



สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)
Synchrotron Light Research Institute (Public Organization)
เอกสารความรู้ (knowledge documents)

ประเภทเอกสาร

- ☒ TR: รายงานเชิงเทคนิค (TECHNICAL REPORT)
☐ TN: รายงานเชิงเทคนิค (ฉบับย่อ) (TECHNICAL NOTE)
☐ MN: คู่มือการดำเนินงาน (Operation Manual) / คู่มือการใช้งาน (Instruction Manual) /
แผนปฏิบัติการ (Operation Plan)

หมายเลขเอกสาร(For QDS) KM Document No.	SLRI-TR-2026-095
ชื่อเรื่อง Title	การศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทำความสะอาดด้วยยูวี โอโซนเพื่อกำจัดการปนเปื้อนของคาร์บอนบนอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในระบบลำแสง ซินโครตรอน
ชื่อฝ่าย Department	ฝ่ายระบบลำแสง
วันที่เผยแพร่ Release date	1 เมษายน 2569
ระดับการเปิดเผยข้อมูล Level of Disclosure	☐ ข้อมูลในรายงานเป็นความลับ (Undisclosed) ☐ เปิดเผยข้อมูลเฉพาะภายในฝ่ายหรือส่วนงาน (Information can be disclosed within department/section) ☒ เปิดเผยข้อมูลได้สำหรับพนักงานของสถาบันฯ และอนุญาตให้บันทึกข้อมูลเข้าเป็น ส่วนหนึ่งของระบบ Knowledge Management ภายในสถาบันฯ (Information can be disclosed for SLRI staffs and can be part of SLRI's Knowledge Management System) ☒ เปิดเผยข้อมูลได้เพื่อเป็นองค์ความรู้สาธารณะ เช่น เว็บไซต์ของสถาบันฯ (Information is available for public)
คำสำคัญ Keyword	การปนเปื้อนคาร์บอน, ยูวีโอโซน, อุปกรณ์ทัศนศาสตร์

รายชื่อผู้จัดทำรายงานหรือผู้ดำเนินโครงการ (Name)	ส่วนร่วมในการปฏิบัติงานในโครงการ Responsible tasks in the project
ดร.รัชฎาภรณ์ ทรัพย์เรืองเนตร	หัวหน้าโครงการ วางแผนการติดตั้งและทดสอบ ทดสอบการใช้งาน วิเคราะห์ผลการทดสอบ และจัดทำรายงาน
นางสาวทิพย์อุษา วงศ์พินิจ	ติดตั้งและทดสอบการใช้งาน จัดทำรายงาน
นายวัชรพล เจนปิยพงศ์	ติดตั้งและทดสอบการใช้งาน
นายสุรเชษฐ์ รัตนสุพร	เขียนโปรแกรมควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ
ดร.อิเดกิ นากาจิม่า	ที่ปรึกษาโครงการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทำความสะอาดด้วยยูวีโอโซน (UV/Ozone cleaning) ในการกำจัดชั้นการปนเปื้อนของคาร์บอนบนพื้นผิวอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงลดลง ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างระบบทำความสะอาดในห้องสุญญากาศที่ติดตั้ง หลอด VUV-DTS (ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร) เพื่อสร้างโอโซนและอะตอมมิกออกซิเจนสำหรับทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารปนเปื้อน โดยใช้ตัวอย่างจำลองที่เคลือบฟิล์มคาร์บอนบนวัสดุฐานรองทอง/ซิลิกอน (Au/Si) ด้วยเทคนิค RF-PECVD ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS พบว่าภายหลังการทำความสะอาดเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ปริมาณคาร์บอน (C1s) โดยเฉพาะพันธะ C-C ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่สัญญาณของออกซิเจน (O1s) และหมู่ฟังก์ชัน C=O เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงความสำเร็จในการสลายพันธะคาร์บอนให้กลายเป็นก๊าซระเหยง่าย สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย UV-VIS-NIR ที่พบว่าค่าการสะท้อนแสง (Reflectivity) ของตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นในทุกเงื่อนไข โดยเฉพาะภายใต้สภาวะที่มีความดันและความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนสูง (เงื่อนไข clean 3) ซึ่งให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดดีที่สุด สรุปได้ว่ากระบวนการ UV/Ozone เป็นวิธีการทำความสะอาดแบบแห้งที่มีความนุ่มนวล ไม่ทำลายโครงสร้างพื้นผิวที่ละเอียดอ่อน และมีประสิทธิภาพสูงในการฟื้นฟูสมรรถนะของอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน

คำสำคัญ Keyword: การปนเปื้อนของคาร์บอน, ยูวีโอโซน, อุปกรณ์ทัศนศาสตร์

1. บทนำ

ที่มาและความสำคัญ [1-3]

การปนเปื้อนของคาร์บอนบนพื้นผิวอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation optics) บนพื้นผิวอุปกรณ์มักจะเกิดชั้นการปนเปื้อนของคาร์บอน (Carbon contamination layer) สะสมบนพื้นผิวอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแสงซินโครตรอน ชั้นคาร์บอนเหล่านี้ส่งผลเสียอย่างรุนแรง โดยทำให้เกิด การฟุ้งกระจายของแสง (Scattered light) เพิ่มขึ้น และทำให้ความสามารถในการสะท้อนแสง (Reflectivity) ลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นใกล้ขอบการดูดกลืนของคาร์บอน (Carbon edge) การทำความสะอาดอุปกรณ์ประเภทนี้ (Synchrotron radiation optics) มีความท้าทายสูงกว่าปกติ เนื่องจากโครงสร้างมีความเปราะบาง ประกอบด้วยฐานซิลิกา, ชั้นอีพ็อกซี (Epoxy layer) และชั้นทองที่ทำหน้าที่สะท้อนแสง การทำความสะอาดแบบเดิมอาจมีความเสี่ยงที่จะทำลายชั้นเคลือบผิวต่างๆ ซึ่งจะส่งผลให้ความเรียบเสียหายได้ การนำวิธีทำความสะอาดด้วย UV/Ozone มาใช้กำจัดคาร์บอนในอุปกรณ์ทางแสงของซินโครตรอน เป็นวิธีการที่อ่อนโยนไม่ทำลายพื้นผิว วัสดุ UV พลังงานสูง (โดยเฉพาะความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร และ 172 นาโนเมตร) สามารถสลายพันธะโมเลกุลของน้ำและสารอินทรีย์ได้โดยตรงโดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูง ทำให้เหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อน เช่น เลนส์ทางแสง, แผ่นเวเฟอร์, หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยแสง UV (โดยเฉพาะความยาวคลื่น 185 nm) จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเพื่อสร้างโอโซน และแสง UV (253 nm) จะช่วยย่อยโอโซนให้กลายเป็น อะตอมมิกออกซิเจน (Atomic Oxygen) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก อะตอมเหล่านี้จะไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ถูกตัดพันธะแล้ว กลายเป็นก๊าซระเหยง่าย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์หรือโมเลกุลของน้ำ แล้วหลุดออกจากพื้นผิวไป

คณะผู้จัดทำจึงได้เห็นความสำคัญการกำจัดคาร์บอนที่ปนเปื้อนออกจากพื้นผิวด้วย UV/Ozone เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัย สำหรับการทำความสะอาดอุปกรณ์ทางแสงที่มีความละเอียดอ่อนสูง ช่วยยืดอายุการใช้งานและฟื้นฟูประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนได้โดยไม่ทำลายโครงสร้างจึงได้ทำการทดสอบและศึกษาเงื่อนไขในการกำจัดคาร์บอนที่ปนเปื้อนออกจากพื้นผิว โดยใช้เครื่อง UV/ozone ออกซิเจน เพื่อประยุกต์ใช้งานกับระบบลำเลียงแสง 3.2Uab PES/PEEM ของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเครื่องปัจจุบัน

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างระบบการทำความสะอาดอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ด้วยกระบวนการยูวีโอโซน (UV/Ozone cleaning) โดยใช้ช่วงกำเนิดแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตสุญญากาศ (VUV) ภายใต้สภาวะสุญญากาศ
2. เพื่อทดสอบและศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดคาร์บอนที่ปนเปื้อนออกจากพื้นผิวอุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อนสูง เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานและฟื้นฟูประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนได้โดยไม่ทำลายโครงสร้างวัสดุ
3. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการยูวีโอโซน โดยการจำลองการทำความสะอาดฟิล์มคาร์บอนบนวัสดุฐานรองทอง/ซิลิกอน (Au/Si) ที่ความหนาในระดับนาโนเมตร และวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพรวมถึงคุณสมบัติของพื้นผิวภายหลังการทำความสะอาด

3. แนวคิด/ทฤษฎี/หลักการ

3.1 การปนเปื้อนของคาร์บอนที่เกิดจากแสงซินโครตรอน [1-4]

การปนเปื้อนของคาร์บอนบนพื้นผิวอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน เป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนซึ่งปนเปื้อนอยู่ในสภาพแวดล้อมสุญญากาศ ถูกดูดซับบนพื้นผิวของอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ เช่น กระจกสะท้อนแสงหรือเกรตติง และเกิดการแตกตัวทางเคมีภายใต้อิทธิพลของแสงซินโครตรอน

กลไกหลักของการเกิดชั้นคาร์บอนเริ่มจากการแตกตัว (dissociation) ของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิว โดยการแตกตัวนี้สามารถถูกกระตุ้นได้ทั้งจากโฟตอนที่มาจากแสงซินโครตรอนโดยตรง และจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวอุปกรณ์ทัศนศาสตร์จากการดูดกลืนรังสี อิออนที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวจะเกิดการเชื่อมขวางของพันธะเคมี (cross-linking) ส่งผลให้เกิดการสะสมของอะตอมคาร์บอนบนพื้นผิวในภาพของชั้นฟิล์มคาร์บอน นอกจากกระบวนการแตกตัวแล้ว การแพร่กระจายบนพื้นผิว (surface diffusion) ของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจากบริเวณรอบข้างเข้าสู่บริเวณที่ถูกแสงซินโครตรอน ยังมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มความหนาและความต่อเนื่องของชั้นคาร์บอนที่สะสมอยู่ ทำให้กระบวนการปนเปื้อนมีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งานของระบบลำเลียงแสง ลักษณะโครงสร้างและสมบัติของชั้นคาร์บอนที่เกิดขึ้นไม่คงที่ แต่ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณโฟตอนที่พื้นผิวได้รับ (photon dose) ปริมาณไฮโดรเจนที่ตกค้างอยู่ในชั้นฟิล์ม และสัดส่วนของคาร์บอนในสถานะไฮบริดต่าง ๆ ได้แก่ sp^1 , sp^2 และ sp^3 โดยทั่วไป ชั้นคาร์บอนที่มีสัดส่วนของคาร์บอนในสถานะ sp^2 สูงจะมีลักษณะคล้ายกราไฟต์ ในขณะที่ชั้นคาร์บอนที่มีสัดส่วน sp^3 สูงจะมีลักษณะเป็นคาร์บอนเหมือนเพชร (diamond-like carbon) ซึ่งมีความหนาแน่นและความแข็งสูงกว่า

การปนเปื้อนของคาร์บอนส่งผลกระทบต่อสมบัติทางแสงของอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ โดยชั้นคาร์บอนจะทำให้ค่าการสะท้อนลดลงจากผลของการดูดกลืนรังสี โดยเฉพาะในช่วงพลังงานใกล้ขอบการดูดกลืนของคาร์บอน (carbon K-edge) นอกจากนี้ ชั้นคาร์บอนยังทำให้เกิดความแตกต่างของเฟสของคลื่นการสะท้อน ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดแบบทำลายในบางช่วงพลังงาน และนำไปสู่การลดลงของฟลักซ์โฟตอนที่สะท้อนจากระบบทัศนศาสตร์โดยรวม

อีกปัจจัยที่สำคัญคือความขรุขระผิวของอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ที่เกิดจากชั้นคาร์บอน ซึ่งจะทำให้ความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการสะสมของคาร์บอนบนพื้นผิว การเพิ่มขึ้นของความขรุขระผิวส่งผลให้เกิดการกระเจิงของแสงเพิ่มขึ้น และทำให้ฟลักซ์โฟตอนมีค่าลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล ส่งผลให้สมรรถนะของระบบลำแสงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน จากกลไกและผลกระทบดังกล่าว การปนเปื้อนของคาร์บอนจึงเป็นปัญหาที่จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขโดยการทำความสะอาดหรือฟื้นฟูพื้นผิวด้วยเทคนิคที่เหมาะสม เพื่อรักษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทัศนศาสตร์และความเสถียรของลำแสงซินโครตรอนที่ตกกระทบบนตัวอย่างในการใช้งานระยะยาว

3.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยูวีโอโซน

3.2.1 โอโซนคือ [5]

โอโซน (Ozone) คือโมเลกุลของออกซิเจน 3 อะตอม ที่เกิดจากการแตกตัวของออกซิเจน ซึ่งมีอยู่ทั่วไปในอากาศ โดยมีแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นตัวกระตุ้น เรียกอีกอย่างว่า ออกซิเจนที่มีพลังงานสูง (Active Oxygen) โอโซนสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ได้เกือบทุกชนิด ทั้งในน้ำและอากาศ ทั้งยังสามารถฆ่าเชื้อโรคได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย โดยการเข้าไปจับโมเลกุล และย่อยสลายสารปนเปื้อนด้วยวิธีการเปลี่ยนโครงสร้างของสารนั้น และยังสามารถทำลายกลิ่น สารเคมี และก๊าซพิษได้ดีเยี่ยม โดยไม่ทิ้งสารตกค้างใดๆ นอกจากออกซิเจน จึงไม่เป็นอันตรายหรือส่งผลกระทบต่อมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม

3.2.2 การทำความสะอาดด้วยแสงยูวีโอโซน (UV ozone cleaning) [2-3,6]

การทำความสะอาดด้วยยูวีโอโซน (UV/Ozone cleaning) เป็นกระบวนการทำความสะอาดแบบแห้งที่มีความนุ่มนวลและไม่ซับซ้อน ใช้สำหรับการกำจัดสารปนเปื้อนอินทรีย์ (organic contaminants) ปริมาณน้อยออกจากพื้นผิววัสดุ กระบวนการนี้อาศัยปฏิกิริยาการออกซิเดชันที่เกิดจากการทำงานร่วมกันของแสงอัลตราไวโอเล็ต พลังงานสูงและก๊าซโอโซน เพื่อเปลี่ยนสิ่งสกปรกให้กลายเป็นก๊าซที่ระเหยได้ง่าย การทำลายพันธะและเปลี่ยนเป็นก๊าซโดยอะตอมมิกออกซิเจนที่เกิดขึ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลสิ่งสกปรกที่ถูกกระตุ้นไว้แล้ว เกิดเป็นก๊าซที่ระเหยได้ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ไอน้ำ (H_2O) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ซึ่งจะหลุดออกจากพื้นผิวไปในอากาศ

กลไกทางเคมีและขั้นตอนการทำงานมีรายละเอียดดังนี้:

1. กลไกการทำงานทางเคมี (Mechanism)

กระบวนการนี้มักใช้หลอดปรอทความดันต่ำที่ปล่อยความยาวคลื่นหลัก 2 ช่วง คือ 184.9 นาโนเมตร และ 253.7 นาโนเมตร ซึ่งทำงานร่วมกันตามขั้นตอนดังนี้:

- การสร้างโอโซน: รังสี UV ที่ความยาวคลื่น 184.9 nm จะถูกออกซิเจน (O_2) ในบรรยากาศดูดซับไว้ ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนแตกตัวและรวมตัวกันใหม่เป็นโอโซน (O_3) และอะตอมมิกออกซิเจน (atomic oxygen)
- การกระตุ้นสารปนเปื้อน: ในขณะเดียวกัน สารปนเปื้อนอินทรีย์ (ไฮโดรคาร์บอน) บนพื้นผิวจะดูดซับรังสี UV ที่ความยาวคลื่น 253.7 nm ทำให้พันธะเคมีของพวกมันอ่อนแอลง แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (free radicals) หรืออยู่ในสถานะกระตุ้นที่ไวต่อปฏิกิริยา
- การทำลายพันธะและเปลี่ยนเป็นก๊าซ: อะตอมมิกออกซิเจนที่เกิดขึ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลสิ่งสกปรกที่ถูกกระตุ้นไว้แล้ว เกิดเป็นก๊าซที่ระเหยได้ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ไอน้ำ (H_2O) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ซึ่งจะหลุดออกจากพื้นผิวไปในอากาศ

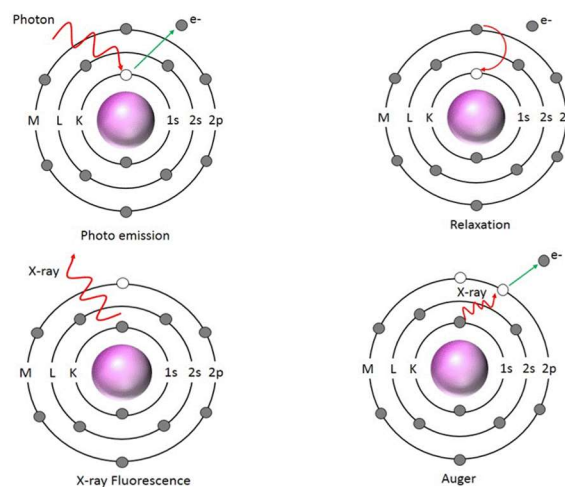
3.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเทคนิคการวิเคราะห์

3.3.1 X-Ray Photoemission spectroscopy (XPS) [7]

เครื่องมือวิเคราะห์พื้นผิววัสดุโดยเทคนิคสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron spectroscopy, XPS) เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นผิวของวัสดุซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุหลากหลายชนิด อาทิเช่น โลหะ และ สารกึ่งตัวนำ เป็นต้น

1) หลักการของเครื่อง XPS

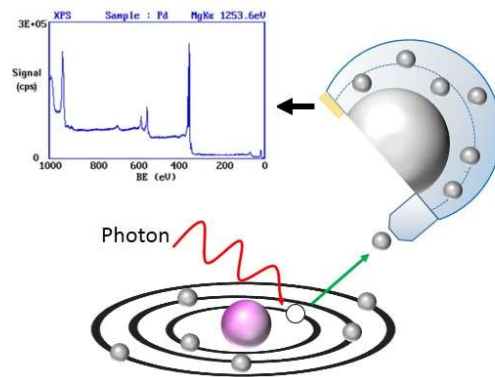
อัตรกิริยาของอะตอมกับโฟตอน ดังแสดงในภาพที่ 3.1 เมื่อลำแสงโฟตอน (Photon, $h\nu$) เข้าไปในอะตอม อะตอมจะดูดกลืนพลังงานจนทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมหลุดออกมาเรียกว่า Photoelectric absorption ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะมีพลังงานจลล์โดยเทคนิค XPS นี้จะวัดจากพลังงานจลล์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา



ภาพที่ 3.1 อันตรกิริยาของอะตอมเมื่อได้รับพลังงานโฟตอน

เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกมาจะมีอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ เรียกว่า Relaxation อิเล็กตรอนที่มาแทนที่นั้นจะคายพลังงานออกมาในรูปของ X-ray Fluorescence ถ้าพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมานี้ไปชนกับอิเล็กตรอนวงนอกจนทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกมา จะเรียกว่า Auger electron จากที่กล่าวข้างต้นว่าเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่วัดสเปกตรัมจากพลังงานจลล์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาซึ่งจะเปรียบเทียบกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของธาตุที่เราวัด โดยทั่วไปแล้วพีคของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจะเกิดจากอิเล็กตรอนในชั้นต่างๆซึ่งการจัดเรียงอิเล็กตรอนของแต่ละธาตุจะไม่เหมือนกันทำให้สามารถแยกธาตุแต่ละชนิดได้

เทคนิคนี้สามารถทำได้โดยฉายแสงที่มีค่าพลังงานหรือความยาวคลื่นค่าเดียวในย่านของรังสีเอกซ์ (X-ray) จากปืนรังสีเอกซ์ (ในค่าพลังงานของ $AlK\alpha$ หรือ $MgK\alpha$) หรือแสงซินโครตรอนลงบนพื้นผิวของวัสดุหรือตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ภายในระบบสุญญากาศ แล้วทำการตรวจจับและวัดค่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้หลุดออกมาเนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric Effect) ค่าพลังงานจลน์ที่วัดได้นี้สามารถนำมาคำนวณกลับหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน (Binding Energy) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะเจาะจง ทำให้สามารถระบุธาตุองค์ประกอบและสถานะทางเคมีบริเวณพื้นผิวของวัสดุได้

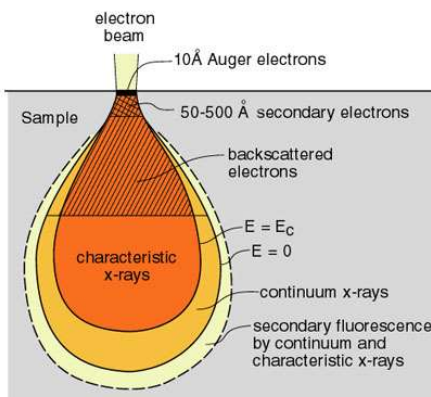


ภาพที่ 3.2 หลักการของเครื่อง XPS

จากภาพที่ 3.2 แสดงหลักการของเทคนิค XPS อิเล็กตรอนในอะตอมถูกกระตุ้นโดยรังสีเอกซ์ให้หลุดออกมาด้วยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกก่อนถูกตรวจจับและวัดค่าพลังงานจลน์ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า electron energy analyzer และแสดงผลในภาพของเส้นสเปกตรัม (spectrum) ก่อนการวิเคราะห์

3.3.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจดังแสดงในภาพที่ 3.3 ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างจากการดิง โดย Energy Dispersive Spectrometry (EDS) เครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์ ใน SEM ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้เพิ่มเติมประเภทตัวอย่างได้แก่ โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์



ภาพที่ 3.3 หลักการทำงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ลักษณะของผลที่ได้: ได้ภาพ 3 มิติจาก Secondary Electron (SE) หรือได้ภาพ 2 มิติจาก Back Scattered Electron (BSE) และธาตุต่างๆที่อยู่ในสารตัวอย่าง

- 1) การใช้งาน นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน กระเจิงกลับ (Back Scattered Electron) ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างที่ผ่านการดองมา หรือเกิดความเสียหายมา
- 2) ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ หากเป็นแบบผง ใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น หากเป็นของแข็ง ควรเตรียมมาโดยมีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรแล้วแต่ภาชนะที่รองรับด้วย (มีขนาดเล็กจะดีกว่า) เนื่องจากตัวอย่างจะสามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนลงกราวด์ได้ดีกว่าป้องกันการ Charging effects) ถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าอาจต้องมีการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองหรือคาร์บอน

3.3.3 Ultraviolet Visible Near Infrared Spectroscopy

สเปกโทรสโกปี UV-VIS-NIR เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการกำหนดสมบัติทางแสงของของเหลวและของแข็ง ได้แก่ ค่าการส่งผ่านแสง (transmittance) การสะท้อนแสง (reflectance) และการดูดกลืนแสง (absorbance) เทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาลักษณะของวัสดุทั้งตัวนำ พอลิเมอร์เคลือบ แก้ว รวมถึงวัสดุอื่น ๆ อีกมากทั้งในงานวิจัยและกระบวนการผลิต โดยช่วงการทำงานของ UV-VIS-NIR อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 175–3300 นาโนเมตร

- 1) การวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวด้วย UV-VIS-NIR

สเปกโทรสโกปี UV/VIS/NIR มักใช้ในการหาความเข้มข้นของสารวิเคราะห์ หรือเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขององค์ประกอบในสารละลาย เทคนิคนี้วัดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ ตัวอย่างจะถูกบรรจุลงในคิวเวต (cuvette) และวางไว้ในแนวทางการเดินทางของแสงระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับตัวตรวจจับ (detector) ตามกฎของ Beer–Lambert เมื่อความยาวทางการเดินทางของแสงคงที่ และทราบค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (ซึ่งขึ้นกับความยาวคลื่น) จะสามารถคำนวณความเข้มข้นของสารจากปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนที่ความยาวคลื่นนั้นได้

- 2) การวิเคราะห์ตัวอย่างของแข็งด้วย UV-VIS-NIR

การวัดค่าการส่งผ่านแสงของตัวอย่างของแข็ง ตัวอย่างจะถูกวางไว้ด้านหน้าของทรงกลมอินทิเกรต (integrating sphere) แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะส่งผ่านตัวอย่างและเข้าสู่ทรงกลมอินทิเกรต จากนั้นแสงจะสะท้อนจากผิวด้านในของทรงกลมและเดินทางไปยังตัวตรวจจับ สามารถวัดได้ทั้งค่าการส่งผ่านแสงรวม (overall transmittance) และค่าการส่งผ่านแสงโดยตรง (direct transmittance) จากสองค่านี้สามารถคำนวณค่าการส่งผ่านแสงแบบกระเจิง (diffuse transmittance) ได้จากสมการ

$$T_{\text{diff}} = T_{\text{overall}} - T_{\text{direct}} \quad (1)$$

- 3) การวัดค่าการสะท้อนแสงของตัวอย่างของแข็ง

การวัดค่าการสะท้อนแสงรวมของวัสดุของแข็งจำเป็นต้องใช้ทรงกลมอินทิเกรต ตัวอย่างจะถูกวางไว้ด้านหลังของทรงกลมอินทิเกรต แสงจากแหล่งกำเนิดจะสะท้อนจากพื้นผิวของตัวอย่าง แล้วสะท้อนต่อจากผิวด้านในของทรง

กลม ก่อนจะไปถึงตัวตรวจจับ นอกจากค่าการสะท้อนแสงรวมแล้ว ยังสามารถวัดค่าการสะท้อนแสงแบบกระเจิงได้อีกด้วย ส่วนค่าการสะท้อนแสงแบบกระจก (specular reflectance) สามารถคำนวณได้จาก

$$R_{\text{spec}} = R_{\text{overall}} - R_{\text{diff}} \quad (2)$$

4) การคำนวณค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างของแข็ง

เปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงถูกนิยามว่าเป็นสัดส่วนของลำแสงตกกระทบที่ถูกตัวอย่างดูดกลืนไป กล่าวคือ เป็นส่วนของลำแสงที่ไม่ถูกสะท้อนและไม่ถูกส่งผ่าน ค่าการดูดกลืนแสงสามารถคำนวณได้จากค่าการสะท้อนและการส่งผ่านแสงดังสมการ

$$\%A = 100\% - \%R_{\text{overall}} - \%T_{\text{overall}} \quad (3)$$

3.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเทคนิคการเคลือบผิว

3.4.1 Radio frequency plasma enhanced chemical vapor deposition

วิธีการเพิ่มการตกตะกอนสะสมด้วยพลาสมาจากไอระเหยทางเคมี (RF-PECVD) ในย่านความถี่วิทยุ (13.56 MHz) เป็นที่รู้จักดีในกลุ่มการเคลือบฟิล์มด้วยไอระเหยทางเคมี โดยอาศัยหลักการแตกตัวของสารตั้งต้นในสถานะแก๊สหรือสารละลายในรูปแบบไอระเหย โดยที่แก๊สตั้งต้นจะถูกกระตุ้นด้วยกำลังไฟฟ้าและความถี่สูงภายในห้องควบคุมสุญญากาศ โดยโมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกกระตุ้นให้แตกตัวเป็น ไอออน อิเล็กตรอน นิวตรอน และ เรดิคอล จนเกิดสถานะที่เรียกว่า “พลาสมา” ทำให้เกิดสปิชีส์ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยสนามไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้อนุภาคต่าง ๆ วิ่งไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้า และกระจายไปทั่วห้องควบคุมสุญญากาศ โดยลักษณะทั่วไประบบจะมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 1 ขั้ว ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นฐานบนวัสดุฐานรอง (Substrate) เช่นเดียวกัน และเมื่อวางวัสดุพื้นที่ต้องการเคลือบลงบนขั้วไฟฟ้าจะทำให้เกิดการตกสะสมในบริเวณดังกล่าว และสร้างชั้นฟิล์มได้ในสภาวะอุณหภูมิห้อง

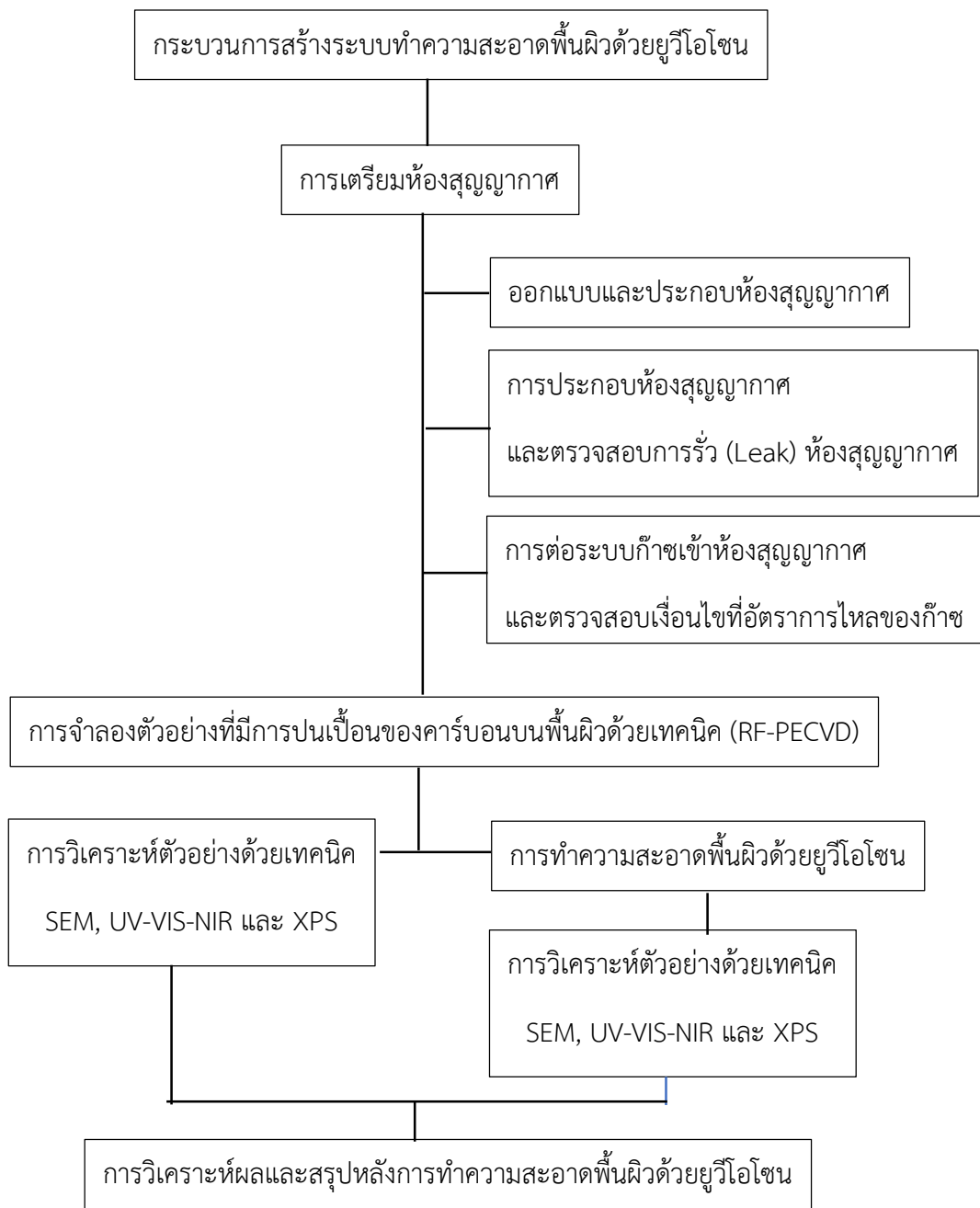
4. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาระบบการทำความสะอาดอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ด้วยกระบวนการยูวีโอโซน (UV/Ozone cleaning) โดยใช้หลอดกำเนิดแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตสุญญากาศภายใต้ระบบสุญญากาศ การทดลองนี้มุ่งเน้นไปที่การจัดการปนเปื้อนของคาร์บอนบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้งานของอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในระบบแสงซินโครตรอน

ลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยกระบวนการหลักที่สำคัญ ดังนี้:

- การสร้างระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซน: เริ่มตั้งแต่การออกแบบและประกอบห้องสุญญากาศ (UV/Ozone Chamber) การตรวจสอบการรั่วซึม (Leak test) ไปจนถึงการติดตั้งระบบก๊าซและควบคุมอัตราการไหล
- การจำลองตัวอย่างที่มีการปนเปื้อน: โดยใช้เทคนิค RF-PECVD เคลือบฟิล์มคาร์บอน (DLC) บนวัสดุฐานรองทอง/ซิลิกอน เพื่อใช้เป็นตัวแทนของอุปกรณ์ที่มีการปนเปื้อนจริง
- กระบวนการทำความสะอาดและการวิเคราะห์ผล: นำตัวอย่างเข้าสู่ระบบเพื่อทำความสะอาดด้วยยูวีโอโซน และดำเนินการวิเคราะห์ลักษณะภายนอกและคุณสมบัติทางกายภาพภายหลังการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการ

ในการเตรียมเครื่องมือ คณะผู้วิจัยได้ออกแบบห้องสุญญากาศให้มีขนาดประมาณ 330 x 330 x 330 มิลลิเมตร เพื่อให้เหมาะสมกับการติดตั้งหลอด VUV-DTS และอุปกรณ์สนับสนุนต่างๆ เช่น Turbomolecular pump และระบบจ่ายก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจน ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นฐานข้อมูลสำคัญในการประยุกต์ใช้งานจริงกับระบบลำเลียงแสงในลำดับต่อไป กระบวนการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปเป็นลำดับขั้นตอนได้ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ผังภาพ (Flowchart) กระบวนการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 4.2 ห้องสุญญากาศ (UV/Ozone Chamber)

4.1 การเตรียมห้องสุญญากาศ (UV/Ozone Chamber)

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทำความสะอาด

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำระบบทำความสะอาดด้วยยูวีโอโซนแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ระบบสุญญากาศ	ระบบแก๊ส	ระบบควบคุมและแสดงผล
1) ห้องสุญญากาศ 2) หน้าแปลน 3) ประเก็นทองแดง 4) Scroll pump 5) Turbomolecular pumps 6) พัดลมระบายความร้อน 7) หลอดยูวี 8) ท่อเฟล็กซ์	1) เกจวัดความดัน 2) Residual Gas Analyzer 3) แก๊สออกซิเจน 4) วาล์ว 5) เครื่องวัดอัตราการไหลของมวล	1) จอแสดงผลความดันบรรยากาศ 2) ระบบควบคุมและแสดงผลปั๊ม Turbomolecular 3) ระบบควบคุมและแสดงผลหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

4.1.2 การออกแบบและประกอบห้องสุญญากาศ (UV/Ozone Chamber)

การออกแบบห้องสุญญากาศและฐานรองรับห้องสุญญากาศสำหรับ UV/Ozone Chamber ในงานนี้ ได้กำหนดขนาดของห้องสุญญากาศโดยประมาณที่ 330 มิลลิเมตร x 330 มิลลิเมตร x 330 มิลลิเมตร เพื่อให้เหมาะสมกับการติดตั้งและการใช้งานหลอด VUV-DTS ภายในระบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.2

โครงสร้างของ UV/Ozone Chamber แบ่งออกเป็นส่วนประกอบหลักทั้งหมด 4 ส่วน ได้แก่

1. ฝาด้านหน้าแบบเปิด-ปิด สำหรับการใส่และนำตัวอย่างออกจากห้องสุญญากาศ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน
2. ส่วนบนของห้องสุญญากาศ ซึ่งใช้สำหรับการติดตั้ง Turbomolecular pump เพื่อสร้างและควบคุมสภาวะสุญญากาศภายในห้อง
3. ส่วนท่อสำหรับติดตั้งหลอด VUV-DTS ซึ่งออกแบบให้เหมาะสมกับตำแหน่งการฉายแสงภายในห้องสุญญากาศ
4. ฝาด้านข้างสำหรับการปล่อยก๊าซออกซิเจน (O_2) เข้าสู่ห้องสุญญากาศ เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างสภาวะ Ozone

ห้องสุญญากาศถูกติดตั้งบนฐานรองรับที่มีขาตั้งจำนวน 4 ขา โดยฐานรองมีความสูงประมาณ 760 มิลลิเมตร เพื่อให้เหมาะสมกับการติดตั้งอุปกรณ์ การเชื่อมต่อระบบ และการบำรุงรักษา โครงสร้างของฐานรองผลิตจากเหล็ก เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความมั่นคงในการรองรับน้ำหนักของห้องสุญญากาศและอุปกรณ์ที่ติดตั้งร่วมกัน

4.1.3 การประกอบห้องสุญญากาศ (Vacuum Chamber Assembly) และตรวจสอบการรั่ว (Helium Leak test) ของห้องสุญญากาศ

การประกอบห้องสุญญากาศสำหรับระบบ UV/Ozone Chamber ต้องคำนึงถึงความแข็งแรงเชิงกล ความสะอาดของผิวสัมผัส และความสามารถในการซีลเพื่อป้องกันการรั่วของอากาศ โดยขั้นตอนการประกอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเตรียมชิ้นส่วนก่อนประกอบ

ตรวจสอบสภาพชิ้นส่วนทั้งหมด เช่น ตัวห้องสุญญากาศ ฝา หน้าแปลนแบบ CF (ConFlat flange) ประเก็นทองแดง (Copper Gasket) และข้อต่อท่อ ว่าปราศจากฝุ่น คราบน้ำมัน หรือรอยขีดข่วน โดยเฉพาะบริเวณผิวซีล ซึ่งอาจทำให้เกิดการรั่วได้

2. การติดตั้งประเก็นทองแดง (Copper Gasket) และหน้าแปลน

การติดตั้งประเก็นทองแดงและหน้าแปลนในระบบห้องสุญญากาศเป็นขั้นตอนสำคัญ เพื่อให้เกิดการซีลที่มีประสิทธิภาพและป้องกันการรั่วของระบบ โดยเฉพาะในระบบสุญญากาศระดับสูงที่ใช้หน้าแปลนแบบ ConFlat (CF flange) ในการติดตั้ง จะวาง ประเก็นทองแดง ไว้ระหว่างหน้าแปลนทั้งสองด้าน โดยให้ประเก็นอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางและแนบสนิทกับผิวซีลของหน้าแปลน จากนั้นประกบหน้าแปลนเข้าด้วยกันและทำการขันสกรูหรือโบลต์ให้แน่นแบบไขว้ (cross tightening) ที่ละน้อย เพื่อให้แรงกดกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยใช้ ประแจทอร์ค (Torque Wrench) ดังแสดงในภาพที่ 4.3 (เครื่องมือที่ใช้สำหรับ ขันน็อตหรือโบลต์ด้วยแรงบิด (Torque) ที่กำหนดอย่างแม่นยำ เพื่อให้การยึดชิ้นส่วนมีความแน่นสม่ำเสมอและปลอดภัย โดยเฉพาะงานวิศวกรรมและงานระบบสุญญากาศ) เมื่อขันหน้าแปลนจนได้แรงกดที่เหมาะสม ขอบของหน้าแปลนจะกดลงบนประเก็นทองแดง ทำให้ประเก็นเกิดการเสียสภาพถาวรและ

สร้างการปิดผนึกที่แน่นหนา ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ซึ่งสามารถป้องกันการรั่วของก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับการใช้งานในสภาวะสุญญากาศระดับสูงและการทดสอบการรั่วด้วยฮีเลียม



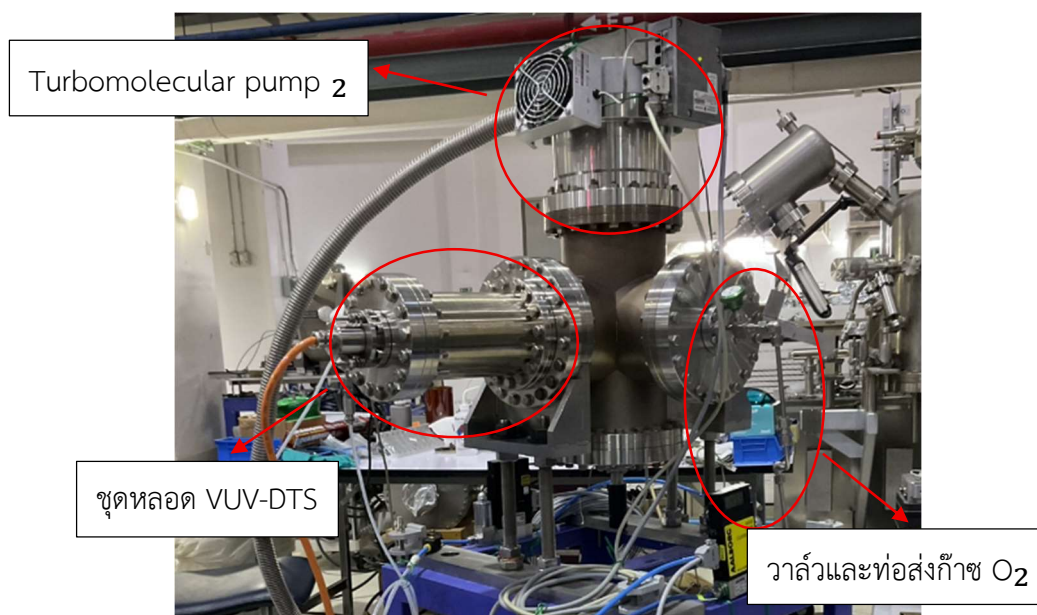
ภาพที่ 4.3 ประแจทอร์ค (Torque Wrench)



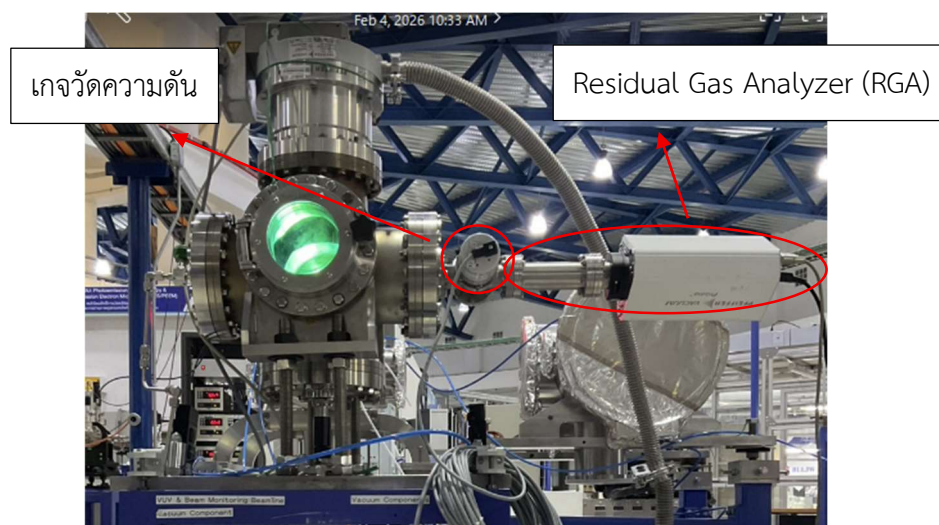
ภาพที่ 4.4 ประเก็นทองแดง

3. การติดตั้งอุปกรณ์หลัก

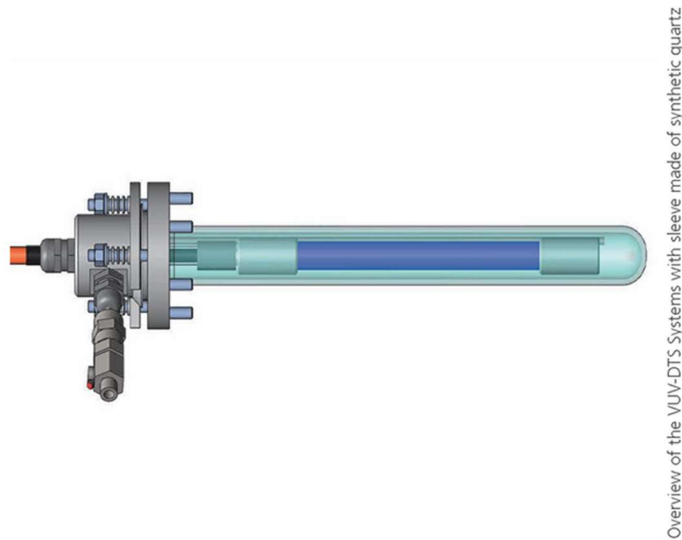
ติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ Turbomolecular pump, เกจวัดความดันสุญญากาศ, วาล์วและท่อส่งก๊าซ O_2 , เครื่องตรวจวัดก๊าซ (Residual Gas Analyzer) และชุดหลอด VUV-DTS ให้แน่นหนาตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้ พร้อมตรวจสอบแนวการติดตั้งให้ตรง ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และ 4.6



ภาพที่ 4.5 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ Turbomolecular pump, ชุดหลอด VUV-DTS และวาล์วและท่อส่งก๊าซ O₂



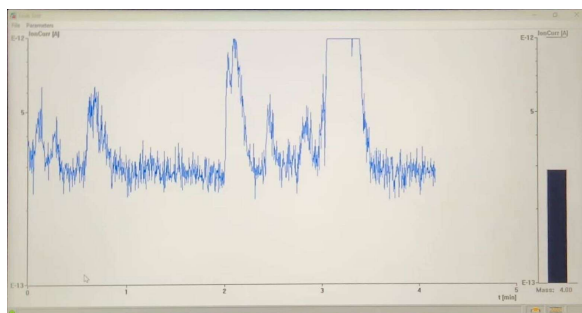
ภาพที่ 4.6 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ เกจวัดความดันสุญญากาศ และเครื่องตรวจวัดก๊าซ (Residual Gas Analyzer)



ภาพที่ 4.7 หลอด VUV-DTS สำหรับห้องสุญญากาศ (Vacuum Chamber)

4. การตรวจสอบการรั่วด้วยฮีเลียม (Helium Leak Test)

หลังจากการประกอบห้องสุญญากาศเสร็จสิ้น ได้ทำการตรวจสอบการรั่วโดยใช้เทคนิค Helium Leak Test ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานสำหรับระบบสุญญากาศระดับสูง เนื่องจากฮีเลียมมีขนาดอะตอมเล็กและสามารถแพร่ผ่านรอยรั่วขนาดเล็กได้ดี ในการทดสอบ ห้องสุญญากาศถูกดูดอากาศออกจนถึงระดับสุญญากาศที่กำหนด (ความดันต่ำกว่า 1×10^{-6} mbar) จากนั้นเชื่อมต่อ Residual Gas Analyzer (RGA) เข้ากับระบบ โดยทำการพ่นก๊าซฮีเลียมบริเวณจุดต้องสงสัย เช่น หน้าแปลน ข้อต่อ ท่อ และบริเวณโอริง หากมีการรั่ว ก๊าซฮีเลียมจะซึมเข้าสู่ห้องสุญญากาศและถูกตรวจจับโดยเครื่องตรวจวัด ซึ่งจะแสดงค่าอัตราการรั่ว (Leak Rate) เมื่อพบตำแหน่งการรั่ว จะทำการแก้ไขโดยการขันหน้าแปลนใหม่ ปรับตำแหน่งข้อต่อ หรือเปลี่ยนประเก็นทองแดง จากนั้นทำการทดสอบซ้ำจนไม่พบสัญญาณการรั่ว หรือมีค่าอัตราการรั่วต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังแสดงในภาพที่ 4.8



มีการรั่ว

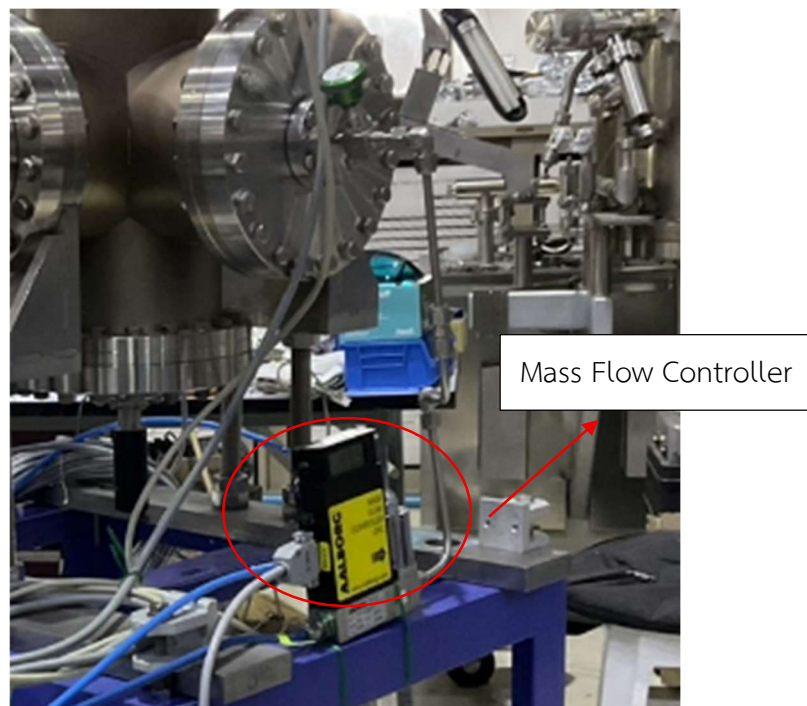


ไม่พบสัญญาณการรั่ว

ภาพที่ 4.8 การตรวจสอบการรั่วด้วยฮีเลียม (Helium Leak Test)

4.1.4 การต่อระบบก๊าซเข้าห้องสุญญากาศและตรวจสอบเงื่อนไขที่อัตราการไหลของก๊าซ

การต่อท่อก๊าซเข้ากับห้องสุญญากาศเป็นขั้นตอนสำคัญ เพื่อควบคุมชนิด ปริมาณ และอัตราการไหลของก๊าซ ที่ถูกปล่อยเข้าสู่ห้องสุญญากาศอย่างแม่นยำและปลอดภัย ในระบบ UV/Ozone Chamber การจ่ายก๊าซออกซิเจน (O_2) ต้องคำนึงถึงความปลอดภัย ความแน่นหนาของข้อต่อ และการป้องกันการรั่วของก๊าซขั้นตอนการต่อท่อก๊าซเริ่มจากการเชื่อมต่อแหล่งก๊าซ (ถังก๊าซ O_2) เข้ากับ เครื่องปรับแรงดันก๊าซ (Regulator) เพื่อควบคุมความดันก่อนเข้าสู่ระบบสุญญากาศ จากนั้นก๊าซจะถูกส่งผ่านท่อสเตนเลสหรือท่อสุญญากาศเข้าสู่ระบบควบคุมการไหล เช่น Mass Flow Controller (MFC) หรือ Needle Valve ดังแสดงในภาพที่ 4.9 เพื่อกำหนดอัตราการไหลของก๊าซก่อนเข้าสู่ห้องสุญญากาศท่อก๊าซถูกเชื่อมต่อเข้ากับห้องสุญญากาศผ่านหน้าแปลน (CF flange) ก่อนการติดตั้งจะมีการตรวจสอบความปลอดภัยของท่อและข้อต่อ เพื่อป้องกันสิ่งปนเปื้อนเข้าสู่ห้องสุญญากาศหลังจากการติดตั้งเสร็จสิ้น จะทำการตรวจสอบการรั่วของระบบท่อก๊าซร่วมกับห้องสุญญากาศ โดยใช้วิธี Helium Leak Test เพื่อยืนยันว่าข้อต่อทั้งหมดมีการประสานกันที่สมบูรณ์และไม่มีการรั่วของก๊าซในระหว่างการใช้งาน



ภาพที่ 4.9 ระบบก๊าซเข้าห้องสุญญากาศ

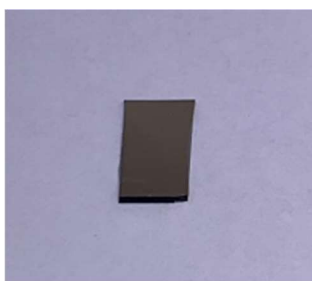
4.2 การจำลองตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนของคาร์บอนบนพื้นผิว

การเคลือบฟิล์มคาร์บอน ด้วยเครื่อง Radio Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (RF-PECVD) ดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 เครื่อง Radio Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition

การเคลือบฟิล์มคาร์บอนทำบนแผ่นซิลิกอนเคลือบทองซึ่งใช้เป็นวัสดุฐานรอง โดยกระบวนการเคลือบดำเนินการด้วยเทคนิค RF-PECVD ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่ควบคุมให้คงที่ทุกประการ ยกเว้นระยะเวลาการเคลือบซึ่งกำหนดให้เป็นตัวแปร โดยทำการเคลือบที่ระยะเวลา 3 และ 5 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.11



แผ่นซิลิกอนเคลือบทอง



เคลือบที่ระยะเวลา 3 นาที



เคลือบที่ระยะเวลา 5 นาที

ภาพที่ 4.11 ตัวอย่างจำลองการปนเปื้อนของคาร์บอนบนพื้นผิว

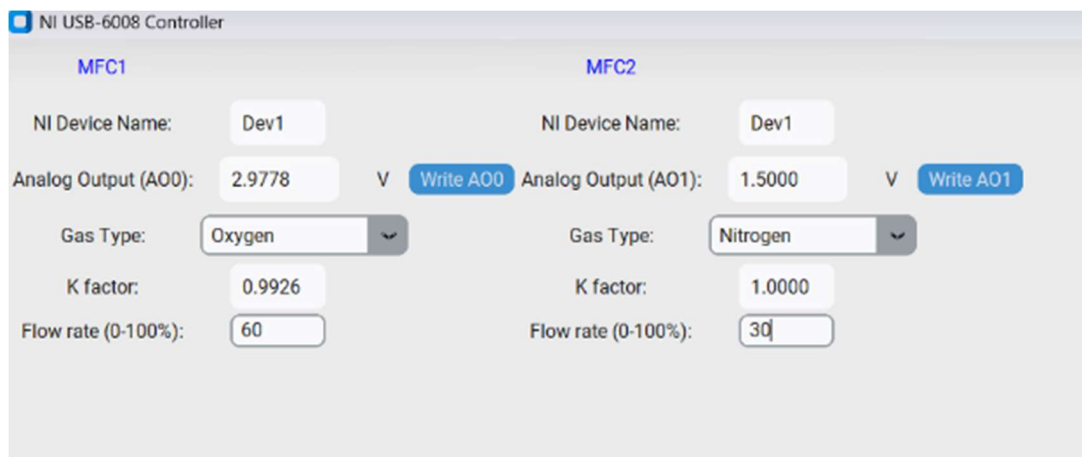
ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มคาร์บอนด้วยเทคนิค RF-PECVD

1. ตัวอย่างที่ต้องการเคลือบฟิล์มจะถูกทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่น คราบไขมัน และสิ่งปนเปื้อน โดยอาจใช้ตัวทำละลาย เช่น อะซิโตนและแอลกอฮอล์ จากนั้นทำให้แห้งก่อนนำไปติดตั้งบนแท่นวาง ปรับตำแหน่งชิ้นงานให้อยู่ภายในบริเวณหัวไฟฟ้า
2. การสร้างสภาวะสุญญากาศหลังจากติดตั้งตัวอย่างแล้ว ห้องเคลือบจะถูกดูดอากาศออกด้วยระบบสุญญากาศจนถึงความดันพื้นฐาน (Base pressure) ที่กำหนด โปรแกรมให้ระบบปั๊มอากาศออกจากห้องเคลือบเป็นระยะเวลา 10 นาที จากนั้นอ่านค่าความดันจาก Pressure gauge ซึ่งแสดงบนหน้าจอ โดยความดันพื้นฐานอยู่ที่ประมาณ 1×10^{-6} torr
3. ตั้งโปรแกรมให้ระบบจ่ายแก๊สอาร์กอนที่อัตราการไหล 20 sccm เพื่อทำความสะอาดพื้นผิวหน้าชิ้นงาน (Ar plasma treatment) โดยรอให้ความดันคงที่เป็นเวลา 2 นาที แล้วทำการอ่านค่าความดัน
4. กำหนดระยะเวลาการทำความสะอาดพื้นผิวหน้าชิ้นงานเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นระบบจะเริ่มทำงานโดยอัตโนมัติ
5. ตั้งโปรแกรมให้ระบบจ่ายแก๊สอาร์กอนที่อัตราการไหล 10 sccm และก๊าซมีเทนที่อัตราการไหล 20 sccm จากนั้นรอให้ความดันคงที่เป็นเวลา 2 นาที และทำการอ่านค่าความดัน
6. ตั้งค่ากำลังไฟฟ้าและระยะเวลาการเคลือบตามเงื่อนไขที่กำหนด ระบบจะเริ่มกระบวนการเคลือบ พร้อมทั้งปรับจูนเนอร์ความถี่ให้เหมาะสมเพื่อลดค่า reflected power ให้น้อยที่สุด
7. เมื่อครบเวลาที่กำหนด ระบบจะหยุดการทำงานโดยอัตโนมัติ จากนั้นรอให้อุณหภูมิภายในห้องเคลือบลดลงประมาณ 10 นาที ทำการ vent ระบบ และนำชิ้นงานออกจากห้องเคลือบ

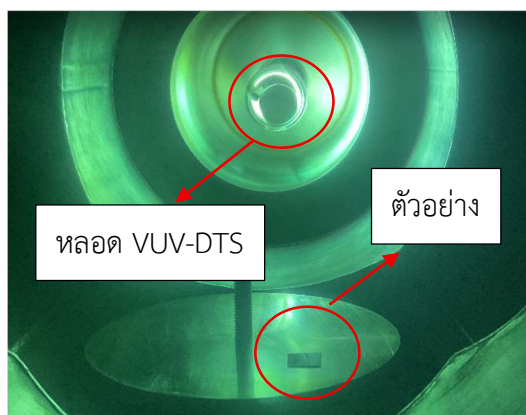
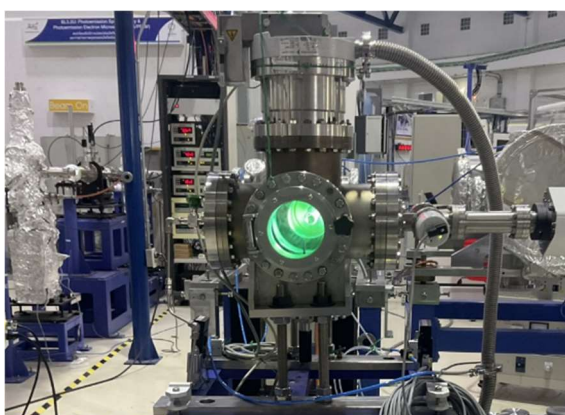
4.3 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซน

ขั้นตอนการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซนโดยเงื่อนไขการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.1

1. เริ่มกระบวนการปั๊มอากาศ เพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศภายในห้องสุญญากาศ จนความดันพื้นฐานอยู่ที่ประมาณ 1×10^{-6} mbar
2. ทำการไล่อากาศภายในหลอด VUV ด้วยก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหลต่ำ เป็นเวลาประมาณ 1 นาที ก่อนเริ่มเปิดใช้งานหลอดไฟ เพื่อกำจัดออกซิเจนออกจากช่องว่างระหว่างหลอดไฟและหลอดแก้วที่ครอบหลอด VUV จากนั้นจ่ายก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหลตามตารางที่ 4.1 เข้าสู่ห้องสุญญากาศโดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซด้วยโปรแกรมควบคุมที่พัฒนาด้วยภาษาไพทอน (Python) ดังแสดงในภาพที่ 4.12
3. เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟ (Main power) เพื่อเริ่มการทำงานของหลอดไฟ ซึ่งจะทำให้เกิดรังสีความยาวคลื่น 185 nm และก๊าซโอโซนขึ้นภายในห้องสุญญากาศ ดังแสดงในภาพที่ 4.13
4. เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ ให้ปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟเพื่อหยุดการทำงานของหลอดไฟและหยุดการไล่ก๊าซไนโตรเจนเมื่อหลอด VUV เย็นลง



ภาพที่ 4.12 หน้าจอโปรแกรมควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ



ภาพที่ 4.13 การทำงานของหลอด VUV-DTS ภายในห้องสุญญากาศ (Vacuum Chamber)

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทำความสะอาดชิ้นงาน

ชื่อตัวอย่าง	เวลา (ชม.)	Turbo Pump	Pressure ก่อน Feed O ₂	Pressure หลัง Feed O ₂	O ₂ flow rate (SCCM)	N ₂ flow rate (SCCM)	หมายเหตุ
Clean 1	18	ปิด	$\sim 10^{-2}$	1.8 mbar	60	30	เปิด turbo pump ให้ pressure ถึง $\sim 1 \times 10^{-6}$ แล้วปิดปั๊ม จนรอบเหลือ 0 ค่อย feed O ₂ แล้วเปิดวาล์วของ Dry pump เล็กน้อยเพื่อไม่ให้ O ₂ โดนดูดออกจนหมด
Clean 2	18	ปิด	$\sim 10^{-2}$	1000 mbar	60	30	เปิด turbo pump ให้ pressure ถึง $\sim 1 \times 10^{-6}$ แล้วปิดปั๊ม จนรอบเหลือ 0 ค่อย feed O ₂ แล้วเปิดวาล์วของ Dry pump เล็กน้อยเพื่อไม่ให้ O ₂ โดนดูดออกจนหมด
Clean 3	18	ปิด	4 mbar	400 mbar	60	80	เปิด Dry pump ให้ pressure ถึง 4 mbar แล้วปิดปั๊มค่อย feed O ₂ จนได้ความดันตามที่กำหนด

หมายเหตุ: เวลาที่ใช้ในการทดลองอ้างอิงจากการทำความสะอาดฟิล์ม 3 min DLC/Au/Si ด้วยเครื่อง Photo Surface Processor (PL17-110) แล้วสามารถกำจัดฟิล์มคาร์บอนออกจนหมด

4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์พื้นผิว

ขั้นตอนการตรวจสอบพื้นผิวก่อนและหลังการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซน

4.4.1 นำตัวอย่างก่อนการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซนทำการตรวจสอบพื้นผิว (Surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM)

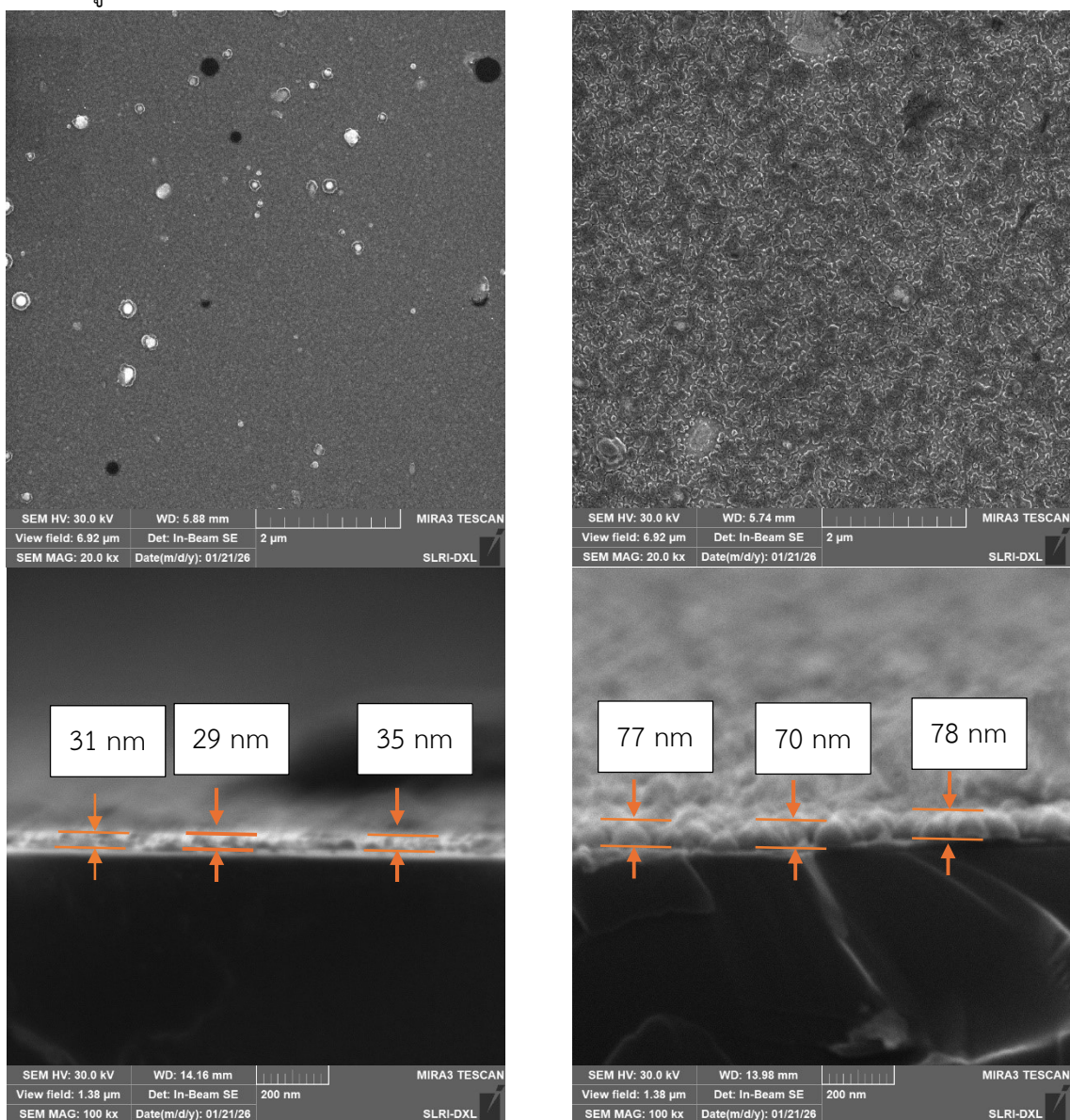
4.4.2 นำตัวอย่างภายหลังการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซนทำการตรวจสอบพื้นผิว (Surface) ด้วยเทคนิค X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) และ UV-VIS-NIR

5. ผลลัพธ์ และอภิปรายผล

5.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค SEM

5.1.1 ก่อนการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซน

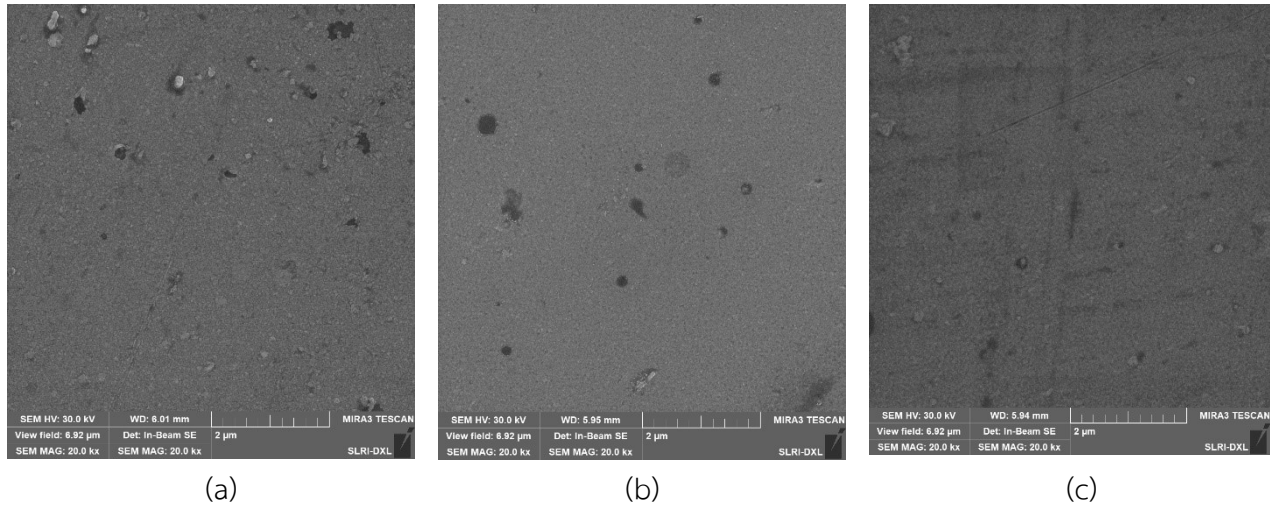
การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพื้นผิวดตัวอย่างก่อนการทำความสะอาดด้วยยูวีโอโซนดำเนินการด้วยเทคนิค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวเริ่มต้นของชิ้นงาน โดยพิจารณาความเรียบ ความสม่ำเสมอ และการมีอยู่ของสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว ดังแสดงในภาพที่ 5.1 ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวหลังการทำความสะอาดด้วยยูวีโอโซนในขั้นตอนถัดไป



ภาพที่ 5.1 พื้นผิวของตัวอย่างก่อนการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซน (ซ้าย) फिल्मคาร์บอนที่เคลือบเวลา 3 นาที (ขวา) फिल्मคาร์บอนที่เคลือบเวลา 5 นาที

5.1.2 หลังทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซน

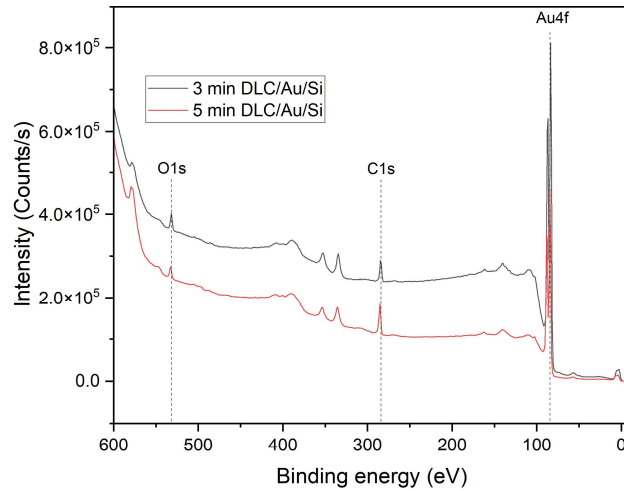
การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพื้นผิวดตัวอย่างหลังการทำความสะอาดด้วยยูวีโอโซน พบว่าลักษณะพื้นผิวไม่มีความแตกต่างจากกรณีของฟิล์มคาร์บอนที่เคลือบเป็นเวลา 3 นาที เป็นผลการยืนยันได้ว่าเทคนิคยูวีโอโซนเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายพื้นผิว ซึ่งสามารถอ้างอิงจากผลของการวัดด้วยเทคนิค XPS ใน ที่บ่งบอกถึงการลดลงของฟิล์มคาร์บอน



ภาพที่ 5.2 พื้นผิวของตัวอย่างหลังการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซน (a) เงื่อนไข clean 1
(b) เงื่อนไข clean 2 (c) เงื่อนไข clean 3

5.2 ผลวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค XPS ก่อนการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซน

จากภาพที่ 5.3 และภาพที่ 5.4 สเปกตรัม XPS แสดงให้เห็นว่าฟิล์มคาร์บอน (DLC) ถูกเคลือบลงบนพื้นผิว Au/Si โดยการเพิ่มระยะเวลาการเคลือบจาก 3 เป็น 5 นาที แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาการเคลือบ DLC จาก 3 เป็น 5 นาที ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น ขณะที่สัญญาณออกซิเจนลดลง ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดฟิล์ม DLC ที่มีความหนาและความครอบคลุมของพื้นผิวที่ดีขึ้น

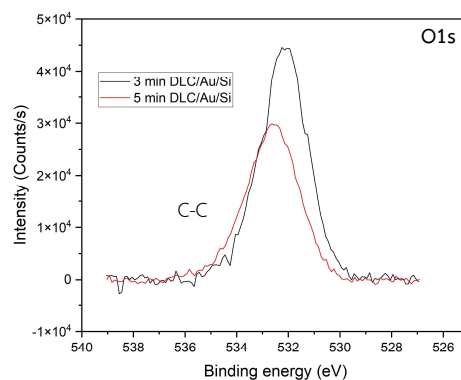
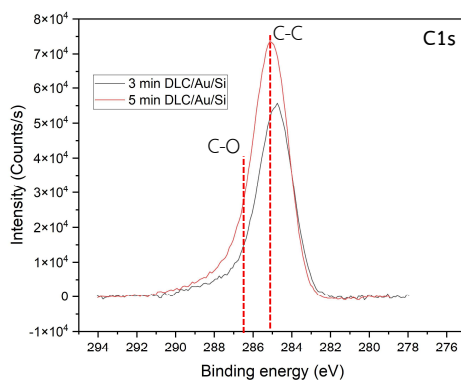


ภาพที่ 5.3 สเปกตรัม XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) แบบ survey scan ของตัวอย่างที่เคลือบ คาร์บอนที่ระยะเวลา 3 และ 5 นาที

พีค O1s (~533 eV) บ่งชี้การมีอยู่ของออกซิเจนบนพื้นผิวอาจเกิดจากออกซิเดชันที่ผิว หรือการปนเปื้อนจาก บรรยากาศ ความเข้มของพีคในตัวอย่าง 3 นาทีสูงกว่าตัวอย่าง 5 นาที แสดงว่าพื้นผิวอาจมีออกซิเจนตกค้างมากกว่า

พีค C1s (~285 eV) เป็นพีคหลักที่ยืนยันการมีอยู่ของคาร์บอนในฟิล์ม DLC พบในทั้งสองตัวอย่าง แสดงถึง การเคลือบฟิล์มคาร์บอน (DLC) ได้สำเร็จ ความแตกต่างของความเข้มอาจสัมพันธ์กับความหนาหรือความต่อเนื่องของ ฟิล์ม

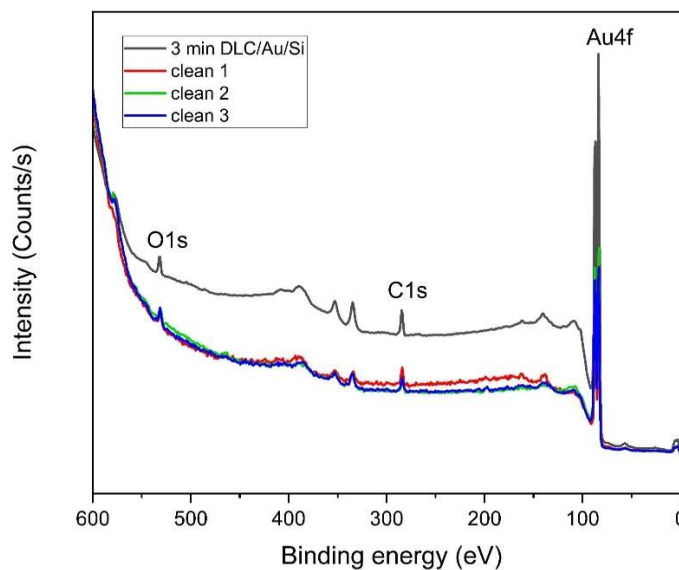
พีค Au4f (~84–88 eV) มาจากชั้นทอง (Au) ของวัสดุฐานรอง การที่ยังตรวจพบพีค Au4f แสดงว่าฟิล์ม DLC ยังมีความบางพอที่อิเล็กตรอนจากชั้น Au สามารถทะลุออกมาได้ ในตัวอย่างที่เคลือบ 5 นาที ความเข้มของพีค Au4f ลดลงเมื่อเทียบกับ 3 นาที ซึ่งบ่งชี้ว่าฟิล์ม DLC มีความหนามากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบ



ภาพที่ 5.4 สเปกตรัม XPS แบบ high-resolution (narrow scan) ของ C1s และ O1s

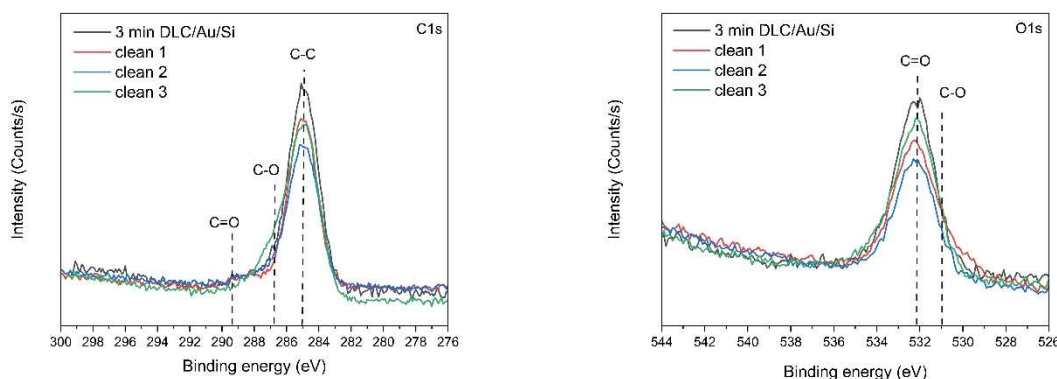
5.3 ผลวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค XPS หลังการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซน [9-12]

เนื่องจากเทคนิคการทำความสะอาดด้วยยูวีโอโซน (UV/Ozone cleaning) เป็นกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งที่มีความนุ่มนวลและไม่ซับซ้อน (Uncomplicated, gentle, dry process), โดยมีจุดเด่นคืออาศัยปฏิกิริยาทางเคมีที่นุ่มนวลซึ่งไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นผิววัสดุ เทคนิคนี้สามารถกำจัดสารปนเปื้อนคาร์บอน (Carbonaceous contaminants) และฟิล์มคาร์บอนบางๆ ให้กลายเป็นก๊าซระเหยเพื่อสร้างพื้นผิวที่สะอาดระดับอะตอม คณะผู้วิจัยจึงเลือกตัวอย่างที่เคลือบคาร์บอนเป็นเวลา 3 นาที บนฐานรองทองและซิลิคอน (3 min DLC/Au/Si) เนื่องจากมีชั้นเคลือบฟิล์มคาร์บอนที่บางที่สุด (~ 31.67 nm) มาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่อง UV/Ozone เพื่อประเมินความสามารถในการฟื้นฟูความสะอาดของพื้นผิวโดยไม่ทำลายโครงสร้างของวัสดุ



ภาพที่ 5.5 สเปกตรัม XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) แบบ survey scan ของตัวอย่างที่มีเงื่อนไขการทำความสะอาดพื้นผิวที่ต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัม XPS แบบ survey ของตัวอย่าง 3 min DLC/Au/Si ก่อน และ หลังการทำความสะอาดด้วยยูวีโอโซนเป็นเวลา 18 ชั่วโมง พบว่า พีคขององค์ประกอบออกซิเจนมีแนวโน้มเด่นชัดมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5.5 ส่งผลให้เกิดการออกซิไดซ์ที่ผิวตัวอย่าง โดยทำให้ปริมาณคาร์บอนบนผิวลดลง ขณะที่ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน การเปลี่ยนแปลงนี้สะท้อนถึงการกำจัดสิ่งปนเปื้อนคาร์บอนและการเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวตัวอย่าง



ภาพที่ 5.6 สเปกตรัม XPS แบบ high-resolution (narrow scan) ของ C1s และ O1s
หลังการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยยูวีโอโซน

จากรูปที่ 5.6 สเปกตรัม XPS แบบ high-resolution (narrow scan) ของ C1s ของตัวอย่าง 3 min DLC/Au/Si แสดงพีคที่ 285.0 eV (C-C aromatic และ aliphatic), 286.3 eV (หมู่ C-O) และ 289.0 eV (หมู่ C=O) เล็กน้อย หลังการทำ UV-ozone 18 ชั่วโมง (clean 1, clean 2 และ clean 3) ปรากฏพีคใหม่ที่ 289.0 eV สำหรับหมู่ C=O มีความเข้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และนอกจากนี้ยังพบการลดลงอย่างมากของพีคที่ 285.0 eV ซึ่งบ่งชี้ว่าพันธะ C-C aromatic ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการออกซิเดชันประสบความสำเร็จในการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวคาร์บอน จากสเปกตรัม XPS ของ C1s แสดงให้เห็นว่า clean 2 และ clean 3 พันธะ C-C aromatic ที่ลดลงอย่างชัดเจน นี่อาจเป็นเพราะเงื่อนไขการทำความสะอาดพื้นผิวของ clean 2 และ clean 3 จะเกิดโอโซนได้ดีที่สุด เพราะมีความดันและความเข้มข้นของ O_2 ที่สูง (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญต่อการสร้าง O_3 สำหรับสเปกตรัม XPS แบบ high-resolution (narrow scan) ของพีค O1s (~531–533 eV) หลังการทำความสะอาดด้วยยูวีโอโซนมีความเข้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน การเพิ่มขึ้นของสัญญาณ O1s บ่งชี้ถึงการเกิดออกซิเดชันบนผิวฟิล์ม DLC และการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน

จากผลการวิเคราะห์สเปกตรัม XPS แบบ high-resolution (narrow scan) ของพีค C1s สำหรับตัวอย่าง 3 min DLC/Au/Si ก่อนการทำ UV-ozone พบองค์ประกอบหลักที่ 285.0 eV ซึ่งสอดคล้องกับพันธะ C-C (ทั้ง aromatic และ aliphatic) พร้อมทั้งพีคย่อยที่ 286.3 eV (C-O) และพีคที่ 289.0 eV (C=O) ในระดับความเข้มต่ำ แสดงถึงการมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวในปริมาณจำกัด ภายหลังจากทำความสะอาดด้วย UV-ozone เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไข clean 1, clean 2 และ clean 3 พบการเปลี่ยนแปลงเชิงเคมีบนพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดของพีคที่ 289.0 eV ซึ่งสอดคล้องกับหมู่คาร์บอนิล (C=O) ขณะเดียวกัน พีคที่ 285.0 eV มีความเข้มลดลง สะท้อนถึงการลดลงของพันธะ C-C การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าพันธะ C-C บางส่วนถูกออกซิไดส์และเปลี่ยนเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน เช่น C-O และ C=O บนพื้นผิว

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างแต่ละเงื่อนไข พบว่า clean 2 และ clean 3 แสดงการลดลงของพีค C-C อย่างชัดเจนกว่ากรณี clean 1 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากเงื่อนไขการทำความสะอาดที่เอื้อต่อการสร้าง

โอโซน (O_3) ได้มากกว่า กล่าวคือ ความดันและความเข้มข้นของ O_2 ที่สูงขึ้นส่งเสริมปฏิกิริยาการเกิดโอโซน โดยโอโซนที่เกิดขึ้นเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีศักยภาพสูง สามารถทำปฏิกิริยากับพันธะ $C=C$ และ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดการแตกพันธะและหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเพิ่มขึ้น ดังนั้น เจ็อนไซ clean 2 และ clean 3 จึงมีแนวโน้มก่อให้เกิดการออกซิเดชันของพื้นผิวได้มากกว่า

โดยสรุป ผลการวิเคราะห์ XPS ทั้งในส่วน of $C1s$ และ $O1s$ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ากระบวนการทำความสะอาดด้วย UV-ozone สามารถกระตุ้นการออกซิเดชันบนพื้นผิว ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะภายใต้เจ็อนไซ clean 2 และ clean 3 ซึ่งมีความดันและความเข้มข้นของ O_2 สูงกว่า ส่งผลให้เกิดการสร้างโอโซนในปริมาณมากและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสะท้อนถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนและการลดลงของโครงสร้างคาร์บอนแบบ $C-C$ ซึ่งมีความสำคัญต่อการปรับสมบัติพื้นผิว

5.4 การวิเคราะห์ค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากเทคนิค UV-VIS-NIR

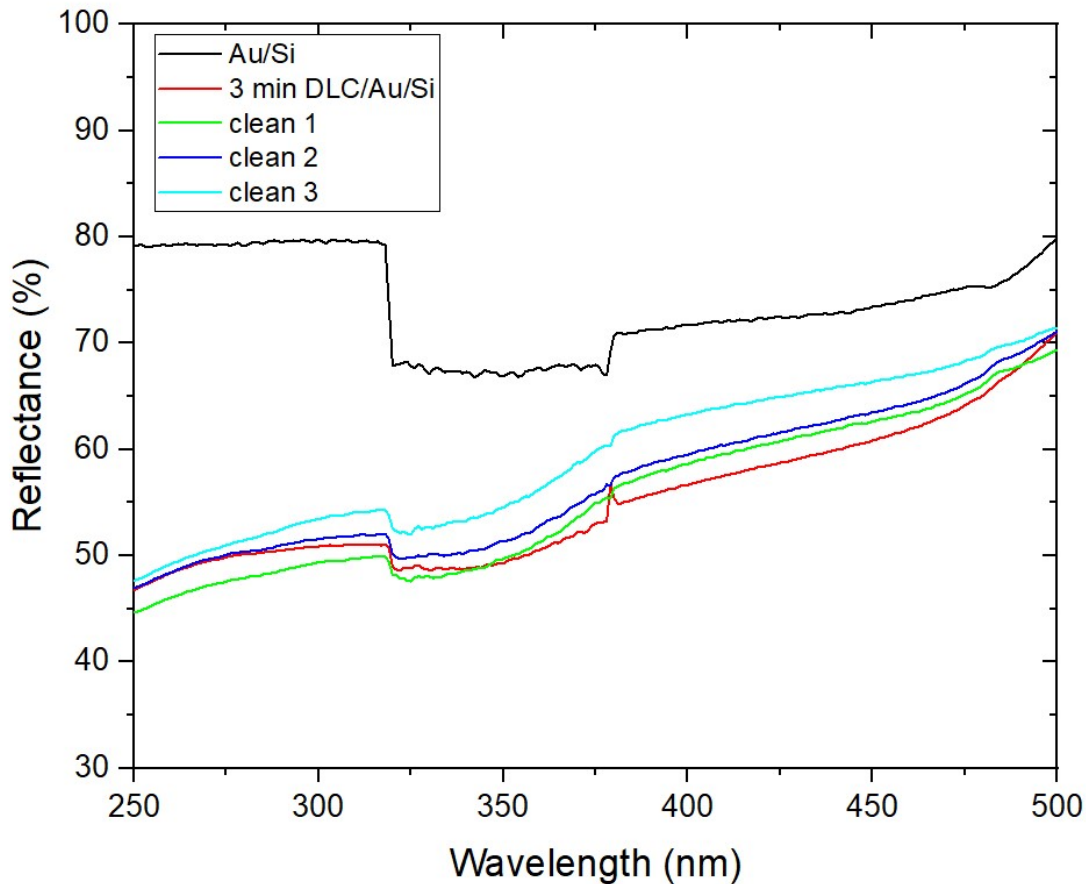
ภาพที่ 5.7 แสดงสเปกตรัมค่าการสะท้อนแสงของตัวอย่าง 3 min DLC/Au/Si และตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด (clean 1–3) เปรียบเทียบกับตัวอย่าง Au/Si ในช่วงความยาวคลื่น 250–500 นาโนเมตร พบว่า ทุกตัวอย่างมีแนวโน้มค่าการสะท้อนเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง เมื่อเปรียบเทียบค่าการสะท้อน พบว่า clean 3 ให้ค่าการสะท้อนสูงที่สุด รองลงมาคือ clean 2, clean 1 และ 3 min DLC/Au/Si ตามลำดับ โดยความแตกต่างของค่าการสะท้อนเห็นได้ชัดเจนที่สุดในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (<400 นาโนเมตร) ขณะที่ในช่วงมากกว่า ~400 นาโนเมตร ค่า reflectance ของแต่ละตัวอย่างเริ่มมีแนวโน้มเข้าใกล้กันมากขึ้น

การที่ค่าการสะท้อนเพิ่มขึ้นตามลำดับจาก clean 1 ไปยัง clean 3 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำความสะอาดมีผลโดยตรงต่อคุณภาพพื้นผิว ตัวอย่าง clean 3 ซึ่งให้ค่าการสะท้อนสูงที่สุด บ่งชี้ว่ามีการลดปริมาณสารปนเปื้อนบนพื้นผิว ผลกระทบของสภาพพื้นผิวเห็นได้ชัดเจนที่สุดในช่วง 250–350 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุจำพวกคาร์บอนมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูง การมี carbon contamination แม้มีความหนาเพียงไม่กี่นาโนเมตรสามารถทำให้ค่าการสะท้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น (>400 นาโนเมตร) ผลกระทบของชั้นปนเปื้อนบาง ๆ จะลดลง ทำให้ความแตกต่างระหว่างตัวอย่างลดลง

ตัวอย่าง 3 min DLC/Au/Si ให้ค่าการสะท้อนต่ำที่สุดในทุกช่วงความยาวคลื่น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการมีชั้น DLC ปกคลุมผิว Au โดยชั้น DLC ส่งผลต่อสมบัติทางแสงดังนี้

- เพิ่มการดูดกลืนแสง เนื่องจากมีค่า extinction coefficient ไม่เป็นศูนย์ (Extinction coefficient (k) คือค่าที่บ่งบอกความสามารถของวัสดุในการ ดูดกลืนและลดทอนความเข้มของแสง เมื่อแสงเดินทางผ่านวัสดุนั้น)
- ทำให้เกิดปรากฏการณ์ thin-film interference (Thin-film interference (การแทรกสอดในฟิล์มบาง) คือปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่คลื่นแสงสะท้อนหลายครั้งภายในชั้นฟิล์มที่มีความหนาระดับนาโนเมตร–ไมโครเมตร แล้วคลื่นสะท้อนเหล่านั้นมา เสริมกัน (constructive interference) หรือ หักล้างกัน (destructive interference)

ผลดังกล่าวมีความเด่นชัดในช่วงคลื่นสั้น (<400 นาโนเมตร) ซึ่ง DLC มีแนวโน้มดูดกลืนแสงมากกว่าในช่วงคลื่นยาว จึงทำให้ค่าการสะท้อนของตัวอย่างที่เคลือบ DLC ต่ำกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำความสะอาดอย่างชัดเจนในช่วง UV



ภาพที่ 5.7 แสดงสเปกตรัมค่าการสะท้อนแสงของตัวอย่าง

6. สรุปผล

จากการศึกษากระบวนการทำความสะอาดอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ด้วยกระบวนการยูวีโอโซน (UV/Ozone cleaning) โดยใช้หลอด VUV-DTS ภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อกำจัดชั้นคาร์บอนจำลอง (DLC) บนวัสดุฐานรองทอง/ซิลิกอน (Au/Si) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ประสิทธิภาพการทำความสะอาด กระบวนการ UV/Ozone สามารถกำจัดชั้นคาร์บอนและสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพภายหลังการทำความสะอาดเป็นเวลา 18 ชั่วโมง พบว่าปริมาณคาร์บอน (C1s) โดยเฉพาะพันธะ C-C ลดลงอย่างชัดเจน ในขณะที่สัญญาณออกซิเจน (O1s) และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O) เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงความสำเร็จของปฏิกิริยาออกซิเดชัน ค่าการสะท้อนแสง (Reflectivity) ของตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นในทุกเงื่อนไข โดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร (UV) ซึ่งเป็นช่วงที่คาร์บอนมีการดูดกลืนแสงสูง

เงื่อนไข Clean 3 (ความดัน 400 mbar) ให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยพิจารณาจากค่าการสะท้อนแสงที่กลับมาสูงที่สุดและการลดลงของพันธะคาร์บอนที่เด่นชัดที่สุด

7. กลุ่มผู้ใช้ประโยชน์

งานพัฒนาระบบกำจัดคาร์บอนที่ปนเปื้อนบนอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ ณ ระบบลำเลียงแสงที่ 3.2 Ua/b มีประโยชน์สำหรับผู้ให้บริการแสงของสถาบันฯ ดังต่อไปนี้

1. การฟื้นฟูประสิทธิภาพทางทัศนศาสตร์ของอุปกรณ์ สามารถเพิ่มความสามารถในการสะท้อนแสง (Reflectivity) ให้กลับมาอยู่ในระดับที่ดีขึ้น และลดการฟุ้งกระจายของแสง (Scattered light) ที่เกิดจากการปนเปื้อนของชั้นคาร์บอน โดยเฉพาะในช่วงพลังงานที่ใกล้ขอบการดูดกลืนของคาร์บอน (Carbon K-edge)

2. การยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ราคาสูง: ช่วยให้สามารถฟื้นฟูพื้นผิวอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ที่มีความละเอียดอ่อนและเปราะบาง เช่น กระจกสะท้อนหรือเกรตติง (Grating) ให้กลับมาใช้งานได้ใหม่ ช่วยยืดอายุการใช้งานและประหยัดงบประมาณในการจัดซื้ออุปกรณ์ใหม่

ข้อเสนอแนะ

การนำไปใช้งานจริง ควรนำเงื่อนไขและระยะเวลาที่เหมาะสมจากการวิจัยนี้ (โดยเฉพาะเงื่อนไข Clean 3) ไปจัดทำเป็นมาตรฐานในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ เช่น กระจกสะท้อนและเกรตติง ในระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน เพื่อยืดอายุการใช้งานและประหยัดงบประมาณ

การพัฒนาต่อยอด ในการทดลองครั้งถัดไป อาจมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของหลอด VUV กับพื้นผิวชิ้นงาน หรือการทดลองกับวัสดุฐานรองประเภทอื่น ๆ ที่ใช้งานในระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน

ทดสอบความขรุขระของผิวกระจกหลังการกำจัดคาร์บอนว่ามีความเสียหายหรือไม่

ทดสอบกับเกรตติงที่ผ่านการใช้งานจริง ก่อนนำไปใช้งานกับเกรตติงที่ BL 3.2Ua/b

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hansen, Roger WC, Jeff Wolske, and Peter Z. Takacs. "UV/ozone cleaning of a replica grating." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 347.1-3 (1994): 254-257.
- [2] E. Laskey, Uvocs, Inc., The UV/Ozone Process for Ultra-Cleaning before Vacuum Deposition, 34th Annual Technical Conference Proceedings (1991) ISBN 1-878068-10-5:374-377.
- [3] Harada, Tatsuo, et al. "Ultraviolet/ozone cleaning of a soft x-ray grating contaminated by synchrotron radiation." *Applied optics* 30.10 (1991): 1165-1168.
- [4] Yadav, Praveen Kumar, and Mohammed H. Modi. "T. 3: Study of carbon removal from synchrotron mirror like gold surfaces using different techniques."
- [5] https://web.etc1992.com/?page_id=6204
- [6] <https://www.ossila.com/pages/uv-ozone-theory>
- [7] <https://www.slri.or.th/th/bl5-3-xps.html>
- [8] https://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detailb137.html?id_sub=42&id=39
- [9] Verkuijlen, R. O. F., et al. "Surface modification of polycarbonate and polyethylene naphthalate foils by UV-ozone treatment and μ Plasma printing." *Applied surface science* 290 (2014): 381-387.
- [10] Song, Weijie, et al. "Angle dependent X-ray photoemission study on UV-ozone treatments of indium tin oxide." *Applied surface science* 177.3 (2001): 158-164.
- [11] Sham, Man-Lung, and Jang-Kyo Kim. "Surface functionalities of multi-wall carbon nanotubes after UV/Ozone and TETA treatments." *Carbon* 44.4 (2006): 768-777.
- [12] Surucu, Seda, and Hilal Turkoglu Sasmazel. "DBD atmospheric plasma-modified, electrospun, layer-by-layer polymeric scaffolds for L929 fibroblast cell cultivation." *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition* 27.2 (2016): 111-132.

ภาคผนวก

Code โปรแกรมควบคุมอัตราการไหลของก๊าซที่พัฒนาด้วยภาษา Python

```

1. import customtkinter as ctk
2. import nidaqmx
3.
4. class USB6008Controller:
5.     def __init__(self, master):
6.         self.master = master
7.         ctk.set_appearance_mode('light')
8.         master.title("NI USB-6008 Controller")
9.
10.        # Device Selection
11.        ctk.CTkLabel(master, text="MFC1", text_color="blue").grid(row=0, column=0, padx=5, pady=5)
12.        ctk.CTkLabel(master, text="NI Device Name:").grid(row=1, column=0, padx=5, pady=5)
13.        self.device_name_boxI = ctk.CTkTextbox(master, width=65, height=20)
14.        self.device_name_boxI.grid(row=1, column=1)
15.        self.device_name_boxI.insert("0.0", "Dev1")
16.
17.        ctk.CTkLabel(master, text="MFC2", text_color="blue").grid(row=0, column=4, padx=5, pady=5)
18.        ctk.CTkLabel(master, text="NI Device Name:").grid(row=1, column=4, padx=5, pady=5)
19.        self.device_name_boxII = ctk.CTkTextbox(master, width=65, height=20)
20.        self.device_name_boxII.grid(row=1, column=5)
21.        self.device_name_boxII.insert("0.0", "Dev1")
22.
23.        # Analog Output (AO0)
24.        ctk.CTkLabel(master, text="Analog Output (AO0):").grid(row=2, column=0, padx=5, pady=5)
25.        self.ao_volI = ctk.CTkTextbox(master, width=80, height=20)
26.        self.ao_volI.grid(row=2, column=1)
27.        self.ao_volI.insert("0.0", "0")
28.        ctk.CTkLabel(master, text="V").grid(row=2, column=2)
29.
30.        self.write_ao_buttonI = ctk.CTkButton(master, text="Write AO0",
31.                                                command=self.write_analog_output0,
32.                                                width=65, height=20)
33.        self.write_ao_buttonI.grid(row=2, column=3)
34.
35.        # Analog Output (AO1)
36.        ctk.CTkLabel(master, text="Analog Output (AO1):").grid(row=2, column=4, padx=5, pady=5)
37.        self.ao_volII = ctk.CTkTextbox(master, width=80, height=20)
38.        self.ao_volII.grid(row=2, column=5)
39.        self.ao_volII.insert("0.0", "0")
40.        ctk.CTkLabel(master, text="V").grid(row=2, column=6)
41.
42.        self.write_ao_buttonII = ctk.CTkButton(master, text="Write AO1",
43.                                                command=self.write_analog_output1,
44.                                                width=65, height=20)
45.        self.write_ao_buttonII.grid(row=2, column=7)
46.
47.        # Gas Type SelectionI
48.        ctk.CTkLabel(master, text="Gas Type:").grid(row=3, column=0)
49.        self.gas_combobox = ctk.CTkComboBox(master, values=list(self.related_values_data.keys()),
50.                                                command=self.update_related_combobox0)
51.        self.gas_combobox.grid(row=3, column=1, columnspan=2, pady=5)
52.
53.        # Gas Type SelectionII
54.        ctk.CTkLabel(master, text="Gas Type:").grid(row=3, column=4)
55.        self.gas_combobox = ctk.CTkComboBox(master, values=list(self.related_values_data.keys()),
56.                                                command=self.update_related_combobox1)
57.        self.gas_combobox.grid(row=3, column=5, columnspan=2, pady=5)
58.
59.        # K factorI
60.        ctk.CTkLabel(master, text="K factor:").grid(row=4, column=0)
61.        self.k_boxI = ctk.CTkTextbox(master, width=65, height=20)
62.        self.k_boxI.grid(row=4, column=1)
63.        self.k_boxI.insert("0.0", "1.0000")
64.
65.        # K factorII
66.        ctk.CTkLabel(master, text="K factor:").grid(row=4, column=4)
67.        self.k_boxII = ctk.CTkTextbox(master, width=65, height=20)
68.        self.k_boxII.grid(row=4, column=5)
69.        self.k_boxII.insert("0.0", "1.0000")
70.
71.        # Flow Rate InputI
72.        ctk.CTkLabel(master, text="Flow rate (0-100%):").grid(row=5, column=0)

```

```

73.         self.flow_boxI = ctk.CTkEntry(master, placeholder_text="0", width=65, height=20)
74.         self.flow_boxI.grid(row=5, column=1)
75.         self.flow_boxI.insert(0, "0")
76.
77.         # Flow Rate InputII
78.         ctk.CTkLabel(master, text="Flow rate (0-100%):").grid(row=5, column=4)
79.         self.flow_boxII = ctk.CTkEntry(master, placeholder_text="0", width=65, height=20)
80.         self.flow_boxII.grid(row=5, column=5)
81.         self.flow_boxII.insert(0, "0")
82.
83.     def write_analog_output0(self):
84.         try:
85.             dev_name = self.device_name_boxI.get("0.0", "end").strip()
86.             with nidaqmx.Task() as task:
87.                 task.ao_channels.add_ao_voltage_chan(f"{dev_name}/ao0", min_val=0, max_val=5)
88.                 # Clean the string to handle potential newlines from Textbox
89.                 val_strI = self.ao_volI.get("0.0", "end").strip()
90.                 task.write(float(val_strI))
91.         except Exception as e:
92.             messagebox.showerror("NI-DAQmx Error", str(e))
93.
94.     def write_analog_output1(self):
95.         try:
96.             dev_name = self.device_name_boxII.get("0.0", "end").strip()
97.             with nidaqmx.Task() as task:
98.                 task.ao_channels.add_ao_voltage_chan(f"{dev_name}/ao1", min_val=0, max_val=5)
99.                 # Clean the string to handle potential newlines from Textbox
100.                 val_strII = self.ao_volII.get("0.0", "end").strip()
101.                 task.write(float(val_strII))
102.         except Exception as e:
103.             messagebox.showerror("NI-DAQmx Error", str(e))
104.
105.     def update_related_combobox0(self, choice):
106.         related_listI = self.related_values_data.get(choice, [1.0])
107.         k_factorI = related_listI[0]
108.         formatted_kI = f"{k_factorI:.4f}"
109.
110.         # Update K-Factor Box
111.         self.k_boxI.delete("0.0", "end")
112.         self.k_boxI.insert("0.0", formatted_kI)
113.
114.         # Calculate AO Output
115.         try:
116.             flow_inputI = self.flow_boxI.get()
117.             flow_valI = float(flow_inputI) if flow_inputI else 0.0
118.
119.             # Formula: (Flow% * K_Factor * 5V) / 100
120.             fl_rateI = k_factorI * flow_valI
121.             ao_outI = (fl_rateI * 5) / 100
122.
123.             # Cap voltage at 5V for NI USB-6008
124.             ao_outI = min(ao_outI, 5.0)
125.
126.             self.ao_volI.delete("0.0", "end")
127.             self.ao_volI.insert("0.0", f"{ao_outI:.4f}")
128.         except ValueError:
129.             pass # Ignore if flow_box is not a number
130.
131.     def update_related_combobox1(self, choice):
132.         related_listII = self.related_values_data.get(choice, [1.0])
133.         k_factorII = related_listII[0]
134.         formatted_kII = f"{k_factorII:.4f}"
135.
136.         # Update K-Factor Box
137.         self.k_boxII.delete("0.0", "end")
138.         self.k_boxII.insert("0.0", formatted_kII)
139.
140.         # Calculate AO Output
141.         try:
142.             flow_inputII = self.flow_boxII.get()
143.             flow_valII = float(flow_inputII) if flow_inputII else 0.0
144.

```

```
145.         # Formula: (Flow% * K_Factor * SV) / 100
146.         fl_rateII = k_factorII * flow_valII
147.         ao_outII = (fl_rateII * 5) / 100
148.
149.         # Cap voltage at 5V for NI USB-6008
150.         ao_outII = min(ao_outII, 5.0)
151.
152.         self.ao_volII.delete("0.0", "end")
153.         self.ao_volII.insert("0.0", f"{ao_outII:.4f}")
154.     except ValueError:
155.         pass # Ignore if flow_box is not a number
156.
157.
158.     # Gas K-Factor Database
159.     related_values_data = {
160.         "Air": [1.0000],
161.         "Acetylene": [0.5829],
162.         "Ammonia": [0.7310],
163.         "Argon": [1.4573],
164.         "Carbon Dioxide": [0.7382],
165.         "Nitrogen": [1.0000],
166.         "Oxygen": [0.9926],
167.         "Propane": [0.3500],
168.         "Methane": [0.7175]
169.         # ... Add others as needed
170.     }
171.
172. if __name__ == "__main__":
173.     root = ctk.CTk()
174.     app = USB6008Controller(root)
175.     root.mainloop()
176.
```