งอยู่ในห้องเคลือบ

(a) ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเคลือบ พบว่ามีฟิล์มติดทั่วชิ้นงาน

(b) ลักษณะของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คที่ติดตั้งในห้องเคลือบ



(a)

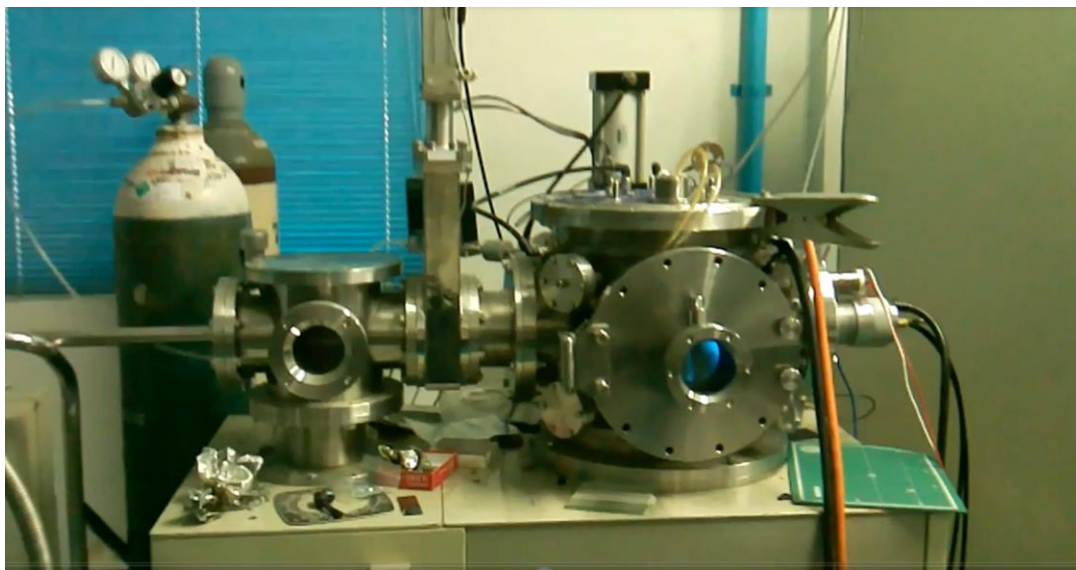


(b)

รูปที่ 2-17 เปรียบเทียบลักษณะของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค

(a) ก่อนใช้งาน

(b) หลังใช้งาน



รูปที่ 2-18 การอาร์คของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คขณะทำงาน

2.4.3 การทดสอบการทำงานของแหล่งกำเนิดสารเคลือบ

เมื่อนำแหล่งกำเนิดสารเคลือบมาทดสอบการทำงาน ใน 3 ประเด็นคือ ความดันขณะอาร์ค กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอาร์ค และการทดลองเคลือบฟิล์ม

1. ผลของความดันต่อการอาร์ค มีผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 2-1 โดยพบว่าเมื่อใช้ความดันต่ำมากน้อยกว่า 5×10^{-5} mbar ไม่สามารถอาร์คได้เพราะปริมาณแก๊สคงค้างในระบบต่ำเกินไป เมื่อเพิ่มความดันในภาชนะสุญญากาศให้สูงขึ้น ในช่วง 5×10^{-5} - 5×10^{-4} mbar พบว่าแหล่งกำเนิดสารเคลือบที่สร้างขึ้นสามารถอาร์คได้เป็นช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 1-15 วินาที สุดท้ายเมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้นในช่วง 5×10^{-4} - 1×10^{-3} mbar พบว่าแหล่งกำเนิดสารเคลือบสามารถอาร์คได้นานมากกว่า 5 นาที (รูปที่ 2-19)

2. ผลของกระแสต่อการอาร์คพบว่า มีผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 2-2 โดยพบว่าเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ (50-60 Amp) เกิดการอาร์คในช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 5-10 วินาที และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ใช้เป็น 70-80 Amp พบว่าเกิดการอาร์คได้นานขึ้น ประมาณ 15-30 วินาที สุดท้ายเมื่อเพิ่มกระแสเป็น 90 Amp พบว่าสามารถอาร์คได้อย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 2-19)

ตารางที่ 2-1 ผลของความดันต่อการอาร์คของแหล่งกำเนิดสารเคลือบ

ความดัน (mbar)	สถานะการอาร์ค
$< 5 \times 10^{-5}$	ติดได้ช่วงเวลาสั้นๆ
5×10^{-5} - 5×10^{-4}	ติดได้ประมาณ 15 วินาทีและดับเป็นบางครั้ง
1×10^{-4} - 5×10^{-4}	ติดได้ประมาณ 1-3 นาทีและดับเป็นบางครั้ง
5×10^{-4} - 1×10^{-3}	ติดได้ต่อเนื่องนานกว่า 5 นาที

ตารางที่ 2-2 ผลของความดันต่อการอาร์คของแหล่งกำเนิดสารเคลือบ

กระแส (Amp)	สถานะการอาร์ค
50	อาร์ค และ แต่ติดได้ช่วงเวลาสั้นๆ
60	อาร์ค และติดได้ประมาณ 10 วินาที
70	ติดได้ประมาณ 15 วินาที
80	ติดได้ต่อเนื่องนานกว่า 30 วินาที
90	ติดได้ต่อเนื่อง



รูปที่ 2-19 ลักษณะการวางวัสดุรองรับและตำแหน่งของ Arc Spot ที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าเป้าสารเคลือบ ที่เคลื่อนที่ไปรอบๆ หน้าเป้าสารเคลือบ เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ติดตั้งไว้หลังเป้าสารเคลือบ

3. ผลของการทดลองเคลือบฟิล์ม พบว่าแหล่งกำเนิดสารเคลือบสามารถเคลือบฟิล์มได้ตาม วัตถุประสงค์ ดังแสดงในรูปที่ 2-20 สารเคลือบ (อะลูมิเนียม) มีการกระจายตัวดี สีของชั้นเคลือบมีลักษณะ เป็นสีอะลูมิเนียมขาวสว่าง แต่ไม่สะท้อนแสง ส่วนหนึ่งเนื่องจากสารเคลือบที่ได้จากเทคนิคคาโทดิกอาร์คมี ลักษณะค่อนข้างใหญ่กว่าวิธีสปีตเตอริงทำให้ฟิล์มที่ได้สะท้อนแสงน้อย ทั้งนี้เมื่อทดสอบการยึดติดของฟิล์ม โดยการเช็ดดูพบว่าฟิล์มมีการหลุดลอกตามแรงที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2-21) ส่วนหนึ่งเนื่องจากฟิล์มที่เคลือบได้มี ความหนาทำให้เกิดความเครียดในเนื้อฟิล์ม เมื่อเช็ดดูจึงหลุดลอก แต่ในการใช้งานจริง จะไม่เคลือบ หนาเช่นนี้



รูปที่ 2-20 ลักษณะของกระจกสไลด์และกระจกแผ่นเรียบที่ใช้ทดสอบการเคลือบเบื้องต้น
ของแหล่งกำเนิดสารเคลือบที่สร้างขึ้น



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 2-21 ลักษณะฟิล์มที่เคลือบได้บนกระจกแผ่นเรียบที่ใช้ทดสอบการเคลือบ

(a) ฟิล์มที่เคลือบได้

(b) เมื่อทดสอบการยึดติดโดยการขีดถู ฟิล์มมีการหลุดลอกบางส่วน

(c) ฟิล์มมีการหลุดลอกเกือบหมดเมื่อถูด้วยแรงที่มากขึ้น

2.5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

2.5.1 สรุปผล

โครงการวิจัยนี้สามารถสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คได้ตามวัตถุประสงค์ ทั้งนี้พารามิเตอร์สำคัญของการอาร์คคือความดันในห้องเคลือบและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ โดยความดันภายในห้องเคลือบที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 5×10^{-4} - 1×10^{-3} mbar และกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 90 Amp สำหรับผลการทดสอบการเคลือบพบว่าแหล่งกำเนิดสารเคลือบที่สร้างขึ้นสามารถเตรียมชั้นเคลือบของอะลูมิเนียมได้ แต่การยึดติดยังไม่ดีนัก

2.5.2 ข้อเสนอแนะ

1. แหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คที่สร้างขึ้นยังมีอนุภาคขนาดใหญ่ (macro particle) จำนวนมากซึ่งทำให้ชั้นเคลือบที่ได้มีลักษณะไม่เนียน ควรมีการสร้างระบบกรอง (filter) สำหรับการกรองอนุภาคขนาดใหญ่ออก ให้เหลือเพียงขนาดของอนุภาคที่ต้องการเท่านั้น
2. ปัญหาอย่างหนึ่งของการอาร์คคือไม่สามารถเกิดการอาร์คได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้ต้องมีการกระตุ้นการอาร์คเป็นระยะๆ ส่วนนี้ควรมีการวิจัยเกี่ยวกับการกระตุ้นการอาร์คแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะช่วยให้สามารถสร้างสารเคลือบออกมาได้ตลอดเวลา
3. การทำงานของแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คจะทำให้เกิดความร้อนสูงจึงต้องมีระบบระบายความร้อนอย่างดี ดังนั้นควรมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับระบบความร้อนของอุปกรณ์ส่วนนี้
4. ชั้นเคลือบที่ได้ในงานวิจัยนี้ยังมีการยึดติดไม่ดีนัก ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากการเตรียมชิ้นงานหรือ พารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาในส่วนของการเตรียมชิ้นงานในลักษณะต่างๆ และผลของพารามิเตอร์การเคลือบต่อโครงสร้างและสมบัติของฟิล์ม
5. การใช้งานจริงส่วนใหญ่ชิ้นงานอาจมีลักษณะหรือรูปร่างในแบบต่างๆ ซึ่งเป็นรูปทรง 3 มิติ ดังนั้นจึงควรมีการปรับหรือพัฒนาอุปกรณ์จับชิ้นส่วนตลอดจนเทคนิคการเคลือบ เพื่อให้สามารถเคลือบชิ้นงานที่มีทรงกระบอกให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน

2.6 เอกสารอ้างอิง

- พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ. (2547). การวิจัยและพัฒนาการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีสปีดเตอริงตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2. รายงานการวิจัยประจำปี 2547. ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยร่วมกับสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (หน้า 163-166). กรุงเทพฯ: ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุรสิงห์ ไชยคุณ, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สกฤต ศรีญาณลักษณ์ และจักรพันธ์ ถาวรธิดา. (2540). การพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอริง. รายงานการวิจัยประจำปี 2540. ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Bunshah, R. F. (1994). *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings* (2nd ed.). New Jersey: Noyes.
- Chapman, B. (1980). *Glow Discharge Processes*. New York: John Wiley & Sons.
- Mattox, D.M. (1997). *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, New Jersey, Noyes Publications, 917 p.
- Munz, W. D. (1991). The Unbalanced Magnetron : Current Status of Development. *Surface and Coatings Technology*, 48, 81-94.
- Ohring, M. (2002). *Materials Science of Thin Films Deposition and Structure*. 2nd ed., New York, Academic Press, 794 p.
- Rickerby, D. S., & Matthews, I. (1991). *Advanced Surface Coating: a Handbook of Surface Engineering*. New York: Chapman and Hall.
- Rohde, S. L., & Munz, W. D. (1991). *Sputter Deposition in Advanced Surface Coatings: A Handbook of Surface Engineering*. New York: Chapman and Hall.
- Smith, D. L. (1995). *Thin-Film Deposition : Principle And Practice*. New York: McGraw-Hill.
- Sproul, W. D. (1992). Unbalanced Magnetron Sputtering. 35th Annual Technical Conference Proceedings. *Society of Vacuum Coaters*, 236-239.
- Vossen, J. L., & Kerns, W. (1978). *Thin Films Processes*. New York: Academic Press.
- Wasa, K., & Hayakawa, S. (1992). *Handbook of sputter deposition technology: principles technology and applications*. New Jersey: Noyes.

บทที่ 3

โครงการวิจัยย่อยที่ 2

การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสปีดเทอริง

บทสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)

โครงการวิจัยเรื่อง “การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสปีดเทอริง” เป็นโครงการวิจัยย่อยที่ 2 ในแผนงานวิจัย เรื่อง “การวิจัยและพัฒนาขั้นเคลือบโลหะบนพลาสติกโดยการเคลือบด้วยไอกายภาพ” ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ ชุดโครงการวิจัยด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเพื่อวิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 สัญญาเลขที่ RDG5750044 ผลการศึกษาพบว่าผิวของชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบางโลหะด้วยเทคนิคสปีดเทอริงจะยังคงมีริ้วรอยของผิวเดิมก่อนเคลือบ เนื่องจากฟิล์มโลหะที่เคลือบด้วยเทคนิคสปีดเทอริงมีลักษณะเป็นการสะสมเรียงตัวและพอกพูนเป็นชั้นของสารเคลือบในระดับอะตอมทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีความหนาน้อยมากในระดับนาโนเมตรจึงไม่เป็นการสร้างผิวใหม่ปิดทับรอยขีดข่วน นอกจากนี้การปรับผิวของวัสดุรองรับก่อนเคลือบก็มีผลต่อลักษณะปรากฏของชิ้นงานโดยการปรับผิวแบบมันหลังเคลือบจะมีการสะท้อนแสงดีส่วนการปรับผิวแบบด้านการสะท้อนแสงไม่ดี นอกจากนี้การปรับผิวยังช่วยปิดรอยขีดข่วนของชิ้นงานก่อนเคลือบอีกด้วย ทั้งนี้ควรมีการศึกษาผลของการปรับผิวก่อนเคลือบเพิ่มเติม และควรมีการทดลองเคลือบชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ เช่น ชิ้นงานที่มีรูปร่าง 3 มิติ หรือ มีขนาดใหญ่ สำหรับผลลัพธ์จากของโครงการวิจัยย่อยที่ 2 มีดังนี้คือ

1. บทความวิจัยเรื่อง “การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสปีดเทอริง” เสนอในการประชุมวิชาการ “ราชภัฏหมู่บ้านจอมบึงวิจัย ครั้งที่ 4 : สร้างองค์ความรู้ สู่การพัฒนา นำพาสังคม”, 1 มีค 59, สถาบันวิจัยและพัฒนา, มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง จ.ราชบุรี

2. การผลิตบุคลากร :นิสิต ปริญญาโท วท.ม.(ฟิสิกส์) 1 คน คือ

ชื่อ-นามสกุล นายทศพล ศรีเจริญ

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของพารามิเตอร์การเคลือบต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโครเมียม
เซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟโคสปีดเทอริง

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์

3. การบริการวิชาการ/ถ่ายทอดเทคโนโลยี/ความเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรม

การให้ความอนุเคราะห์ผู้สนใจ เข้าเยี่ยมชมกิจกรรมของโครงการวิจัยฯ จำนวน 3 ครั้ง

การเข้าร่วมจัดนิทรรศการแสดงผลงานวิจัย จำนวน 3 ครั้ง

การเป็นวิทยากรบรรยายเผยแพร่ความรู้จากงานวิจัย จำนวน 2 ครั้ง

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางโลหะ (ไทเทเนียม และ อะลูมิเนียม) ถูกเคลือบบนผิวหน้าของแผ่นพลาสติกชนิด ABS ด้วยเทคนิคสเปตเตอริงเพื่อให้ผิวหน้ามีลักษณะปรากฏเหมือนโลหะสำหรับใช้ในงานด้านการเคลือบสวยงาม ทั้งนี้การฟอร์มตัวของฟิล์มบางโลหะจากเทคนิคสเปตเตอริงมีลักษณะเป็นการสะสมเรียงตัวและพอกพูนเป็นชั้นของสารเคลือบในระดับอะตอมทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีความหนาน้อยมากในระดับนาโนเมตร อีกทั้งฟิล์มที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นการวางตัวไปบนผิวหน้าวัสดุรองรับไม่ใช่การสร้างชั้นสารเคลือบใหม่ที่หนามากขึ้นมาปกปิดผิวของวัสดุรองรับทั้งหมด ทำให้ผิวหน้าของวัสดุรองรับยังคงแสดงลักษณะเดิมของผิววัสดุก่อนเคลือบ หากผิวหน้าของวัสดุรองรับมีลักษณะไม่เรียบหรือมีรอย หลังการเคลือบผิวหน้าของวัสดุรองรับก็ยังคงแสดงลักษณะไม่เรียบหรือมีรอยเช่นเดิม เมื่อทดลองปรับผิววัสดุรองรับก่อนเคลือบ แบบมันและแบบด้าน พบว่าหลังการเคลือบฟิล์มบางโลหะวัสดุรองรับไม่แสดงริ้วรอยการขีดข่วนของผิวเดิมก่อนการเคลือบ ชิ้นงานที่ปรับผิวแบบมันมีการสะท้อนแสงดีตามลักษณะของฟิล์มบางโลหะที่เคลือบ ส่วนชิ้นงานที่ปรับผิวแบบด้านมีการสะท้อนแสงไม่ดี

Abstract

Metal thin films (titanium and aluminium) were deposited on surface of ABS plastics type by sputtering technique to appearance like metal for decorative coating. The formation characteristic of metal thin films were deposited, arranged and accumulated to form deposited material layer in the atomic scale resulting very thin film with thickness in nanometer scale. Moreover, the occurred films characteristic were laid on surface of substrate which wasn't created a new very thick deposited material layer to cover surface of substrate resulting surface of substrate still showed raw characteristics of substrate before deposition. If surface of substrate were roughed or scratched, the coatings were also still roughed or scratched patterns. When pretreatment substrates before deposited with gloss and matted types, after deposited metal thin films, the substrates did not exhibited the scratch pattern of raw surface before deposition. The good reflection like a characteristics of metal thin films were investigated for gloss treatment, whereas poor reflection was founded for matted treatment.

3.1 บทนำ

3.1.1 ความสำคัญและที่มา

การปรับปรุงผิววัสดุเพื่อความสวยงามเป็นวิธีการหนึ่งที่สำคัญสำหรับการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าประเภทต่างๆ โดยวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ คือ การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) แต่พบว่าวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้ามีข้อเสียสำคัญ 2 ประการ คือ (1) สารเคลือบหลุดลอกจากผิวของวัสดุได้ง่าย และ (2) มีสารละลายเคมีเหลือใช้หลังกระบวนการเคลือบจำนวนมากโดยสารละลายเคมีเหล่านี้มีส่วนประกอบของโลหะหนักดังนั้นเมื่อถูกทิ้งลงในแหล่งน้ำจะก่อให้เกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อมขึ้นทำให้มีการพัฒนาการเคลือบใหม่ขึ้นมาใช้ทดแทนคือ การเคลือบด้วยไอกายภาพ (Physical Vapor Deposition ; PVD)

การเคลือบด้วยไอกายภาพ มีข้อได้เปรียบการเคลือบด้วยไฟฟ้าหลายด้าน กล่าวคือเป็นกระบวนการที่ให้ชั้นเคลือบที่มีคุณภาพสูง มีการยึดติดดี นอกจากนี้กระบวนการเคลือบเกิดขึ้นเฉพาะในสุญญากาศเท่านั้น ที่สำคัญไม่ใช้สารละลายเคมีในกระบวนการเคลือบ ทำให้การเคลือบในสุญญากาศได้รับการยอมรับว่าเป็นกระบวนการเคลือบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (environmental friendly processes) การเคลือบในสุญญากาศยังแบ่งเป็นวิธีการย่อยๆ ได้อีกหลายวิธี เช่น วิธีสปัตเตอริง วิธีระเหยสาร วิธีอาร์ค วิธีเพลทด้วยไอออน ฯลฯ ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกันอีกทั้งยังเหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่แตกต่างกันอีกด้วย อย่างไรก็ตามการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นวิธีที่น่าสนใจเพราะสามารถคุมตัวแปรในกระบวนการเคลือบซึ่งมีผลต่อสมบัติของชั้นเคลือบที่ได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถขยายผลสู่ระดับอุตสาหกรรมได้อย่างไม่ยุ่งยากอีกด้วย

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมที่ต้องใช้การเคลือบในกระบวนการผลิตเริ่มสนใจการเคลือบด้วยไอกายภาพ เป็นอย่างมาก เช่น การเคลือบแข็ง (hard coating) เพื่อให้ผิววัสดุมีความแข็งทนการขีดข่วนหรือ การเคลือบสวยงาม (decorative coating) เพื่อให้ผิววัสดุมีสีสันท่างๆ ที่สวยงาม แต่การเคลือบด้วยไอกายภาพ สำหรับอุตสาหกรรมในประเทศไทยยังมีข้อจำกัดหลายด้าน ที่สำคัญ คือ ด้านความพร้อมของบุคลากรที่มีความรู้ความเข้าใจ และ know how ต่างๆ ที่จำเป็นและเกี่ยวข้อง ทำให้ภาคอุตสาหกรรมที่สนใจใช้เทคนิคนี้ส่วนใหญ่ต้องนำเข้าเทคโนโลยีนี้จากต่างประเทศเกือบทั้งหมด

ทั้งนี้จากการสำรวจเบื้องต้นของคณะผู้วิจัยเกี่ยวกับการใช้ การเคลือบด้วยไอกายภาพ สำหรับอุตสาหกรรมในประเทศ พบว่าปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีด้านการเคลือบด้วยไอกายภาพ จากต่างประเทศ เข้ามาใช้ภายในประเทศมากขึ้นตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ในกลุ่มพลาสติก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาสามารถขึ้นรูปให้มีลักษณะและรูปทรงต่างๆ ได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือผิวหน้าของพลาสติกอ่อนนุ่มทำให้เกิดการขีดข่วนได้ง่าย อีกทั้งยังไม่ทนต่อสารเคมี ที่สำคัญสีของพลาสติกค่อนข้างจำกัด ทำให้จำเป็นต้องมีการเคลือบผิวพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงผิวทั้งเพื่อให้ทนการขีดข่วน รวมถึงทำให้มีสีที่หลากหลายอีกด้วย ปัจจุบันกลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกมีการนำชิ้นงานที่มีรูปทรงต่างๆ ไปเคลือบด้วยชั้นเคลือบโลหะให้ผิวของชิ้นงานมีลักษณะมันเงาล้ำลายโลหะ ซึ่งนิยมใช้วิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า แต่

วิธีนี้มีข้อเสียคือ ชั้นเคลือบหลุดลอกง่าย อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่ใช้สารละลายเคมีในกระบวนการเคลือบ ซึ่งสุดท้ายก็มีสารละลายเคมีหลังการใช้จำนวนมากที่ทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมในประเทศมีความพยายามเปลี่ยนมาใช้กระบวนการเคลือบด้วยไอกายภาพ เพื่อทดแทนการเคลือบด้วยไฟฟ้าที่มีปัญหาดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเคลือบด้วยวิธีสปีดเทอริง ซึ่งเป็นหนึ่งในหลายวิธีของเทคนิคการเคลือบด้วยไอกายภาพเนื่องจากมีข้อดีหลายอย่าง เช่น ชิ้นงานไม่จำเป็นต้องนำไฟฟ้า ไม่ต้องใช้ความร้อนในกระบวนการเคลือบ

ทั้งนี้ บริษัท ออฟเท็ค จำกัด เป็นบริษัทในกลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกที่ผลิตสินค้าจากพลาสติกชนิดต่างๆ โดยมีผลิตภัณฑ์หลักคือ แวนตาว่ายนํ้า ซึ่งผลิตในลักษณะ OEM ให้กับแบรนด์ต่าง ๆ ทั้งในและต่างประเทศ ได้มาศึกษาเยี่ยมชมกิจกรรมการวิจัยและพัฒนาของคณะผู้วิจัยหลายครั้ง สนใจที่จะนำการเคลือบด้วยเทคนิคนี้ไปใช้กับผลิตภัณฑ์ของบริษัทฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเคลือบด้วยวิธีสปีดเทอริง เพื่อพัฒนาและปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตของบริษัท ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ๆ ของบริษัทด้วย โดยผลงานวิจัยที่ได้นี้จะทำให้บริษัทได้ข้อมูลและเทคนิคในการเตรียมชั้นเคลือบโลหะบนพลาสติกเพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตและการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ของบริษัทต่อไป รายงานการนี้เป็นผลการศึกษา การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสปีดเทอริง โดยมี บริษัท ออฟเท็ค จำกัด เป็นภาคเอกชนผู้ร่วมโครงการ ซึ่งเป็นผู้กำหนดโจทย์วิจัยและสนับสนุน โครงการวิจัยนี้นอกจากเป็นการนำองค์ความรู้พื้นฐานจากงานวิจัยของคณาจารย์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ไปขยายสู่ภาคอุตสาหกรรมแล้ว ยังเป็นโครงการที่แสดงถึงความร่วมมือของภาคอุตสาหกรรมและคณะผู้วิจัย โดยการสนับสนุนของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการแข่งขันและการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ ตลอดจนอาจทำให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นของประเทศอีกด้วย ทั้งนี้โครงการนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการวิจัยเพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานสำคัญก่อนนำไปขยายผลระดับอุตสาหกรรมซึ่งเป็นจุดเริ่มของการพัฒนาเทคโนโลยีแบบพึ่งพาตนเองของประเทศในอนาคต

3.1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยวิธีสปีดเทอริง
2. เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ สี และการยึดติด ของฟิล์มบางโลหะที่เตรียมได้

3.2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 การเคลือบฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี ค.ศ.1852 แนวคิดพื้นฐานของการเคลือบฟิล์มบางคือ เป็นการเรียงตัว (fabricated) โดยการสะสม (deposition) ของสารเคลือบในลักษณะของอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (substrate) จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบางที่บางมาก จึงอาจกล่าวได้ว่า “ฟิล์มบาง (Thin Film) หมายถึง ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบาง ๆ” แต่การระบุว่าฟิล์มใดเป็น “ฟิล์มบาง” นั้นอาจพิจารณาได้จากลักษณะการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์ม กล่าวคือ ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงผิว (Surface Properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มบาง” แต่ถ้ามองการใช้สมบัติเชิงปริมาตร (Bulk Properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มหนา” (Bunshah, 1994)

การเคลือบด้วยกระบวนการ PVD หรือ การเคลือบด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์นั้นอาศัยหลักการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วพุ่งกระจายวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับแล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางซึ่งเกิดขึ้นภายใต้ภาวะสุญญากาศ แบ่งเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ

1. การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศ (ความดันประมาณ 10^{-6} mbar) ทำได้โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ ซึ่งไอของสารเคลือบนี้จะพุ่งไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนต่อเนื่องเป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไป การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยากคือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้านอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เช่น การให้ความร้อนจากตัวต้านทาน (resistive heating) การระเหยแบบวาบ (flash evaporation) การระเหยด้วยเลเซอร์ (laser evaporation) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporation) การระเหยด้วยการอาร์ค (arc evaporation) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (radiofrequency heating) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้นิยมใช้เคลือบสารไดอิเล็กตริก (dielectric) เช่น แมกนีเซียมไดฟลูออไรด์ (MgF_2) หรือ ออกไซด์ (oxide) ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสบนวัตถุที่ต้องการเคลือบ เช่น เลนส์กล้องถ่ายรูป แว่นตาและกระจกเลเซอร์ ฯลฯ สำหรับข้อเสียของการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับจะไม่สูงนักจึงต้องอาศัยกระบวนการอบด้วยความร้อนหรือวิธีอื่นช่วยให้การยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้ อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ

2. การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง (ความดันประมาณ 10^{-3} ถึง 10^{-1} mbar) การเคลือบเกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งชนวัสดุรองรับและพอกพูนเป็นฟิล์มบางในที่สุด การสปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงโดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและ

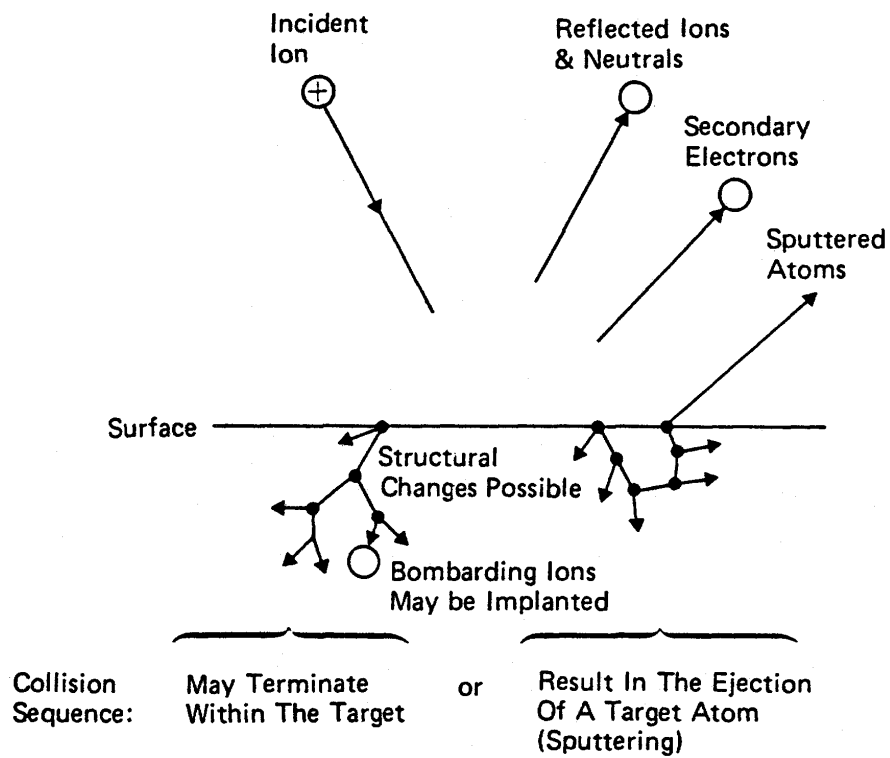
โมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ กระบวนการนี้อ่อนภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ และเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีการระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า

3.2.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

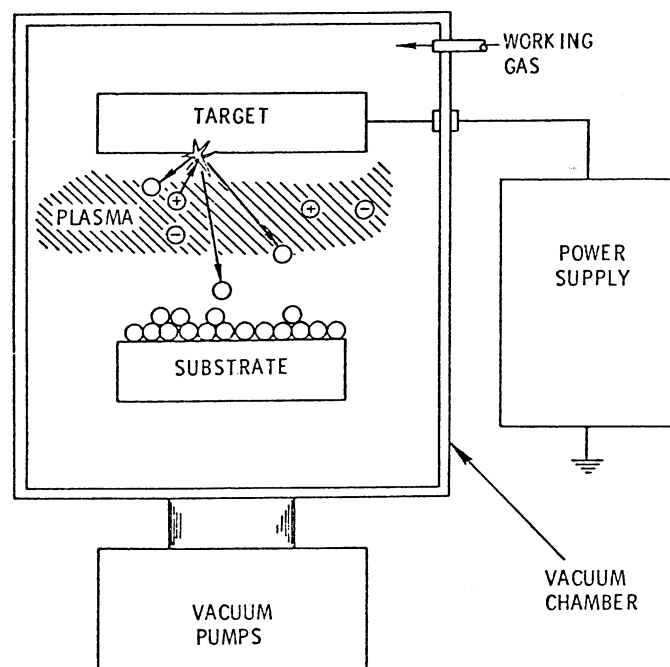
การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางจากสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนและโตเป็นฟิล์มบางในที่สุด

กระบวนการสปัตเตอริง คือ กระบวนการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ ซึ่งอนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าเป้าสารเคลือบจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้คือ

1. การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (reflected ions and neutrals) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากพื้นผิวหน้าของวัสดุ ซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิววัสดุ
2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (secondary electron emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองจากผิววัสดุถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ
3. การฝังตัวของไอออน (ion implantation) ไอออนที่วิ่งชนพื้นผิววัสดุนั้นอาจฝังตัวลงในผิววัสดุ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันตรงกับพลังงานไอออน มีค่าประมาณ 10^{-10} A ต่อ พลังงานไอออน 1 keV สำหรับไอออนของแก๊สอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง
4. การเปลี่ยนโครงสร้างของผิววัสดุ การชนของไอออนบนผิววัสดุอาจทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิววัสดุใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (lattice defect) เราเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวนี้นี้ว่า altered surface layers
5. การสปัตเตอริง การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมวัสดุแล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากผิววัสดุ เรียกว่ากระบวนการนี้ว่า “สปัตเตอริง”



รูปที่ 3-1 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ



รูปที่ 3-2 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

ทั้งนี้กระบวนการสปัตเตอริงต้องมียุทธศาสตร์ประกอบพื้นฐานอย่างน้อย 3 อย่างคือ (1) สารเคลือบซึ่งทำหน้าที่เป็นเป้า (target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชน จนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ (2) อนุภาคพลังงานสูงซึ่งจะวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบแล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอนหรืออะตอมของธาตุต่างๆ แต่การให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 eV เพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่ยอมรับคือการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งผลิตได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้กระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นได้ ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงนิยมเลือกการเร่งไอออนของแก๊สในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความ ต้องการ (3) ได้แก่การผลิตอนุภาคพลังงานสูงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ฟิล์มที่มีความหนาตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (ion gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออน ในอัตราสูง หรือผลิตจากกระบวนการโกลด์ดิสชาร์จ (glow discharge) แต่เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ ดังนั้นในกระบวนการสปัตเตอริงในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลด์ดิสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูงแทน

เนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงนั้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก เมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีการระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงจะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุที่ต้องการเคลือบดีกว่า การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงนี้ยังแบ่งได้หลายแบบ เช่น วิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง (rf sputtering) เป็นการใช้ระบบไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุในการทำให้ไอออนของสารเคลือบหลุดจากผิวของเป้าสารเคลือบ หรือวิธีไอออนบีม สปัตเตอริง (ion beam sputtering) เป็นระบบที่ใช้วิธีกำเนิดไอออนในห้องไอออนแล้วเร่งให้ชนกับขั้วคาโทดซึ่งเป็นสารเคลือบด้วยศักย์สูงในสุญญากาศจากนั้นไอออนที่หลุดจากขั้วคาโทดจะวิ่งไปเกาะวัสดุที่ต้องการอีกต่อหนึ่ง วิธีการนี้จะได้สารเคลือบผิวที่บริสุทธิ์มาก ทั้งนี้เห็นว่าฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบนั้นขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ซึ่งรวมถึงกระบวนการเคลือบด้วย

3.3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

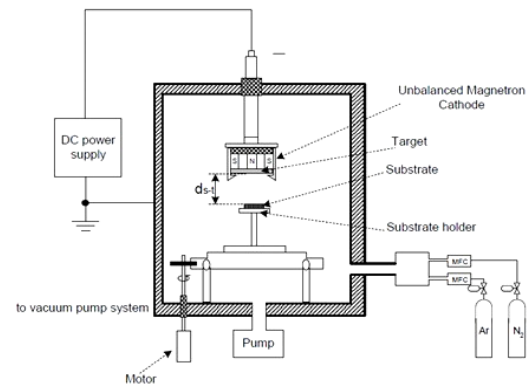
คณะผู้วิจัยแบ่งการดำเนินงานของโครงการวิจัยนี้เป็น 2 ส่วนดังนี้คือ

1. การปรับแต่งเครื่องเคลือบในสุญญากาศ เครื่องเคลือบที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้เป็นเครื่องเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีดีซีสปัตเตอร์ริง ซึ่งออกแบบสร้างโดยคณะผู้วิจัย กิจกรรมนี้เป็นการจัดเตรียม/ปรับแต่งเครื่องเคลือบให้พร้อมทำงานสำหรับการเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกชนิดต่างๆ เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีการคายแก๊สง่าย ซึ่งทำให้เป็นการยากในการสร้างสุญญากาศก่อนเคลือบ ดังนั้นในระหว่างดำเนินการอาจมีการปรับแต่งเครื่องเป็นระยะตามเหมาะสมของการเงื่อนไขการเคลือบและลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ
2. การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติก ขั้นตอนนี้เป็นการทดลองเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ โดยฟิล์มบางโลหะที่ใช้เช่น อะลูมิเนียม ไทเทเนียม

3.3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง แบ่งเป็นสามส่วนดังนี้
 - 1.1 เป้าสารเคลือบ (target) ไทเทเนียม และ อะลูมิเนียม
 - 1.2 แก๊ส (Gas) ใช้ แก๊สอาร์กอน (99.999%) เป็นแก๊สสปัตเตอร์ (Sputtered Gas)
 - 1.3 วัสดุรองรับ (Substrate) ได้แก่ แผ่นซิลิกอน และ พลาสติก
2. เครื่องเคลือบสุญญากาศ ระบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง ในช่วงแรกใช้เครื่องเคลือบซึ่งออกแบบและสร้างโดยคณะผู้วิจัย ของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (รูปที่ 3-3) ฟิล์มบางโลหะในงานวิจัยนี้เตรียมจากเครื่องเคลือบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อให้ฟิล์มบางที่ได้มีคุณภาพและสมบัติตามที่ต้องการ จะต้องลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศให้อยู่ในระดับ 10^{-5} mbar ส่วนประกอบของเครื่องเคลือบระบบสปัตเตอร์ริงในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของระบบสุญญากาศ (Vacuum Parts) และ ส่วนของระบบเคลือบ (Coating Parts) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้
 - 2.1 ส่วนของระบบสุญญากาศ ประกอบด้วย ห้องเคลือบทรงกระบอกทำจากสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.50 cm สูง 23.50 cm ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องสูบบแบบแพร่ไอรบายความร้อนด้วยน้ำและมีเครื่องสูบลโรตารีเป็นเครื่องสูบลท้าย การวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศใช้มาตรวัดความดันของ Balzers ประกอบด้วย ส่วนแสดงผลรุ่น TPG300 ใช้มาตรวัดความดันแบบพิรานีรุ่น TPR010 และมาตรวัดความดันแบบเพนนิ่งรุ่น IKR050

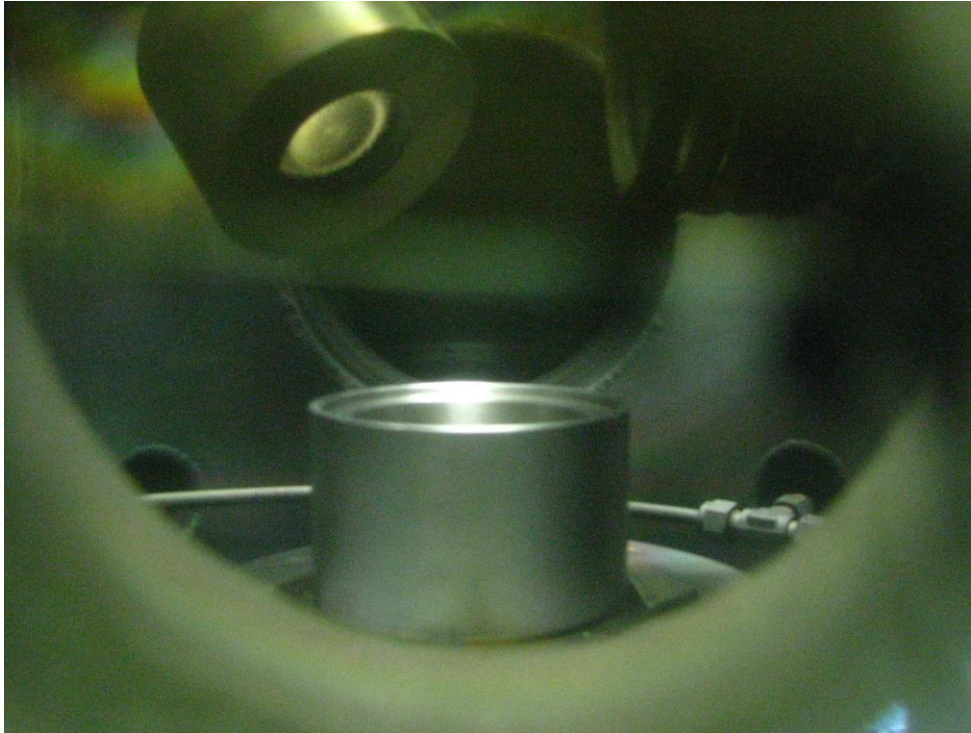
2.2 ส่วนของระบบเคลือบ เป็นส่วนในเตรียมฟิล์มบางโลหะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบแมกนีตรอนคาโทด เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 cm ระบายความร้อนด้วยน้ำติดตั้งเป้าโลหะพร้อมภาคจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ใช้แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นแก๊สสปัตเตอร์ สำหรับการจ่ายแก๊สในกระบวนการเคลือบควบคุมด้วย Mass Flow Controller ของ MKS type247D



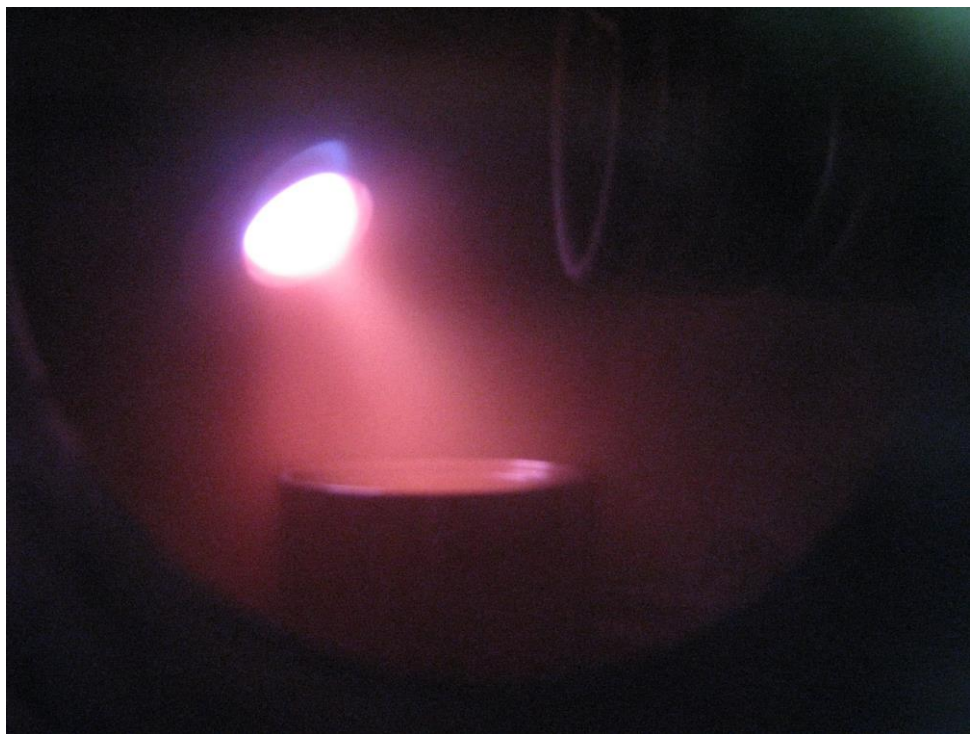
รูปที่ 3-3 ลักษณะและไดอะแกรมของเครื่องเคลือบระบบสปัตเตอร์ริง ในโครงการวิจัยย่อยที่ 2



รูปที่ 3-4 ลักษณะพลาสมาของเครื่องเคลือบระบบสปัตเตอร์ริงในโครงการวิจัยย่อยที่ 2



(a)



(b)

รูปที่ 3-5 ลักษณะของเครื่องเคลือบระบบสปีดเตอริงแบบวางหัวเคลือบเฉียงเพื่อหมุนชิ้นงาน

3.4 ผลและอภิปรายผล

การทดลองในส่วนนี้แบ่งเป็น (1) การเคลือบฟิล์มบางโลหะแบบไม่หมุนชิ้นงาน (2) การเคลือบฟิล์มบางโลหะแบบหมุนชิ้นงาน และ (3) การเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมแบบหมุนชิ้นงาน ซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้

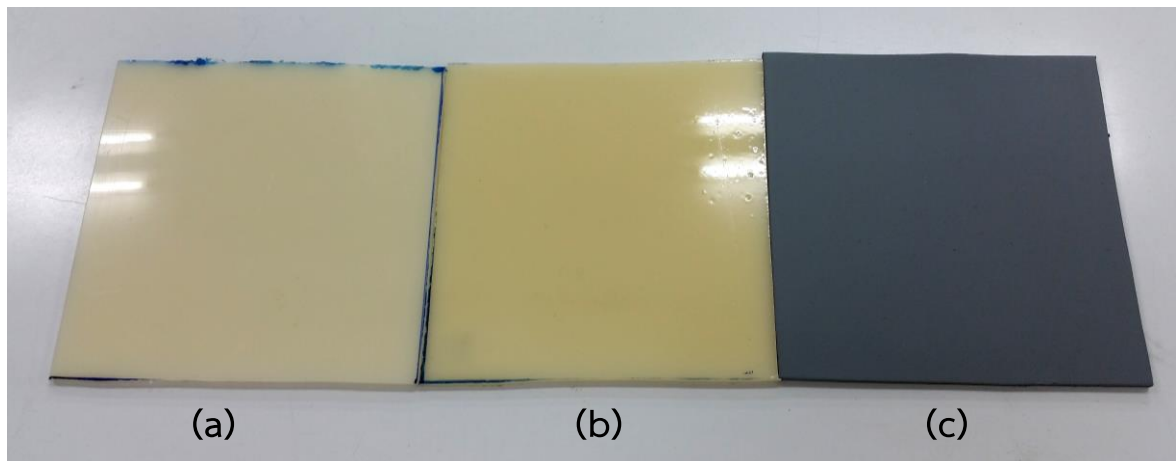
3.4.1 การทดลองเคลือบฟิล์มบางโลหะแบบไม่หมุนชิ้นงาน

ขั้นตอนนี้เป็น การเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมบนพลาสติก ABS ที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ แบบไม่ปรับผิว แบบปรับผิวมัน และแบบปรับผิวด้าน แบบไม่หมุนชิ้นงาน โดยใช้เวลาการเคลือบต่างๆ กัน สำหรับเงื่อนไขการเคลือบสรุปในตารางที่ 3-1

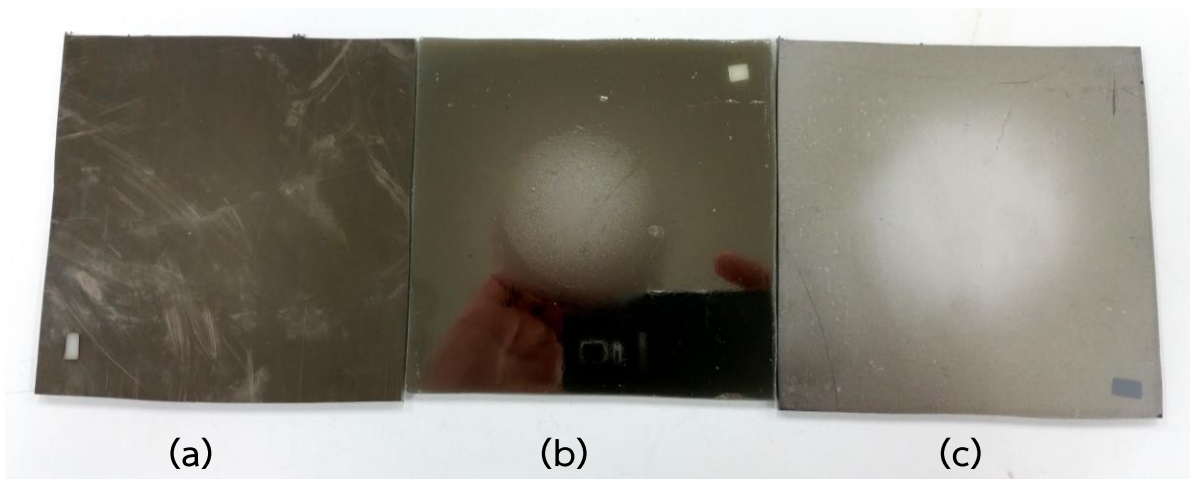
เนื่องจากผิวหน้าของชิ้นงานพลาสติกที่ใช้ในการทดลองอาจไม่เรียบหรือมีรอยมาจากกระบวนการผลิต ประกอบกับการเคลือบด้วยวิธีสเปตเตอริงเป็นการเรียงตัวของสารเคลือบในระดับนาโนซึ่งอาจทำให้ผิวของชิ้นงานหลังการเคลือบมีลักษณะตามผิวของชิ้นงานเดิม ผู้วิจัยจึงทดลองเคลือบชิ้นงานใน 3 ลักษณะ คือ (1) ชิ้นงานที่ไม่ปรับผิว (2) ชิ้นงานที่ปรับผิวแบบมัน และ (3) ชิ้นงานที่ปรับผิวแบบด้าน (รูปที่ 3-6)

ตารางที่ 3-1 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางโลหะแบบไม่หมุนชิ้นงาน

พารามิเตอร์	รายละเอียด
เป่าสารเคลือบ	ไทเทเนียม
วัสดุรองรับ	พลาสติก ABS และ ซิลิกอน
การหมุนชิ้นงาน	ไม่หมุน
ความดันพื้น (mbar)	5.0×10^{-5}
ความดันรวม (mbar)	5.0×10^{-3}
อัตราไหลแก๊สอาร์กอน (sccm)	10
ระยะห่างของหน้าเป่าถึงวัสดุรองรับ	12
กระแสไฟฟ้า (mA)	500
เวลาเคลือบ (min)	3, 5, 10, 15



รูปที่ 3-6 ลักษณะของชิ้นงานพลาสติก ABS ที่ใช้ในการทดลองก่อนเคลือบ
 (a) ไม่ปรับผิว (b) ปรับผิวมัน (c) ปรับผิวด้าน



รูปที่ 3-7 ลักษณะของชิ้นงานพลาสติก ABS หลังการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียม
 (a) ไม่ปรับผิว (b) ปรับผิวแบบมัน (c) ปรับผิวแบบด้าน

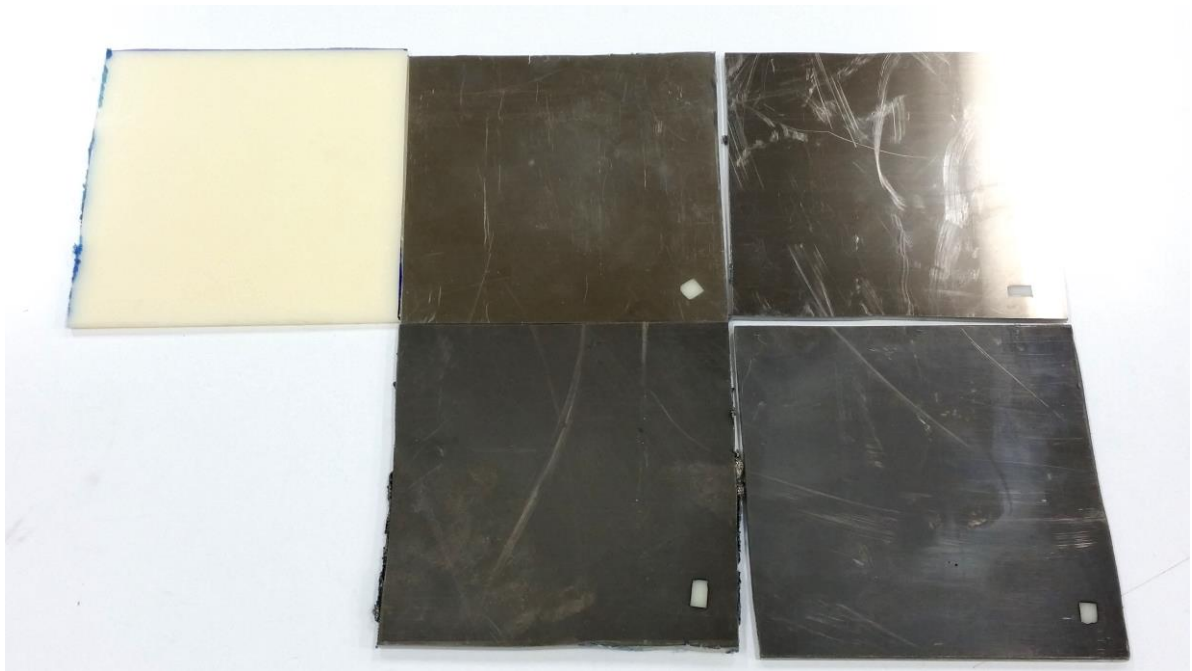
ผลการเคลือบฟิล์มบางโลหะ (ไทเทเนียม) บนผิวพลาสติกต่างกัน 3 ลักษณะ แบบไม่หมุนชิ้นงาน พบว่า ฟิล์มโลหะสามารถเคลือบ (จับ) บนแผ่นพลาสติกได้ ดังแสดงในรูปที่ 3-7 สำหรับความหนาของฟิล์มที่เคลือบประมาณจากเทคนิค FE-SEM แสดงดังรูปที่ 3-11 (อัตราเคลือบเท่ากับ 62 nm/min)

ทั้งนี้ลักษณะของฟิล์มบาง หรือ ชั้นเคลือบ ที่ได้มีลักษณะแตกต่างกันไป ดังนี้

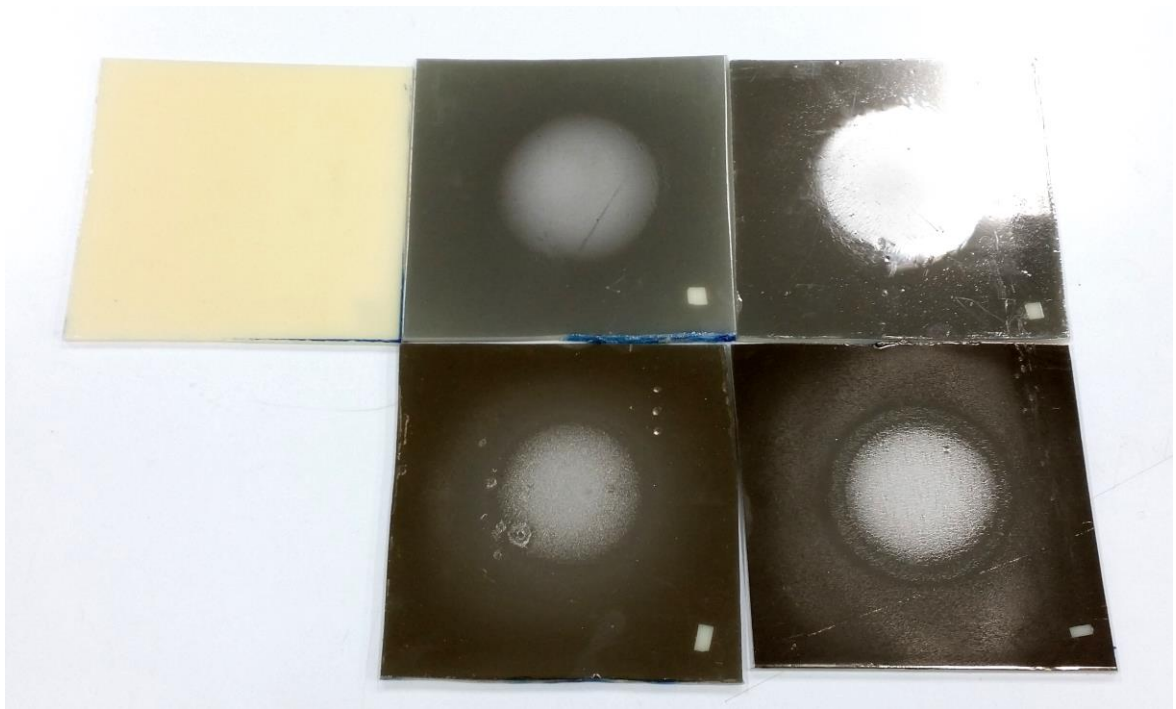
1. กรณีชิ้นงานที่ไม่มีการปรับผิว ชั้นเคลือบที่มีได้มีสีของไทเทเนียม สะท้อนแสงปานกลาง ผิวมีรอยขีดข่วนตามลักษณะผิวของพลาสติกก่อนเคลือบ เมื่อเคลือบที่เวลาต่างๆ กัน พบว่าสีของชิ้นงานที่เคลือบแล้วมีความเข้มขึ้นตามเวลาการเคลือบ (รูปที่ 3-8)

2. กรณีชิ้นงานที่ปรับผิวแบบมัน ชั้นเคลือบที่มีได้มีสีของไทเทเนียม การสะท้อนแสงดีมาก ผิวมีรอยขีดข่วนตามลักษณะผิวของพลาสติกก่อนเคลือบเล็กน้อย แต่พบรอยวงกลมที่กลางชิ้นงานมีลักษณะขาวขุ่น คาดว่าเป็นผลจากการวางชิ้นงานในลักษณะตั้งฉากกับเป้าสารเคลือบทำให้พลังงานของสารเคลือบบริเวณนี้มีค่าสูงมากจนทำให้เกิดการขยายตัวของสารเคลือบที่ใช้ในการปรับผิว ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยการหมุนชิ้นงานขณะเคลือบ สุดท้ายเมื่อเคลือบที่เวลาต่างๆ กัน พบว่าสีของชิ้นงานที่เคลือบแล้วมีความเข้มขึ้นตามเวลาการเคลือบ (รูปที่ 3-9)

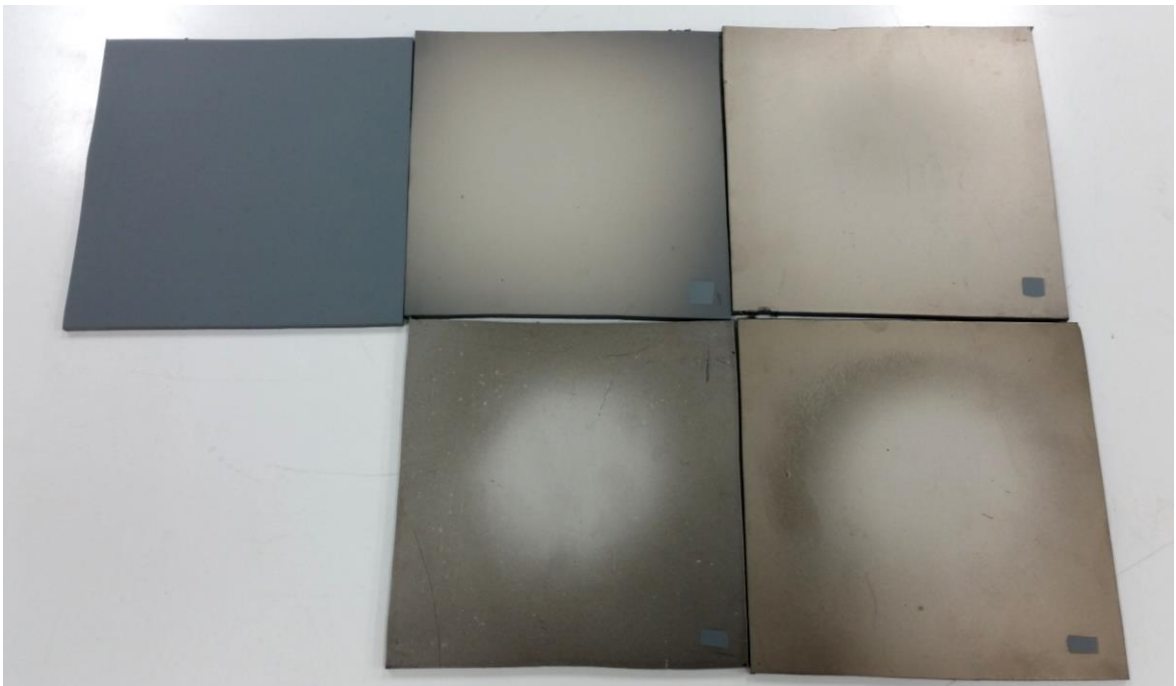
3. กรณีชิ้นงานที่ปรับผิวแบบด้าน ชั้นเคลือบที่มีได้มีสีของไทเทเนียม ไม่มีการสะท้อนแสงผิวของชั้นเคลือบค่อนข้างเรียบ ไม่มีรอยขีดข่วนของผิวพลาสติกก่อนเคลือบ เมื่อเคลือบที่เวลาต่างๆ กัน พบว่าสีของชิ้นงานที่เคลือบแล้วมีความเข้มขึ้นตามเวลาการเคลือบ (รูปที่ 3-10) รวมถึงยังพบว่าบริเวณตำแหน่งการขึ้นงานสีของชั้นเคลือบต่างจากบริเวณขอบ ซึ่งอาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของความหนาของชั้นเคลือบที่ได้ ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยการหมุนชิ้นงานขณะเคลือบ



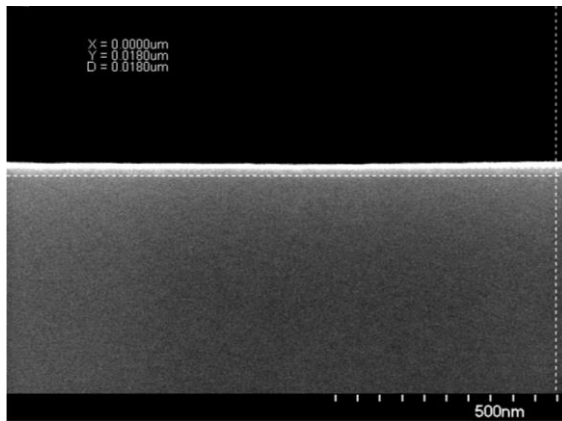
รูปที่ 3-8 ลักษณะของฟิล์มโลหะที่เคลือบบนพลาสติก แบบไม่ปรับผิว เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบ



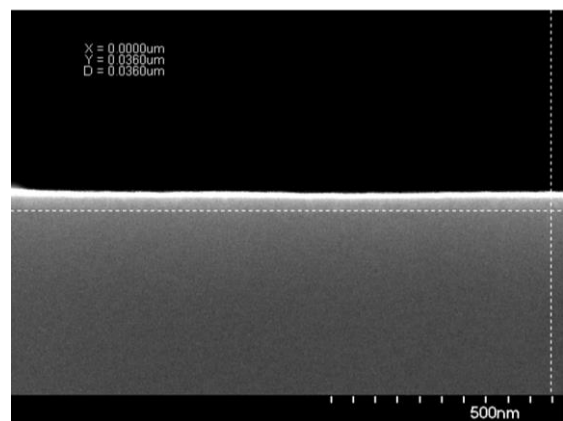
รูปที่ 3-9 ลักษณะของฟิล์มโลหะที่เคลือบบนพลาสติก แบบปรับผิวมัน เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบ



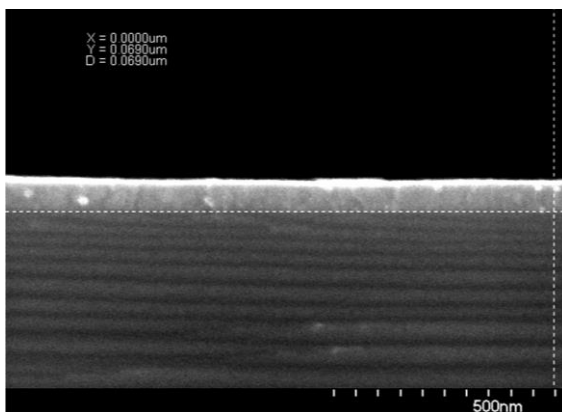
รูปที่ 3-10 ลักษณะของฟิล์มโลหะที่เคลือบบนพลาสติก แบบปรับผิวด้าน เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบ



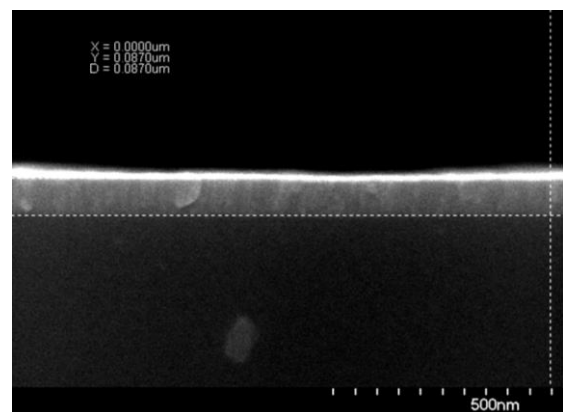
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 3-11 ความหนาของฟิล์มโลหะที่เคลือบบนพลาสติกจากเทคนิค FE-SEM

(a) เคลือบนาน 3 นาที ความหนาประมาณ 20 nm

(b) เคลือบนาน 5 นาที ความหนาประมาณ 40 nm

(c) เคลือบนาน 10 นาที ความหนาประมาณ 70 nm

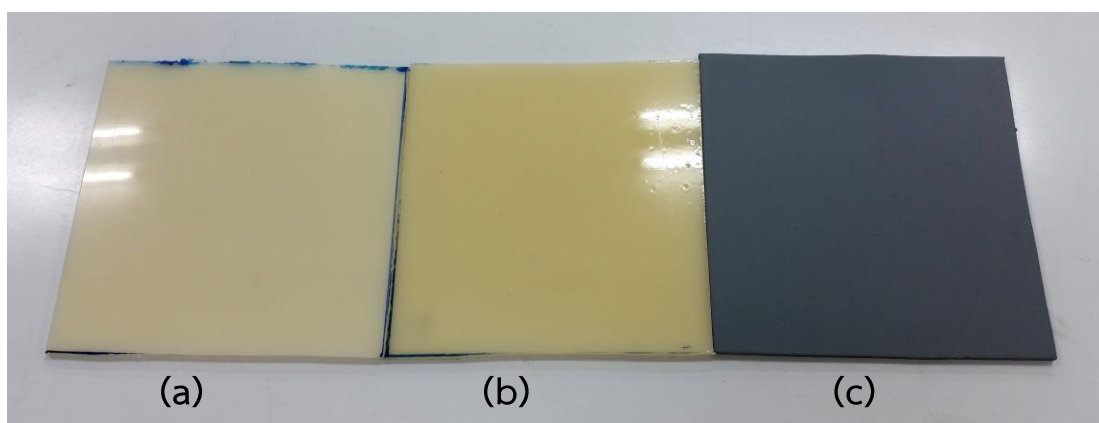
(d) เคลือบนาน 15 นาที ความหนาประมาณ 90 nm

3.4.2 การทดลองเคลือบฟิล์มบางโลหะแบบหมุนขึ้นงาน

ขั้นตอนนี้เป็นการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมบนพลาสติก ABS ที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ แบบไม่ปรับผิว แบบปรับผิวมัน และแบบปรับผิวด้าน แบบหมุนขึ้นงาน โดยใช้เวลาการเคลือบต่างๆ กัน สำหรับเงื่อนไขการเคลือบสรุปในตารางที่ 3-2 โดยทดลองเคลือบบนชิ้นงานใน 3 ลักษณะ คือ (1) ชิ้นงานที่ไม่มีการปรับผิว (2) ชิ้นงานที่ปรับผิวแบบมัน และ (3) ชิ้นงานที่ปรับผิวแบบด้าน (รูปที่ 3-12)

ตารางที่ 3-2 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางโลหะแบบหมุนขึ้นงาน

พารามิเตอร์	รายละเอียด
เป้าสารเคลือบ	ไทเทเนียม
วัสดุรองรับ	พลาสติก ABS และ ซิลิกอน
การหมุนขึ้นงาน	หมุน
ความดันพื้น (mbar)	5.0×10^{-5}
ความดันรวม (mbar)	5.0×10^{-3}
อัตราไหลแก๊สอาร์กอน (sccm)	10
ระยะห่างของหน้าเป้าถึงวัสดุรองรับ	12
กระแสไฟฟ้า (mA)	500
เวลาเคลือบ (min)	3, 5, 10

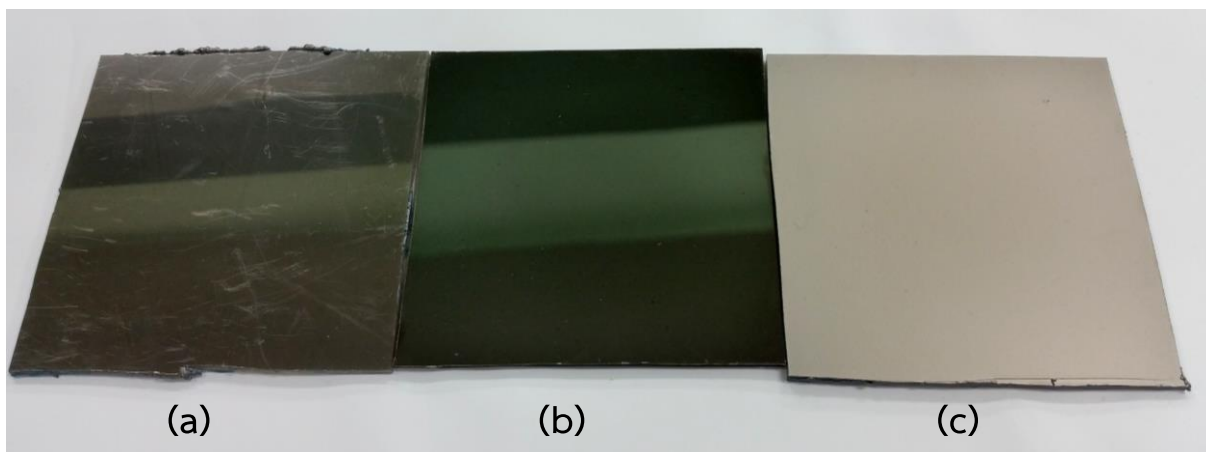


รูปที่ 3-12 ลักษณะของชิ้นงานพลาสติก ABS ที่ใช้ในการทดลอง

(a) ไม่ปรับผิว

(b) ปรับผิวมัน

(c) ปรับผิวด้าน



รูปที่ 3-13 ลักษณะของชิ้นงานพลาสติก ABS หลังการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมแบบหมุนชิ้นงาน

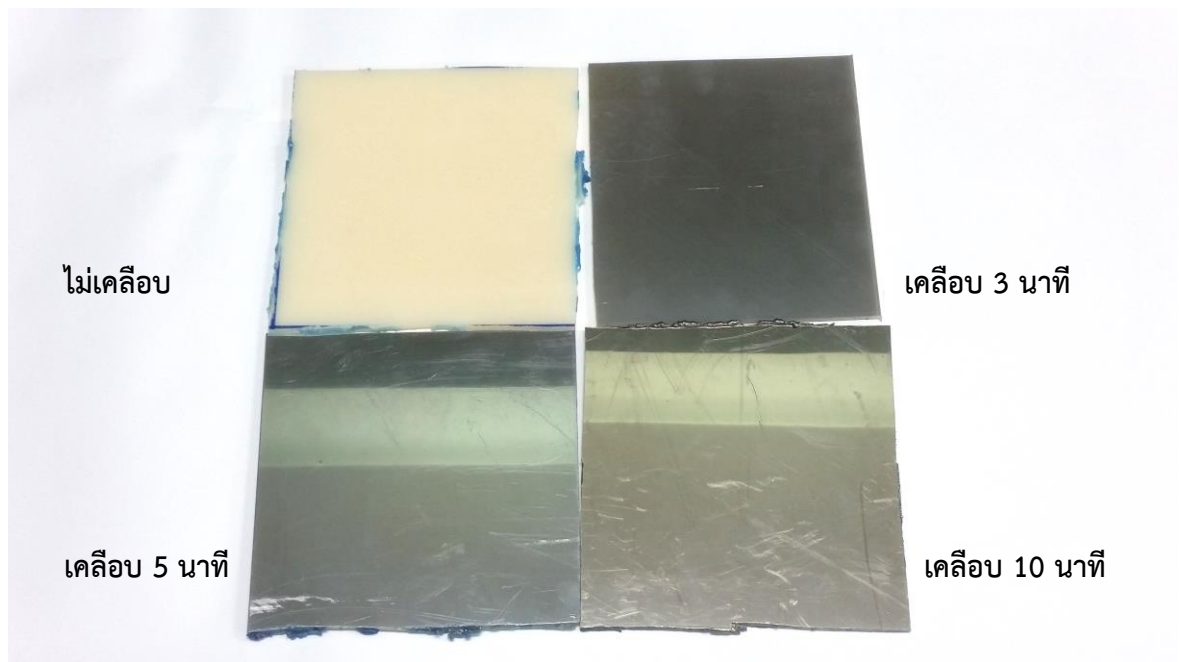
(a) ไม่ปรับผิว (b) ปรับผิวแบบมัน (c) ปรับผิวแบบด้าน

สำหรับผลการเคลือบฟิล์มบางโลหะ (ไทเทเนียม) บนผิวของพลาสติกที่ต่างกัน 3 ลักษณะแบบหมุนชิ้นงาน พบว่า ฟิล์มบางโลหะสามารถเคลือบ (จับ) บนแผ่นพลาสติกได้ ดังแสดงในรูปที่ 3-13 กรณีนี้ลักษณะการเป็นวงกลมลดลง ฟิล์มบางที่เคลือบได้มีลักษณะแตกต่างกันไป ดังนี้

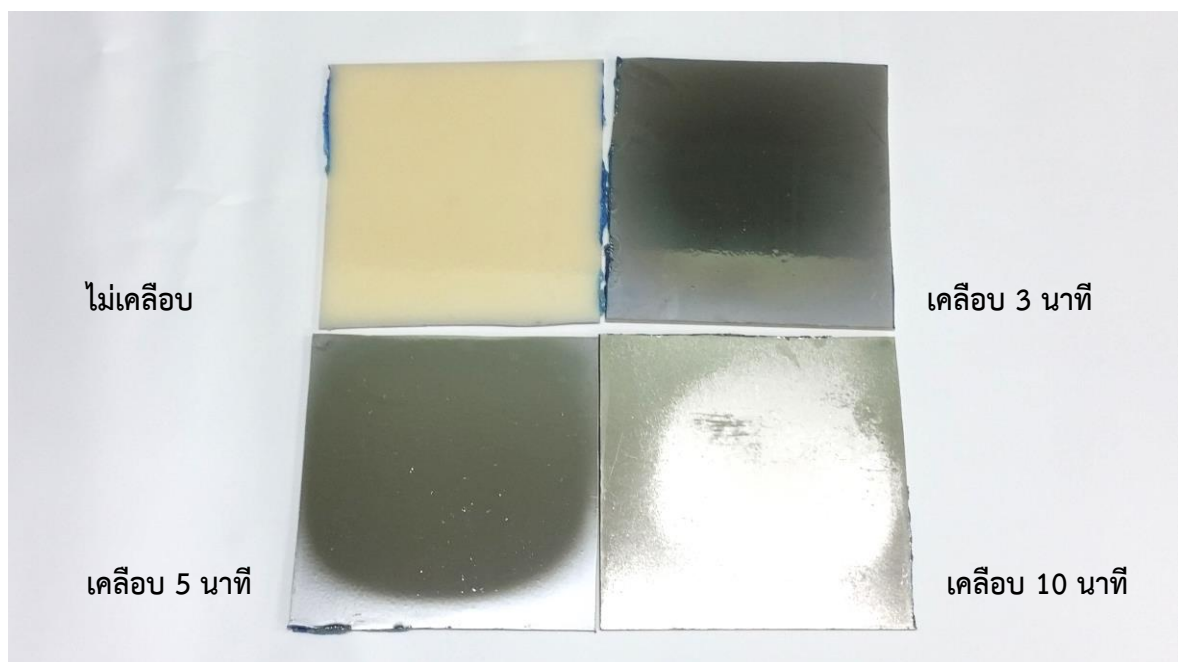
1. กรณีชิ้นงานที่ไม่มีการปรับผิว ชิ้นเคลือบที่มีได้มีสีของไทเทเนียม สะท้อนแสงปานกลาง ผิวมีรอยขีดข่วนตามลักษณะผิวของพลาสติกก่อนเคลือบ เมื่อเคลือบที่เวลาต่างๆ กัน พบว่าสีของชิ้นงานที่เคลือบแล้วเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการเคลือบ (รูปที่ 3-14)

2. กรณีชิ้นงานที่ปรับผิวแบบมัน ชิ้นเคลือบที่มีได้มีสีของไทเทเนียม มีการสะท้อนแสงสูง ผิวค่อนข้างเรียบดี ไม่พบรอยวงกลมที่กลางชิ้นงานที่เกิดขึ้นกรณีการเคลือบแบบไม่หมุนชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่าสารเคลือบมีการกระจายตัวค่อนข้างดี แต่ยังมีบางส่วนที่ขอบ สำหรับชิ้นงานที่ใช้เวลาเคลือบนาน 10 นาที พบว่าชิ้นงานมีการสะท้อนแสงแบบกระจายแสง ส่วนหนึ่งเนื่องจากสารที่ใช้ในการปรับผิวอาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากขณะเคลือบจะเกิดความร้อนที่ผิวหน้าของฟิล์ม สำหรับลักษณะของฟิล์มที่เคลือบได้ที่เวลาต่างๆ พบว่าสีของชิ้นงานที่เคลือบแล้วมีความเข้มขึ้นตามเวลาการเคลือบ (รูปที่ 3-15)

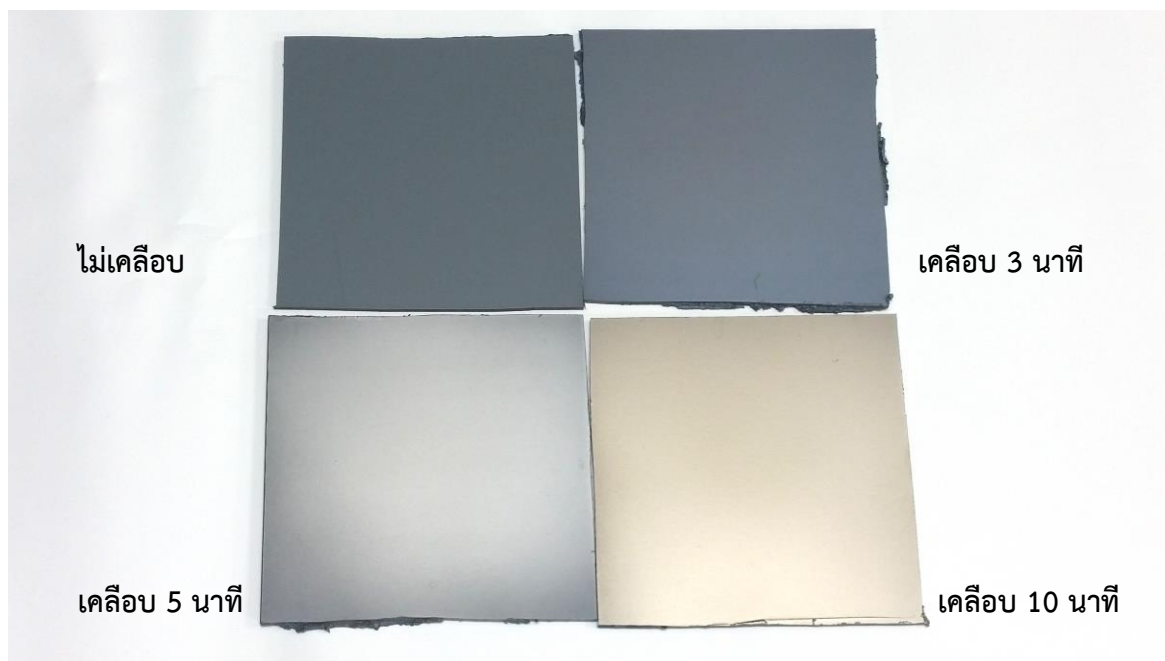
3. กรณีชิ้นงานที่ปรับผิวแบบด้าน ชิ้นเคลือบที่มีได้มีสีของไทเทเนียม ไม่มีการสะท้อนแสง ผิวของชิ้นเคลือบค่อนข้างเรียบ ไม่มีรอยขีดข่วนของผิวพลาสติกก่อนเคลือบ เมื่อเคลือบที่เวลาต่างๆ กัน พบว่าสีของชิ้นงานที่เคลือบแล้วมีความเข้มขึ้นตามเวลาการเคลือบ (รูปที่ 3-16) รวมถึงยังพบว่าบริเวณตำแหน่งการขึ้นงานสีของชิ้นเคลือบต่างจากบริเวณขอบ ซึ่งอาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของความหนาของชิ้นเคลือบที่ได้ ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยการหมุนชิ้นงานขณะเคลือบ



รูปที่ 3-14 ลักษณะของฟิล์มโลหะที่เคลือบบนพลาสติก ไม่ปรับผิว เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบ – หมุนชิ้นงาน



รูปที่ 3-15 ลักษณะของฟิล์มโลหะที่เคลือบบนพลาสติก ปรับผิวมัน เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบ – หมุนชิ้นงาน



รูปที่ 3-16 ลักษณะของฟิล์มโลหะที่เคลือบบนพลาสติก ปรับผิวด้าน เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบ – หมุนชิ้นงาน

3.4.3 การทดลองเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมแบบหมุนชิ้นงาน

ขั้นตอนนี้เป็นการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมบนพลาสติก ABS ที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ แบบไม่ปรับผิว แบบปรับผิวมัน และแบบปรับผิวด้าน แบบหมุนชิ้นงาน โดยใช้เวลาการเคลือบต่างๆ กัน สำหรับเงื่อนไขการเคลือบสรุปในตารางที่ 3-3 โดยทดลองเคลือบบนชิ้นงานใน 3 ลักษณะ คือ (1) ชิ้นงานที่ไม่มีการปรับผิว (2) ชิ้นงานที่ปรับผิวแบบมัน และ (3) ชิ้นงานที่ปรับผิวแบบด้าน (รูปที่ 3-17 – รูปที่ 3-19)

ตารางที่ 3-3 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางโลหะแบบหมุนชิ้นงาน

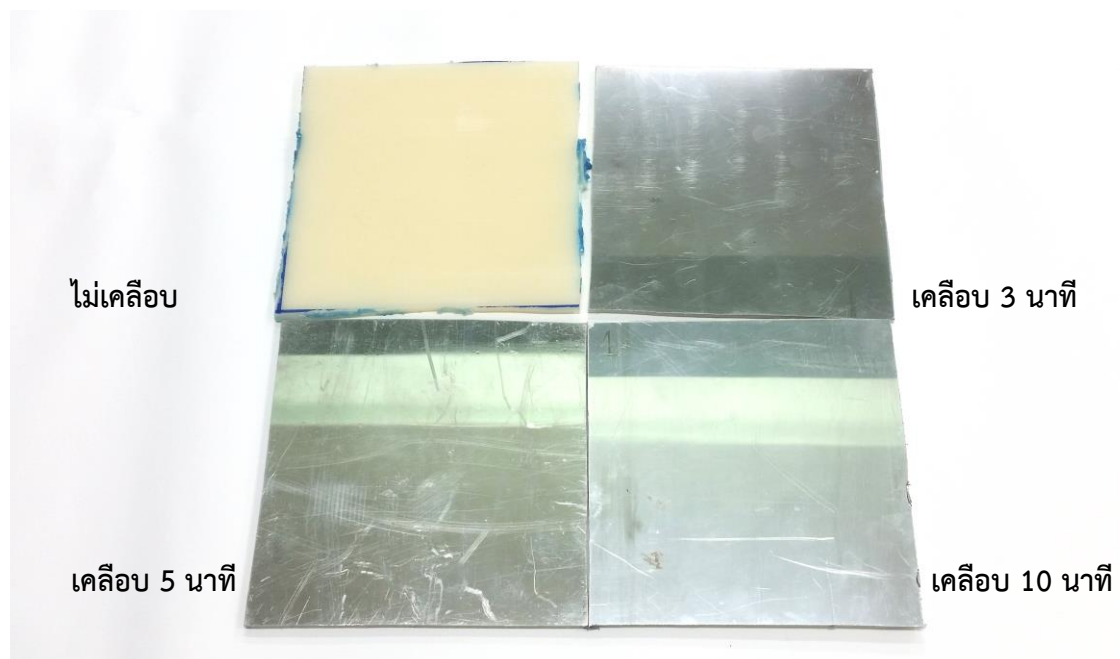
พารามิเตอร์	รายละเอียด
เป้าสารเคลือบ	อะลูมิเนียม
วัสดุรองรับ	พลาสติก ABS และ ซิลิกอน
การหมุนชิ้นงาน	หมุน
ความดันพื้น (mbar)	5.0×10^{-5}
ความดันรวม (mbar)	5.0×10^{-3}
อัตราไหลแก๊สอาร์กอน (sccm)	10
ระยะห่างของหน้าเป้าถึงวัสดุรองรับ	12
กระแสไฟฟ้า (mA)	500
เวลาเคลือบ (min)	3, 5, 10

สำหรับผลการเคลือบฟิล์มบางโลหะ (อะลูมิเนียม) บนผิวของพลาสติกที่ต่างกัน 3 ลักษณะ แบบหมุนชิ้นงาน พบว่า ฟิล์มบางโลหะสามารถเคลือบ (จับ) บนแผ่นพลาสติกได้ ดังแสดงในรูปที่ 3-17 ฟิล์มบางที่เคลือบได้มีลักษณะแตกต่างกันไป ดังนี้

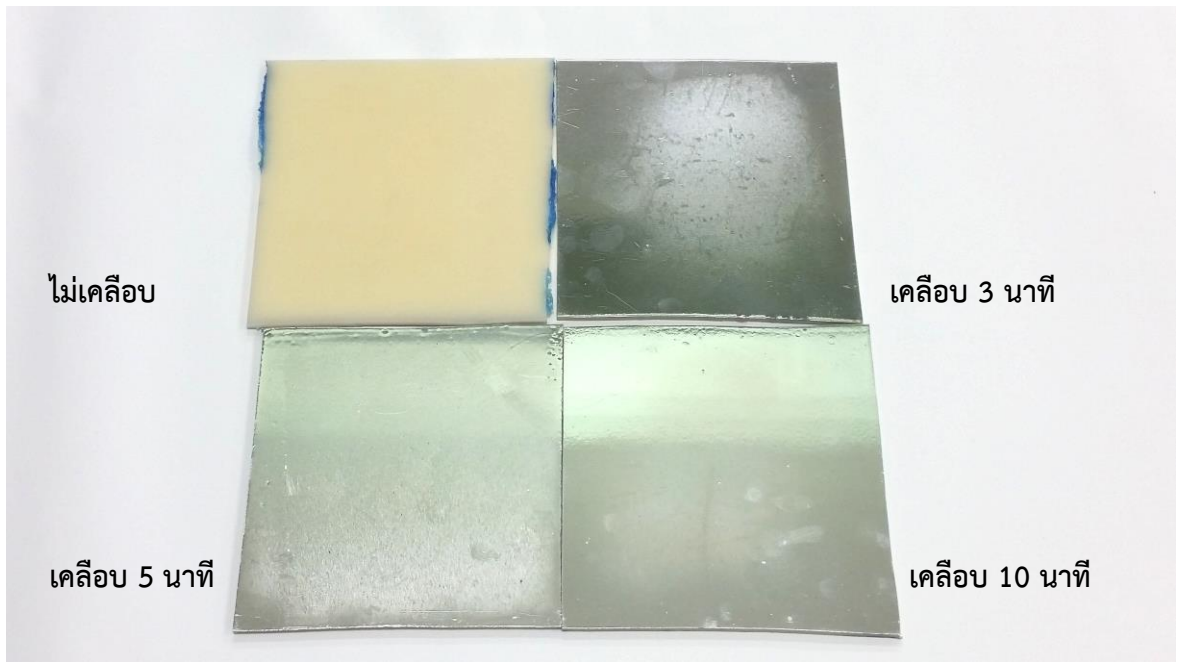
1. กรณีชิ้นงานที่ไม่มีการปรับผิว ชั้นเคลือบที่มีได้มีสีของอะลูมิเนียมขาวสว่าง สะท้อนแสงได้ดีมาก ผิวมีรอยขีดข่วนตามลักษณะผิวของพลาสติกก่อนเคลือบ เมื่อเคลือบที่เวลาต่างๆ พบว่าสีของชิ้นงานที่เคลือบแล้วมีความสว่างมากขึ้นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการเคลือบ (รูปที่ 3-17)

2. กรณีชิ้นงานที่ปรับผิวแบบมัน ชั้นเคลือบที่มีได้มีสีของอะลูมิเนียม มีการสะท้อนแสงสูง ผิวค่อนข้างเรียบดี ไม่พบรอยวงกลมที่กลางชิ้นงาน อย่างไรก็ตามพบว่าการสะท้อนแสงของฟิล์มมีลักษณะคล้ายผ้าที่มีลักษณะสีขาวเล็กน้อย ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากชั้นเคลือบที่ใช้ในการปรับผิวแบบมัน เนื่องจากสารที่ใช้ในการปรับผิวอาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากขณะเคลือบจะเกิดความร้อนที่ผิวหน้าฟิล์ม (รูปที่ 3-18)

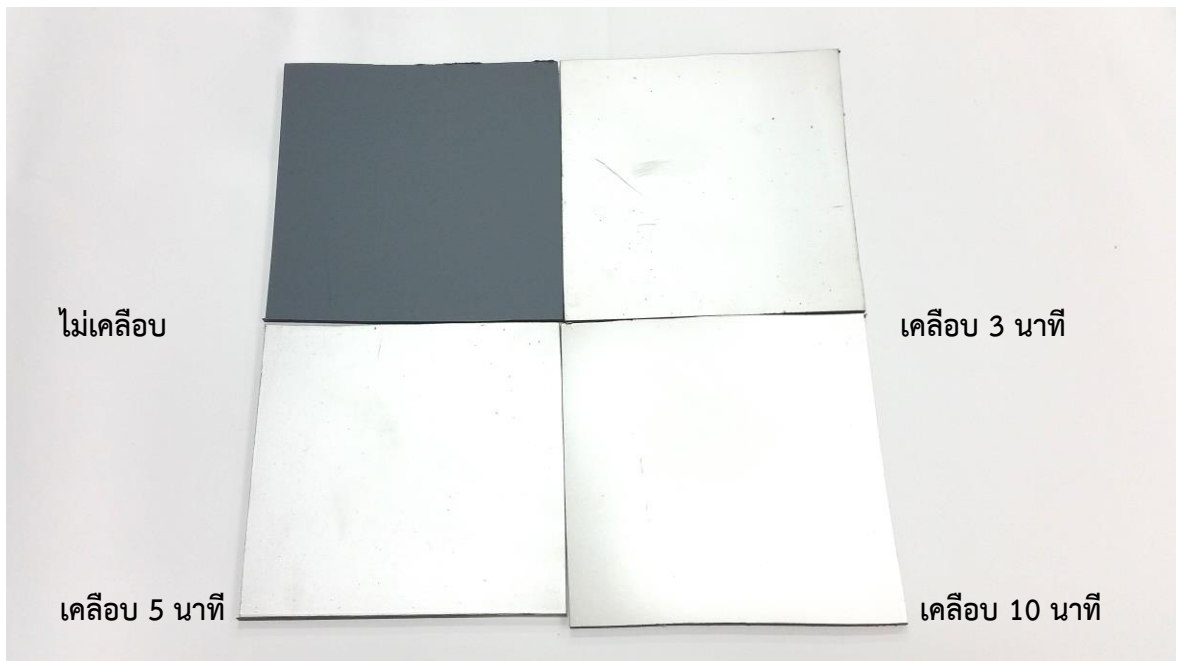
3. กรณีชิ้นงานที่ปรับผิวแบบด้าน ชั้นเคลือบที่มีได้มีสีของอะลูมิเนียมชัดเจนที่สุด โดยมีสีขาวไม่สะท้อนแสง ผิวของชั้นเคลือบค่อนข้างเรียบ ไม่มียอยขีดข่วนของผิวพลาสติกก่อนเคลือบ เมื่อเคลือบที่เวลาต่างๆ กัน พบว่าสีของชิ้นงานที่เคลือบแล้วมีสีขาวสว่างขึ้นตามเวลาการเคลือบ (รูปที่ 3-19)



รูปที่ 3-17 ลักษณะของฟิล์มอะลูมิเนียมที่เคลือบบนพลาสติก แบบไม่ปรับผิว
เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบ - หมุนชิ้นงาน



รูปที่ 3-18 ลักษณะของฟิล์มอะลูมิเนียมที่เคลือบบนพลาสติก
แบบปรับผิวมัน เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบ – หมุนชิ้นงาน



รูปที่ 3-19 ลักษณะของฟิล์มอะลูมิเนียมที่เคลือบบนพลาสติก แบบปรับผิวด้าน
เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบ – หมุนชิ้นงาน

3.5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

3.5.1 สรุปผล

โครงการวิจัยนี้สามารถเคลือบฟิล์มบางโลหะ 2 ชนิด ได้แก่ ไทเทเนียม และ อะลูมิเนียม บนพลาสติก ABS ได้ตามวัตถุประสงค์ ทั้งนี้เนื่องจากการเคลือบฟิล์มบางโลหะด้วยการเคลือบในสุญญากาศ โดยวิธีสเปตเตอร์นั้นการเกิดฟิล์มจะมีลักษณะเป็นการสะสมพอกพูนของสารเคลือบในระดับอะตอมซึ่งทำให้ชั้นเคลือบ/ฟิล์มบางที่ได้มีความหนาน้อยมากในระดับนาโน ที่สำคัญชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นบางมากจนไม่สามารถปิดผิวหน้าของชิ้นงานได้ หากผิวหน้าของชิ้นงานมีลักษณะไม่เรียบหรือมีรอยขีดข่วน ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นก็จะยังคงแสดงลักษณะร้าวรอยการขีดข่วนอย่างเห็นได้ชัด ทำให้จำเป็นต้องมีการปรับผิวก่อนเคลือบ โดยในงานวิจัยนี้ได้ปรับผิว 2 แบบ คือ แบบมัน และ แบบด้าน โดยชั้นเคลือบบนชิ้นงานปรับผิวแบบมันจะไม่แสดงร้าวรอยการขีดข่วนของผิวชิ้นงานเดิม และให้การสะท้อนแสงมันเงาดี ตามลักษณะของฟิล์มโลหะ ส่วนชิ้นงานที่ปรับผิวแบบด้านชั้นเคลือบที่ได้ไม่แสดงร้าวรอยการขีดข่วนของผิวชิ้นงานเดิม และไม่สะท้อนแสงตามลักษณะของการปรับผิวก่อนเคลือบ

3.5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ใช้การปรับผิวโดยการพ่นสเปรย์ด้วยมือซึ่งทำให้ชั้นของสารเคลือบที่ใช้ปรับผิวมีลักษณะไม่เรียบเนียน ควรมีการพัฒนาชุดพ่นสเปรย์สารเคลือบสำหรับปรับผิวแบบอัตโนมัติซึ่งจะให้ผิวที่เรียบเนียนดีกว่า
2. ควรศึกษาผลของการปรับผิวก่อนเคลือบในลักษณะต่างๆ เพิ่มเติม
3. ชั้นเคลือบโลหะในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือทำให้ผิวของพลาสติกมีลักษณะเป็นโลหะ ดังนั้นอาจต้องมีการเคลือบปิดผิวหน้าของชั้นเคลือบด้วยสารเคลือบที่เหมาะสม
4. ควรมีการทดลองเคลือบฟิล์มบางโลหะบนชิ้นงานประเภทต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานและแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้งานต่อไป
5. ควรมีการทดลองเคลือบชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆ เนื่องจาก ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเท่านั้น โดยอาจเคลือบชิ้นงานที่มีลักษณะต่างๆ เช่น ชิ้นงานที่มีรูปร่าง 3 มิติ หรือ มีขนาดใหญ่

3.6 เอกสารอ้างอิง

- พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ. (2547). การวิจัยและพัฒนาการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2 รายงานการวิจัยประจำปี 2547. ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยร่วมกับสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (หน้า 163-166). กรุงเทพฯ: ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุรสิงห์ ไชยคุณ, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สกฤต ศรีญาณลักษณ์ และจักรพันธ์ ถาวรธิดา. (2540). การพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง. รายงานการวิจัยประจำปี 2540. ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Bertrand, G., Savall, C., & Meunier, C. (1997). Properties of reactively RF magnetron sputtered chromium nitride coatings. *Surface and Coatings Technology*, 96, 323-329.
- Budke, E., Krempel-Hesse, J., Maidhof, H., & Schüssler, H. (1999). Decorative hard coating with improved corrosion resistance. *Surface coating and Technology*, 112, 108-113.
- Bunshah, R.F. (1994). *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings* (2nd ed.). New Jersey, Noyes.
- Chapman, B. (1980). *Glow Discharge Processes*. New York, John Wiley & Sons.
- Chapman, B. (1980). *Glow Discharge Processes*. New York: John Wiley & Sons.
- Mattox, D.M. (1997). *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, New Jersey, Noyes Publications, 917 p.
- Munz, W.D. (1991). The Unbalanced Magnetron : Current Status of Development. *Surface and Coating Technology*, 48, 81-94.
- Rickerby, D.S., & Matthews, A. (1991). *Advanced Surface Coatings : a Handbook of Surface Engineering*. New York: Chapman and Hall.
- Smith, D. L. (1995). *Thin-Film Deposition : Principle And Practice*. New York: McGraw-Hill.
- Wasa, K., & Hayakawa, S. (1992). *Handbook of sputter deposition technology: principles, technology and applications* (pp. 19-29). New Jersey: Noyes.

บทที่ 4

โครงการวิจัยย่อยที่ 3

การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน

บทสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)

โครงการวิจัยเรื่อง “การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน” เป็นโครงการวิจัยย่อยที่ 3 ในแผนงานวิจัย “การวิจัยและพัฒนาชั้นเคลือบโลหะบนพลาสติกโดยการเคลือบด้วยไอกายภาพ” ซึ่งได้รับทุนวิจัย จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ ชุดโครงการวิจัยด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเพื่อวิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 สัญญาเลขที่ RDG5750044 พบว่า ฟิล์มที่เคลือบได้ทุกเงื่อนไขเย็นเรียบ ใสส่งผ่านแสงได้ดี มีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐานทั้งหมด ฟิล์มที่ได้ทั้งหมดมีอะลูมิเนียมและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในอัตราส่วน 35:65 ฟิล์มมีความหนาประมาณ 0.14-0.18 μm ฟิล์มที่เตรียมได้มีสามารถต้านการดูดซึมน้ำได้ดีแต่ยังไม่ดีเพราะฟิล์มบางเกินไป ทั้งนี้ การเตรียมฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์เพื่อให้เกิดโครงสร้างผลึกต้องใช้พลังงานสูง อาจไม่เหมาะกับการเคลือบพลาสติก แต่ฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานซึ่งเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้องก็มีสมบัติการต้านทานการดูดซึมน้ำได้ดี ควรศึกษาผลของการปรับผิวก่อนเคลือบในลักษณะต่างๆ เพิ่มเติม รวมถึงทดลองเคลือบบนชิ้นงานอื่น สำหรับผลลัพธ์จากของโครงการวิจัยย่อยที่ 1 มีดังนี้คือ

1. บทความวิจัยเรื่อง “การเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน” เสนอใน การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติครั้งที่ 7 “ยกระดับงานวิจัย เพื่อก้าวสู่มหาวิทยาลัยระดับโลก”, 25-26 มีค 59, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา กรุงเทพมหานคร

2. การผลิตบุคลากร :นิสิต ปริญญาโท วท.ม.(ฟิสิกส์) 1 คน คือ

ชื่อ-นามสกุล นางสาวพรพิมล ธัญญะภูมิ

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโครเมียมเซอร์โคเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบด้วยวิธีอีพอกซีฟแมกนีตรอนโคสเปตเตอริง

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์

3. การบริการวิชาการ/ถ่ายทอดเทคโนโลยี/ความเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรม

การให้ความอนุเคราะห์ผู้สนใจ เข้าเยี่ยมชมกิจกรรมของโครงการวิจัยฯ จำนวน 3 ครั้ง

การเข้าร่วมจัดนิทรรศการแสดงผลงานวิจัย จำนวน 3 ครั้ง

การเป็นวิทยากรบรรยายเผยแพร่ความรู้จากงานวิจัย จำนวน 2 ครั้ง

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ถูกเคลือบบนซิลิกอนและกระจกสไลด์ด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปตเตอริง เพื่อศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์การเคลือบ ได้แก่ อัตราไหลแก๊สออกซิเจนในช่วง 2-6 sccm กระแสสเปตเตอริงในช่วง 500-800 mA ระยะห่างจากหน้าเป้าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับในช่วง 5-10 cm และการให้ความร้อนหลังการเคลือบเท่ากับ 600 °C ต่อการเกิดฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มที่เคลือบได้ทุกเงื่อนไขการเคลือบมีลักษณะเนียนเรียบสม่ำเสมอ ใสส่งผ่านแสงได้ดี ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ และมีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐานทุกเงื่อนไขการทดลอง สำหรับองค์ประกอบทางเคมีจากเทคนิค EDS พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีอะลูมิเนียมประมาณ 35% และออกซิเจนประมาณ 65% เป็นองค์ประกอบ ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาประมาณ 0.14-0.18 μm สำหรับผลทดสอบการต้านทานการขีดข่วนของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ตามเงื่อนไขข้างต้นปิดทับไปบนฟิล์มบางอะลูมิเนียมบนพลาสติกชนิด ABS พบว่าสามารถป้องกันการขีดข่วนได้แต่ยังไม่ดีนัก ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบมีความหนาน้อยเกินไป

Abstract

Aluminium oxide (Al_2O_3) thin films were deposited on silicon and glass slide substrates by reactive magnetron sputtering technique to study the effect of deposition parameters as N_2 flow rate in the range of 2 - 6 sccm, the sputtering current in the range of 500 - 800 mA, target-substrate distance in the range of 5 - 10 cm and heat treatment of 600 °C after deposition on the formation of Al_2O_3 thin films. The results indicated that the smooth with uniform, clear and good transparent for all deposition conditions which was important property of Al_2O_3 thin films were investigated. The crystal structures of the films were amorphous. The element composition from EDS technique was founded that the deposited films compose of aluminium about 35% and oxygen about 65%. The thickness of the films was about 0.14-0.18 μm . In case of scratch testing results of Al_2O_3 thin films obtained by deposited the films though the deposition conditions on aluminium thin films which prepared on ABS plastic type, it was revealed that the films able to prevent the scratch but still not good maybe due to the thickness of deposited Al_2O_3 films was too thin.

4.1 บทนำ

4.1.1 ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกมาใช้งานในด้านต่างๆ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีข้อดีหลายประการเช่น เป็นวัสดุราคาถูก สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ตั้งแต่พื้นฐานไปจนถึงรูปร่างรูปทรงที่ซับซ้อน และที่สำคัญยังมีน้ำหนักเบาอีกด้วย แต่พลาสติกก็มีข้อจำกัดบางประการในด้านความทนทาน ขูดขีดเป็นรอยง่ายและไม่ทนทานต่อสารละลายเคมี อย่างไรก็ตามข้อจำกัดเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการเคลือบผิวหน้าของพลาสติกด้วยสารเคลือบประเภทต่างๆ เพื่อเพิ่มความทนทานทั้งต่อการขูดขีดและสารเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารเคลือบหรือชั้นเคลือบที่มีลักษณะใสและแข็ง โดยสารเคลือบหรือชั้นเคลือบที่มีสมบัติดังกล่าวนี้คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เนื่องจากเป็นสารประกอบออกไซด์ที่มีสมบัติที่ตีหลายประการ เช่น จุดหลอมเหลวสูง ค่าความแข็ง สูงที่สุดในกลุ่มออกไซด์ทั้งหมด มีเสถียรภาพทางกลและทางเคมีที่สูง แม้ที่สภาวะอุณหภูมิสูงเกือบ $1000\text{ }^{\circ}C$ ทำให้อะลูมิเนียมออกไซด์มีความทนทานต่อการขัดสี (wear resistance) และทนทานต่อการกัดกร่อน ดี นอกจากนี้ อะลูมิเนียมออกไซด์ยังเป็นสารไดอิเล็กทริกที่มีลักษณะใส ส่องผ่านของแสงที่ตลอดช่วงที่ตามองเห็น จึงนิยมนำมาใช้ในงานด้านทัศนศาสตร์ เช่น ใช้เคลือบเพื่อปกป้องผิวกระจกหรือใช้เคลือบเป็นฟิล์มป้องกันสำหรับชั้นโลหะสะท้อนแสงในกระจกมืด (dark mirror)

โดยทั่วไปการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์สามารถเคลือบได้หลายวิธีทั้งแบบ chemical vapor deposition (CVD) หรือแบบ physical vapor deposition (PVD) อย่างไรก็ตาม การเคลือบด้วยไอกายภาพ (Physical Vapor Deposition ; PVD) มีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน มีการยึดติดของฟิล์มที่ดี อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการเคลือบของชั้นงานมีค่าไม่สูงมาก ทำให้ชั้นงานไม่เกิดความเสียหายหรือเปลี่ยนรูปไปเนื่องจากผลของอุณหภูมิของชั้นงานที่เกิดจากกระบวนการเคลือบมีค่าสูงเกินไป ซึ่งทำให้ชั้นงานที่ใช้เคลือบมีความหลากหลายมากขึ้น เช่น สามารถเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์เพื่อเคลือบป้องกันผิวลงบนวัสดุประเภทพลาสติกหรือพอลิเมอร์รวมทั้งไม่มีการใช้สารเคมีในการเคลือบซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดของเสียที่ตกค้างทางเคมีที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

บริษัท ออฟเท็ค จำกัด เป็นบริษัทในกลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกที่ผลิตสินค้าจากพลาสติกชนิดต่างๆ โดยมีผลิตภัณฑ์หลักคือ แวนตาว่ายนน้ำ ซึ่งผลิตในลักษณะ OEM ให้กับแบรนด์ต่าง ๆ ทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งใช้การเคลือบในสุญญากาศด้วย ชั้นเคลือบโลหะบนชิ้นงานที่เป็นพลาสติกในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์บางชนิด โดยการเคลือบที่ บริษัท ออฟเท็ค จำกัด ใช้เคลือบผลิตภัณฑ์คือ วิธีระเหยสารด้วยเครื่องเคลือบที่นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น อย่างไรก็ตามข้อจำกัดบางประการคือมีการหลุดลอกและเป็นรอยจากการขูดขีดได้ง่าย สำหรับการแก้ปัญหานี้ บริษัท ออฟเท็ค จำกัด ได้มาปรึกษาและทดลองเบื้องต้นเกี่ยวกับการพัฒนาชั้นเคลือบป้องกัน (protective coating) สำหรับใช้เคลือบป้องกันชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ของบริษัทฯ ที่เป็นพลาสติกและผ่านการเคลือบสวอยงามแล้ว จากการประสานงานอย่างต่อเนื่อง บริษัท ออฟเท็ค จำกัด และคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนากระบวนการเคลือบชั้นป้องกัน

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกด้วยฟิล์มบางหรือ ชั้นเคลือบอะลูมิเนียมซึ่งมีลักษณะใสและแข็ง โดยผลงานวิจัยที่ได้นี้จะทำให้บริษัทได้ข้อมูลและเทคนิคในการเตรียมชั้นเคลือบป้องกันบนพลาสติกเพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตและการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ของบริษัทต่อไป รายงานนี้เป็นผลการศึกษา ของโครงการวิจัยเรื่อง “การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน” (Preparation and Characterization of Aluminium Oxide Thin Film for Protective Coating Application) โดยมี บริษัท ออฟเท็ค จำกัด เป็นภาคเอกชนผู้ร่วมโครงการ โครงการวิจัยนี้นอกจากเป็นการนำองค์ความรู้พื้นฐานงานวิจัยในมหาวิทยาลัยไปขยายสู่ภาคอุตสาหกรรมแล้ว ยังเป็นโครงการที่แสดงถึงความร่วมมือของภาคอุตสาหกรรมและคณะผู้วิจัยจากภาครัฐ โดยการสนับสนุนของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันและการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์และเพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานสำคัญก่อนนำไปขยายผลระดับอุตสาหกรรมซึ่งเป็นจุดเริ่มของการพัฒนาเทคโนโลยีแบบพึ่งพาตนเองของประเทศในอนาคต

4.1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนากระบวนการเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์โดยการเคลือบด้วยไอกายภาพ
2. เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เตรียมได้

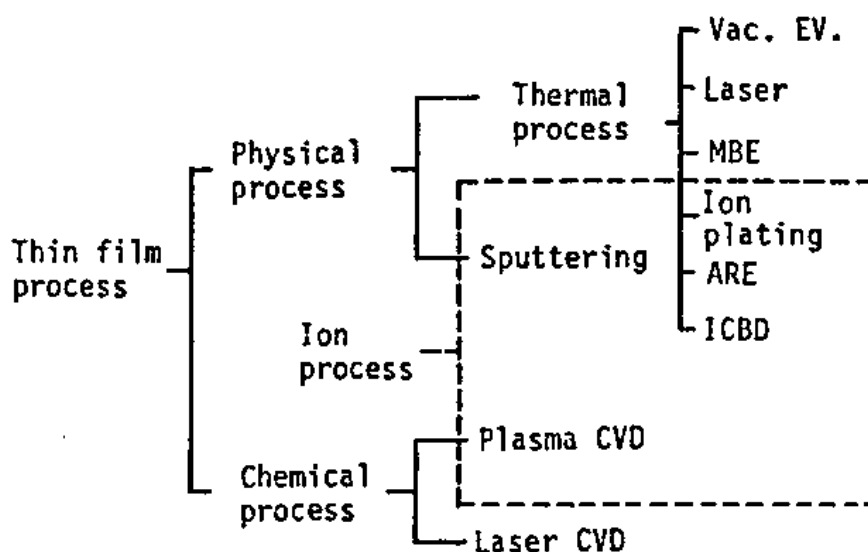
4.2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

4.2.1 การเคลือบในสุญญากาศ

เทคนิคการเคลือบด้วยกระบวนการ PVD (physical vapor deposition) เป็นเทคนิคหนึ่งของการเคลือบในสุญญากาศ ชั้นเคลือบที่ได้จากกระบวนการ PVD นั้นเรียกว่า “ฟิล์มบาง Thin Film” เนื่องจากเป็นชั้นเคลือบที่มีความหนาน้อยมาก การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี คศ.1852 โดยแนวคิดพื้นฐานแล้ว การเคลือบฟิล์มบางก็คือ การเรียงตัว (fabricated) โดยการสะสม (deposition) ของสารเคลือบในลักษณะของอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (substrate) จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบาง โดยฟิล์มที่ได้บางมาก (ระดับไมครอน) ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางในงานด้านต่างๆ มากมาย เช่น อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำและฟิล์มตัวต้านทาน หรืออุปกรณ์ทางแสง เช่น เลนส์ กระจกเลเซอร์ กระจกสะท้อนแสง กระจกกรองแสงเฉพาะบางช่วงความถี่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางนี้ในการเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางและมีความเป็นระเบียบสำหรับใช้ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุต่างๆ ในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางประการไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน ข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์มากในการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม (Wasa & Hayakawa, 1992)

การเคลือบฟิล์มในสุญญากาศบางอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท (รูปที่ 4-1) ได้แก่

1. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (chemical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (new species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี plasma CVD และ วิธี laser CVD เป็นต้น
2. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (physical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร (evaporation) และ วิธีสปัตเตอริง (sputtering) เป็นต้น



รูปที่ 4-1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ (Wasa & Hayakawa, 1992)

การเคลือบด้วยกระบวนการ PVD หรือ การเคลือบด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์นั้น อาศัยหลักการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับแล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบาง (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสสา รัตน์, 2547; Wasa & Hayakawa, 1992) ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้ภาวะสุญญากาศ แบ่งเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ

1. การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศ (ความดันประมาณ 10^{-6} mbar) ทำได้โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ ซึ่งไอของสารเคลือบนี้จะฟุ้งไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนโตเป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไป การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยากคือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้านอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เช่น การให้ความร้อนจากตัวต้านทาน (resistive heating) การระเหยแบบวาบ (flash evaporation) การระเหยด้วยเลเซอร์ (laser evaporation) การระเหยด้วยลำ

อิเล็กตรอน (electron beam evaporation) การระเหิดด้วยการอาร์ค (arc evaporation) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (radiofrequency heating) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้นิยมใช้เคลือบสารไดอิเล็กตริก (dielectric) เช่น แมกนีเซียมไดฟลูออไรด์ (MgF_2) หรือ ออกไซด์ (oxide) ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสบนวัตถุที่ต้องการเคลือบ เช่น เลนส์กล้องถ่ายรูป แว่นตาและกระจกเลเซอร์ ฯลฯ สำหรับข้อเสียของการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและวัตถุรองรับจะไม่สูงนักจึงต้องอาศัยกระบวนการอบด้วยความร้อนหรือวิธีอื่นช่วยให้การยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้ อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ

2. การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง (ความดันประมาณ 10^{-3} ถึง 10^{-1} mbar) การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการ สปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ กระบวนการนี้อ่อนกว่าที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ และเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหิดสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีการระเหิดสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัตถุรองรับดีกว่า

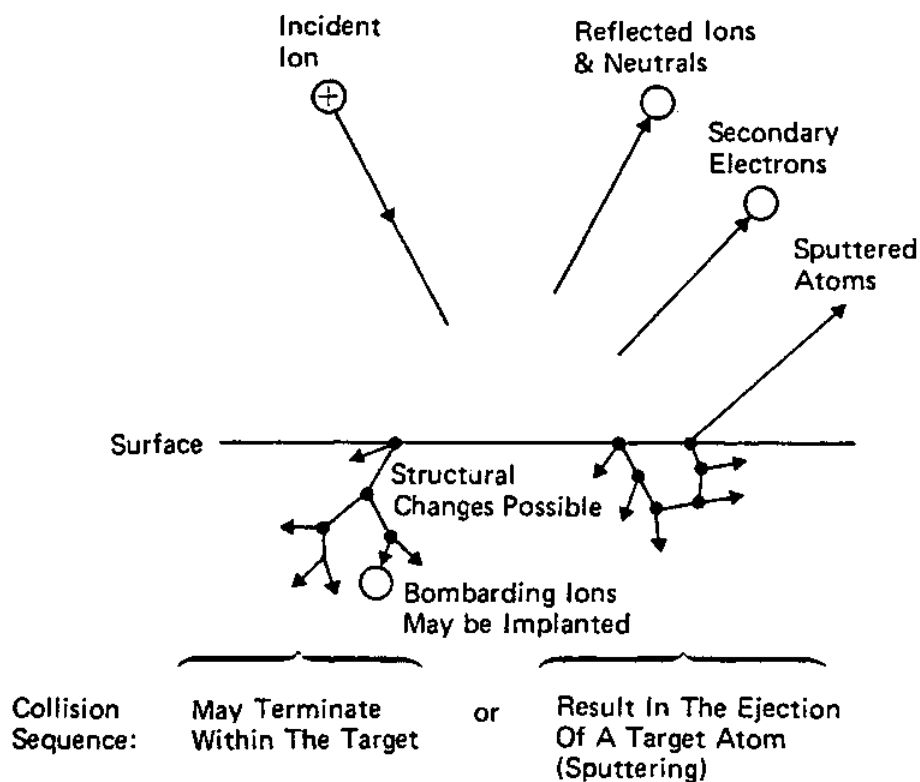
4.2.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางจากสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนและโตเป็นฟิล์มบางในที่สุด

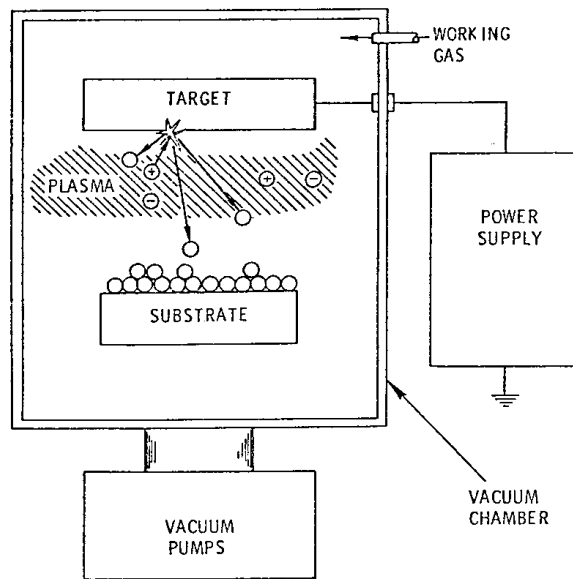
กระบวนการสปัตเตอริง คือ กระบวนการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุซึ่งอนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4-2 อย่างไรก็ตามเมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าเป้าสารเคลือบจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้คือ (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธรรณ รัตน์, 2547; Chapman, 1980)

1. การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (reflected ions and neutrals) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากพื้นผิวหน้าของวัสดุ ซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิววัสดุ

2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากผิววัสดุถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ
3. การฝังตัวของไอออน (ion implantation) ไอออนที่วิ่งชนพื้นผิววัสดุอาจฝังตัวลงในผิววัสดุ ด้วยความลึกประมาณ 10 Å ต่อ พลังงานไอออน 1 keV สำหรับไอออนของแก๊สอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง
4. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผิวหน้าเป้าสารเคลือบ (target material structural rearrangements) บางครั้งการชนของไอออนบนผิวเป้าสารเคลือบอาจทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวเป้าสารเคลือบใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (lattice defect) เราเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวนี้นว่า altered surface layers
5. การสปัตเตอร์ (sputter) บางครั้งการชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบ ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจาก เป้าสารเคลือบ ซึ่งกระบวนการนี้ว่า “สปัตเตอร์ริง”



รูปที่ 4-2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ (Chapman, 1980)



รูปที่ 4-3 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง (Chapman, 1980)

ทั้งนี้กระบวนการสปัตเตอริงจำเป็นต้องมีองค์ประกอบพื้นฐานอย่างน้อย 3 อย่างคือ

1. สารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้า (target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชน จนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ
2. อนุภาคพลังงานสูงซึ่งจะวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบแล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอนหรืออะตอมของธาตุต่างๆ แต่การให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 eV เพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่ยอมรับคือการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่เกิดได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้กระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นได้ ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมที่ดีที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงนิยมเลือกการเร่งไอออนของแก๊สในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ
3. การผลิตอนุภาคพลังงานสูงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริงต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ฟิล์มที่มีความหนาตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (ion gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออน ในอัตราสูง หรือผลิตจากกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (glow discharge) แต่เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ ดังนั้นในกระบวนการสปัตเตอริงในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูงแทน

เนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอร์ในการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์นั้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก เมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์จึงทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุที่ต้องการเคลือบดีกว่า การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์นี้ยังแบ่งได้หลายแบบ เช่น วิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ (rf sputtering) เป็นการใช้ระบบไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุในการทำให้ไอออนของสารเคลือบหลุดจากผิวของเป้าสารเคลือบ หรือวิธีไอออนบีม สปัตเตอร์ (ion beam sputtering) เป็นระบบที่ใช้วิธีกำเนิดไอออนในห้องไอออนแล้วเร่งให้ชนกับชิ้นงานที่เคลือบด้วยศักย์สูงในสุญญากาศจากนั้นไอออนที่หลุดจากชิ้นงานจะวิ่งไปเกาะวัสดุที่ต้องการอีกต่อหนึ่ง วิธีการนี้จะได้สารเคลือบผิวที่บริสุทธิ์มาก ทั้งนี้เห็นว่าฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบนั้นขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ซึ่งรวมถึงกระบวนการเคลือบด้วย

4.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Roth , Broszeit และ Kloops ได้ทำการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์บน cast iron ด้วยวิธี อาร์เอฟสปัตเตอร์ พบว่าการใช้ก๊าซออกซิเจนเพิ่มเข้าไปในกระบวนการ sputter cleaning รวมทั้งเพิ่มระยะเวลาในการ sputter cleaning จะมีอัตราการการสึกหรอที่น้อยกว่าการ sputter cleaning ที่ใช้ก๊าซอาร์กอนเพียงอย่างเดียว ส่วนการลดความดันที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มจะช่วยปรับปรุงให้การสึกหรอของฟิล์มมีค่าที่ดีขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการที่ฟิล์มมีการยึดเกาะ (adhesion) ที่ดีขึ้นเนื่องจาก compressive residual stress ที่เพิ่มขึ้นของฟิล์ม

Chou , Adamson ,Mardinly ,และ Nieg ได้ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธี อาร์เอฟสปัตเตอร์ โดยใช้ผลวิเคราะห์ที่จากวิธี grazing angle X-ray diffraction ,nanoidentation และ transmission electron microscopy โดยฟิล์มบางที่ได้จะประกอบด้วย amorphous $\text{-Al}_2\text{O}_3$ และ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ เฟสมีค่า elastic modulus ประมาณ 150 GPa และความแข็งอยู่ระหว่าง 8.5-10 Gpa ผลการแอนนิล (anneal) ฟิล์มที่อุณหภูมิระหว่าง 800 – 1200 °C ทำให้เกิดผลึกของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ขึ้น ใน amorphous- Al_2O_3 โดยจะเกิดบนระนาบ {400} และ {440} ของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ โดยมีทิศทางการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศที่ชอบ (preferred orientation) เป็น [001] และมีการเปลี่ยนแปลงเฟส จาก γ เป็น α เกิดขึ้น โดยจะขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการแอนนิลฟิล์ม การแอนนิลที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะพบว่าเกรนของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ เฟสจะโตขึ้น มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 50 nm และเกิดการโตของเกรน $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ขึ้นโดยมีทิศทางการจัดเรียงตัวในทิศ [0001] และมีขนาดเกรนในช่วง 3-15 ไมครอน อยู่ใน matrix ของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งเป็น polycrystalline ที่ขนาดเกรนละเอียด โดยโครงสร้างจุลภาคของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ มีลักษณะกลมเป็นชั้นๆ ดังฉากซึ่งกันและกัน เรียงตัวในระนาบ {220} ของ γ -phase การเกิด nucleation ของ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ จะเกิดบนระนาบ {220} ของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ เพราะจะทำให้เกิด defect structure บนระนาบได้ง่ายในระหว่างการโตของ layer structure

Lynne M. และ Subhash .H ได้ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ลงบน ferrite, glass และ graphite ที่มีการปนเปื้อนของไอน้ำ (water vapor) หรือก๊าซออกซิเจนเกิดขึ้นในภาชนะสุญญากาศ(chamber) ในระหว่างการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีอาร์เอสพีเตอริง ทำให้อัตราการเคลือบของฟิล์มลดลงและเกิดผลึกของ γ - Al_2O_3 เฟสเกิดขึ้น ซึ่งจะทนต่อการกัดกร่อนในสารละลาย H_3PO_4 ได้ดีกว่าฟิล์มที่เป็น amorphous- Al_2O_3 โดยผลจากการที่ก๊าซออกซิเจนถูกดูดกลืนที่ผิวของเป่าเคลือบทำให้อัตราการเคลือบของฟิล์มลดลงเป็นผลให้เกิดการฟอร์มตัวของผลึก γ - Al_2O_3 ที่บริเวณรอยต่อ (interface) ของฟิล์มและวัสดุรองรับ ซึ่งลักษณะโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของเกรน (grain orientation) ของวัสดุรองรับจะมีผลต่อการโตของผลึก γ - Al_2O_3 ที่บริเวณรอยต่อดังกล่าวด้วยเช่นกัน

Schneider, Sproul, Chia, และ Matthews ได้พัฒนากระบวนการเคลือบฟิล์มบางอลูมินาในด้าน hard coating ที่อุณหภูมิของวัสดุรองรับขึ้นงานมีค่าไม่เกิน 250°C เพื่อให้ได้อัตราการเคลือบฟิล์มที่มีค่าสูง โดยใช้ระบบเคลือบแบบดีซีพัลส์ และใช้การควบคุมแรงดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่มีความเที่ยงตรงสูง ทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มที่มีค่าสูงเป็น 76 % ของอัตราการเคลือบฟิล์มอลูมินัม โดยฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะเป็น transparent alumina, fully dense, ค่าความแข็งของฟิล์มประมาณ 15 GPa และมีองค์ประกอบของฟิล์มที่ใกล้เคียงกับ stoichiometric Al_2O_3

Stauder, Perry และ Frantz ได้ศึกษาโครงสร้างของฟิล์มอลูมินาที่สัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนในฟิล์ม ที่ความดันย่อยของก๊าซอาร์กอนมีค่าสูง (0.92 Pa) โดยพบว่าในช่วง 0-28 at %O ฟิล์มจะมีโครงสร้างเป็น metastable supersaturated f.c.c solid solution (α -Al) และฟิล์มจะมีโครงสร้างเป็น amorphous เฟส (a - $\text{Al}_2\text{O}_{3-x}$) ตลอดช่วง 50-60 at %O โดยที่ค่า at %O ในระหว่างช่วงทั้งสอง จะมีโครงสร้างผสมกันระหว่าง (α -Al) และ (a - $\text{Al}_2\text{O}_{3-x}$) นอกจากนี้การใช้พัลส์ไฟฟ้าที่มีความถี่ขนาดกลาง (medium frequency) เช่น 50 KHz จะช่วยลดการเกิด microarc ลงทำให้ลดจำนวนของ grow defect ที่ตกลงไปยังฟิล์มได้และในการเคลือบฟิล์มที่ความดันต่ำ การใช้พัลส์ไฟฟ้าความถี่ต่ำจะช่วยให้กระบวนการเคลือบมีความเสถียรขึ้นทำให้สามารถควบคุมกระบวนการรีแอคทีฟสปัตเตอริงได้ ซึ่งจะลดผลกระทบของ hysteresis effect ที่เกิดขึ้น เมื่อความดันรวมหรือ pumping speed มีค่าลดลง

Eva Fredriksson และ Jan-Otto Carlsson [11] ได้เตรียมฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์บน silica ด้วยเทคนิค CVD จากกระบวนการใช้ $\text{AlCl}_3/\text{CO}_2/\text{H}_2$ ที่อุณหภูมิ 950 - 1080°C ซึ่ง $\text{K-Al}_2\text{O}_3$ จะโตขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นและทิศทางการโตจะเปลี่ยนแปลงระหว่างทำ CVD จนเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็น α - Al_2O_3 ซึ่งอัตราการเปลี่ยนเฟสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากการศึกษาผลของสิ่งปนเปื้อนด้วยเทคนิค XRD และการวิเคราะห์ที่โครงสร้างพื้นผิว (morphology) ของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ $\text{AlCl}_3/\text{CO}_2/\text{H}_2$ จะไวต่อสิ่งปนเปื้อน ซึ่งการมีสิ่งปนเปื้อนและอัตราการรั่วของอากาศในระบบ CVD จะมีผลต่อปริมาณเฟส K/α และโครงสร้างพื้นผิว

4.3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

4.3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

คณะผู้วิจัยแบ่งการดำเนินงานของโครงการวิจัยนี้เป็น 3 ส่วนดังนี้คือ

1. การปรับแต่งเครื่องเคลือบในสุญญากาศ กิจกรรมนี้เป็นการจัดเตรียม/ปรับแต่งเครื่องเคลือบให้พร้อมทำงานการติดตั้ง ส่วนการเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คพร้อมชุดควบคุม อย่างไรก็ตามก็ตีระหว่างดำเนินการ อาจมีการปรับแต่งเครื่องเป็นระยะตามความเหมาะสม

2. การทดลองเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ขั้นนี้เป็นทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยแบ่งเป็น 3 การทดลองย่อยคือการแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน การแปรค่าระหว่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับ และ การอบอ่อนหลังการเคลือบ โดยนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึก FE-SEM เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความหนา และ EDS เพื่อศึกษาองค์ประกอบธาตุของฟิล์ม

3. การทดลองเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์บนแผ่นพลาสติก ขั้นนี้เป็นการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์บนแผ่นพลาสติกที่เคลือบฟิล์มบางโลหะ (อะลูมิเนียม) ซึ่งเป็นการเคลือบทับสองชั้น จากนั้นเพื่อดูลักษณะทางกายภาพและทดสอบการขีดข่วนของฟิล์มที่เคลือบได้

4.3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง แบ่งเป็นสามส่วนดังนี้

1.1.1 เป้าสารเคลือบ (target) อะลูมิเนียม ความบริสุทธิ์ 99.97 %

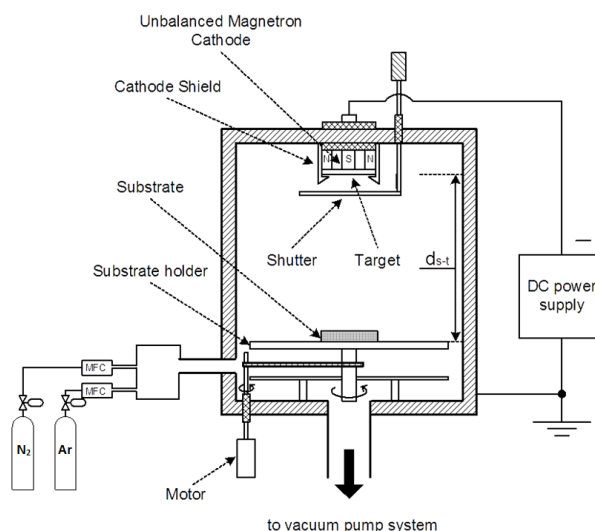
1.1.2 วัสดุรองรับ (Substrate) คือ กระดาษแผ่นเรียบ แผ่นซิลิกอน พลาสติก

1.1.3 แก๊ส (Gas) ประกอบด้วยแก๊ส 2 ชนิดคือ แก๊สอาร์กอน และ แก๊สออกซิเจน

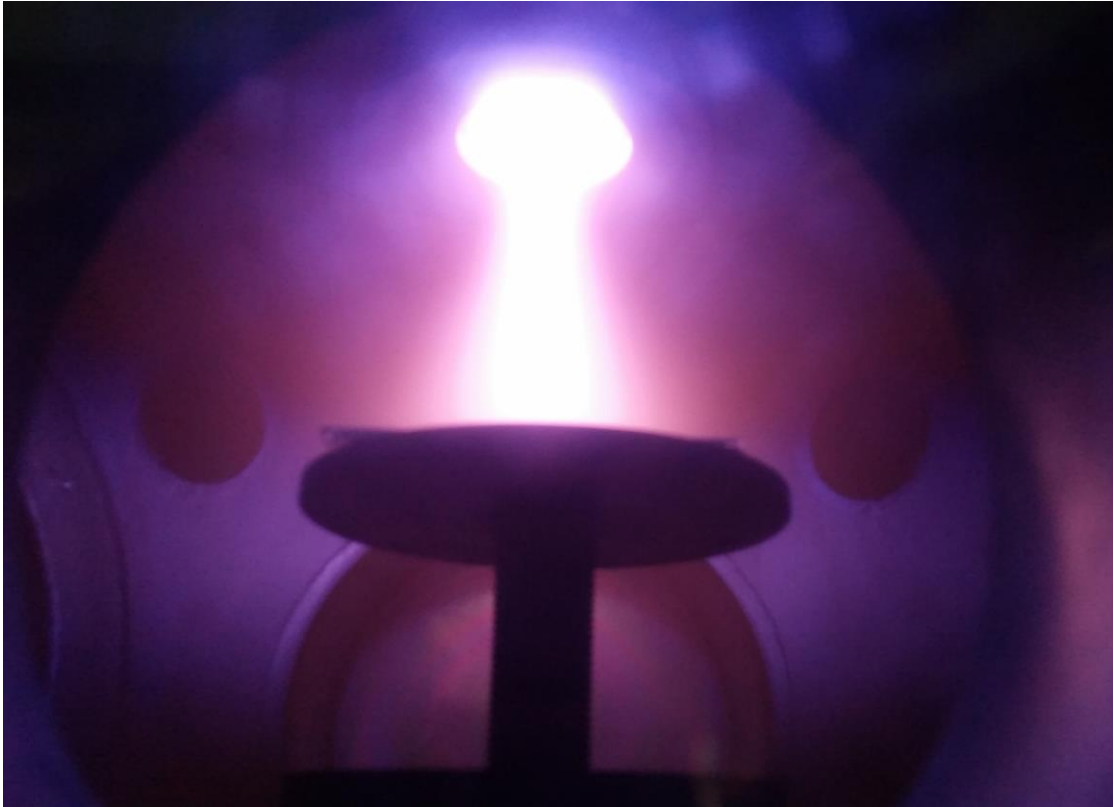
2. เครื่องเคลือบสุญญากาศระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งเป็นเครื่องเคลือบที่ออกแบบสร้างโดยคณะผู้วิจัย ของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (รูปที่ 4-4) ทั้งนี้ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในงานวิจัยนี้เตรียมจากเครื่องเคลือบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมภายใต้ภาวะสุญญากาศ เพื่อให้ฟิล์มบางที่ได้มีสมบัติตามที่ต้องการต้องลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศให้อยู่ในระดับ 10^{-5} mbar ส่วนประกอบของเครื่องเคลือบระบบสปัตเตอริงในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของระบบสุญญากาศ (Vacuum Parts) และ ส่วนของระบบเคลือบ (Coating Parts) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.2.1 ส่วนของระบบสุญญากาศ ประกอบด้วยห้องเคลือบสแตนเลสทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 31.0 cm ความสูง 31.0 cm ชุดระบบเครื่องสูบล้างสุญญากาศของเครื่องเคลือบ ประกอบด้วย เครื่องสูบบแบบแฟรไอแบบระบายความร้อนด้วยน้ำและมีเครื่องสูบล้างโรตารีเป็นเครื่องสูบล้าง ใช้มาตรวัดความดัน ของ PFEIFFER ซึ่งประกอบด้วย ส่วนแสดงผลรุ่น TPG262 และ มาตรวัดความดัน ชนิด Compact Full Range Gauge รุ่น PKR251

1.2.2 ส่วนของระบบเคลือบ เป็นส่วนในการเตรียมฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ประกอบด้วย แมกนีตรอนคาโทด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 cm ระบายความร้อนด้วยน้ำติดตั้งเป้าอะลูมิเนียม (99.97%) พร้อมภาคจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ใช้แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นแก๊สปัดเตอร์ ใช้แก๊สออกซิเจนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นแก๊สไวปฏิกิริยา สำหรับการจ่ายแก๊สในกระบวนการเคลือบควบคุมด้วย Mass Flow Controller ของ MKS type247D



รูปที่ 4-4 ลักษณะและไดอะแกรมของเครื่องเคลือบระบบสปัตเตอร์ริงในโครงการย่อยที่ 3



รูปที่ 4-5 ลักษณะพลาสมาของเครื่องเคลือบระบบสเปตเตอร์ริงในโครงการวิจัยย่อยที่ 3

4.4 ผลและอภิปรายผล

การทดลองนี้เป็นการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ เพื่อนำไปเคลือบเป็นชั้นป้องกันสำหรับฟิล์มบางโลหะที่เคลือบบนแผ่นพลาสติก โดยฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์มีลักษณะสำคัญคือ เป็นฟิล์มที่มีความแข็ง ใสส่งผ่านแสงดี ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 4 ตอน คือ (1) การศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจน (2) การศึกษาผลของระยะห่างของหน้าปัดถึงวัสดุรองรับ (3) การศึกษาผลของอุณหภูมิอบอ่อนหลังการเคลือบ และ (4) การทดสอบการต้านการขีดข่วนของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้

4.4.1 การศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจน

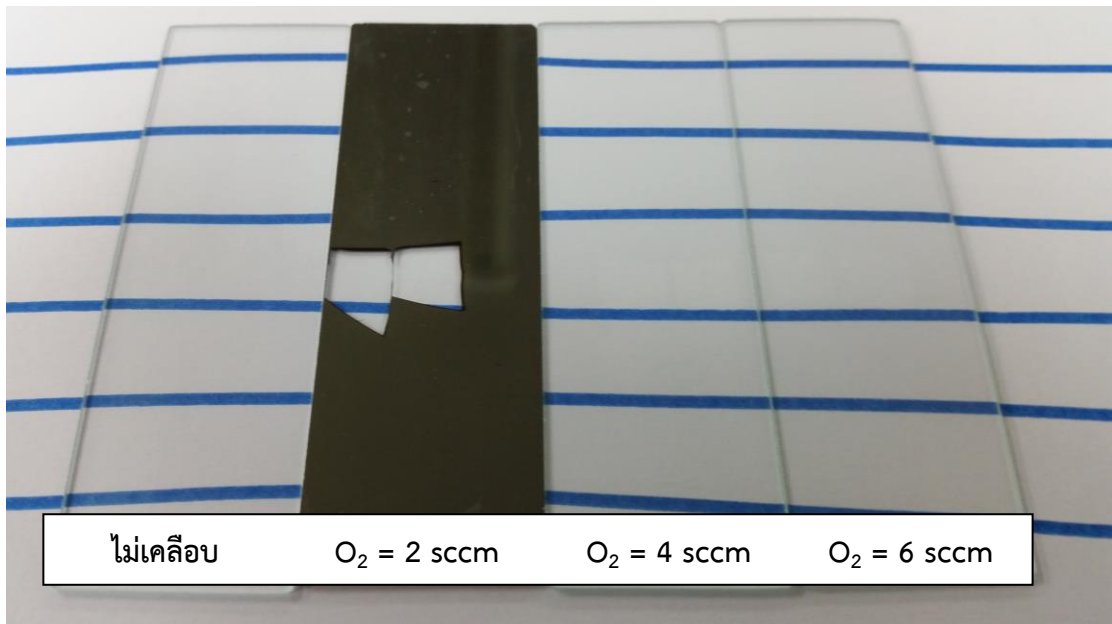
ขั้นนี้เป็นการหาอัตราไหลแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมสำหรับเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยเคลือบฟิล์มตามเงื่อนไขในตารางที่ 4-1 โดยแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน ในช่วง 2- 6 sccm และแปรค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสปัตเตอร์ 2 ค่า คือ 500 mA และ 800 mA

ตารางที่ 4-1 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ แปรค่าอัตราไหลออกซิเจน

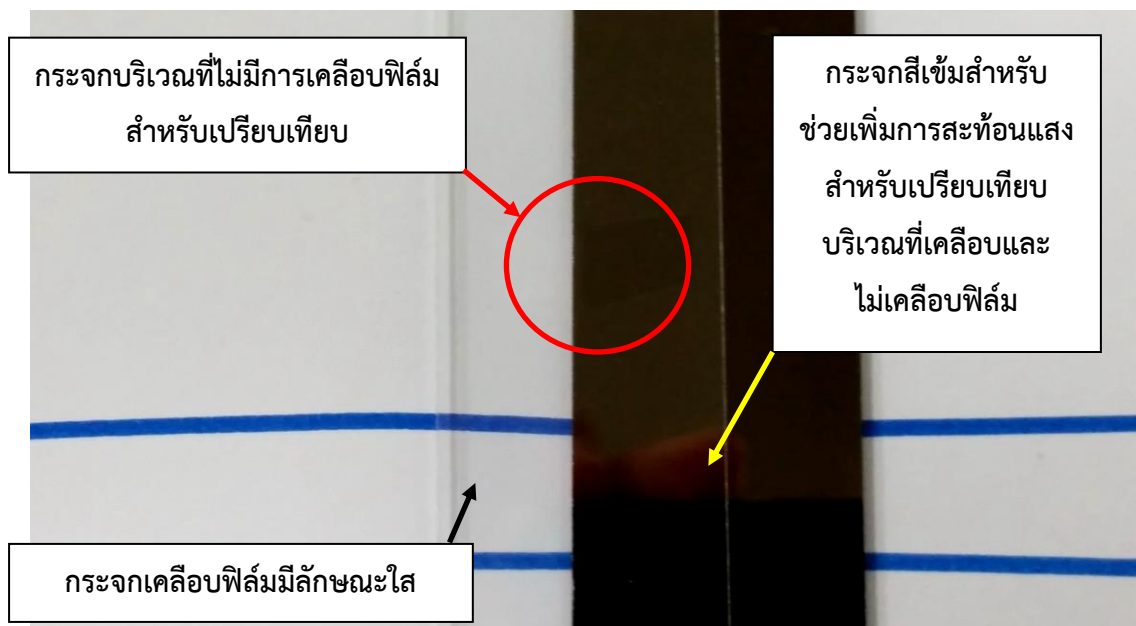
พารามิเตอร์	รายละเอียด	
	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2
เป้าสารเคลือบ	อะลูมิเนียม	
วัสดุรองรับ	กระจก และ ซิลิกอน	
อุณหภูมิขณะเคลือบ	อุณหภูมิห้อง	
การอบอ่อนหลังเคลือบ	ไม่อบอ่อน	
ความดันพื้น (mbar)	5.0×10^{-5}	
ความดันรวม (mbar)	5.0×10^{-3}	
ระยะห่างของหน้าเป้าถึงวัสดุรองรับ (cm)	10	
อัตราไหลแก๊สอาร์กอน (sccm)	20	
อัตราไหลแก๊สออกซิเจน (sccm)	2, 4, 6	2, 4, 6
กระแสไฟฟ้า (mA)	500	800
เวลาเคลือบ (min)	90	

ผลการศึกษาพบว่า

1. ฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีลักษณะใส ส่องผ่านแสงดี (รูปที่ 4-6 และ รูปที่ 4-7)
2. ผลจากเทคนิค XRD ไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงว่าฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐาน (รูปที่ 4-8 และ รูปที่ 4-9) ยกเว้นที่อัตราไหลแก๊สเท่ากับ 2 sccm
3. องค์ประกอบธาตุของฟิล์มจากเทคนิค EDS พบว่า ฟิล์มที่เคลือบได้มี อะลูมิเนียมและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนต่าง ๆ กัน (รูปที่ 4-10 และ รูปที่ 4-11)
4. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาในช่วง $0.15 - 3.83 \mu\text{m}$ (ชุด 500 mA) และ $0.17 - 8.15 \mu\text{m}$ (ชุด 800 mA) โดยฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเกาะกัน แต่ไม่จับตัวแน่นเป็นโครงสร้างที่ชัดเจน (รูปที่ 4-12 และ รูปที่ 4-13)



(a)

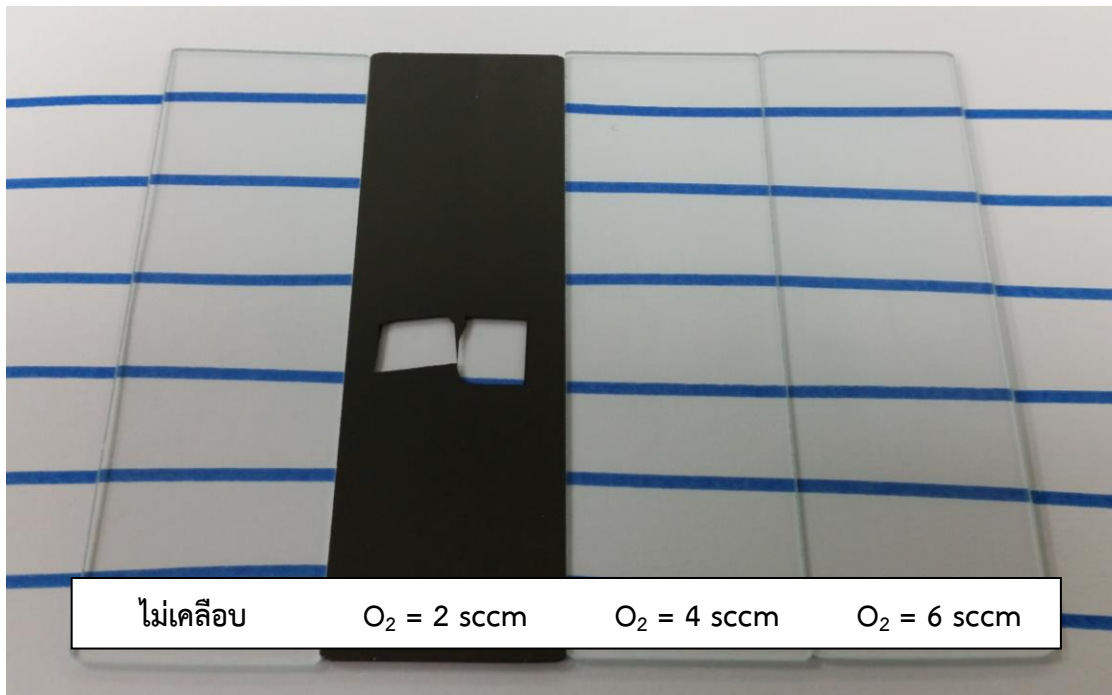


(b)

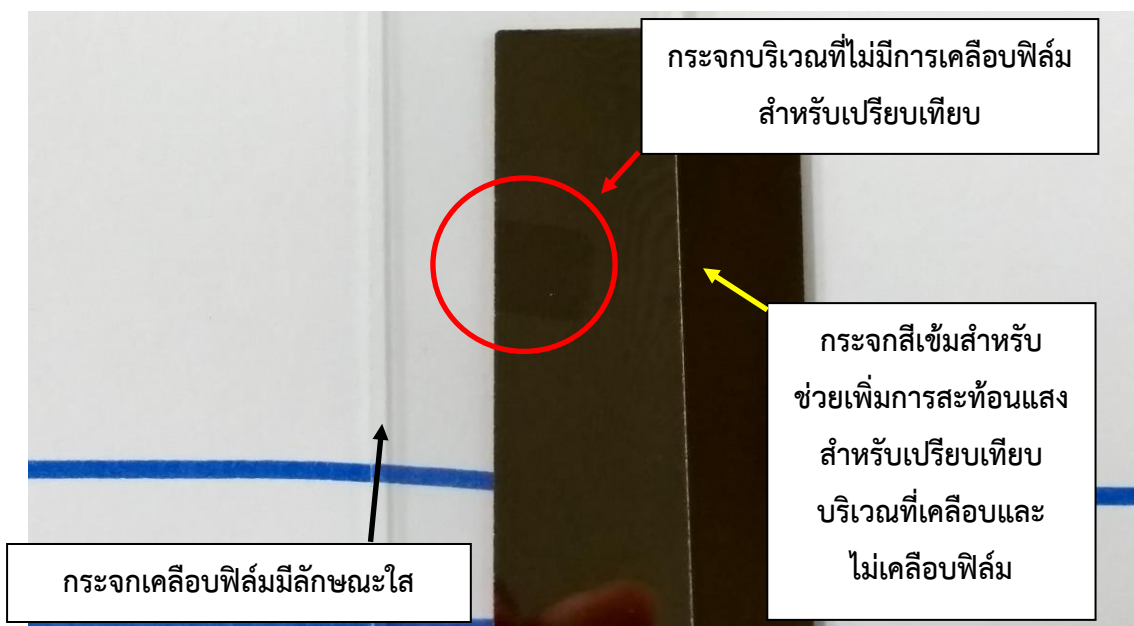
รูปที่ 4-6 ลักษณะของฟิล์มที่เคลือบได้ เมื่อใช้กระแส 500 mA และแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน

(a) เปรียบเทียบลักษณะของฟิล์มที่เคลือบบนกระจกสไลด์

(b) ตัวอย่างตำแหน่งของชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับบริเวณที่เคลือบ



(a)

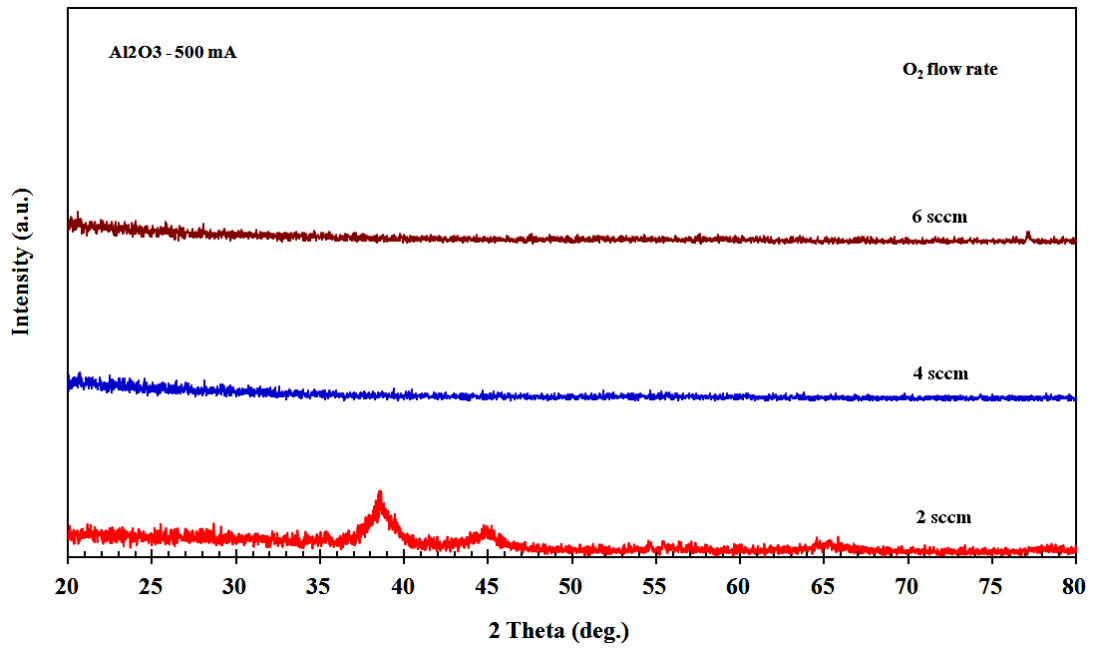


(b)

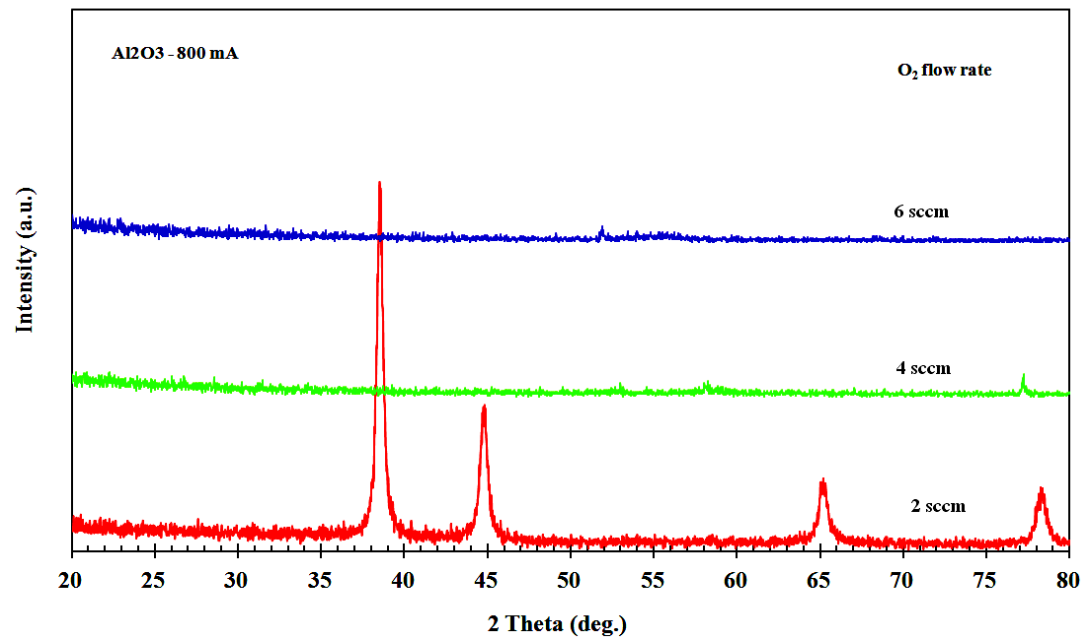
รูปที่ 4-7 ลักษณะของฟิล์มที่เคลือบได้ เมื่อใช้กระแส 800 mA และแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน

(a) เปรียบเทียบลักษณะของฟิล์มที่เคลือบบนกระจกสไลด์

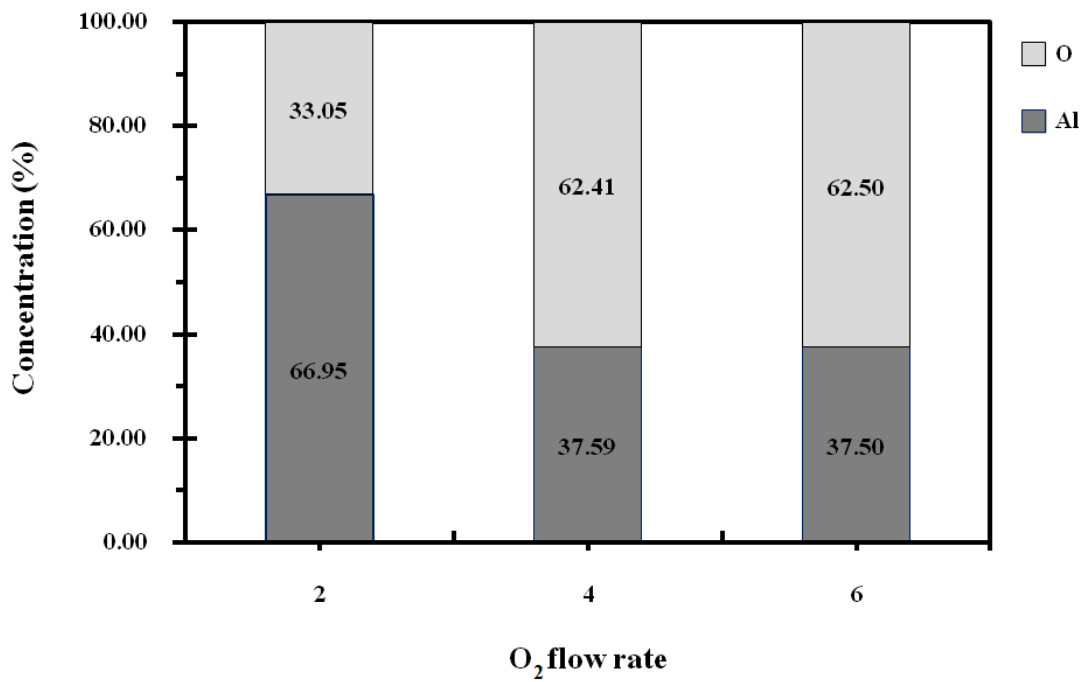
(b) ตัวอย่างตำแหน่งของชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับบริเวณที่เคลือบ



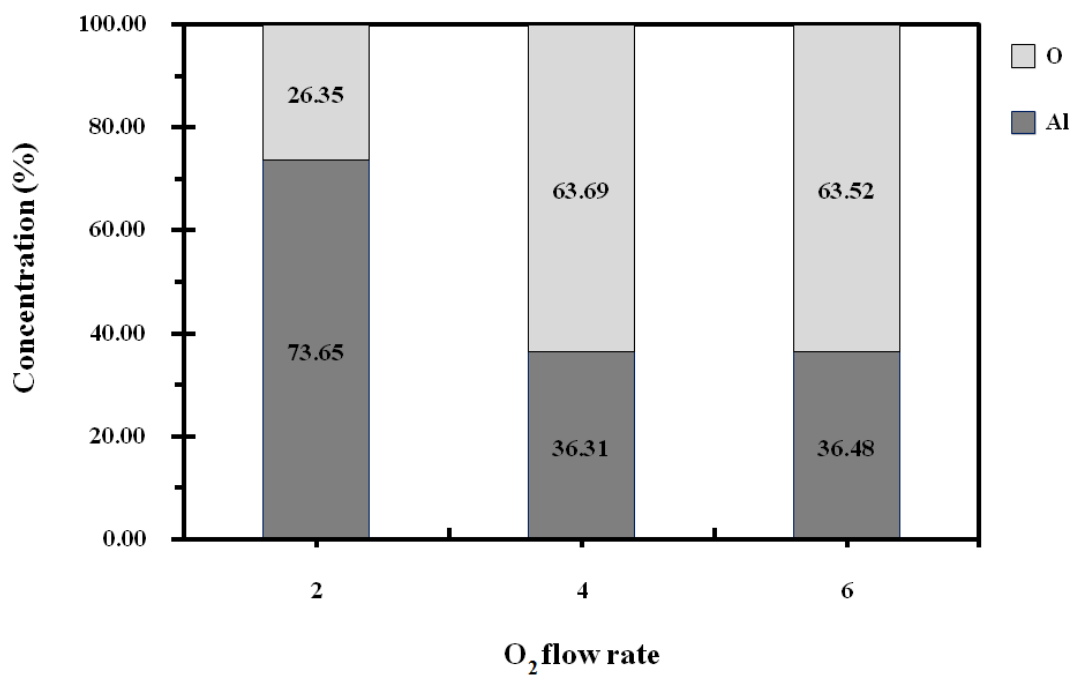
รูปที่ 4-8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อใช้กระแส 500 mA และแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน



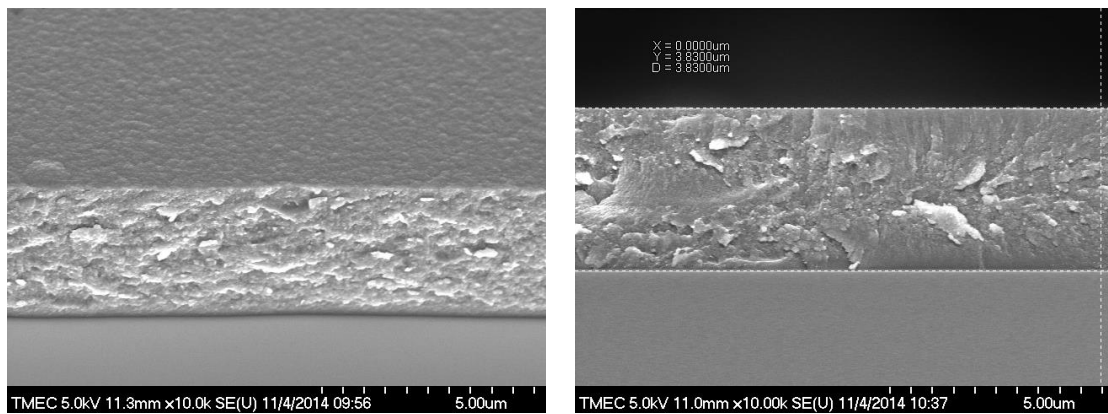
รูปที่ 4-9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อใช้กระแส 800 mA และแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน



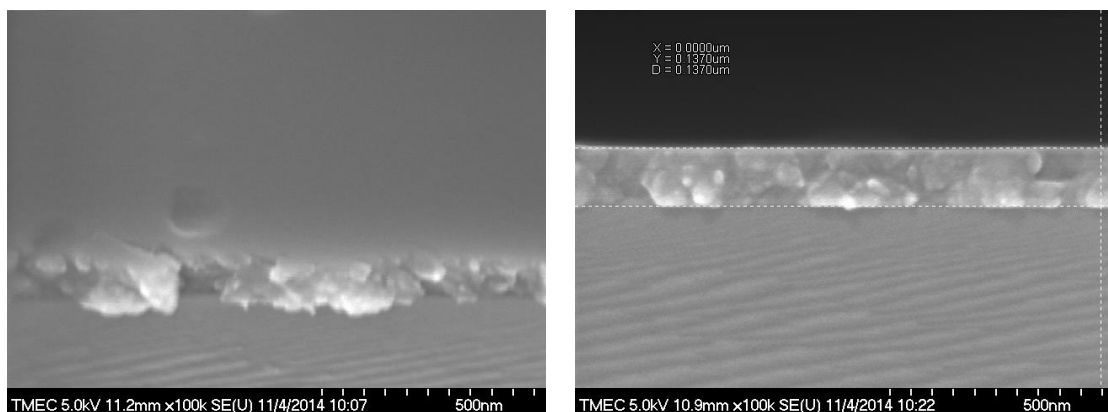
รูปที่ 4-10 องค์ประกอบธาตุของฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อใช้กระแส 500 mA
และแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน



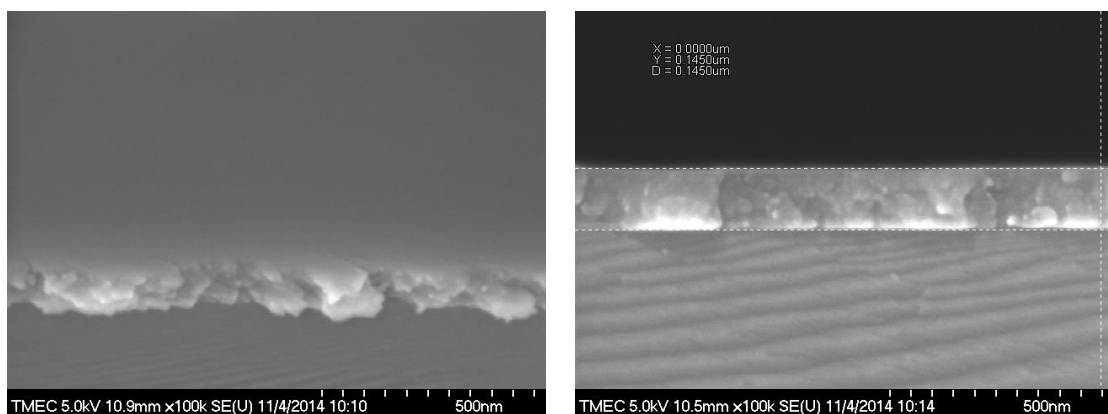
รูปที่ 4-11 องค์ประกอบธาตุของฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อใช้กระแส 800 mA
และแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน



(a)

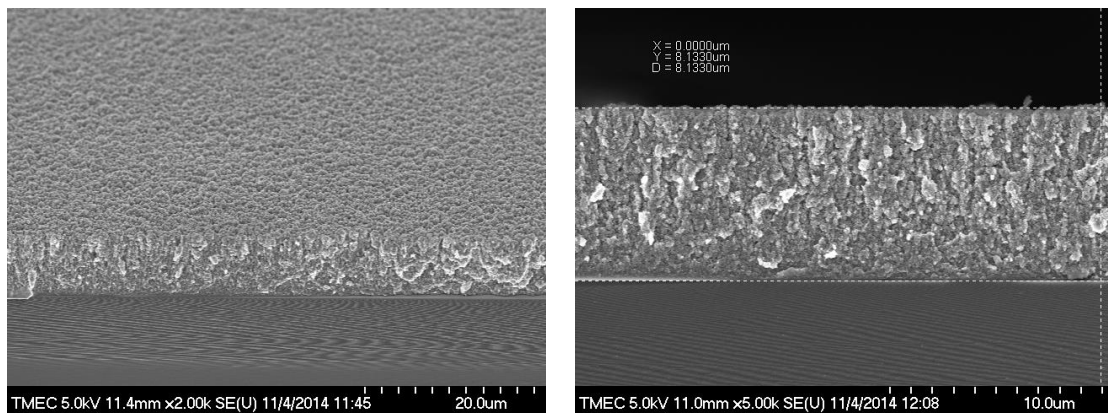


(b)

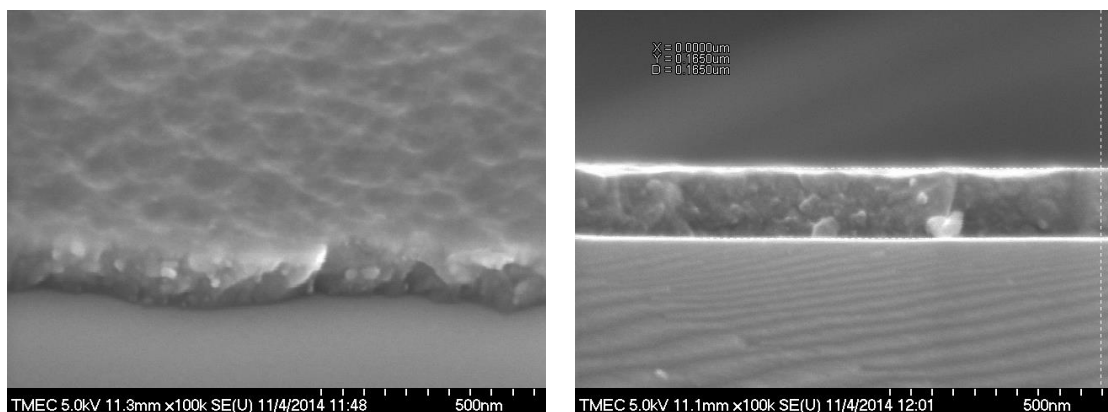


(c)

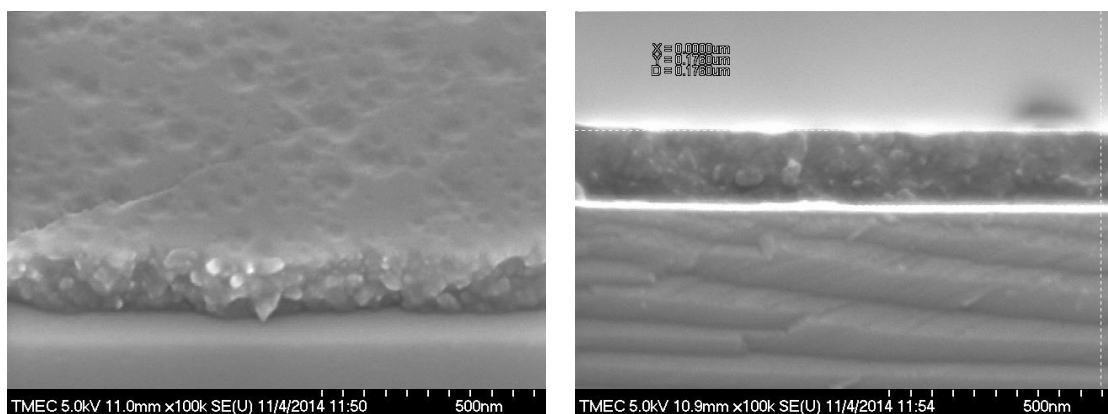
- รูปที่ 4-12 โครงสร้าง ลักษณะพื้นผิว และภาคตัดขวางของฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อใช้กระแส 500 mA และแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน
- (a) อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 2 sccm
 - (b) อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 4 sccm
 - (c) อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 6 sccm



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4-13 โครงสร้าง ลักษณะพื้นผิว และภาคตัดขวางของฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อใช้กระแส 800 mA และแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน

- (a) อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 2 sccm
- (b) อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 4 sccm
- (c) อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 6 sccm

4.4.2 การศึกษาผลของระยะห่างของหน้าปัดถึงวัสดุรองรับ

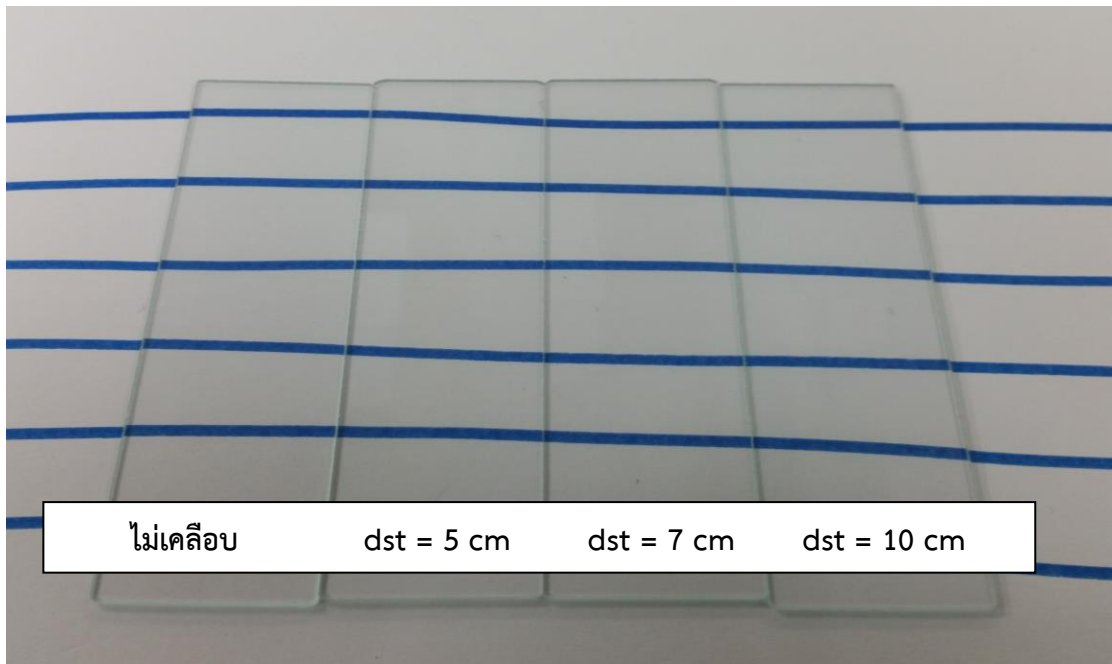
ขั้นนี้เป็นการหาระยะห่างของหน้าปัดสารเคลือบถึงวัสดุรองรับที่เหมาะสมสำหรับเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ การทดลองนี้ได้เคลือบฟิล์มตามเงื่อนไขในตารางที่ 4-2 โดยแปรค่าระยะห่างระหว่างปาดสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ในช่วง 5 - 10 cm

ตารางที่ 4-2 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ แปรค่าระยะห่างของหน้าปัดถึงวัสดุรองรับ

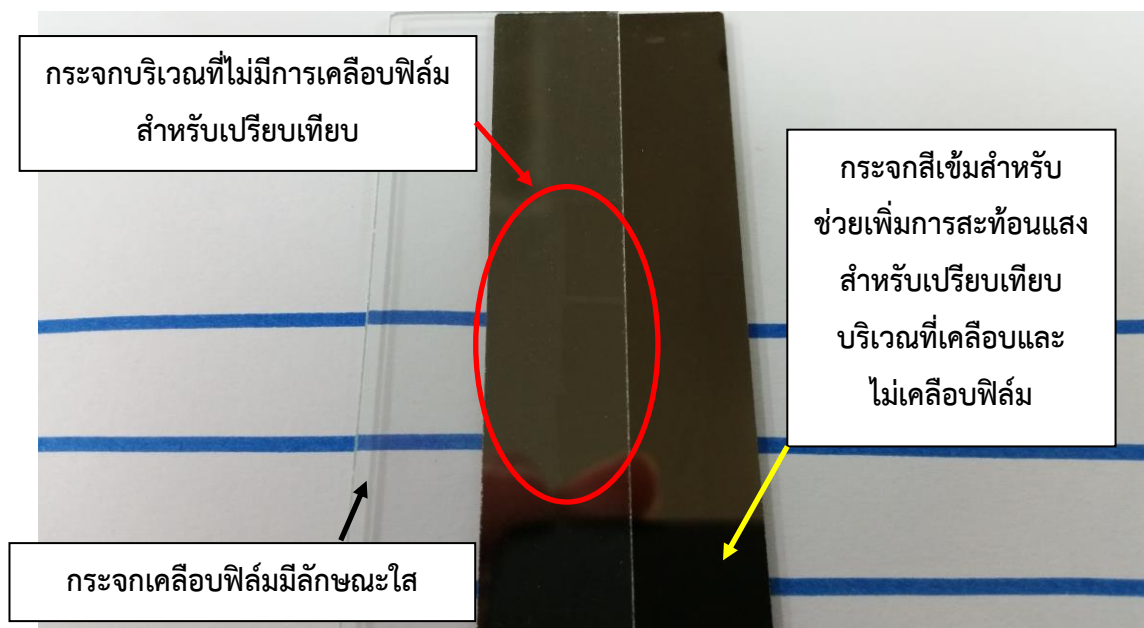
พารามิเตอร์	รายละเอียด
ปาดสารเคลือบ	อะลูมิเนียม
วัสดุรองรับ	กระจก และ ซิลิกอน
อุณหภูมิขณะเคลือบ	อุณหภูมิห้อง
การอบอ่อนหลังเคลือบ	ไม่อบอ่อน
ความดันพื้น (mbar)	5.0×10^{-5}
ความดันรวม (mbar)	5.0×10^{-3}
ระยะห่างของหน้าปัดถึงวัสดุรองรับ (cm)	5, 7, 10
อัตราไหลแก๊สอาร์กอน (sccm)	20
อัตราไหลแก๊สออกซิเจน (sccm)	6
กระแสไฟฟ้า (mA)	800
เวลาเคลือบ (min)	90

ผลการทดลองพบว่า

1. ฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีลักษณะใส ส่องผ่านแสงดี (รูปที่ 4-14)
2. ผลจากเทคนิค XRD ไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงว่าฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐาน (รูปที่ 4-15)
3. องค์ประกอบธาตุของฟิล์มจากเทคนิค EDS พบว่า ฟิล์มที่เคลือบได้มี อะลูมิเนียมและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน โดยมีอะลูมิเนียมประมาณ 63%-65% และออกซิเจนประมาณ 34%-36% (รูปที่ 4-16)
4. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาในช่วง 0.08 – 0.17 μm (โดยฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเกาะกัน แต่ไม่จับตัวแน่นเป็นโครงสร้างที่ชัดเจน (รูปที่ 4-17)



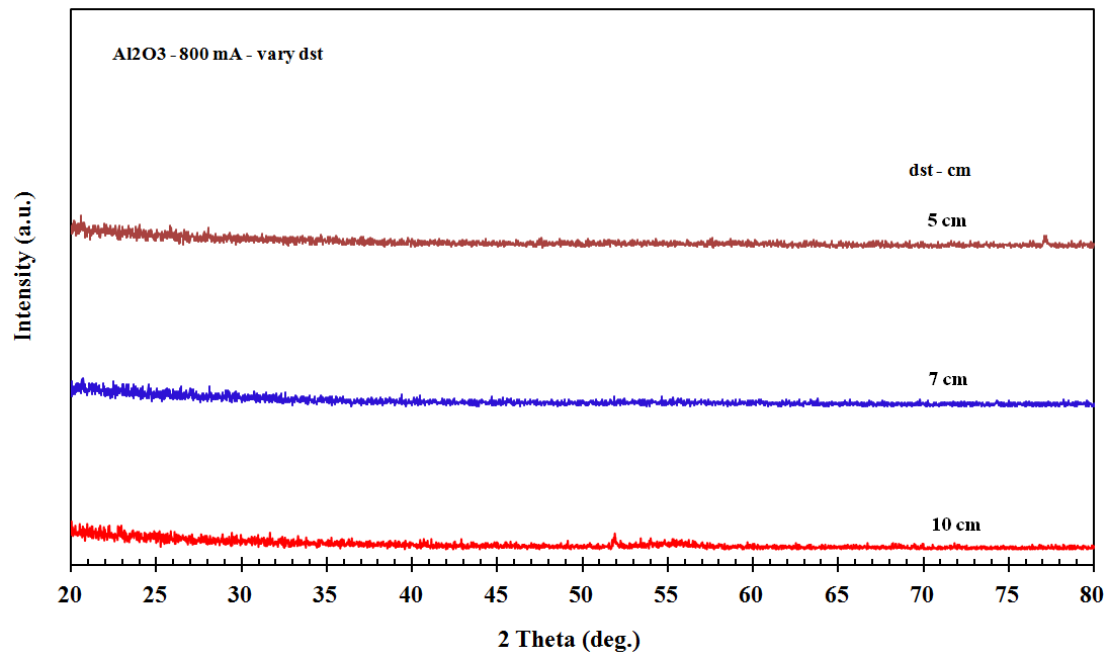
(a)



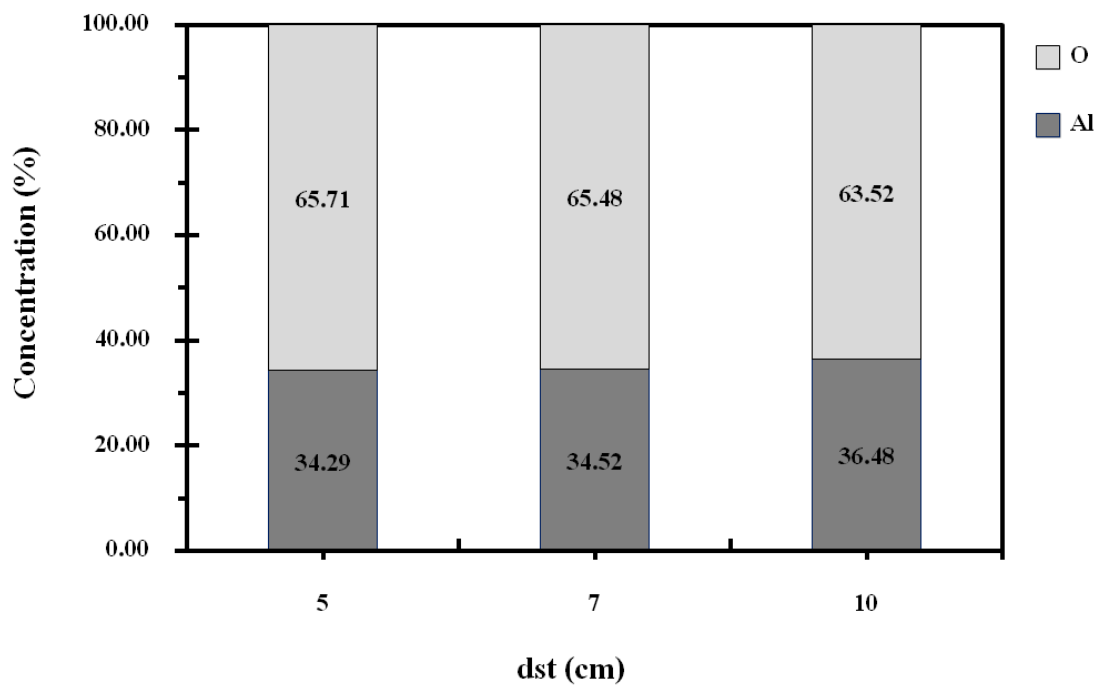
(b)

รูปที่ 4-14 ลักษณะของฟิล์มที่เคลือบได้ เมื่อใช้กระแส 800 mA
และแปรค่าระยะห่างของหน้าปัดถึงวัสดุรองรับ

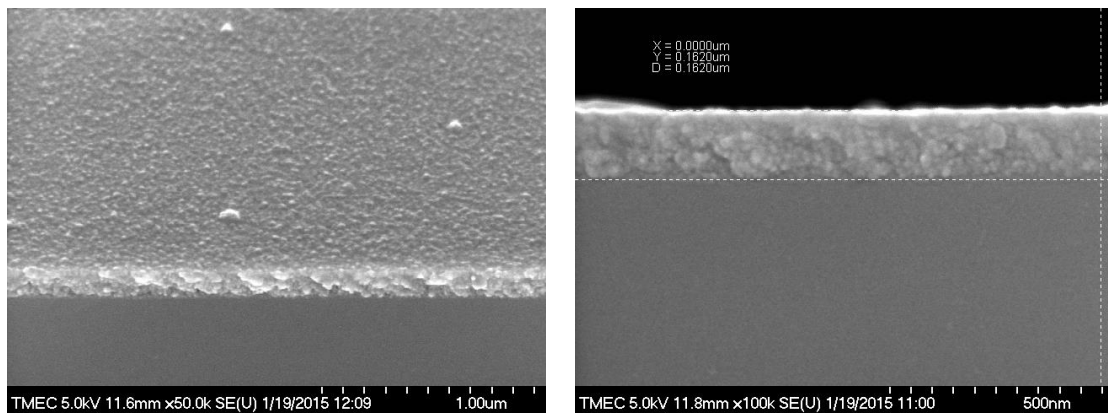
- (a) เปรียบเทียบลักษณะของฟิล์มที่เคลือบบนกระจกสไลด์
- (b) ตัวอย่างตำแหน่งของชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับบริเวณที่เคลือบ



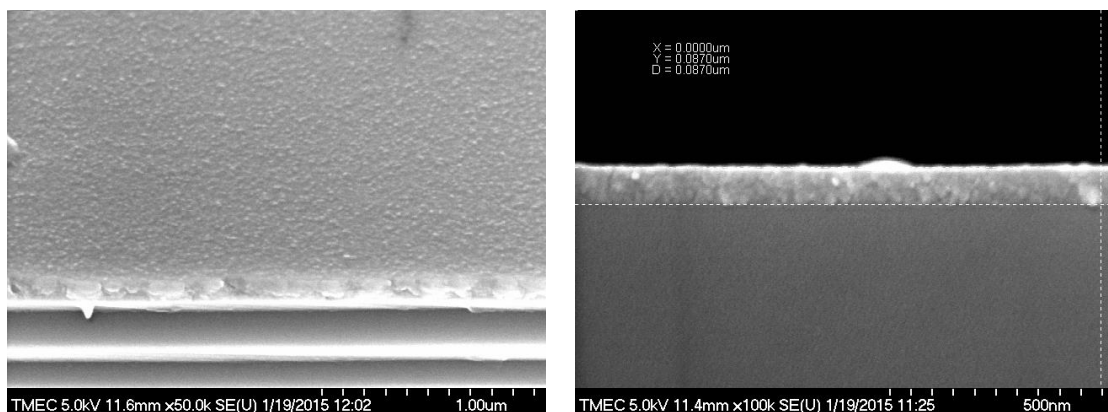
รูปที่ 4-15 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่เคลือบได้ เมื่อใช้กระแส 800 mA และแปรค่าระยะห่างของหน้าปัดถึงวัสดุรองรับ



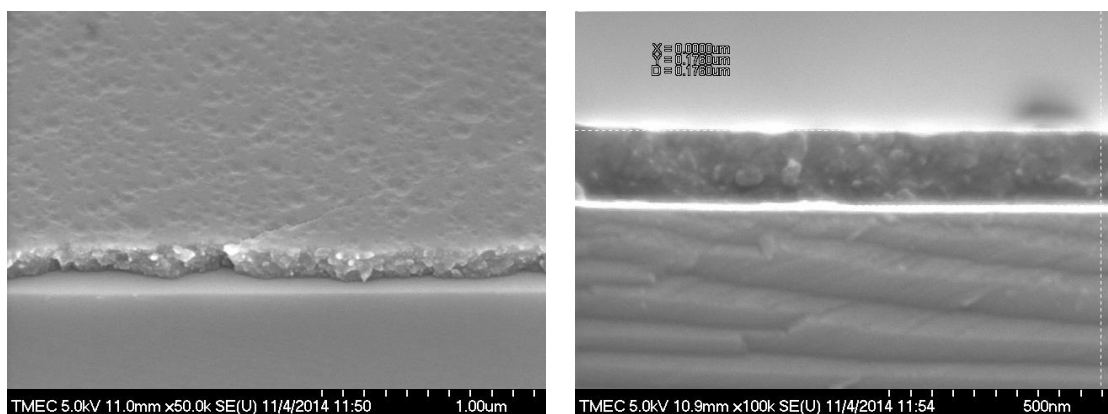
รูปที่ 4-16 องค์ประกอบธาตุของฟิล์มที่เคลือบได้ เมื่อใช้กระแส 800 mA และแปรค่าระยะห่างของหน้าปัดถึงวัสดุรองรับ



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4-17 โครงสร้าง ลักษณะพื้นผิว และภาคตัดขวางของฟิล์มที่เคลือบได้ เมื่อใช้กระแส 800 mA และแปรค่าระยะห่างของหน้าเป่าถึงวัสดุรองรับ

(a) ระยะห่างของหน้าเป่าถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 5 cm

(b) ระยะห่างของหน้าเป่าถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 7 cm

(c) ระยะห่างของหน้าเป่าถึงวัสดุรองรับเท่ากับ 10 cm

4.4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิอบอ่อนหลังการเคลือบ

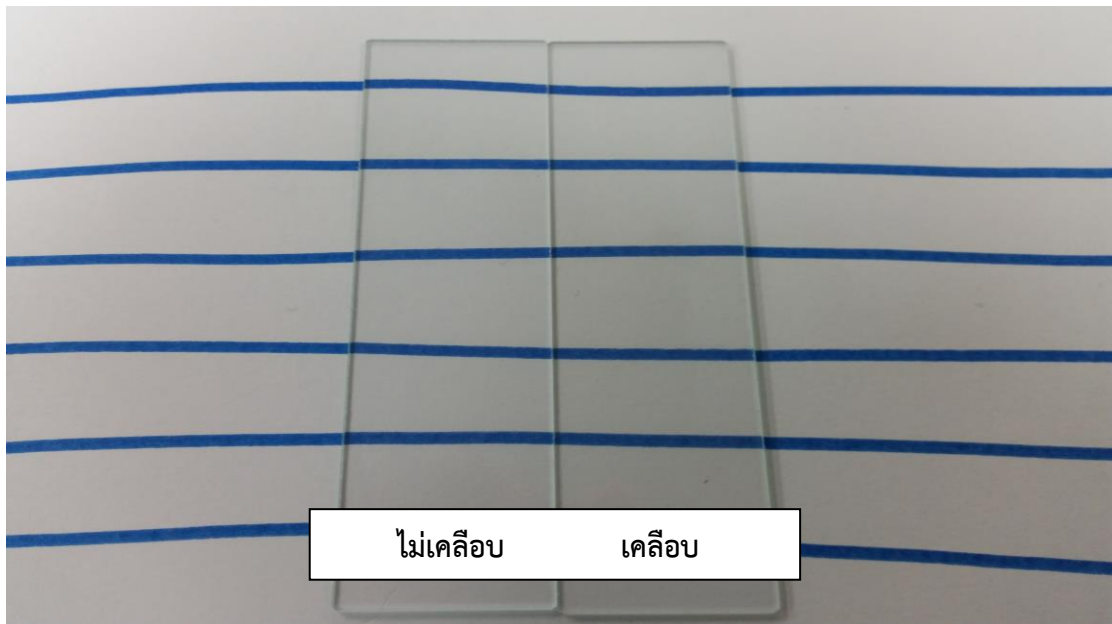
ขั้นนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิอบอ่อนหลังการเคลือบที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มที่เตรียมได้ โดยการทดลองนี้เคลือบฟิล์มตามเงื่อนไขในตารางที่ 4-3 จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 °C แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้าง

ตารางที่ 4-3 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ เปรียบเทียบการอบอ่อน

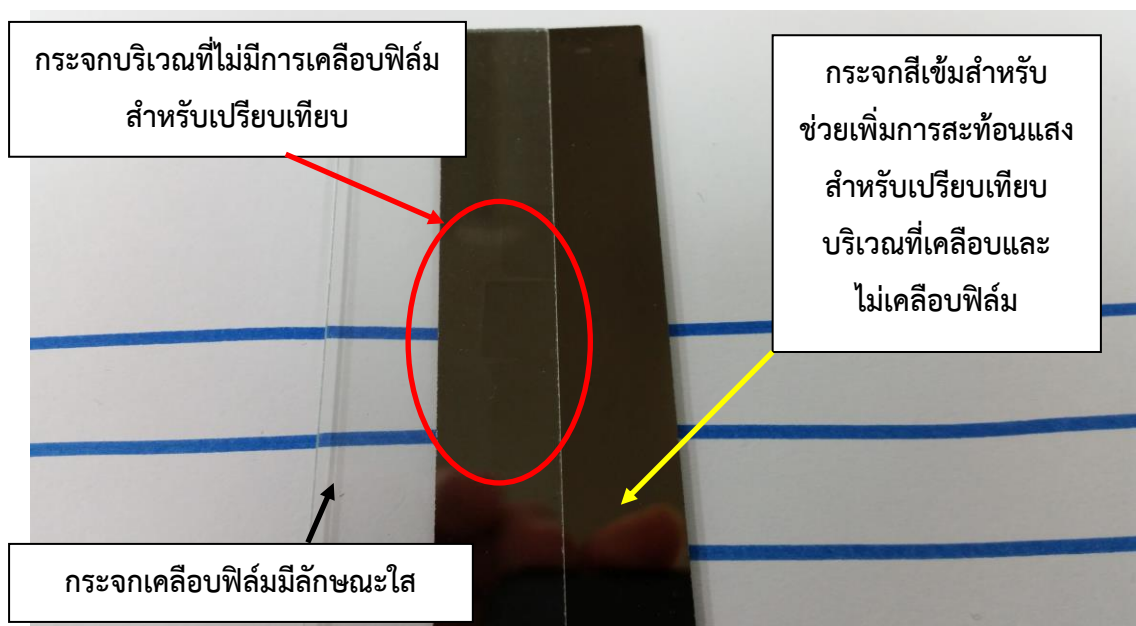
พารามิเตอร์	รายละเอียด
เป้าสารเคลือบ	อะลูมิเนียม
วัสดุรองรับ	กระจก และ ซิลิกอน
อุณหภูมิขณะเคลือบ	อุณหภูมิห้อง
การอบอ่อนหลังเคลือบ	อบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 °C
ความดันพื้น (mbar)	5.0×10^{-5}
ความดันรวม (mbar)	5.0×10^{-3}
ระยะห่างของหน้าเป้าถึงวัสดุรองรับ (cm)	5
อัตราไหลแก๊สอาร์กอน (sccm)	20
อัตราไหลแก๊สออกซิเจน (sccm)	6
กระแสไฟฟ้า (mA)	800
เวลาเคลือบ (min)	90

ผลการทดลองพบว่า

1. ฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีลักษณะใส ส่องผ่านแสงดี (รูปที่ 4-18)
2. ผลจากเทคนิค XRD ไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงว่าฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐาน (รูปที่ 4-19)
3. องค์ประกอบธาตุของฟิล์มจากเทคนิค EDS พบว่า ฟิล์มที่เคลือบได้มี อะลูมิเนียมและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน โดยมีอะลูมิเนียมประมาณ 65% และออกซิเจนประมาณ 35% (รูปที่ 4-20)
4. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาในช่วง 0.14 – 0.15 μm (โดยฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเกาะกัน แต่ไม่จับตัวแน่นเป็นโครงสร้างที่ชัดเจน (รูปที่ 4-21)



(a)

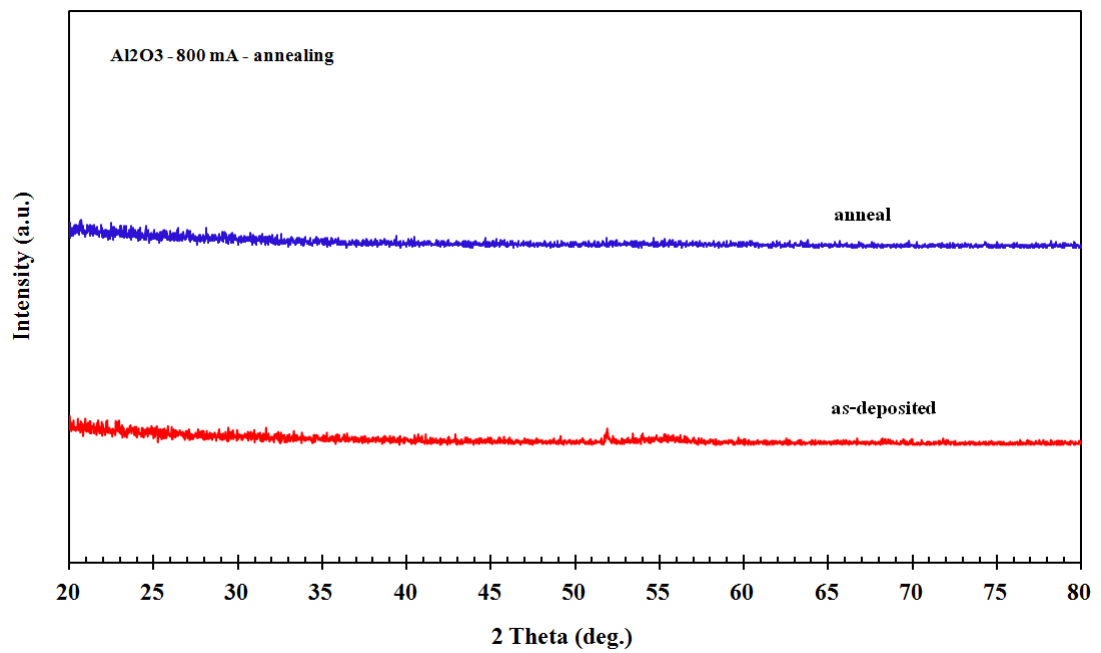


(b)

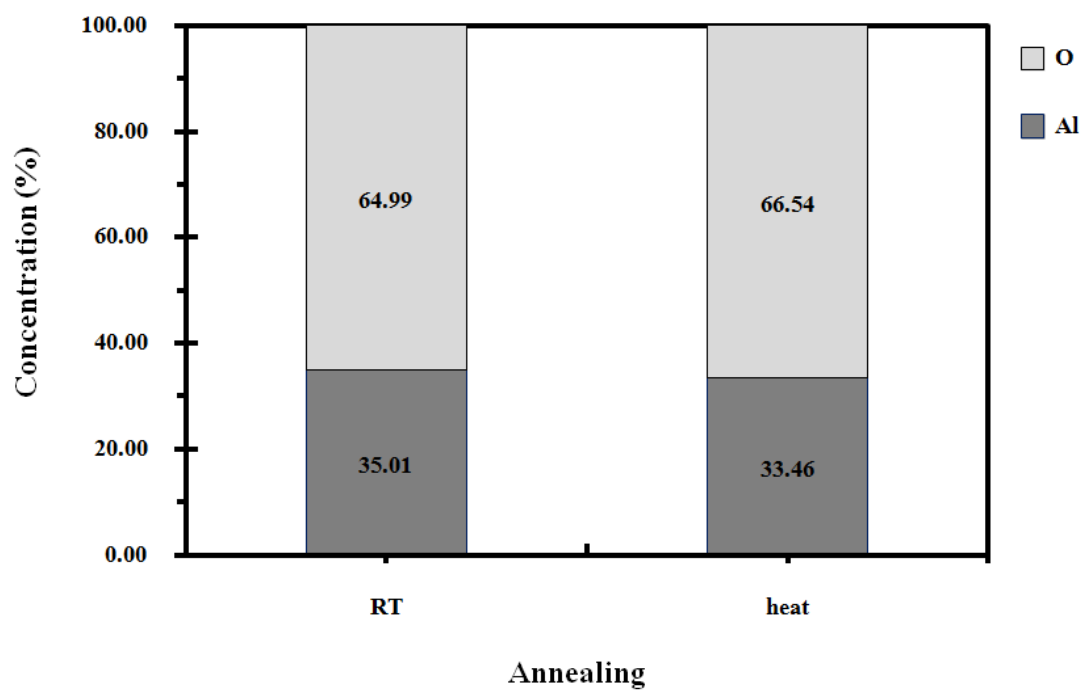
รูปที่ 4-18 ลักษณะของฟิล์มที่เคลือบได้ เมื่อใช้กระแส 800 mA ก่อนนำไปปอบอ่อน

(a) เปรียบเทียบลักษณะของฟิล์มที่เคลือบบนกระจกสไลด์

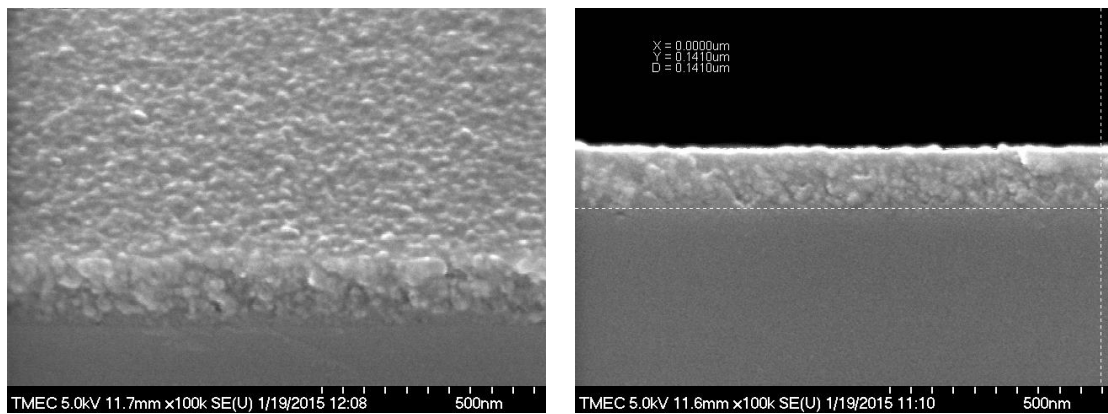
(b) ตัวอย่างตำแหน่งของชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับบริเวณที่เคลือบ



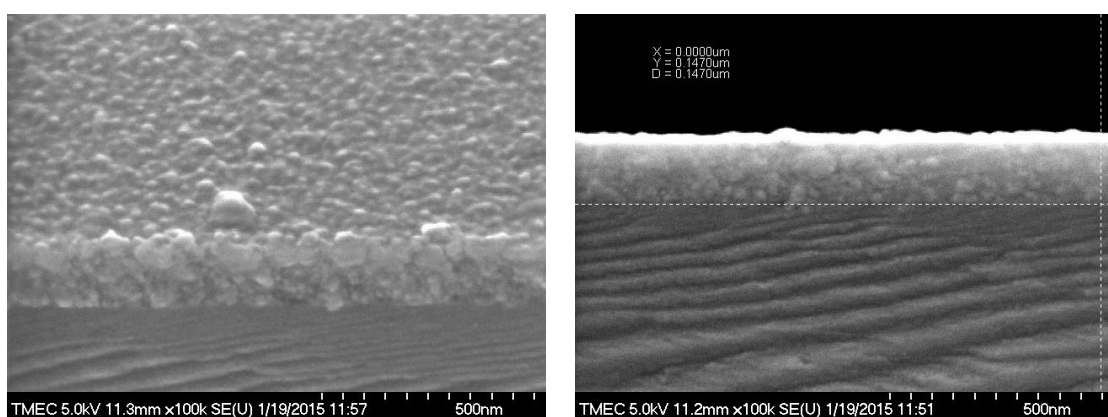
รูปที่ 4-19 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่เคลือบได้ เมื่อใช้กระแส 800 mA
เปรียบเทียบก่อนและหลังการอบอ่อน



รูปที่ 4-20 องค์ประกอบธาตุของฟิล์มที่เคลือบเมื่อใช้กระแส 800 mA
เปรียบเทียบก่อนและหลังการอบอ่อน



(a)



(b)

รูปที่ 4-21 โครงสร้าง ลักษณะพื้นผิว และภาคตัดขวางของฟิล์มที่เคลือบได้ เมื่อใช้กระแส 800 mA
เปรียบเทียบก่อนและหลังการอบอ่อน

(a) ก่อนอบอ่อน

(b) หลังอบอ่อน

4.4.4 การทดสอบการด้านการดูดซับของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์

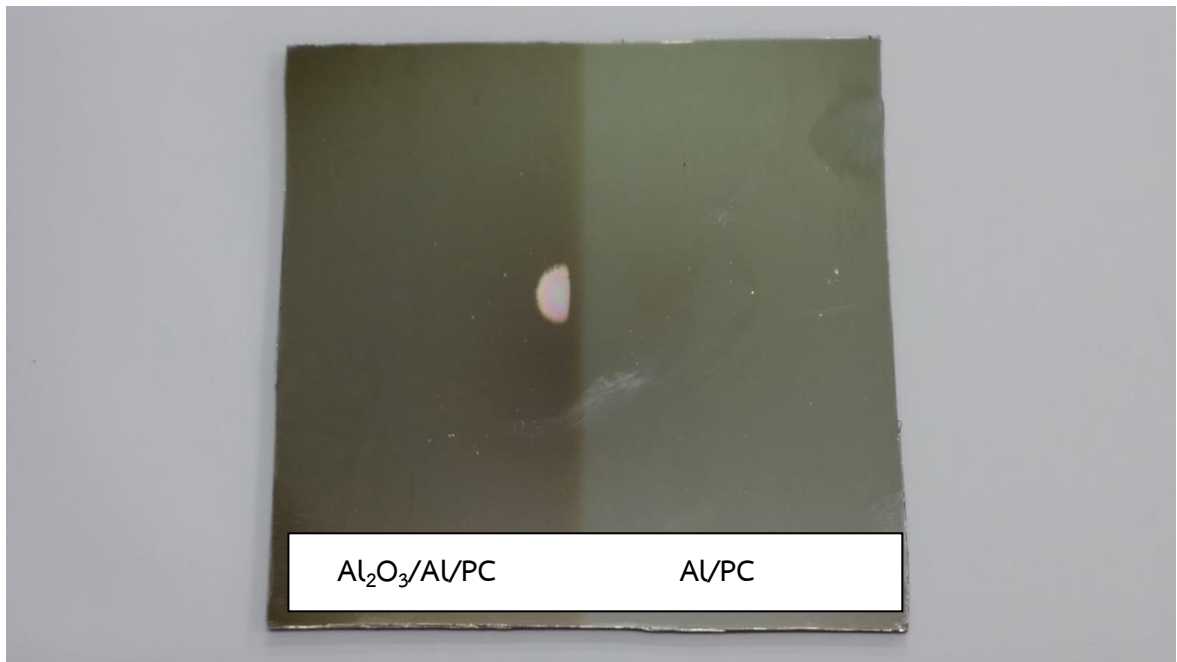
ขั้นนี้เป็นการทดลองเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ซ้อนทับบนฟิล์มบางโลหะที่เคลือบบนพลาสติกจากนั้นนำไปทดสอบการดูดซับด้วยกระดาษทราย ตารางที่ 4-4 แสดงเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4-4 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ เปรียบเทียบการอบอ่อน

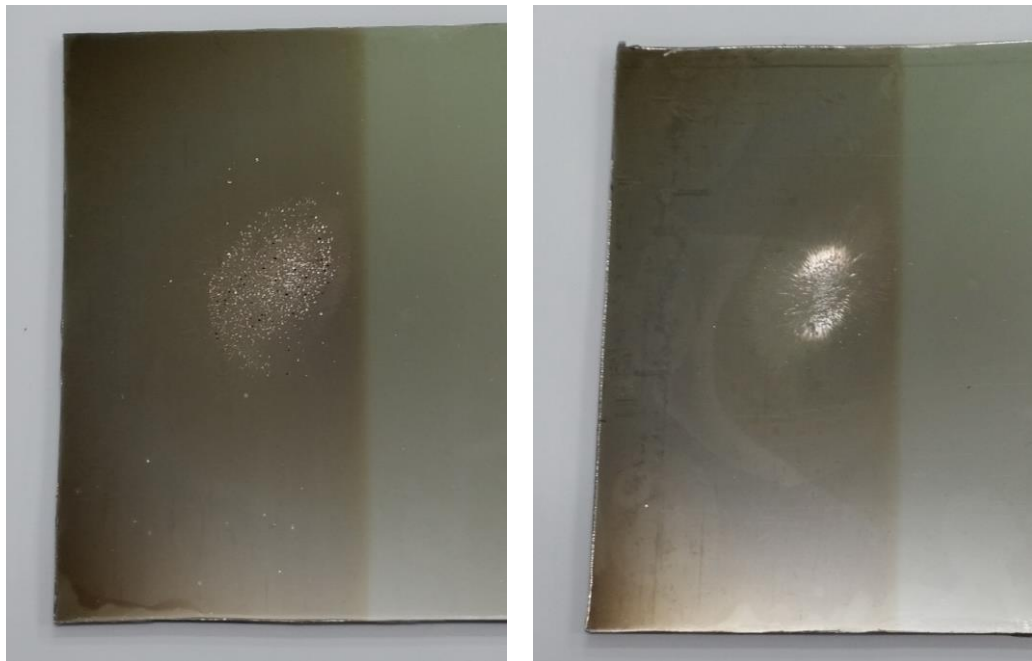
พารามิเตอร์	รายละเอียด	
	ฟิล์ม Al	ฟิล์ม Al ₂ O ₃
เป้าสารเคลือบ	อะลูมิเนียม	
วิธีเคลือบ	สปีดเตอริง	รีแอคทีฟสปีดเตอริง
วัสดุรองรับ	กระจก และ ซิลิกอน	
อุณหภูมิขณะเคลือบ	อุณหภูมิห้อง	
การอบอ่อนหลังเคลือบ	ไม่อบอ่อน	
ความดันพื้น (mbar)	5.0×10^{-5}	
ความดันรวม (mbar)	5.0×10^{-3}	
ระยะห่างของหน้าเป้าถึงวัสดุรองรับ (cm)	10	
อัตราไหลแก๊สอาร์กอน (sccm)	20	
กระแสไฟฟ้า (mA)	500	
เวลาเคลือบ (min)	5	60

ผลการทดลองพบว่า

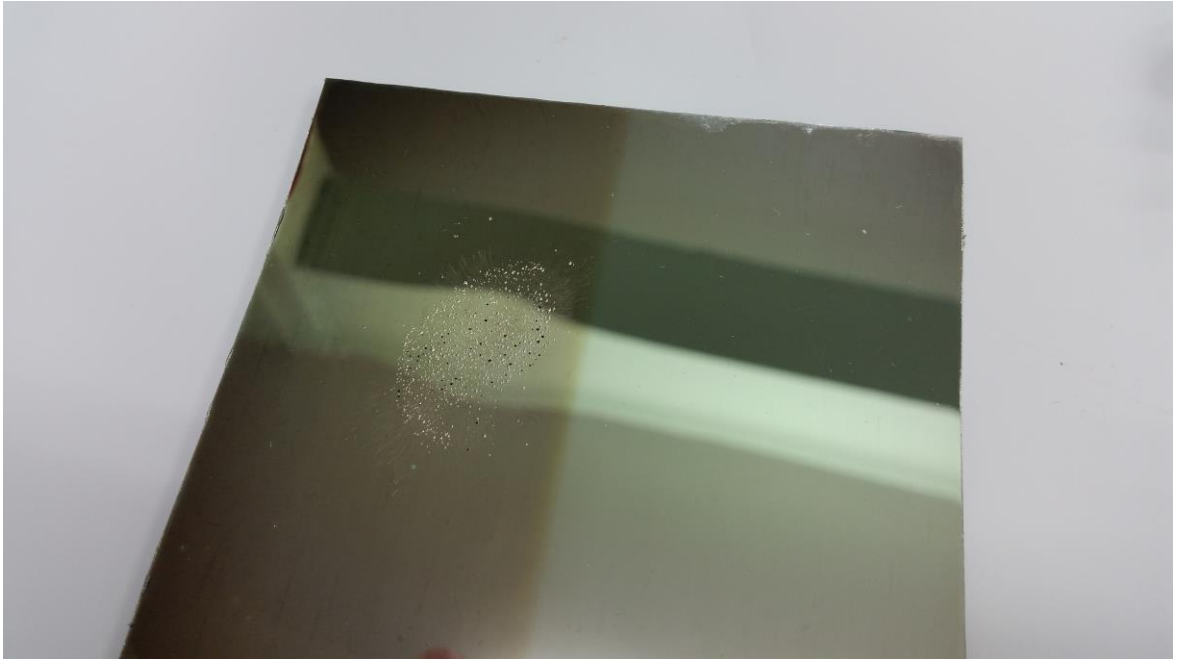
1. ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบทับฟิล์มอะลูมิเนียมบนแผ่นพลาสติกมีสีที่เข้มขึ้นสะท้อนแสงดี มีการส่งผ่านแสงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (รูปที่ 4-22)
2. รูปที่ 4-23 แสดงลักษณะของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เกิดข้อบกพร่องในส่วนกลางชิ้นงานเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเคลือบทำให้ชั้นเคลือบหลุดลอกเล็กน้อย
3. รูปที่ 4.24 แสดงลักษณะของฟิล์มก่อนทดสอบการดูดซับ
4. ผลการทดสอบการดูดซับโดยใช้น้ำหนักถ่วงบนกระดาษทรายแล้วลาก พบว่าเกิดริ้วรอยการดูดซับทั้งในส่วนฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์และฟิล์มอะลูมิเนียม แต่ฟิล์มอะลูมิเนียมจะมีรอยมากกว่าในส่วนของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (รูปที่ 4-25)



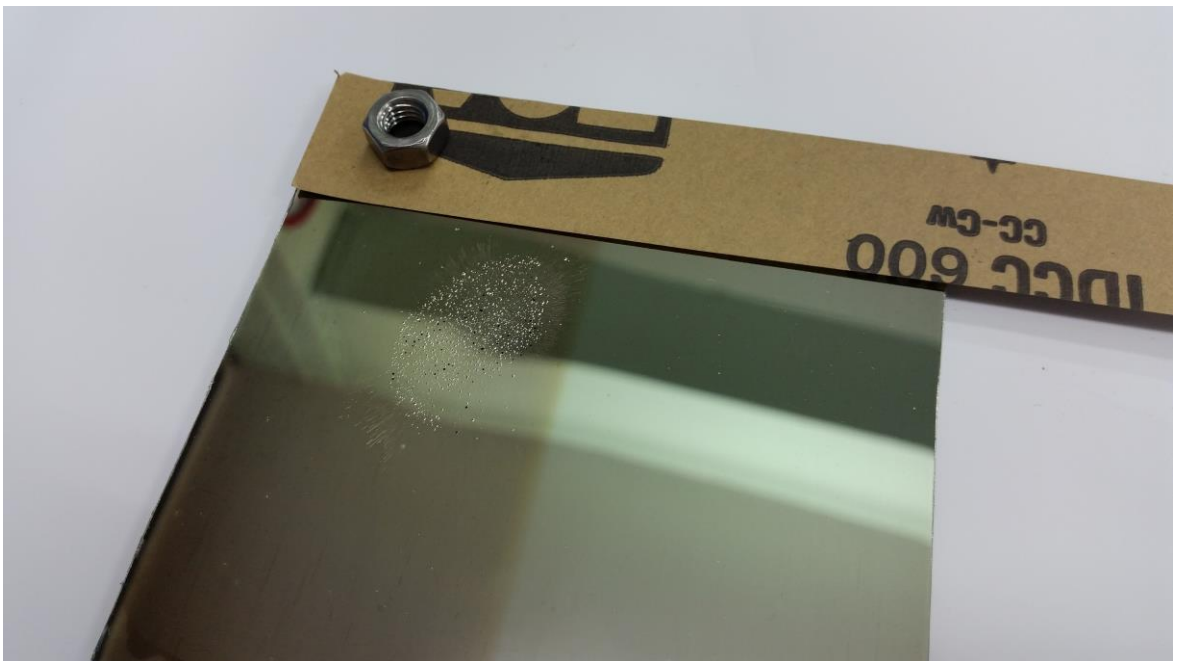
รูปที่ 4-22 ลักษณะของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบทับฟิล์มอะลูมิเนียมบนแผ่นพลาสติก จะเห็นลักษณะของสีที่แตกต่างกันได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4-23 ลักษณะของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เกิดข้อบกพร่องเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเคลือบ อาจทำให้พลาสติกเริ่มเปลี่ยนรูปร่าง



(a)

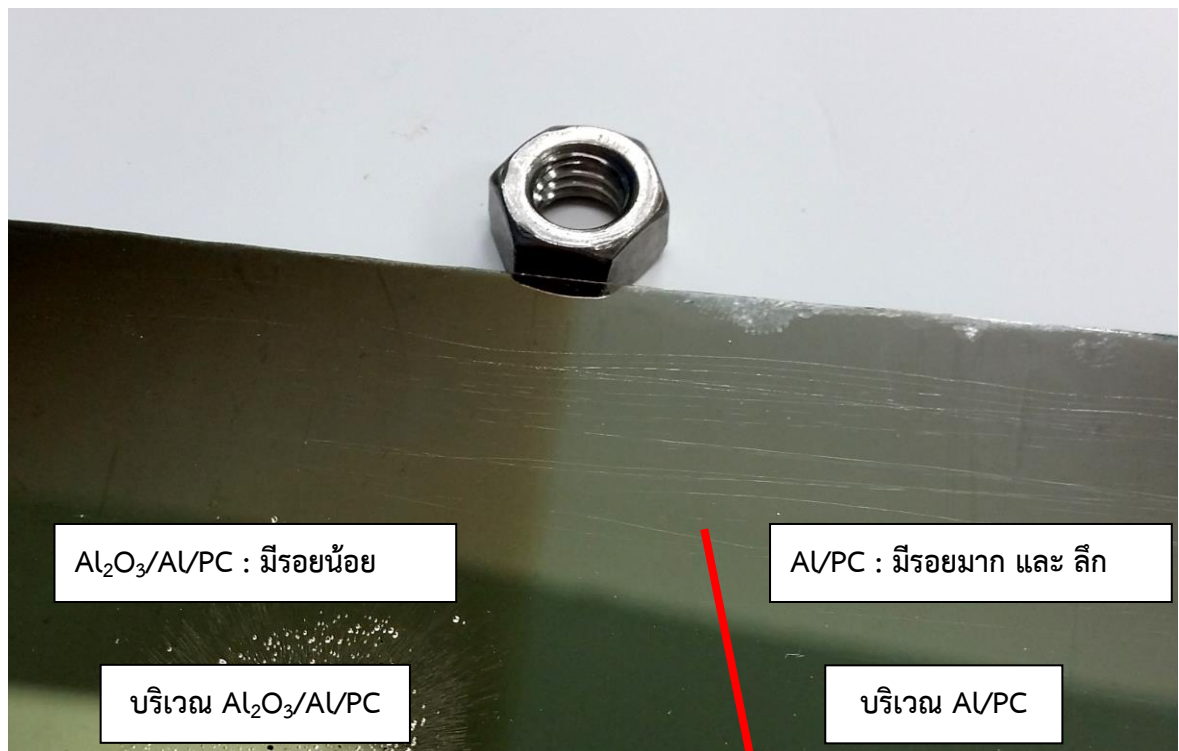


(b)

รูปที่ 4-24 ลักษณะของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบทับฟิล์มอะลูมิเนียมบนแผ่นพลาสติก

(a) ก่อนทดสอบการชุบซีด

(b) การวางกระดาษทรายและน้ำหนักรีดบนแผ่นฟิล์มก่อนทดสอบ



รูปที่ 4-25 ผลการทดสอบการขีดขีดของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์

4.5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์บนซิลิกอนและกระจกสโตร์ด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง โดยแปรค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ อัตราไหลแก๊สออกซิเจน กระแสไฟฟ้า ระยะห่างจากหน้าเป่าสารเคลือบถึงวัสดุรองรับ และการให้ความร้อนหลังการเคลือบต่อการเกิดฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มที่เคลือบได้ทุกเงื่อนไขมีลักษณะเนียนเรียบ สีส่องผ่านแสงได้ดี ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ และมีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐานทั้งหมด สำหรับองค์ประกอบทางเคมีจากเทคนิค EDS พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีอะลูมิเนียมประมาณ 35% และออกซิเจนประมาณ 65% เป็นองค์ประกอบ ฟิล์มมีความหนาประมาณ 0.14-0.18 μm สำหรับผลทดสอบการป้องกันการดูดซึดของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ตามเงื่อนไขข้างต้นปิดทับไปบนฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เคลือบอยู่บนพลาสติกชนิด ABS พบว่าสามารถป้องกันการดูดซึดได้แต่ยังไม่ดีนัก ทั้งนี้จากการทดสอบการดูดซึดโดยใช้น้ำหนักกดทับแล้วลากผ่านบริเวณที่เคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์เทียบกับฟิล์มบางอะลูมิเนียมพบว่าบริเวณฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เตรียมได้เกิดรอยดูดซึดน้อยกว่าฟิล์มอะลูมิเนียม ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบยังมีความหนาน้อยเกินไป

4.5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์เพื่อให้เกิดโครงสร้างผลึกต้องใช้พลังงานสูงทำให้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึก อาจไม่เหมาะสมกับงานเคลือบพลาสติก อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่ฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอสัณฐานซึ่งสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้อง
2. ความร้อนขณะเคลือบอาจมีผลต่อวัสดุรองรับ (พลาสติก) ดังนั้นจึงอาจต้องมีการปรับแต่งเครื่องเคลือบให้สามารถเคลือบได้โดยไม่มีการสะสมความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเคลือบ โดยอาจเพิ่มระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับแหล่งกำเนิดสารเคลือบหรือใช้การเคลือบแบบเป็นช่วงเวลาสั้นๆ หลายๆ ครั้ง
3. ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ได้ยังมีด้านการดูดซึดได้ไม่ดีนัก ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากชั้นเคลือบที่ได้ยังมีความหนาไม่มากพอ (บางเกินไป) ควรศึกษาผลของความหนาต่อสมบัติด้านการดูดซึด
4. ควรศึกษาผลของการปรับผิวก่อนเคลือบในลักษณะต่างๆ เพิ่มเติม
5. ควรมีการทดลองเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์บนชิ้นงานประเภทต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานและแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้งานต่อไป

4.6 เอกสารอ้างอิง

- พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ. (2547). การวิจัยและพัฒนาการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีสปีดเตอริงตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2 รายงานการวิจัยประจำปี 2547. ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยร่วมกับสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (หน้า 163-166). กรุงเทพฯ: ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุรสิงห์ ไชยคุณ, นิรันดร์ วิทอนันต์, สกฤต ศรีญาณลักษณ์ และจักรพันธ์ ถาวรธิดา. (2540). การพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอริง. รายงานการวิจัยประจำปี 2540. ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Budke, E., Krempel-Hesse, J., Maidhof, H., & Schüssler, H. (1999). Decorative hard coating with improved corrosion resistance. *Surface coating and Technology*, 112, 108-113.
- Bunshah, R.F. (1994). *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings* (2nd ed.). New Jersey, Noyes.
- Chapman, B. (1980). *Glow Discharge Processes*. New York: John Wiley & Sons.
- Chou, T.C., Adamson, D., Mardinly, J. and Nieg, T.G., 1991, "Microstructural Evolution and Properties of Nanocrystalline Alumina made by Reative Sputtering Deposition", *Thin Solid Film*, Vol 205, pp 131-189.
- Cueff, R., Baud, G. and Besse, J.P., 1995 "Study of Thin Alumina Coatings Sputtered on Polyethylene Terephthalate Films", *Thin Solid Films*, Vol 266, pp 198-204.
- Eva Fredriksson and Jan-Otto Carlsson, 1993, "Factors Influenceing the $\mathbf{K}$ Al₂O₃ -> $\mathbf{\alpha}$ Al₂O₃ Phase Transormantion During CVD Growth", *Surface and Coating Technology*, Vol 56, pp 165-177.
- Ga-Lane Chen, Sivertsen, J.M. and Judy, J.H., 1984 "The Effect of Partial Pressure on The Properties of RF-Sputtered Al₂O₃ Thin Films", *Material letters*, Vol 2, pp 196-201.
- Halvarsson, M. and Norden, H., 1993. "Microstructual Investigation of CVD $\mathbf{K}/\mathbf{\alpha}$ Al₂O₃", *Surface and Coating Technology*, Vol 202, pp 103-108.
- Koski, K., Juliet, P., Wang, Z.H. and Pischow, K., 1999, "Characterization of Aluminium Oxide Thin Film Deposited on Polycarbonate Substrates by Reactive Magnetron Sputtering", *Materials Science and Engineering*, Vol 65, pp 94-105.

- Layyous, A.A., Freinkel, D.M. and Israel, R., 1992. "Al₂O₃ Coated Cemented Carbides: Optimization of Structure, Number of Layers and Type of Interlayer", *Surface and Coating Technology*, Vol 56, pp 89-95.
- Lynne, M.G. and Subhash, H., 1991, "Reluctant Etchability of Dielectric Al₂O₃ Films Sputtered in Water Vapor and Ar-O₂ Environment", *Thin Solid Film*, Vol 202, pp 83-89.
- Mattox, D.M. (1997). *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, New Jersey, Noyes Publications, 917 p.
- Munz, W.D. (1991). The Unbalanced Magnetron : Current Status of Development. *Surface and Coating Technology*, 48, 81-94.
- Rickerby, D.S., & Matthews, A. (1991). *Advanced Surface Coatings : a Handbook of Surface Engineering*. New York: Chapman and Hall.
- Roth, T.H., Broszeit, E. and Kloops, K.H., 1988 "Wear Behaviour of R.F. Sputtered Alumina Coatings on Cast Iron Substrates in A Moel Wear Test Under Dry Conditions and The Influence of Residual Stresses and Adhesion", *Surface and Coating Technology*, Vol 36, pp 801-805.
- Schneider, J.M., Sproul, W.D., Chai, R.W.J. and Matthews, A., 1997, "Very-high-rate Reactive Sputtering of Alumina Hard Coatings", *Surface and Coating Technology*, Vol 96, pp 262-266.
- Smith, D. L. (1995). *Thin-Film Deposition : Principle And Practice*. New York: McGraw-Hill.
- Stauder, B., Perry, F. and Frantz, C., 1995, "Chemical and Structural Analysis of Aluminium-Oxygen Coating Obtained by D.C. Magnetron Reactive Sputtering: Some Features of The Process", *Surface and Coating Technology*, Vol 74-75, pp 320-325.
- Wasa, K., & Hayakawa, S. (1992). *Handbook of sputter deposition technology: principles, technology and applications (pp. 19-29)*. New Jersey: Noyes.

ภาคผนวก

บทความสำหรับเผยแพร่

การปรับปรุงผิววัสดุโดยการเคลือบเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเคลือบผิววัสดุด้วยเทคนิค PVD เนื่องจากเป็นกระบวนการเคลือบที่ให้ชั้นเคลือบในลักษณะของฟิล์มบางที่มีคุณภาพสูงและอีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้สารละลายเคมีในกระบวนการเคลือบซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันมีการนำเทคนิค PVD มาใช้ในงานเคลือบต่าง ๆ เช่น การเคลือบแข็ง การเคลือบด้านการกัดกร่อนหรือการเคลือบสวยงาม เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเคลือบด้วยเทคนิค PVD ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่สำหรับอุตสาหกรรมในประเทศไทยยังมีข้อจำกัดหลายด้าน ทั้งนี้กลุ่มอุตสาหกรรมหนึ่งที่น่าสนใจในการเคลือบด้วยเทคนิค PVD คือ กลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติก เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปให้มีลักษณะและรูปทรงต่าง ๆ ได้ง่าย แต่พลาสติกก็มีข้อจำกัดด้านสี ความเงางามและการทนต่อการขีดข่วน ซึ่งปัจจุบันเริ่มมีการนำพลาสติกมาขึ้นรูปขึ้นงานแบบต่าง ๆ แล้วนำมาเคลือบให้ผิวมีลักษณะคล้ายโลหะ ซึ่งเดิมนิยมใช้วิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) แต่วิธีนี้ก็มีข้อเสียมากมาย ทำให้อุตสาหกรรมพลาสติกสนใจและต้องการพัฒนาการเคลือบพลาสติกด้วยเทคนิค PVD เพิ่มมากขึ้นเป็นลำดับ

โครงการวิจัยเรื่อง “การวิจัยและพัฒนาชั้นเคลือบโลหะบนพลาสติกโดยการเคลือบด้วยไอกายภาพ” เป็นโครงการที่ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ ชุดโครงการวิจัยด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเพื่อวิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 สัญญาเลขที่ RDG5750044 โดยมีบริษัท ออฟเท็ค จำกัด เป็นภาคเอกชนผู้กำหนดโจทย์วิจัย มีโครงการวิจัยย่อย 3 โครงการวิจัย ได้แก่ (1) การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค (2) การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสปัตเตอริง และ (3) การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน มีผลโดยสรุปดังนี้

โครงการวิจัยย่อยที่ 1 โครงการสามารถออกแบบสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์คสำหรับเคลือบฟิล์มบางโลหะบนวัสดุรองรับแบบแผ่นเรียบได้ ซึ่ง โดยแหล่งกำเนิดสารเคลือบที่สร้างขึ้นทำจากสเตนเลสเป็นทรงกระบอก ระบายความร้อนด้วยน้ำ ผลทดสอบพบว่าสามารถเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมบนวัสดุแผ่นเรียบได้ โดยความดันที่เหมาะสมมีค่าในช่วง 5×10^{-4} - 1×10^{-3} mbar และกระแสอาร์คเท่ากับ 90 Amp ทั้งนี้ควรมีการพัฒนากระบวนการเพื่อคัดกรองขนาดใหญ่มาก่อนการเคลือบ และพัฒนาวิธีอาร์คแบบอัตโนมัติเพื่อให้สร้างสารเคลือบได้ตลอดเวลา ควรศึกษาผลของพารามิเตอร์การเคลือบต่อการยึดติดของฟิล์มที่เคลือบจากแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค รวมถึงพัฒนาชุดจับชิ้นงานเพื่อให้การเคลือบเกิดขึ้นสม่ำเสมอรวมถึงสามารถเคลือบชิ้นงานที่มีรูปร่าง 3 มิติได้

โครงการวิจัยย่อยที่ 2 พบว่าผิวของชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบางโลหะด้วยเทคนิคสปีดเทอริงยังคงมี รีวรอยของผิวเดิมก่อนเคลือบ เนื่องจากเทคนิคสปีดเทอริงเป็นการสะสมเรียงตัวและพอกพูนเป็นชั้นของ สารเคลือบในระดับอะตอม ฟิล์มที่ได้มีความหนาในระดับนาโนเมตรจึงไม่เป็นการสร้างผิวใหม่ปิดทับรอย ขูดขีด ทั้งนี้การปรับผิวของวัสดุก่อนเคลือบจะมีผลต่อลักษณะปรากฏของชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบางโลหะ โดยการปรับผิวก่อนเคลือบแบบมันภายหลังการเคลือบจะให้การสะท้อนแสงดี ส่วนการปรับผิวแบบด้าน ชิ้นงานที่เคลือบได้มีการสะท้อนแสงไม่ดี นอกจากนี้การปรับผิวชิ้นงานก่อนเคลือบยังช่วยปิดรอยขูดขีดของ ชิ้นงานก่อนเคลือบรวมถึงเพิ่มความสามารถในการเกาะติดของฟิล์มกับชิ้นงานอีกด้วย ทั้งนี้ควรมีการศึกษา ผลของการปรับผิวก่อนเคลือบเพิ่มเติม และควรมีการทดลองเคลือบชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ เช่น ชิ้นงานที่มีรูปร่าง 3 มิติ หรือ มีขนาดใหญ่

โครงการวิจัยย่อยที่ 3 ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มที่เคลือบได้ทุกเงื่อนไขเนียบเรียบ ใส่แสงผ่านแสงได้ดี มีโครงสร้างผลึกแบบออสถินทั้งหมด ฟิล์มที่ได้ทั้งหมดมีอะลูมิเนียมและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบใน อัตราส่วน 35:65 ฟิล์มมีความหนาประมาณ 0.14-0.18 μm ฟิล์มที่เตรียมได้มีความสามารถในการขูดขีดได้แต่ ยังไม่ดีเพราะฟิล์มบางเกินไป ทั้งนี้ การเตรียมฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์เพื่อให้เกิดโครงสร้างผลึกต้องใช้ พลังงานสูง อาจไม่เหมาะกับการเคลือบพลาสติก แต่ฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบออสถินซึ่งเตรียมได้ที่ อุณหภูมิห้องก็มีสมบัติการต้านทานการขูดขีดได้ ควรศึกษาผลของการปรับผิวก่อนเคลือบในลักษณะต่างๆ เพิ่มเติม รวมถึงทดลองเคลือบบนชิ้นงานอื่น

ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยนี้ นอกจากการสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค การพัฒนากระบวนการเคลือบฟิล์มบางโลหะบนพลาสติก และ การพัฒนาการเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียม ไดออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน แล้ว โครงการยังได้ผลิตผลงานรูปแบบอื่นได้แก่บทความวิจัย จำนวน 3 บทความ ผลิตบุคลากรด้านการเคลือบฟิล์มบางระดับบัณฑิตศึกษาจำนวน 3 คน รวมถึงผลงาน เชิงสาธารณะเช่น การให้ความอนุเคราะห์ผู้สนใจ เข้าเยี่ยมชมกิจกรรมของโครงการวิจัยฯ หรือการเข้าร่วม จัดนิทรรศการแสดงผลงานวิจัยในงานต่าง ๆ และการเป็นวิทยากรบรรยายเผยแพร่ผลงานวิจัย และความรู้เกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มบางโลหะ

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการ

ตารางผนวกที่ 1 เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ของโครงการและผลการดำเนินงานตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์ของโครงการ	ผลการดำเนินงาน
1. แหล่งกำเนิดสารเคลือบ แบบคาโทดิกอาร์ค	1. ได้ผลตามวัตถุประสงค์
2. วิธีเคลือบฟิล์มโลหะด้วยเทคนิคคาโทดิกอาร์ค	2. ได้ผลตามวัตถุประสงค์
3. วิธีเคลือบฟิล์มโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยวิธีสปีดเทอริง	3. ได้ผลตามวัตถุประสงค์
4. วิธีเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์บนแผ่นพลาสติก	4. ได้ผลตามวัตถุประสงค์
5. บทความวิชาการ	4. ได้ผลตามวัตถุประสงค์
6. นิสิต	4. ได้ผลตามวัตถุประสงค์

ตารางผนวกที่ 2 เปรียบเทียบวัตถุประสงค์และผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยย่อย

วัตถุประสงค์ของโครงการ	ผลการดำเนินงาน
โครงการวิจัยย่อยที่ 1	
1. เพื่อออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค	ได้ผลตามวัตถุประสงค์
2. เพื่อพัฒนากระบวนการเตรียมชั้นเคลือบโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคคาโทดิกอาร์ค	ได้ผลบางส่วน
3. เพื่อศึกษาสมบัติของชั้นเคลือบโลหะบนแผ่นพลาสติกที่เคลือบด้วยเทคนิคคาโทดิกอาร์ค	ได้ผลบางส่วน
โครงการวิจัยย่อยที่ 2	
1. เพื่อศึกษาขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกประเภทต่างๆ ด้วยวิธีสปีดเทอริง	ได้ผลตามวัตถุประสงค์
2. เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ สี และการยึดติดของฟิล์มบางโลหะที่เตรียมได้	ได้ผลตามวัตถุประสงค์
โครงการวิจัยย่อยที่ 3	
1. เพื่อพัฒนากระบวนการเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์โดยการเคลือบด้วยไอกายภาพ	ได้ผลตามวัตถุประสงค์
2. เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เตรียมได้	ได้ผลตามวัตถุประสงค์

ตารางผนวกที่ 3 เปรียบเทียบกิจกรรมของโครงการวิจัยย่อยที่เสนอ และกิจกรรมที่ดำเนินการของ
แต่ละโครงการวิจัยย่อย ตลอดโครงการ

กิจกรรม	เดือนที่					
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12
โครงการวิจัยย่อยที่ 1						
1. การปรับแต่งระบบสุญญากาศ	↔ ←--→					
2. ออกแบบและกำหนดรายละเอียดต่างๆ ของหัวอาร์คและส่วนประกอบ	↔ ←--→					
3. สร้างและทดสอบหัวอาร์คตามแบบใน ข้อ 2		↔ ←--→				
4. การศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโลหะด้วยวิธีคาโทดิกอาร์ค		↔ ←--→				
5. สรุปผลการศึกษาและเขียนรายงานการวิจัยและพัฒนา						↔ ←--→
โครงการวิจัยย่อยที่ 2						
1. การปรับแต่งเครื่องเคลือบให้พร้อมทำงาน	↔ ←--→					
2. การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับ เคลือบฟิล์มบางโลหะบนพลาสติก	↔ ←--→					
3. การศึกษาสมบัติ/ลักษณะเฉพาะของ ฟิล์มโลหะที่เคลือบได้		↔ ←--→				
4. สรุปผลการศึกษาและเขียนรายงานการวิจัยและพัฒนา						↔ ←--→
โครงการวิจัยย่อยที่ 3						
1. การปรับแต่งเครื่องเคลือบให้พร้อมทำงาน	↔ ←--→					
2. การศึกษาฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์	↔ ←--→					
3. การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของฟิล์มที่เคลือบได้		↔ ←--→				
4. สรุปผลการศึกษาและเขียนรายงานการวิจัยและพัฒนา						↔ ←--→

หมายเหตุ: ↔ แผนตามข้อเสนอ
←--→ การดำเนินงานของโครงการ

ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ

ตารางผนวกที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ

ผลลัพธ์ (OUTPUT)	จำนวน
1. องค์ความรู้ - การสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค - การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสปีดเทอริง - การเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน มีผลโดย	1 เรื่อง 1 เรื่อง 1 เรื่อง
2. บทความทางวิชาการ - ผลงานตีพิมพ์ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ	3 เรื่อง
3. การผลิตบุคลากร - ปริญญาโท	3 คน
4. การบริการวิชาการ/ถ่ายทอดเทคโนโลยี/ความเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรม - การให้ความอนุเคราะห์ผู้สนใจ เข้าเยี่ยมชมกิจกรรมของโครงการวิจัยฯ - การเข้าร่วมจัดนิทรรศการแสดงผลงานวิจัย - การเป็นวิทยากรบรรยายเผยแพร่ความรู้จากงานวิจัย	3 ครั้ง 3 ครั้ง 2 ครั้ง

ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ - 1

บทความทางวิชาการ

1. สรุปผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ : บทความวิจัย จำนวน 3 เรื่อง ได้แก่
 - 1.1 สุรสิงห์ ไชยคุณ, ธนัสถา รัตนะ, อติศร บุรณวงศ์, นิรันดร์ วิทิตอนันต์. 2559. การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสารเคลือบแบบคาโทดิกอาร์ค. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติครั้งที่ 7 “ยกระดับงานวิจัย เพื่อก้าวสู่มหาวิทยาลัยระดับโลก”. 25-26 มีค 59. ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา กรุงเทพมหานคร
 - 1.2 อติศร บุรณวงศ์, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, จินดาวรรณ ธรรมปรีชา, สุรสิงห์ ไชยคุณ. 2559. การเคลือบฟิล์มบางโลหะบนแผ่นพลาสติกด้วยเทคนิคสปีตเตอริง. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏหมู่บ้านจอมบึงวิจัย ครั้งที่ 4 “สร้างองค์ความรู้ สู่การพัฒนา นำพาสังคม”. 1 มีค 59. ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง จ.ราชบุรี
 - 1.3 นิรันดร์ วิทิตอนันต์, วิเชียร ศิริพรม, อติศร บุรณวงศ์, สุรสิงห์ ไชยคุณ. 2559. การเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์สำหรับใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติครั้งที่ 7 “ยกระดับงานวิจัย เพื่อก้าวสู่มหาวิทยาลัยระดับโลก”. 25-26 มีค 59. ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา กรุงเทพมหานคร

ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ - 2

การผลิตบุคลากร

2. สรุปผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ : การผลิตบุคลากร จำนวน 3 คน (วท.ม.(ฟิสิกส์)) ได้แก่

2.1 ชื่อ-นามสกุล นายอำพล ชีชมบุตร

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมโครเมียม
ไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีอีพอกซีแมกนีตรอนโคสแปดเตอริง

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์

2.2 ชื่อ-นามสกุล นายทศพล ศรีเจริญ

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของพารามิเตอร์การเคลือบต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโครเมียม
เซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีอีพอกซีโคสแปดเตอริง

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์

2.3 ชื่อ-นามสกุล นางสาวพรพิมล ัญญะภูมิ

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโครเมียมเซอร์โคเนียม
ไนไตรด์ ที่เคลือบด้วยวิธีอีพอกซีแมกนีตรอนโคสแปดเตอริง

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์

ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ - 3

การบริการวิชาการ/ถ่ายทอดเทคโนโลยี/ความเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรม

1. การให้ความอนุเคราะห์ผู้สนใจ เข้าเยี่ยมชมกิจกรรมของโครงการวิจัยฯ จำนวน 3 ครั้ง

ภาพกิจกรรม

ข้อมูล



ว-ด-ป 11 กพ. 2558
หน่วยงาน คณะอัญมณี
มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี



ว-ด-ป 22 เมย. 2558
หน่วยงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี



ว-ด-ป 27 เมย. 2558
หน่วยงาน ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและ
อุปกรณ์การแพทย์
คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ - 3

การบริการวิชาการ/ถ่ายทอดเทคโนโลยี/ความเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรม

2. การเข้าร่วมจัดนิทรรศการแสดงผลงานวิจัย จำนวน 3 ครั้ง

#1 ว-ด-ป : 30-31 มีนาคม 2558

ชื่องาน : การประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 7

ผู้จัดงาน : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

สถานที่ : มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

เรื่อง : การเคลือบผิววัสดุด้วยเทคนิคการเคลือบในสุญญากาศ



ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ - 3

การบริการวิชาการ/ถ่ายทอดเทคโนโลยี/ความเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรม

2. การเข้าร่วมจัดนิทรรศการแสดงผลงานวิจัย จำนวน 3 ครั้ง

- #2 ว-ด-ป : 24-27 มิถุนายน 2558
ชื่องาน : Surface&Coatings 2015
ผู้จัดงาน : REED TRADEX CO., LTD.
สถานที่ : ศูนย์การประชุมไบเทคบางนา ททท.
เรื่อง : การเคลือบผิววัสดุด้วยเทคนิค PVD



ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ - 3

การบริการวิชาการ/ถ่ายทอดเทคโนโลยี/ความเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรม

2. การเข้าร่วมจัดนิทรรศการแสดงผลงานวิจัย จำนวน 3 ครั้ง

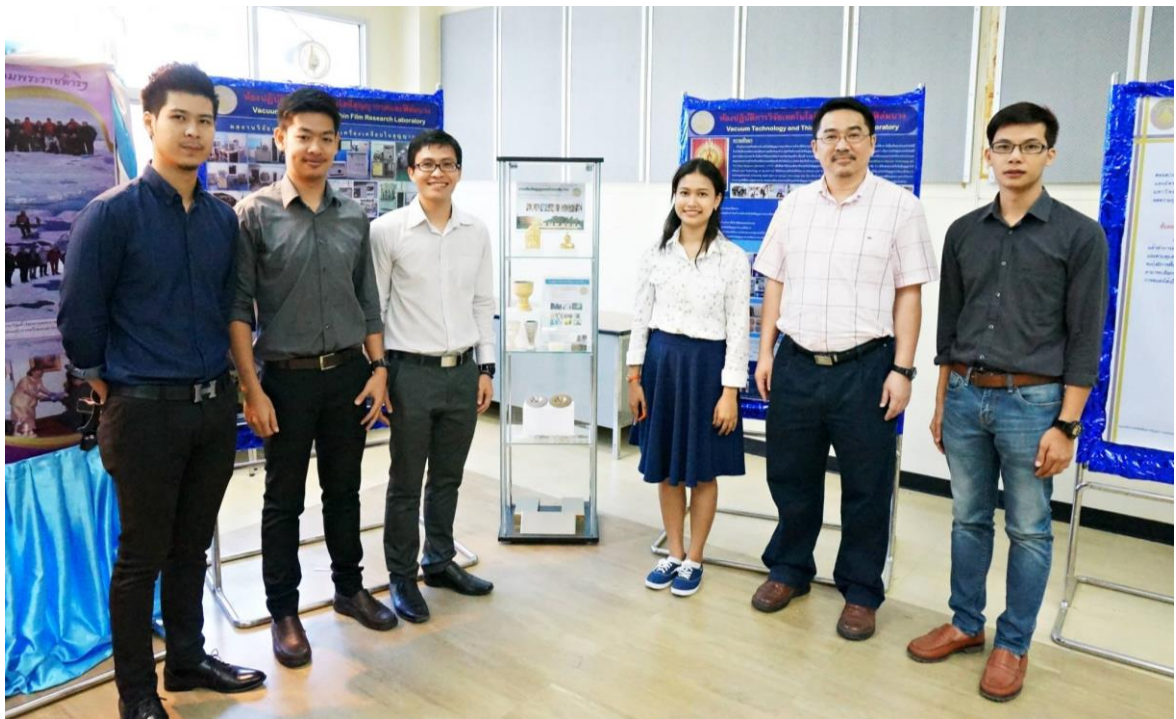
#3 ว-ด-ป : 7-9 กรกฎาคม 2558

ชื่องาน : บูรพาวิชาการ 2558

ผู้จัดงาน : มหาวิทยาลัยบูรพา

สถานที่ : มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

เรื่อง : การปรับปรุงผิววัสดุด้วยเทคนิคการเคลือบในสุญญากาศ

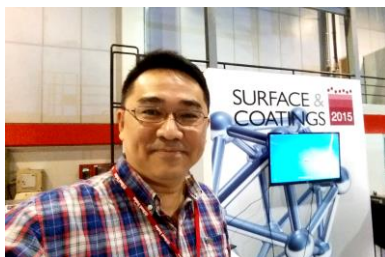


ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ - 3

การบริการวิชาการ/ถ่ายทอดเทคโนโลยี/ความเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรม

3. การเป็นวิทยากรบรรยายเผยแพร่ผลงานวิจัย จำนวน 2 ครั้ง

- #1 ว-ด-ป : 24-25 มิถุนายน 2558
ชื่องาน : Surface&Coatings 2015
ผู้จัดงาน : REED TRADEX CO., LTD.
สถานที่ : ศูนย์การประชุมไบเทคบางนา กทม.
หัวข้อ : การเคลือบผิววัสดุด้วยเทคนิค PVD



ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ - 3

การบริการวิชาการ/ถ่ายทอดเทคโนโลยี/ความเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรม

3. การเป็นวิทยากรบรรยายเผยแพร่ผลงานวิจัย จำนวน 2 ครั้ง

#2 ว-ด-ป : 27 มิถุนายน 2558

ชื่องาน : Surface&Coatings 2015

ผู้จัดงาน : REED TRADEX CO., LTD.

สถานที่ : ศูนย์การประชุมไบเทคบางนา กทม.

หัวข้อ : การเคลือบผิววัสดุด้วยเทคนิค PVD



ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

นายสุรสิงห์ ไชยคุณ

ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย / หัวหน้าโครงการวิจัยย่อยที่ 1 / นักวิจัย

ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล นายสุรสิงห์ ไชยคุณ
ตำแหน่งทางวิชาการ รองศาสตราจารย์
ที่ทำงาน ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131.
โทรศัพท์/โทรสาร (038) 745-900 ต่อ 3084
E-mail s-chaikhun@hotmail.com



ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สถาบัน	ปี	สาขา
ปร.ด.	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2552	ฟิสิกส์
วท.ม.	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2528	ฟิสิกส์
กศ.บ.	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางแสน	2525	ฟิสิกส์

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

เทคโนโลยีสุญญากาศ, เทคโนโลยีฟิล์มบาง, อิเล็กทรอนิกส์, แหล่งกำเนิดไอออน

ประวัตินักวิจัย

นายอดิศร บุรณวงศ์

หัวหน้าโครงการวิจัยย่อยที่ 2 / นักวิจัย

ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล นายอดิศร บุรณวงศ์
ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์
ที่ทำงาน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131.
โทรศัพท์/โทรสาร 038-103-084
E-mail adisornb@buu.ac.th



ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สถาบัน	ปี	สาขา
ปร.ด.	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2553	ฟิสิกส์
วท.ม.	มหาวิทยาลัยบูรพา	2550	ฟิสิกส์
วท.บ.	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2546	ฟิสิกส์

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

เทคโนโลยีสุญญากาศ, เทคโนโลยีฟิล์มบาง, ฟิล์มบางสารประกอบไนไตรด์

ประวัติส่วนตัว

นายนิรันดร์ วิทิตอนันต์

หัวหน้าโครงการวิจัยย่อยที่ 3 / นักวิจัย

ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล นายนิรันดร์ วิทิตอนันต์
ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ที่ทำงาน ห้องปฏิบัติการวิจัยพลสมสำหรับวิทยาศาสตร์พื้นผิว
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131.
โทรศัพท์/โทรสาร (038) 745-900 ต่อ 3084
E-mail nirun@buu.ac.th



ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สถาบัน	ปี	สาขา
ปร.ด.	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2553	ฟิสิกส์
วท.ม.	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2543	ฟิสิกส์
วท.ม.	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2535	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
กศ.บ.(เกียรตินิยม)	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร	2532	วิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

เทคโนโลยีสุญญากาศ, เทคโนโลยีฟิล์มบาง, สวณศาสตร์, ฟิสิกส์สิ่งแวดล้อม, การสอนวิทยาศาสตร์

ประวัตินักวิจัย

นายธนัสถา รัตนะ

นักวิจัย

ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล นายธนัสถา รัตนะ
ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์
ที่ทำงาน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131.
โทรศัพท์/โทรสาร 038-103-084
E-mail tanat_jo@hotmail.com



ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สถาบัน	ปี	สาขา
ปร.ด.	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2553	ฟิสิกส์
วท.ม.	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2547	ฟิสิกส์
วท.บ.	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2540	ฟิสิกส์

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Thin Films Technology, Materials Physics, General Physics

ประวัติส่วนตัว

นายวิเชียร ศิริพรหม

นักวิจัย

ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล นายวิเชียร ศิริพรหม
ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์
ที่ทำงาน หน่วยวิจัยวัสดุศาสตร์และฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ต.ทุ่งสุขลา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20130.
โทรศัพท์/โทรสาร 038-354-587
E-mail w.siriprom@hotmail.com



ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สถาบัน	ปี	สาขา
ปร.ด.	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2552	ฟิสิกส์
วท.ม.	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2547	ฟิสิกส์
กศ.บ.	มหาวิทยาลัยบูรพา	2540	วิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

General Physics, Computational Physics, Crystallography, X-ray diffraction

ประวัติส่วนตัว

นางสาวจินดาวรรณ ธรรมปรีชา

นักวิจัย

ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล นางสาวจินดาวรรณ ธรรมปรีชา

ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์

ที่ทำงาน สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

ถ.ปรีดีพนมยงค์ ต.ประตู่ชัย อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000

โทรศัพท์/โทรสาร 0-3532-2076-9

E-mail eang_jj@hotmail.com



ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สถาบัน	ปี	สาขา
วท.ม.	มหาวิทยาลัยบูรพา	2553	ฟิสิกส์
วท.บ.	มหาวิทยาลัยบูรพา	2551	ฟิสิกส์

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Vacuum Technology, Thin Films Technology, Materials Physics, General Physics
