รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนอุปกรณ์ตัดคว้านสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร

Research and Development of Chromium Nitride Thin Films on Cutting Tools For Agricultural Products Industry

โดย

นายจักรพันธ์ ถาวรธิราและคณะ

กรกฎาคม 2551

❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁

สัญญาเลขที่ RDG4850024

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย
การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนอุปกรณ์ตัดคว้านสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร
Research and Development of Chromium Nitride Thin Films on Cutting Tools For Agricultural Products Industry

โดย
นายจักรพันธ์ ถาวรธิรา
นายสุรสิงห์ ไชยคุณ
ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

นายสุคคเณศ ตุงคะสมิต
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁

บทสรุปผู้บริหาร

อุตสาหกรรมแปรรูปทางการเกษตรเป็นอุตสาหกรรมสำคัญอุตสาหกรรมหนึ่งของประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการแปรรูปสับปะรด ซึ่งใช้มีดทรงกระบอกในกระบวนการแปรรูป อย่างไรก็ดีมีดที่ใช้ในกระบวนการนั้นมีปัญหาเกี่ยวกับการผุกร่อน บริษัท เบทเทอร์ มาชีนเนอรี จำกัด ผู้ประกอบการทางการผลิตเครื่องมือแปรรูปสินค้าทางการเกษตร สนใจที่จะแก้ปัญหานี้ และได้ปรึกษากับคณะนักวิจัย ได้ข้อสรุปร่วมกันว่า ปัญหานี้แก้ไขได้โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเคลือบด้วยสารที่มีเหมาะสมได้แก่โครเมียมไนไตรด์ (CrN) ในลักษณะฟิล์มบางที่ผิวของใบมีด เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงผิวของใบมีดสำหรับลดการเสียดสีและป้องกันการทำปฏิกริยาเคมีบนใบมีด

จากการพิจารณาร่วมกันของ คณะผู้วิจัย และ บริษัท เบทเทอร์ มาชีนเนอรี จำกัด ทำให้คณะผู้วิจัยเสนอโครงการ “การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนอุปกรณ์ตัดคว้านสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร” ต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (ฝ่าย 5) โดยมีบริษัท เบทเทอร์ มาชีนเนอรี จำกัด เป็นผู้ร่วมให้ทุนวิจัย และได้รับการอนุมัติให้เริ่มดำเนินโครงการได้ตั้งแต่ วันที่ 1 มกราคม 2548 ตามสัญญาเลขที่ RDG4850024 ซึ่งมีระยะเวลาดำเนินงาน 18 เดือน งบประมาณรวม 2,872,800 บาท แบ่งเป็นส่วนที่รับการสนับสนุนจาก สกว. จำนวน 2,147,800 บาท และสมทบจาก บริษัท เบทเทอร์ มาชีนเนอรี จำกัด จำนวน 725,000 บาท วัตถุประสงค์หลักของโครงการคือเพื่อพัฒนาเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรดสำหรับยืดอายุการใช้งานชิ้นงาน

สำหรับผลการดำเนินงานของโครงการมีดังนี้ เครื่องเคลือบในสุญญากาศที่ปรับแต่งแล้วสามารถเคลือบฟิล์มบางของโลหะและฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนวัสดุรองรับได้ โดยสมบัติและโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ ทั้งนี้เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ความดันพื้นเท่ากับ $3x10^{-5}$ mbar อัตราส่วนความดันย่อยแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 2.5:1.5 กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 230 W อุณหภูมิวัสดุรองรับขณะเคลือบเท่ากับ 250 ^{O}C ความต่างศักย์ไบแอสเท่ากับ -100 V เมื่อพิจารณาฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ด้วยตาเปล่าพบว่าฟิล์มที่ได้มีสีดำเข้มเป็นมันวาวสะท้อนแสงดี เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ใน 2 ระนาบคือ CrN(111), CrN(200) ผลการทดสอบการใช้งานจริงพบว่าใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรดที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์แล้วมีอายุการใช้งานมากกว่าใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรดที่ไม่ได้เคลือบ สูงสุด 9 เท่าสำหรับใบมีดสั้น และ 6 เท่าสำหรับใบมีดยาว

Executive Summary

Agricultural food processing industries is one of the most important industries of Thailand, especial for pineapples, which have use cylinder knife's shape in the process. The knives which use in the processes have some problem about erosion of the edge. BETTER Co.Ltd., agricultural food processing machine manufacture, interest to slove this problem. BETTER have discuss about this problem with researcher staff, which have conclude that, this problem can slove by coating the knife with appropriate substance, CrN thin film, for modified surface properties to protect of wear and chemical reaction of the knife surface.

From the discussion of researcher staffs and BETTER Co.Ltd.. We repurpose the research project "Research and Development of Chromium Nitride Thin Films on Cutting Tools For Agricultural Products Industry" to the Thailand Research Fund (TRF) for the main funding and co-funding from BETTER Co.Ltd., contract number RDG4850024 of the research project for 18 months in 2,872,800 baths (from the TRF 2,147,800 baths and from the ESSOM 725,000 baths). The main objective of this research was to develop the deposition technique of CrN thin film for coating on knife for extended the useage life.

The result of this research show that, the modified vacuu coater, the modified vacuum coater can be deposited a metal thin film and CrN thin film on the substrate. The properties and crystal structure of thin films were varying with the deposition conditions. The suitable condition for deposited the CrN thin film was, base pressure equal to $3x10^{-5}$ mbar, partial pressure ration of gas Ar and gas O_2 was 2.5:1.5, electrical power was 230 W, substrate temperature was 250 ^{O}C and voltage bias was -100 V. As-deposited CrN thin film gave a black bright color. From XRD technique we find 2 phase of CrN that were CrN(111) and CrN(200). The results of test sample at the user factory found that the coated knife part have a good result.

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยและพัฒนานี้มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อพัฒนาเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรดสำหรับยืดอายุการใช้งานชิ้นงาน มีผลการศึกษาดังนี้ เครื่องเคลือบในสุญญากาศที่ปรับแต่งแล้วสามารถเคลือบฟิล์มบางของโลหะและฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนวัสดุรองรับได้ โดยสมบัติและโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ ทั้งนี้เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ความดันพื้นเท่ากับ $3x10^{-5}$ mbar อัตราส่วนความดันย่อยแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 2.5:1.5 กำลังไฟฟ้า เท่ากับ 230 W อุณหภูมิวัสดุรองรับขณะเคลือบเท่ากับ 250 ^{O}C ความต่างศักย์ไบแอสเท่ากับ -100 V เมื่อพิจารณาฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ด้วยตาเปล่าพบว่าฟิล์มที่ได้มีสีดำเข้มเป็นมันวาว สะท้อนแสงดี เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ใน 2 ระนาบคือ CrN(111), CrN(200) ผลการทดสอบการใช้งานจริงพบว่าใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรดที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์แล้วมีอายุการใช้งานมากกว่าใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรดที่ไม่ได้เคลือบ สูงสุด 9 เท่าสำหรับใบมีดสั้นและ 6 เท่าสำหรับใบมีดยาว

ABSTRACT

The main objective of this research was to develop the deposition technique of CrN thin film for coating on knife for extended the useage life. The result show that, the modified vacuu coater, the modified vacuum coater can be deposited a metal thin film and CrN thin film on the substrate. The properties and crystal structure of thin films were varying with the deposition conditions. The suitable condition for deposited the CrN thin film was, base pressure equal to $3x10^{-5}$ mbar, partial pressure ration of gas Ar and gas O_2 was 2.5:1.5, electrical power was 230 W, substrate temperature was 250 ^{O}C and voltage bias was -100 V. As-deposited CrN thin film gave a black bright color. From XRD technique we find 2 phase of CrN that were CrN(111) and CrN(200). The results of test sample at the user factory found that the coated knife part have a good result.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการ “การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนอุปกรณ์ตัดคว้านสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร : Research and Development of Chromium Nitride Thin Films on Cutting Tools For Agricultural Products Industry” เป็นโครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก ฝ่ายสนับสนุนการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตามสัญญาเลขที่ RDG4850024 ในชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ โดยมี บริษัท เบทเทอร์ มาชีนเนอรี จำกัด เป็นผู้ร่วมให้ทุนวิจัย มีระยะเวลาดำเนินงาน 18 เดือน และมีวัตถุประสงค์หลักคือ (1) เพื่อพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยการเคลือบแมกนีตรอนสปัตเตอร์แบบเกิดปฏิกิริยา (2) เพื่อพัฒนาเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรด และ (3) เพื่อทดสอบการใช้งานใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรดที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 2 ท่าน คือ รศ.ดร.ณสรรค์ ผลโภค ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ รศ.ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ภาควิชาวิศวกรรมโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สละเวลาในการตรวจเยี่ยมและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่างๆ เกี่ยวกับการดำเนินโครงการแก่คณะผู้วิจัยตลอดโครงการ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ คุณโสภณ ชัยธัมมาวุธ กรรมการผู้จัดการบริษัท เบทเทอร์ มาชีนเนอรี จำกัด ที่ร่วมให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้แก่คณะผู้วิจัย คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศ.ดร.ทวีป ศิริรัศมี ที่กรุณาช่วยเหลือประสานงานและให้คำแนะนำต่างๆ ต่อโครงการ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับที่ให้ความช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานและอำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินโครงการ ขอขอบใจนายอดิศร บูรณวงศ์ สำหรับความช่วยเหลือในการจัดพิมพ์รูปเล่มรายงาน ท้ายที่สุดคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำด้านเทคนิคต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้วิจัยตลอดมา

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

หน้า

บทสรุปผู้บริหาร i

Executive Summary ii

บทคัดย่อ iii

ABSTRACT iv

กิตติกรรมประกาศ v

สารบัญ vi

สารบัญตาราง viii

สารบัญรูป ix

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ 4

1.3 แนวทางและวิธีดำเนินงานโดยย่อ 4

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ 5

บทที่ 2 ทฤษฎี 6

2.1 การเคลือบด้วยกระบวนการ PVD 6

2.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอริง 8

2.3 ระบบเคลือบด้วยกระบวนการสปัตเตอริง 10

2.4 ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) 18

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 22

3.1 เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง 22

3.2 เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบ รีแอคตีฟ ดีซี สปัตเตอริง 24

3.3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการเคลือบฟิล์มบาง 25

3.4 การเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ 26

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 27

สารบัญ

หน้า

บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการศึกษา 29

4.1 การปรับแต่งเครื่องเคลือบ 29

4.2 การเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ 40

4.3 การเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนใบมีดตัดกว้านใส้สับปะรด 48

4.4 การทดลองใช้ใบมีดตัดกว้านใส้สับปะรดที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ 50

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 51

5.1 สรุปผลการศึกษา 51

5.2 ข้อเสนอแนะ 53

เอกสารอ้างอิง 54

ภาคผนวก

ก เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนและกิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ 57

ข ประวัตินักวิจัย 62

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าคงที่ผลึกและ d-spacing ของ CrN (111)	44
2	ค่าคงที่ผลึกและ d-spacing ของ CrN (200)	44
3	เปรียบเทียบอายุการใช้งานของชิ้นงานที่ไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบางที่เงื่อนไขต่างๆ	50

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2-1	ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	7
2-2	อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ	9
2-3	องค์ประกอบพื้นฐานของระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง	9
2-4	ระบบสปัตเตอริงแบบ ดีซี สปัตเตอริง	10
2-5	ผลของความดันในระบบที่มีต่ออัตราเคลือบ ค่ายีลด์และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm	11
2-6	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก	12
2-7	การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่างๆ โดย a , b , c เป็นการเคลื่อนที่ของประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่างๆ	12
2-8	การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลานาร์แมกนีตรอน สปัตเตอริง	15
2-9	ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง	16
2-10	ลักษณะพลาสมาของระบบสปัตเตอริง (a) ระบบบาลานซ์แมกนีตรอน สปัตเตอริง (b) ระบบอันบาลานซ์แมกนีตรอน สปัตเตอริง	17
3-1	ใบมีดตัดคว้านใส้สับปะรด ขนาดสั้นสำหรับตัดเปลือกสับปะรด	23
3-2	ใบมีดตัดคว้านใส้สับปะรด ขนาดยาวสำหรับตัดใส้สับปะรด	23
3-3	ส่วนประกอบหลักของส่วนของระบบการเคลือบของเครื่องเคลือบ	24
3-4	ขั้นตอนการล้างชิ้นงาน	25
3-5	กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	28
4-1	เครื่องเคลือบในสุญญากาศระบบสปัตเตอริง ที่ใช้ในโครงการวิจัย	29
4-2	ภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบในสุญญากาศที่ใช้ในโครงการ	30
4-3	ระบบเครื่องสูบสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องสูบกลโรตารีและเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน	31
4-4	วาล์วสุญญากาศสูงและระบบคานกระดกเพื่อเปิดปิดวาล์วของเครื่องเคลือบ	32
4-5	วาล์ว roughing และ วาล์ว backing ของเครื่องเคลือบ	32

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
4-6	ชุดควบคุมการปล่อยก๊าซอย่างละเอียดพร้อมทรานสดิวเซอร์	33
4-7	มาตรวัดความดันแบบ full range พร้อมชุดแสดงผล	33
4-8	ส่วนต่อขยาย ชุดจับชิ้นและชุดเกียร์ส่งกำลังสำหรับหมุนชิ้นงาน	34
4-9	ชิ้นส่วนของแมกนีตรอนคาโทดพร้อมส่วนประกอบที่สร้างขึ้นสำหรับเคลือบชิ้นงาน 3 มิติ	35
4-10	ลักษณะของแมกนีตรอนคาโทดที่ประกอบเรียบร้อย	35
4-11	การติดตั้งคาโทดกับพอร์ตด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ และตำแหน่งคาโทดในภาชนะ	35
4-12	ภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูงกระแสสูงสำหรับคาโทด	36
4-13	ชุดให้ความต่างศักย์ไบแอสชิ้นงาน	36
4-14	ชุดให้ความร้อนแก่ชิ้นงานชนิดแผ่รังสีจากลวดร้อนและลักษณะการติดตั้งชุดควบคุม	37
4-15	ลักษณะตู้ควบคุมหลักของเครื่องเคลือบ	38
4-16	ลักษณะของ glow discharge ของแมกนีตรอนคาโทดเมื่อจ่ายกระแสในปริมาณต่างกัน	39
4-17	ตำแหน่งและลักษณะการติดตั้งชิ้นงานภายในเครื่องเคลือบ	40
4-18	ลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ตัวอย่างที่เคลือบบนกระจกแผ่นเรียบ	41
4-19	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม CrN ที่เคลือบด้วยสัดส่วนก๊าซ $Ar:N_2$ ต่างๆ	41
4-20	สเปกตรัมการเรืองรังสีเอกซ์จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX	42

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

4-21 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนแผ่นซิลิคอนเตรียมที่อุณหภูมิสารรองรับต่างกัน 43

4-22 แผนภาพพื้นผิวด้านข้างจากเทคนิค STM ของฟิล์มบาง CrN ที่เตรียมบนแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน 46

4-23 แผนภาพพื้นผิวด้านบนจากเทคนิค STM ของฟิล์มบาง CrN เตรียมบนแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน 47

4-24 ตำแหน่งและลักษณะการติดตั้งใบมีดสั้นภายในเครื่องเคลือบ 48

4-25 ตำแหน่งและลักษณะการติดตั้งใบมีดยาวภายในเครื่องเคลือบ 48

4-26 ลักษณะใบมีดสั้นก่อนและหลังการเคลือบ 49

4-27 ลักษณะใบมีดยาวก่อนและหลังการเคลือบ 49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับโจทย์วิจัยจาก คุณโสภณ ชัยธัมมาวุธ กรรมการผู้จัดการบริษัท เบทเทอร์ มาชีนเนอรี จำกัด ซึ่งเป็นผู้ประกอบการด้านการแปรรูปสินค้าทางการเกษตร ว่า **"มีปัญหาการผุกร่อนของใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรด"** และในมุมมองของผู้ประกอบการเล็งเห็นว่าการนำเทคโนโลยีการเคลือบผิววัสดุน่าจะเป็นทางออกของการแก้ปัญหานี้ จึงเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัยนี้

จากการสังเกตเบื้องต้นพบว่าใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรด เป็นใบมีดรูปทรงกระบอกกลวง ทำจากโลหะไร้สนิม ซึ่งมีส่วนที่ถูกลับให้คมเพื่อประโยชน์ในการทะลวงคว้านผ่านเนื้อสับปะรดโดยจะตัดแยกส่วนไส้สับปะรดออกจากเนื้อสับปะรดทั้งลูก เมื่อสังเกตใบมีดที่ถูกใช้งานไปช่วงเวลาหนึ่ง พบว่าส่วนคมของใบมีดจะเกิดการสึกกร่อนที่ส่วนนี้อย่างมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทะลวงตัดคว้านไส้สับปะรดของมีดดังกล่าวลดลงจากการสอบถามผู้ประกอบการพบว่า ผู้ประกอบการได้นำกระบวนการทางวิศวกรรมโลหะการมาเตรียมให้เนื้อวัสดุโลหะที่ใช้ทำมีดมีความแข็งขึ้น สามารถวัดค่าความแข็งตามมาตรฐานร็อคเวลได้เท่ากับ 58 ซึ่งเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาของผู้ประกอบการ

จากแนวทางดังกล่าวผู้ประกอบการยังพบว่า เมื่อเตรียมความแข็งของมีดตัดคว้านไส้สับปะรดแล้ว การผุกร่อนในส่วนคมมีดยังคงเกิดขึ้นอยู่ แสดงว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดการผุกร่อนของส่วนคมของมีดตัดคว้านไส้สับปะรดไม่น่าจะเกิดขึ้นเฉพาะปัจจัยทางกายภาพ น่าจะมีปัจจัยอื่นๆร่วมด้วย ผู้วิจัยจึงศึกษาวิเคราะห์ปัญหานี้ต่อไปจนพบว่า ในเนื้อสับปะรดนอกจากจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบแล้ว ยังมีกรดผลไม้ในสับปะรดในปริมาณพอสมควรด้วย จากการศึกษาเอกสารทางโลหะวิทยาพบว่า โลหะไร้สนิมที่มีใช้กันอยู่โดยทั่วไปนั้นไม่สามารถที่จะทนกรดได้ โลหะไร้สนิมส่วนมากจะผสมเนื้อโลหะให้มี สมบัติการไม่เกิดปฏิกริยากับออกซิเจนเป็นสารประกอบออกไซด์ ซึ่งการป้องกันการออกซิเดชันอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ของโครเมียม ซึ่งไม่สามารถทนการกัดกร่อนของกรดผลไม้ได้ คณะผู้วิจัยจึงเห็นว่า กระบวนการในการเคลือบผิวโดยเฉพาะในส่วนคมของใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรด ดังกล่าวน่าจะเป็นทางออกที่ดีจึงได้เริ่มศึกษาสมบัติทางกายภาพของผิวเคลือบต่างๆให้สัมพันธ์กับระบบเคลือบและงานวิจัยที่เคยทำอยู่

จากปัญหาดังกล่าว การนำเทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบางที่มีคุณสมบัติเหมาะสมมาใช้เคลือบผิวและส่วนคมของอุปกรณ์ตัดคว้านที่ใช้ในอุตสาหกรรมดังกล่าว จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมและเป็นไปได้สูง ทางออกแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมต่อปัญหานี้คือการเคลือบผิวและส่วนคมของอุปกรณ์ตัดคว้านด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับงานนี้ โดยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์นี้ เป็นสารประกอบไนไตรด์ประเภทวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติที่เด่นหลายประการ เช่น มีความแข็งจุลภาคสูง มีเสถียรภาพทางเคมีทำให้ทนต่อการกัดกร่อนด้วยกรด ซึ่งจะช่วยในการยืดอายุการใช้งานของใบมีดตัดคว้านให้ได้นานขึ้นกว่าปรกติหลายเท่า ลดต้นทุนในการผลิตที่มาจากการที่ต้องเปลี่ยนใบมีดบ่อยๆ อีกทั้งลดโอกาสเสี่ยงจากการปนเปื้อนของโลหะที่ใช้ทำใบมีดตัดคว้านเมื่อมีการกัดกร่อนโดยสภาพความเป็นกรดของผลไม้ และสารเคลือบประเภทเซรามิคนี้ยังไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนในอาหารที่จะเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคอีกด้วย คุณสมบัติเด่นอีกประการหนึ่งของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์คือ มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ต่ำทำให้เป็นผิวเคลือบมันและลื่น ลดเสียดสีกับเนื้อของผลไม้ ทำให้ง่ายและลดเวลาในการตัดคว้านในปริมาณมาก เหล่านี้เป็นข้อบ่งชี้ให้เห็นถึงความเหมาะสมของการเลือกใช้ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ในการเคลือบผิวอุปกรณ์ตัดคว้านที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลการเกษตร

สำหรับกระบวนการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ลงบนอุปกรณ์ตัด สำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรนี้ จะใช้กระบวนการเคลือบทางฟิสิกส์ซึ่งกระทำภายใต้สภาวะสุญญากาศ (physical vapor deposition) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายในกระบวนการเคลือบ และยังให้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทางเคมี ในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการเคลือบทางฟิสิกส์ที่เรียกว่า กระบวนการเคลือบแมกนีตรอนสปัตเตอร์แบบเกิดปฏิกิริยา (reactive magnetron sputter deposition) ซึ่งเป็นกระบวนการเคลือบทางฟิสิกส์ที่เป็นที่ยอมรับว่าให้ฟิล์มที่มีคุณภาพสูงและเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งในการปลูกฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ลงบนอุปกรณ์ตัดคว้านสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร โดยหลักการของกระบวนการเคลือบนี้ จะอาศัยหลักการทางฟิสิกส์ในเรื่องของการถ่ายทอดพลังงานและโมเมนตัม รวมกับการเกิดปฏิกิริยาของธาตุในระดับอะตอม (atomic-scale elemental reactions) โดยเป็นกระบวนการจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดันต่ำ ประมาณ $10^{-5} – 10^{-6}$ Torr ทำให้กระบวนการนี้มีความสะอาดสูง ในช่วงของการเคลือบฟิล์มมีการเติมก๊าซผสมระหว่างก๊าซอาร์กอนที่ทำหน้าที่เป็นก๊าซสปัตเตอร์ กับก๊าซไนโตรเจนที่เป็นก๊าซไวปฏิกิริยา จนกระทั่งความดันในภาชนะสุญญากาศเป็น 10^{-3} Torr จากนั้นจ่ายความต่างศักย์แก่ขั้วคาโถดที่ติดตั้งแผ่นโลหะโครเมียม(Cr) ที่มีความบริสุทธิ์สูงไว้ เมื่อให้พลังงานไฟฟ้าที่สูงพอ($E > E_{ionization}$ ของก๊าซ) ก๊าซผสมทั้งสองชนิดบางส่วนจะแตกตัวเป็นไอออนแล้ววิ่งเข้าชนแผ่นเป้าโครเมียม ไอออนของก๊าซไนโตรเจนบางส่วนจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าให้วิ่งเข้าชนกับเป้าโลหะโครเมียม และจะทำปฏิกิริยาในระดับกับอะตอมของ

โลหะโครเมียม ณ บริเวณผิวหน้าของเป้า ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ก่อให้เกิดเป็นสารประกอบโครเมียมไนไตรด์ หลังจากนั้นในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน ไอออนของก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจนในส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะถูกเร่งเข้าชนและถ่ายทอดโมเมนตัมและพลังงานจลน์ให้กับแผ่นเป้าโครเมียม ทำให้อะตอมของโครเมียมไนไตรด์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของแผ่นโครเมียมหลุดออก และมีพลังงานและโมเมนตัมมากพอที่จะวิ่งไปตกเคลือบบนชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ (substrates) ในที่นี้คืออุปกรณ์ตัดคว้านสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรดังที่ได้กล่าวมา เกิดเป็นฟิล์มบางของเซรามิกโครเมียมไนไตรด์ขึ้น

ในการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ลงบนอุปกรณ์ตัดคว้านนี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาและวิจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีคุณสมบัติ คุณภาพและประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานตามวัตถุประสงค์ โดยต้องทดสอบเงื่อนไขในการเคลือบที่ให้ได้ฟิล์มที่เคลือบมีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของโดยใช้การวัด energy dispersive spectroscopy (EDS) การตรวจสอบสภาพพื้นผิวและโครงสร้างของฟิล์มในระดับจุลภาค (microstructure) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscopy) การทดสอบความแข็งจุลภาคของชั้นฟิล์มที่เคลือบ (Nano-Indenter) และการทดสอบการนำอุปกรณ์ตัดที่ได้รับการเคลือบไปใช้งานในสภาพการใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม โดยข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการตรวจสอบและวิเคราะห์นี้จะเป็นข้อมูลที่ถูกนำไปใช้ในการศึกษาและพัฒนาองค์ความรู้ในการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ อีกทั้งยังเป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของงานวิจัยนี้อีกด้วย

ประกอบกับ ดร.สุคคเณศ ตุงคะสมิต จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีประสบการการศึกษาในระดับปริญญาเอก และการวิจัยหลังปริญญาเอกจากต่างประเทศ ซึ่งได้ทำการวิจัยในเรื่องเดียวกัน คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเบื้องต้นร่วมกันในปัญหาการสึกกร่อนของใบมีดตัดคว้านใส้สับปะรดนี้ ได้ข้อสรุปเบื้องต้นว่า **การเคลือบมีดตัดคว้านใส้สับปะรดด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์** น่าจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับของปัญหานี้ โดยจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า สารประกอบโครเมียมไนไตรด์ เป็น**สารประกอบเซรามิกส์ที่ปลอดภัย ที่มีเสถียรภาพทางเคมีสูง ทนต่อการกัดกร่อนด้วยกรด มีความแข็งจุลภาคสูง มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ต่ำ** ซึ่งสามารถเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์จากกระบวนการรีแอกตีฟสปัตเตอริง ซึ่งทีมผู้วิจัยมีความชำนาญ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นคณะผู้วิจัยจึงขอเสนอโครงการวิจัย **การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนอุปกรณ์ตัดคว้านสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร** ต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย เพื่อพิจารณาในลำดับต่อไป

1.2 <u>วัตถุประสงค์ของโครงการ</u>

1. เพื่อพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยการเคลือบแมกนีตรอนสปัตเตอร์แบบเกิดปฏิกิริยา

2. เพื่อพัฒนาเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรด

3. เพื่อทดสอบการใช้งานใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรดที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

1.3 <u>แนวทางการศึกษาโดยย่อ</u>

โครงการวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานโดยย่อดังนี้

1. การปรับแต่งเครื่องเคลือบ เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการเคลือบฟิล์มบางบนใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรด ที่มีรูปทรงกระบอกทำให้ต้องมีการปรับเครื่องเคลือบให้สามารถเคลือบใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรด ที่มีลักษณะดังกล่าวได้ โดยปรับแต่งจากเครื่องเคลือบเดิมที่มีของห้องปฏิบัติการวิจัยฯ ในส่วนนี้ได้มีการสร้างชิ้นส่วนเพิ่มบางส่วนเช่น วาล์วสุญญากาศต่างๆ และส่วนการเคลือบ (coating parts) ได้แก่ คาโถด แท่นยึดจับชิ้นงาน ชุดหมุนชิ้นงาน ชุดไบอัสและชุดให้ความร้อน

2. การศึกษากระบวนการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ส่วนนี้เป็นการศึกษาเทคนิคและการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนชิ้นงานที่เป็นแผ่นเรียบเพื่อใช้เป็นแนวทาง สำหรับการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรด

3. การทดลองเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรดจริง

4. การทดลองใช้งานใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรดที่มีการฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์แล้ว

5. สรุปผลและเขียนรายงานการวิจัย

1.4 <u>ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ</u>

1. ได้เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยการเคลือบแมกนีตรอนสปัตเตอร์แบบเกิดปฏิกิริยา

2. ได้องค์ความรู้ในการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนมีดตัดคว้านไส้สับปะรด

3. ได้ข้อมูลการใช้งานใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรดที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

4. ได้แนวทางการศึกษาวิจัยและพัฒนามีดตัดคว้านที่ใช้กับอุตสาหกรรมดังกล่าว รวมทั้งการถ่ายทอดเทคโนโลยีและการนำเครื่องตัดคว้านดังกล่าวไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

5. ได้แนวทางในการผลิตมีดตัดคว้านดังกล่าวในเชิงพาณิชย์ต่อไป

6. เป็นการพัฒนาบุคลากรเพื่อการศึกษาวิจัยองค์ความรู้ วิธีการประยุกต์องค์ความรู้ไปสู่ภาคอุตสาหกรรมและสร้างผลิตภัณฑ์นี้ในเชิงพาณิชย์เพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมนี้ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎี

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ (1) การเคลือบด้วยกระบวนการ PVD (2) การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอริง(3) ระบบเคลือบด้วยกระบวนการสปัตเตอริง และ (4) ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ซึ่งรายละเอียดดังนี้

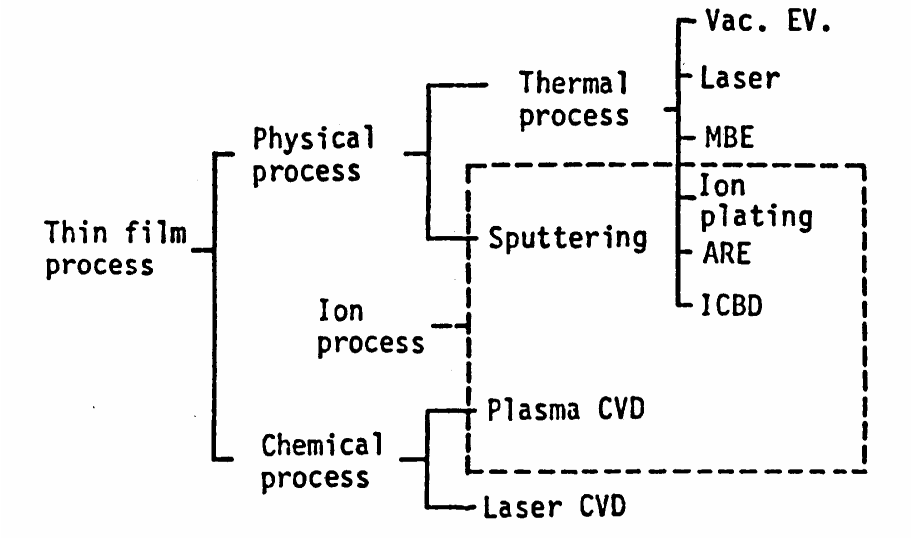
2.1 การเคลือบด้วยกระบวนการ PVD

เทคนิคการเคลือบด้วยกระบวนการ PVD (physical vapor deposition) เป็นเทคนิคหนึ่งของการเคลือบในสุญญากาศ ชั้นเคลือบที่ได้ของการเคลือบด้วยกระบวนการ PVD นั้นเรียกว่า “ฟิล์มบาง Thin Film” เนื่องจากเป็นชั้นเคลือบที่มีความหนาน้อยมาก การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี คศ.1852 โดยแนวคิดพื้นฐานแล้ว การเคลือบฟิล์มบางก็คือการเรียงตัว (fabricated) โดยการตกเคลือบ (deposition) ของสารเคลือบในลักษณะของอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (substrate) จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบาง โดยฟิล์มที่ได้จะบางมาก (ระดับไมครอน) ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางในงานด้านต่างๆ มากมาย เช่น อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำและฟิล์มตัวต้านทาน หรือ อุปกรณ์ทางแสง เช่น เลนส์ กระจกเลเซอร์ กระจกสะท้อนแสง กระจกกรองแสงเฉพาะบางช่วงความถี่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางนี้ในการเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางและมีความเป็นระเบียบสำหรับใช้ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุต่างๆ ในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางประการไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน ข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์มากในการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม[1]

การเคลือบฟิล์มในสุญญากาศบางอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท[2] (รูปที่ 2-1) ได้แก่

1. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (chemical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (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[2]

การเคลือบด้วยกระบวนการ PVD นั้น[3][2] อาศัยหลักการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับแล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางซึ่งเกิดขึ้นภายใต้ภาวะสุญญากาศ แบ่งเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ

1. <u>การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร</u> เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศ (ความดันประมาณ 10^{-6} mbar) ทำได้โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ ซึ่งไอของสารเคลือบนี้จะฟุ้งไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนโตเป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไป การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยากคือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้านอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เช่น การให้ความร้อนจากตัวต้านทาน (resistive heating) การระเหยแบบวาบ (flash evaporation) การระเหยด้วยเลเซอร์ (laser evaporation) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporation) การระเหยด้วยการอาร์ค (arc evaporation) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (radiofrequency heating) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้นิยมใช้เคลือบสารไดอิเลคตริก (dielectric) เช่น แมกนีเซียมไดฟลูออไรด์ (MgF_2) หรือ ออกไซด์ (oxide) ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสบนวัตถุที่ต้องการเคลือบ เช่น เลนส์กล้องถ่ายรูป แว่นตาและกระจกเลเซอร์ ฯลฯ สำหรับข้อเสียของการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและวัตถุรองรับจะไม่สูงนักจึงต้องอาศัยกระบวนการอบด้วยความร้อนหรือวิธีอื่นช่วยให้การยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ

2. <u>การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง</u> เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง (ความดันประมาณ 10^{-3} ถึง 10^{-1} mbar) การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการ สปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงโดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ กระบวนการนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ และเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัตถุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัตถุรองรับดีกว่า

2.2 <u>การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอริง</u>

การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางจากสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอร์ การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนและโตเป็นฟิล์มบางในที่สุด

กระบวนการสปัตเตอริง คือ กระบวนการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ ซึ่งอนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ อย่างไรก็ดีเมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าเป้าสารเคลือบจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้คือ[4][5]

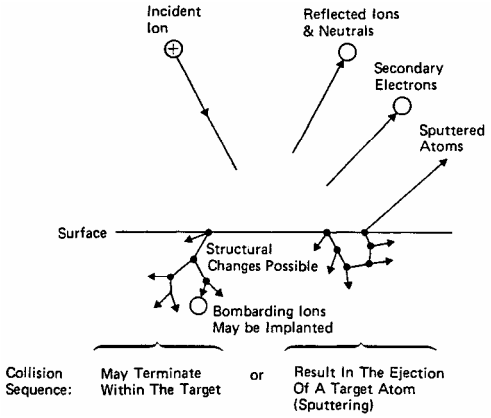
1. การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (reflected ions and neutrals) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากพื้นผิวหน้าของวัสดุ ซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิววัสดุ

2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (secondary electron emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองจากผิววัสดุถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ

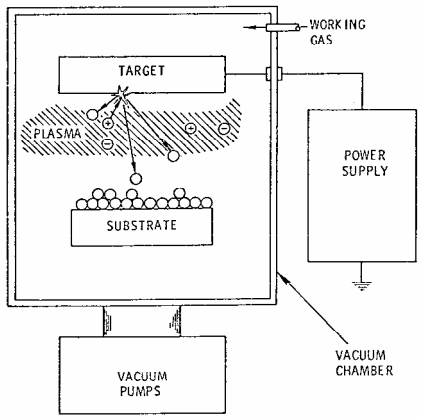
3. การฝังตัวของไอออน (ion implantation) ไอออนที่วิ่งชนพื้นผิววัสดุนั้นอาจฝังตัวลงในผิววัสดุ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันตรงกับพลังงานไอออน มีค่าประมาณ 10 ^{o}A ต่อพลังงานไอออน 1 keV สำหรับไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง

4. การเปลี่ยนโครงสร้างของผิววัสดุ การชนของไอออนบนผิววัสดุอาจทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิววัสดุใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (lattice defect) เราเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า altered surface layers

5. การสปัตเตอร์ การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมวัสดุแล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากผิววัสดุ เรียกว่ากระบวนการนี้ว่า “สปัตเตอริง”



รูปที่ 2-2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ



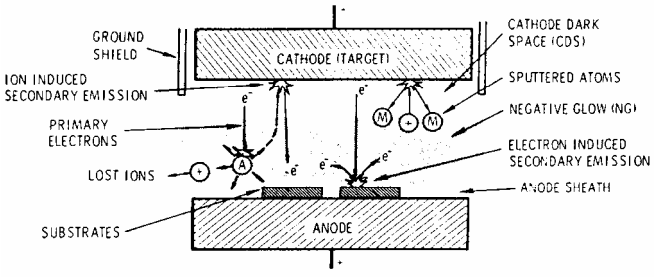
รูปที่ 2-3 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

ทั้งนี้กระบวนการสปัตเตอริงจำเป็นต้องมีองค์ประกอบพื้นฐานอย่างน้อย 3 อย่างคือ (1) สารเคลือบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นเป้า (target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชน จนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ (2) อนุภาคพลังงานสูงซึ่งจะวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบแล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอนหรืออะตอมของธาตุต่างๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 eV เพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่นิยมคือการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่ผลิตได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้กระบวนการสปัตเตอร์เกิดขึ้นได้ ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงนิยมเลือกการเร่งไอออนของก๊าซในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ (3) ได้แก่การผลิตอนุภาคพลังงานสูงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริง นี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ฟิล์มที่มีความหนาตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (ion gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออน ในอัตราสูง หรือผลิตจากกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (glow discharge) แต่เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ ดังนั้นในกระบวนการสปัตเตอริงในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูงแทน

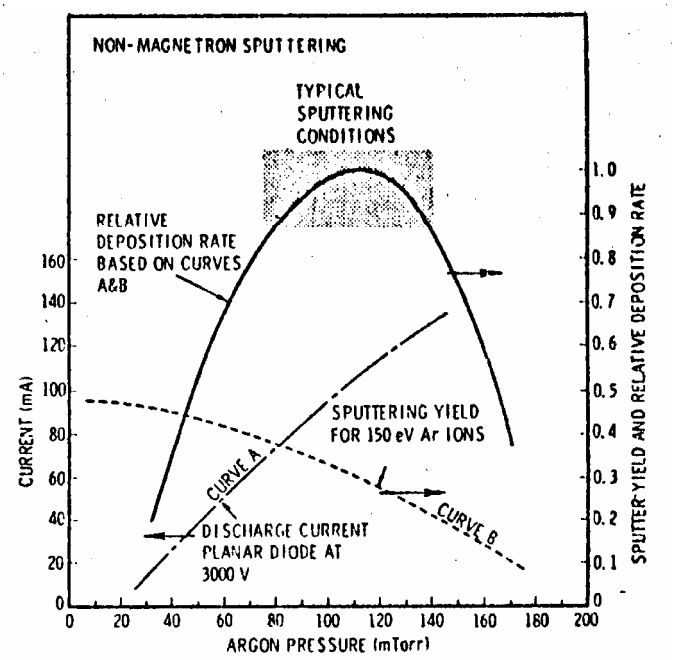
เนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอร์ในการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงนั้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก เมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัตถุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงจะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัตถุที่ต้องการเคลือบดีกว่า การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงนี้ยังแบ่งได้หลายแบบ เช่น วิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง (rf sputtering) เป็นการใช้ระบบไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุในการทำให้ไอออนของสารเคลือบหลุดจากผิวของเป้าสารเคลือบ หรือวิธีไอออนบีม สปัตเตอริง (ion beam sputtering) เป็นระบบที่ใช้วิธีกำเนิดไอออนในห้องไอออนแล้วเร่งให้ชนกับขั้วคาโทดซึ่งเป็นสารเคลือบด้วยศักย์สูงในสุญญากาศจากนั้นไอออนที่หลุดจากขั้วคาโทดจะวิ่งไปเกาะวัตถุที่ต้องการอีกต่อหนึ่ง วิธีการนี้จะได้สารเคลือบผิวที่บริสุทธิ์มาก ทั้งนี้จะเห็นว่าฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบนั้นขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ซึ่งรวมถึงกระบวนการเคลือบด้วย

2.3 ระบบเคลือบด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

1. ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปัตเตอริง[1][3][6][5] แบบง่ายที่สุดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-4 ซึ่งประกอบด้วยคาโทดคือแผ่นเป้าสารเคลือบและอาโนดใช้เป็นที่วางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ปกติระยะระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับจะอยู่ระหว่าง 4.0-10.0 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบออกด้านข้างหรือผนังของภาชนะสุญญากาศ โดยทั่วไประยะดาร์คสเปซอยู่ระหว่าง 1.0-4.0 cm โดยอาโนดจะอยู่บริเวณเนกาทีฟโกลว์ ส่วนอุปกรณ์ทำงานอยู่ในช่วงแอบนอร์มอลโกลว์ ก๊าซที่ใช้เป็นก๊าซเฉื่อยซึ่งให้ยีลด์สูงและไม่ทำปฏิกริยากับเป้าสารเคลือบ (ปกติใช้ก๊าซอาร์กอน) ขณะเกิดโกลว์ดิสชาร์จที่ความดันค่าหนึ่ง กระบวนการไอออไนซ์จะรักษาสภาพโกลว์ดิสชาร์จไว้ตราบที่ระยะดาร์คสเปซไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและอาโนด เมื่อความดันลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดสูงขึ้น ระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้น ทำให้ระยะดาร์คสเปซขยายตัวออก และแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาตรน้อย กระแสไฟฟ้าจะลดลงและอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์มีปริมาณลดลงตามปริมาณของไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบ ที่ความดันต่ำกว่า 10^{-2} mbar ระยะดาร์คสเปซจะยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรดและกระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ ทำให้กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดลงและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการ สปัตเตอร์อีก



รูปที่ 2-4 ระบบสปัตเตอริงแบบ ดีซี สปัตเตอริง[7]



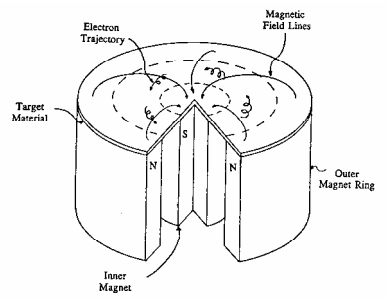
รูปที่ 2-5 ผลของความดันในระบบที่มีต่ออัตราเคลือบ ค่ายีลด์และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอริง ของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm[8]

ขณะที่ความดันสูงขึ้นระยะดาร์คสเปซจะหดสั้นลง บริเวณการผลิตไอออนมีปริมาตรสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงตามความดัน (รูปที่ 2-5 เส้นกราฟ A) ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลอดการชนระหว่างโมเลกุลของก๊าซมีค่าลดลง อะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านเคลือบบนวัสดุรองรับได้ยากจากการชนกับโมเลกุลของก๊าซและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่ายีลด์จากการสปัตเตอร์มีค่าลดลง แต่เมื่อความดันสูงขึ้น (รูปที่ 2-5 เส้นกราฟ B) ผลรวมระหว่างยีลด์และกระแสไอออนจะทำให้อัตราเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่ง ทั้งนี้พบว่าการสปัตเตอร์นิเกิลเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm ในก๊าซอาร์กอน การเคลือบจะหยุดที่ความดันมีค่าต่ำกว่า 2.6×10^{-4} mbar และที่ความดันสูงกว่า 1.6×10^{-5} mbar โดยอัตราเคลือบจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อความดันสูงเกินค่านี้ ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปัตเตอริงคือบริเวณที่ให้อัตราเคลือบสูงและประสิทธิภาพดีที่สุด จากรูปที่ 5 พบว่าความดันที่เหมาะสำหรับเคลือบคือ 1.0×10^{-5} mbar ความหนาแน่นกระแส 1.0 mA/cm^2 ด้วยอัตราเคลือบ 0.036 μm/min ซึ่งเป็นอัตราเคลือบที่ค่อนข้างต่ำในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างสูง

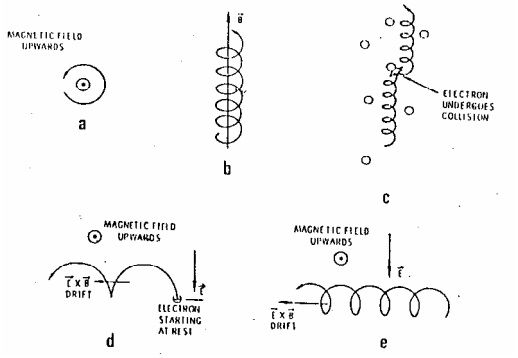
ระบบสปัตเตอริงทั่วไปจะต่ออาโนดลงกราวด์รวมกับภาชนะสุญญากาศและให้คาโทด มีศักย์ไฟฟ้าลบ โดยแยกขั้วคาโทดและผิวของภาชนะสุญญากาศด้วยฉนวน เรียกว่า กราวด์ชีลด์ (ground shield) ดังในรูปที่ 2-4 กราวด์ชีลด์จะมีลักษณะเป็นผนังโลหะหุ้มรอบๆ ขอบของคาโทด โดยจะต้องจัดระยะระหว่างคาโทดและกราวด์ชีลด์ให้สั้นกว่าระยะดาร์คสเปช ดังนั้นแม้ว่าศักย์ไฟฟ้าของกราวด์ชีลด์จะเท่ากับอาโนดการโกลว์ดิสชาร์จและสปัตเตอริงจะไม่สามารถเกิดกับคาโทดในบริเวณที่มีกราวด์ชีลด์หุ้มอยู่ทำให้สามารถควบคุมบริเวณที่ต้องการสปัตเตอร์ได้

2. <u>ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง</u>[1][3][5][9] อัตราการเกิดสปัตเตอริงนั้นขึ้นกับผลคูณระหว่างยีลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอร์นั้นนอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มยีลด์แล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ในระบบ ดีซี สปัตเตอริง ปกติ ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด หรือเพิ่มความดัน ซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 mA/cm^2 และความดันประมาณ 1.33×10^{-5} mbar นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบดีซี สปัตเตอริง ทั่วไปอะตอมของก๊าซที่จะเกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้ยังมีข้อเสียเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณก๊าซที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบใหม่ที่เรียกว่า ระบบดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศขนานกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง (รูปที่ 2-6) ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมก๊าซเฉื่อยมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสปัตเตอร์สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2-6 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก[10]



รูปที่ 2-7 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่างๆ โดย a , b , c เป็นการเคลื่อนที่ของประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่างๆ[11]

ทั้งนี้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก พบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม (รูปที่ 2-7(a)) ด้วยรัศมี

$$r = \frac{3.37(W)^{1/2}}{B} \qquad \text{..... (1)}$$

เมื่อ W คือพลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV

B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss หมุนด้วยความถี่ไซโคลตรอน $\nu = 2.8 \times 10^6$ Hz

ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 10 eV และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม 100 gauss รัศมีการหมุนมีค่าเท่ากับ 0.1 cm ด้วยความถี่การหมุนเท่ากับ 2.8×10^8 Hz รูปที่ 2-7(b) แสดงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่งระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมก๊าซ รูปที่ 2-7(c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกัน อำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่า การเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (drift motion) มีค่าเท่ากับ

$$V_E = \frac{10^8 E}{B} \qquad \text{..... (2)}$$

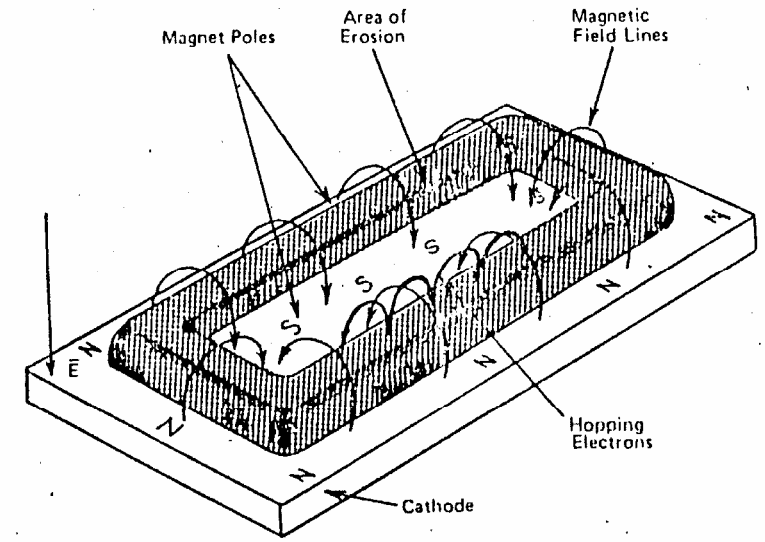
เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าหน่วยเป็น V/cm

B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss

กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณดาร์คสเปซมีค่าประมาณ 1,000 V/cm และสนามแม่เหล็กประมาณ 100 gauss จะให้ค่าความเร็วลอยเลื่อนเท่ากับ 10^7 m/s ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงกรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นรูปไซคลอยด์ (cycloid) ดังรูปที่ 2-7(d) ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนจะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกันดังแสดงในรูปที่ 2-7(e) พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้เด่นชัดมาก แม้ใช้สนามแม่เหล็กมีค่าน้อย ระหว่าง 50-500 gauss แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางเดินของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

ระบบสปัตเตอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่า สนามตามยาว (longitudinal field) จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลว์ดิสชาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ดี กรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า สนามตามขวาง (transverse field) โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมา อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับรูปที่ 2-7(d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้คาโทดและเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนไปตามแนวผิวหน้าของคาโทด (รูปที่ 2-8) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับโมเลกุลก๊าซบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของก๊าซจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากขึ้นเป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดใกล้ผิวคาโทด ทำให้เกิดสเปซชาร์จ (space charge) จากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทด ซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลอดการชนของระบบ ดีซี สปัตเตอริงที่ความดันใช้งานมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณนี้ และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณดาร์คสเปซใน ดีซี สปัตเตอริงขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมากทำให้ความต้องการแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของระบบ แมกนีตรอน สปัตเตอริง ลดลง มีค่าประมาณ 300-800 V ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนี ตรอนทรงกระบอกจะเรียกว่า แมกนีตรอน สปัตเตอริงทรงกระบอก (cylindrical magnetron sputtering) และถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบดีซี สปัตเตอริงที่ใช้เป้าแบบแผ่นราบจะเรียกว่า พลานาร์แมกนีตรอน สปัตเตอริง (planar magnetron sputtering)

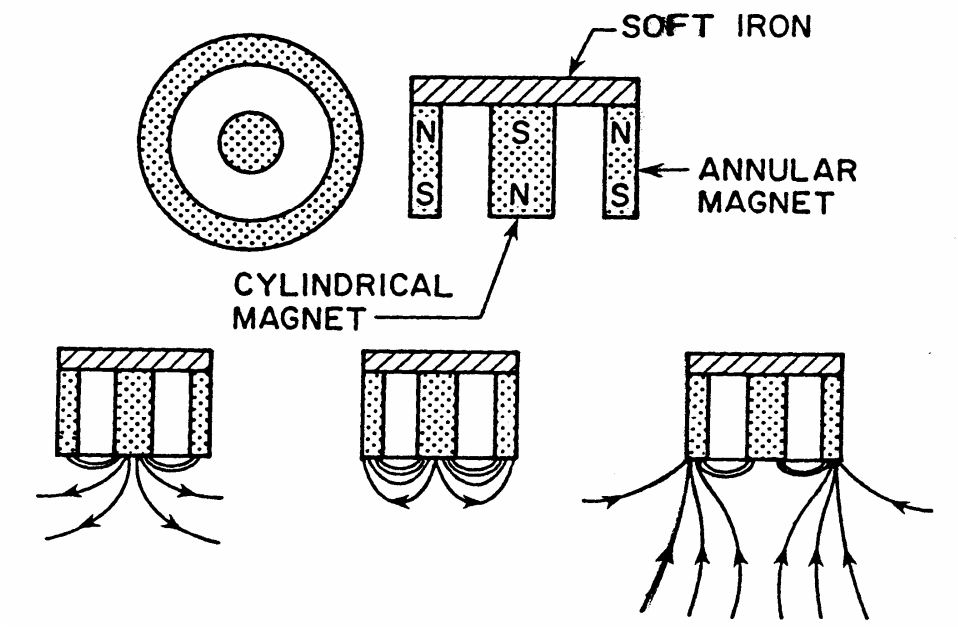
ในระบบแมกนีตรอน สปัตเตอริง ไอออนและพลาสมาที่เกิดขึ้นเข้มมากบริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสปัตเตอร์มีค่าสูง ขณะที่ใช้ความดันต่ำและแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปัตเตอร์ แมกนีตรอนสปัตเตอริงทรงกระบอกทั่วไปมีอัตราการสปัตเตอร์สูงกว่า 1.0 μm/min และมีอัตราเคลือบสูงกว่า 0.2 μm/min ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทด ประมาณ 20.0 mA/cm^2 แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง 300-800 V ที่ความดันประมาณ 5.33x10^{-5} mbar ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบสูงขึ้นกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสปัตเตอริงขนาดใหญ่ได้ง่าย ส่วนข้อเสียของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าต่ำ จึงมีข้อจำกัดในการเคลือบวัสดุบางชนิดที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อควบคุมคุณภาพฟิล์ม แต่มีข้อได้เปรียบที่ระบบนี้สามารถคุมอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ให้อยู่ภายในกรอบสนามแม่เหล็กจึงมีอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาและวิ่งเข้าสู่วัสดุรองรับปริมาณน้อยซึ่งช่วยลดปัญหาความร้อนบนวัสดุรองรับเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนลงได้มาก



รูปที่ 2-8 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลานาร์แมกนีตรอน สปัตเตอริง[12]

3. <u>ระบบเคลือบแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง</u>[13][14][15][16] ในกระบวนการเคลือบฟิล์มนั้น พบว่าหากการระดมยิงไอออนระหว่างที่สารเคลือบมีการตกเคลือบและการก่อตัวเป็นฟิล์มนั้นจะเป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของฟิล์มหลายอย่างเช่น พฤติกรรมการเกิดนิวเคลียส (nucleation behavior) สัณฐานวิทยา (morphology) องค์ประกอบ (composition) ทิศทางการจัดเรียงตัว และสมบัติเชิงกล เป็นต้น เช่น ในกรณี แมกนีตรอน สปัตเตอริง ไอออนที่ใช้ในการระดมยิงวัสดุรองรับจะมาจากประจุไฟฟ้าที่อยู่รอบวัสดุรองรับ ซึ่งทำได้โดยการจ่ายศักย์ไฟฟ้าลบประมาณ -1 ถึง -500 V ให้กับวัสดุรองรับ ทั้งนี้ความหนาแน่นกระแสที่ฟิล์มหรือผิวหน้าของวัสดุรองรับ สำหรับระบบดีซี แมกนีตรอน ปกติจะมีค่าต่ำประมาณ 0.05-0.10 ไอออน/อะตอมสารเคลือบ แต่การใช้งานจริงต้องมีค่าสูงกว่านี้

สำหรับการเคลือบแข็ง (hard coating) ฟิล์มที่ต้องการนั้นจะต้องมีช่องว่าง (voids) ในเนื้อฟิล์มน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมีความทนต่อการกัดกร่อน (corrosion) และทนต่อการขัดสี (wear resistance) มากขึ้น การลดช่องว่างในเนื้อฟิล์มนี้ทำได้โดยการเพิ่มความต่างศักย์ไบแอสให้กับวัสดุรองรับ แต่ก็จะทำให้เกิดความเค้นและความบกพร่อง (defects) ภายใน เกรน (grain) ของฟิล์มมากขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไบแอสเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้คุณภาพของฟิล์มและการยึดติดของฟิล์มกับวัสดุรองรับลดลง ปัญหานี้แก้ได้โดยการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไอออนที่ใช้ ซึ่งทำได้โดยใช้ระบบเคลือบแบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง (unbalanced magnetron sputtering)



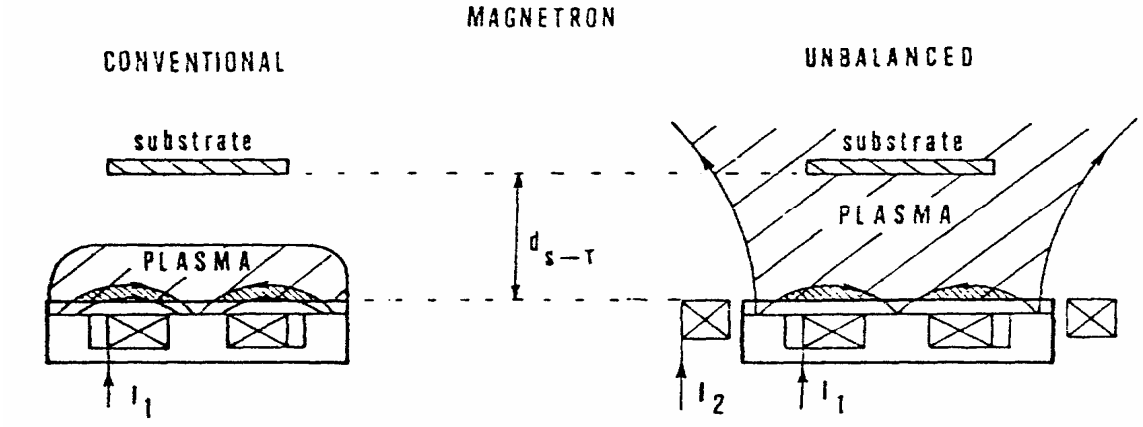
(a) (b) (c)

รูปที่ 2-9 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง[17]

ระบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง ได้รับการคิดค้นและตีพิมพ์เผยแพร่โดย Window และ Savvides ครั้งแรกในปี ค.ศ.1986 โดยทั้งสองพบว่าการติดตั้งแม่เหล็กที่คาโทด ของระบบสปัตเตอริงปกติ หากทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งมากหรือน้อยกว่าอีกด้านหนึ่งแล้วสนามแม่เหล็กที่คาโทดมีลักษณะไม่สมมาตร ทำให้ปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนหรือระดมยิงวัสดุรองรับ (ฟิล์มบาง) นั้นมีปริมาณมากกว่าปกติ ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มบางที่เคลือบได้โดยตรง การจัดแม่เหล็กของระบบนี้อาจแบ่งเป็น 3 แบบ คือความเข้มสนามของแม่เหล็กที่ด้านในมากกว่าด้านนอก (รูปที่ 2-9 (a)) หรือกลับกัน (รูปที่ 2-9 (c)) หรือใกล้เคียงกัน (รูปที่ 2-9 (b))

การจัดแม่เหล็กตามรูปที่ 2-9(a) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าต่ำ (อัตราส่วนไอออน/อะตอมสารเคลือบประมาณ 0.25:1) ส่วนการจัดแม่เหล็กตามรูปที่ 2-9(c) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนไอออน/อะตอมสารเคลือบมีค่าสูงขึ้นคือประมาณ 2:1 (เมื่อใช้ความต่างศักย์ไบแอสต่ำ) จากการศึกษาของ Musil และ Kadlec ที่ใช้ระบบเคลือบแบบอันบาลานซ์ พลานาร์ แมกนีตรอนเดี่ยวและขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขด เคลือบไททาเนียมไนไตรด์ที่ระยะเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับประมาณ 200.0 mm ใช้ความต่างศักย์ไบแอสในช่วง -5 ถึง -100 V พบว่าความหนาแน่นกระแสสูงถึง 6.0 mA/cm^2 ซึ่งมากพอสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม

หากเปรียบเทียบระบบสปัตเตอริงทั้ง 3 ระบบ พบว่าในระบบสปัตเตอริงปกตินั้น อิเล็กตรอนที่ได้จากการไอออไนซ์จะวิ่งไปจับอาโนดโดยไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสปัตเตอริงเลย ดังนั้นเพื่อให้ระบบสปัตเตอริงมีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงมีแนวคิดที่จะนำอิเล็กตรอนเหล่านี้เข้ามาช่วยในกระบวนการสปัตเตอริงโดยการใช้สนามแม่เหล็กช่วย จึงเกิดระบบแมกนีตรอน สปัตเตอริง ซึ่งใช้สนามแม่เหล็กช่วยทำให้เกิดอิเล็กตรอนบริเวณหน้าคาโทดเพิ่มขึ้น (เนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้มีส่วนช่วยทำให้กระบวนการสปัตเตอริงคงอยู่อย่างต่อเนื่อง) อำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้งทำให้การไอออนไนซ์ก๊าซเฉื่อยสูงขึ้น นอกจากนี้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ายังทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบมีลักษณะเป็นการชนแบบซ้ำๆ ต่อเนื่องกัน ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิปริมาณนี้มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการสปัตเตอร์มากตามไปด้วย แต่ก็ยังมีอิเล็กตรอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงสามารถหลุดจากอำนาจของสนามแม่เหล็กนี้วิ่งเข้าหาขั้วอาโนดทันที สำหรับในระบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง นั้นอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่หลุดจากสนามแม่เหล็กนี้จะถูกยึดไว้ด้วยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนเกินของระบบแล้วเคลื่อนที่เป็นทางโค้งไปตามเส้นแรงแม่เหล็กเข้าชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อยและเกิดการไอออไนซ์เป็นพลาสมาบริเวณผิวหน้าวัสดุรองรับทำให้ความหนาแน่นกระแสที่วัสดุรองรับมีค่าสูงกว่าระบบแมกนีตรอน สปัตเตอริง มาก (ประมาณ 5.0-10.0 mA/cm^2 ปกติมีค่าน้อยกว่า 1.0 mA/cm^2)



รูปที่ 2-10 ลักษณะพลาสมาของระบบสปัตเตอริง[14]
(a) ระบบบาลานซ์แมกนีตรอน สปัตเตอริง
(b) ระบบอันบาลานซ์แมกนีตรอน สปัตเตอริง

2.4 ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN)

ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์เริ่มได้รับความสนใจในราวปี ค. ศ.1984 เพื่อที่ทดแทนฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ซึ่งในสมัยนั้นนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มีข้อจำกัดในด้านการนำมาใช้ประโยชน์ นักวิจัยจึงพัฒนาฟิล์มบางตัวใหม่ เช่น ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ฮาล์ฟเนียมไนไตรด์ (HfN) โมลิบดินั่มไนไตรด์ (MN) ขึ้นมาทดแทนเพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะด้าน[18] นอกจากนั้นฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ได้นำมาแทนที่ฟิล์มที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรเพลตติง (กระบวนการชุบทางเคมี) เช่น การชุบฮาร์ดโครม ซึ่งใช้ในการลดการสึกหรอของเครื่องมือ เช่น แหวนลูกสูบ วาล์ว ปั๊มไฮดรอลิค, แม่พิมพ์, เครื่องตกแต่ง (รถยนต์, ล้อรถ, เฟอร์นิเจอร์) แต่เนื่องจากกระบวนการเตรียมการชุบฮาร์ดโครมโดยวิธีอิเล็กโตรเพลตติง มีผลเสียกับสิ่งแวดล้อม นักวิจัยจึงหันมาสนใจกระบวนการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์แบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (PVD) แทน ซึ่งในตอนแรกฟิล์มที่ใช้งานแทน การชุบฮาร์ดโครม คือฟิล์มบางโครเมียม ซึ่งจะมีสมบัติคือ ความแข็งสูง อัตราการสึกหรอต่ำ ต้านทานการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันได้ดี ต่อมาได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพของฟิล์มโดยการเพิ่มก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในระบบ ทำให้เกิดฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ซึ่งมีความแข็งจุลภาคสูงกว่าฟิล์มบางโครเมียม[19] โดยการวิจัยและพัฒนาฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีวิวัฒนาการตามลำดับอย่างคร่าวๆ ดังต่อไปนี้

ในช่วง ค. ศ. 1980s-1990s นักวิจัยค้นคว้าหาฟิล์มบางตัวใหม่ที่มีคุณสมบัติความแข็งเชิงจุลภาคสูงและมีสมบัติไตรโบโลยีจึงพัฒนาจากฟิล์มบาง TiN เป็นฟิล์มบาง CrN[20] และหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการตกเคลือบที่จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของฟิล์ม การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์ม, การกัดกร่อนเชิงเคมี การสึกหรอเชิงกล คุณสมบัติไตรโบโลยี และการประยุกต์ใช้

ในปี ค. ศ.1995 งานวิจัยส่วนใหญ่ต้องการฟิล์มบางที่เคลือบสารชิ้นฐานประเภทโลหะผสม อะลูมิเนียม ซึ่งฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ไม่เหมาะสมเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ระหว่างการตกเคลือบมากกว่า 250 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้เนื้อสารชิ้นงานหลอม[21] นักวิจัยจึงเลือกใช้ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า นอกจากนี้ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์สามารถเคลือบบนผิวแก้ว ใยผ้า อุตสาหกรรมพลาสติกซึ่งมีคุณสมบัติที่เหนือกว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ คือ ความต้านทานการเกิดออกไซด์สูงกว่า และความต้านทานการกัดกร่อนดีกว่าฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์[22]

ในปี ค. ศ.1997 ฟิล์มบางจำพวกโลหะทรานซิชันไนไตรด์ (Transition metal nitride) เช่น ไทเทเนียม และโครเมียมใช้ในเทคโนโลยีการป้องกันการสึกหรอและการกัดกร่อน ในอุปกรณ์ประยุกต์ทางแสง และเครื่องตกแต่ง โดยเฉพาะความต้านทานการกัดกร่อนจากความร้อน ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีคุณสมบัติเหนือกว่า ฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ ซึ่งในงานวิจัยพบว่า โครเมียมไนไตรด์มีความต้านทานการสึกหรอที่ยอดเยี่ยมภายใต้สภาวะไตรโบโลยีที่รุนแรงเช่น อุณหภูมิสูง

ความเร็วในการเสียดสีและความดันที่กระทำต่อผิวสูง โครเมียมไนไตรด์มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยกว่าไทเทเนียมไนไตรด์[23] ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่ใช้วิธีเตรียมในสภาวะสุญญากาศ ถูกนำไปใช้งานด้านไตรโบโลยีเพื่อพัฒนาสมรรถภาพและยืดอายุการใช้งานของ ใบมีด, สว่าน, forming tool, bearing ส่วนประกอบเครื่องยนต์ และทางด้านเครื่องประดับ นอกจากนี้ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เกิดจากกระบวนการ PVD ยังนำไปใช้แทนการชุบฮาร์ดโครมที่เกิดจากกระบวนการอิเล็กโตรเพลตติง เช่นแทนการผลิตวงแหวนลูกสูบ เป็นต้น[24]

ในปี ค. ศ.1998 – 1999 ได้มีการพัฒนาความต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนของสารชิ้นฐานจำพวกโลหะอ่อน เช่น นิกเกิล ทองแดง อลูมิเนียม โลหะผสม ซึ่งถ้าใช้กระบวนการเคลือบทางอิเล็กโตรเพลต ซึ่งจะป้องกันการสึกหรอได้น้อย จึงหันมาใช้กระบวนการเคลือบ PVD ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด ยกตัวอย่างเช่น ได้มีการพัฒนา Cu welding contactlic ซึ่งแต่ก่อนใช้กระบวนการทางอิเล็กโตรเพลต ใช้โลหะหนัก เช่น นิกเกิล โครเมียม แต่ได้ฟิล์มคุณภาพไม่ดี จึงเปลี่ยนเป็นการใช้ PVD แทน[25] ส่วนอุปกรณ์ทางด้านใบมีดตัด, สว่าน ซึ่งต้องการยืดอายุการใช้งาน ถ้าใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์จะมีปัญหาตรงความแข็งน้อย (2000 HV) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากกว่า 0.4 ซึ่งทำให้ความต้านทานการสึกหรอต่ำ ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้โดยใช้ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์[26]

ในปี ค. ศ.2000 มีการใช้ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์สำหรับ EMC (epoxy molding compound) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกเพื่อป้องกัน chip[27]

ในปี ค.ศ.2001 มีการพัฒนาฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์เพื่อใช้สำหรับ routing application ใน wood machine[28] และนำไปเคลือบ extrusion dies[29] นอกจากนี้ยังมีการนำฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ไปใช้อย่างแพร่หลายใน diverse technique application เช่น diffuse barrier ใน microelectronic รวมถึงมีการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของชิ้นงานด้าน optic[30]

ในปี ค.ศ.2002 ได้มีการวิจัยเพื่อหาผลของพารามิเตอร์ในกระบวนการตกเคลือบที่มีผลต่อความหนาแน่น พื้นผิว โครงสร้างและส่วนประกอบของฟิล์ม[31]

ในปีค.ศ.2003 ได้มีงานวิจัยศึกษาผลของความดันของก๊าซไนโตรเจนที่มีผลต่อฟิล์ม เช่น เฟส โครงสร้าง อัตราการตกเคลือบ[32] นอกจากนี้งานวิจัยยังเน้นถึง อิทธิพลของการไบแอสสารชิ้นฐาน และคุณสมบัติของชิ้นสารที่มีผลต่อโครงสร้าง ขนาดของผลึก และOrientation

ในปี ค.ศ.2004 ศึกษาสมบัติทาง optic และ electronic ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์[33]

ในปี ค.ศ. 2005 ศึกษาสมบัติของฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ที่เตรียมโดยวิธีต่างๆกัน[34]

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ พบว่า สมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ จะขึ้นกับการไบแอสชิ้นงาน ความดันของก๊าซไนไตรเจน อุณหภูมิของชิ้นงาน[35] รายละเอียดดังต่อไปนี้

การไบแอสสารชิ้นฐานทำให้ฟิล์มมีความหนาแน่นมากขึ้น ไม่ทำให้เกิดโครงสร้าง Columnar และแข็งขึ้นด้วยไอออนอนุภาคพลังงานสูง ให้ฟิล์มมีความบกพร่องน้อยกว่าการไม่ไบแอสสารชิ้นฐาน[36] การไบแอสสามารถทำให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนเฟส[37] เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการฟอร์มตัวของ CrN และ Cr_2N ใกล้เคียงกัน และการไบแอสทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของ adatom มากขึ้น[35] แต่ถ้าเพิ่มการไบแอสจะทำให้อัตราการตกเคลือบลดลง เนื่องจากการสปัตเตอร์กลับบนสารชิ้นฐาน[38]

ความดันของก๊าซไนโตรเจน จะกำหนดเฟสของโครเมียมไนไตรด์ ถ้าความดันของก๊าซไนโตรเจนน้อยจะทำให้ยีลด์ของกระบวนการสปัตเตอริง (ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดออกของอะตอมเป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค) สูงกว่าที่ความดันของก๊าซไนโตรเจนมีค่ามาก เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับโครเมียมซึ่งเป็นเป้า ทำให้ได้สารประกอบของไนโตรเจนบนเป้าที่เรียกว่าเกิด Poison effect หรือสภาวะหน้าเป้าไม่ได้เป็นสารบริสุทธิ์เช่นเดิมแต่กลายเป็นสารประกอบไนไตรด์จากการรวมกันของก๊าซไนโตรเจนและสารที่เป็นเป้า และจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนมามากกว่า อนุภาคเป้าโลหะ แต่ถ้าความดันของก๊าซไนโตรเจนมาก การยึดเกาะของฟิล์มบนสารชิ้นฐานจะน้อยลงเนื่องจากลดอนุภาคพลังงานสูง ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของ adatom น้อยลงและลดอัตราการตกเคลือบของฟิล์ม ยิ่งถ้าเพิ่มความดันของก๊าซไนโตรเจนในระบบจะทำให้มีเปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนที่อยู่ในฟิล์มมากขึ้น และทำให้ฟิล์มแข็งมากขึ้นด้วย[39] ทั้งนี้ความดันของก๊าซอาร์กอนจะมีผลต่อฟิล์มเช่นกัน โดยทั่วไปจะใช้ความดันของก๊าซอาร์กอนน้อยเพื่อให้ฟิล์มเรียบ แต่ถ้าความดันของก๊าซอาร์กอนสูงจะเป็นการเพิ่มความขรุขระของฟิล์ม โดยทั่วไปการเคลื่อนที่ของ adatom นั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการคลือบเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการสะสมความร้อนที่เกิดจากอนุภาคสปัตเตอร์พลังงานสูง ถ้าเพิ่มทั้งก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจนเข้าไปในระบบสุญญากาศจะส่งผลให้ความหนาแน่นของฟิล์มลดลงเนื่องจากลด mean free path ในกระบวนการเคลือบ และเพิ่มการชนของอนุภาคโครเมียมไนไตรด์ที่หลุดจากเป้า ทำให้อนุภาคโครเมียมไนไตรด์มีการสูญเสียพลังงานไปในระหว่างชน เมื่ออนุภาคโครเมียมไนไตรด์มาถึงสารชิ้นฐานจะมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะ diffuse บนผิวชิ้นงาน ทำให้ฟิล์มเกิดรูพรุน[40]

การควบคุมพลังงานของไอออนระหว่างกระบวนการตกเคลือบจะส่งผลถึง ความหนาแน่นของฟิล์ม ความขรุขระของผิว การสึกหรอและการกัดกร่อนของฟิล์ม[41] แต่ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของฟิล์ม[42] อุณหภูมิของสารชิ้นฐานมีผลต่อฟิล์ม ถ้าอุณหภูมิของสารชิ้นฐานน้อยจะส่งผลถึงขนาดของเกรน โดยขนาดของเกรนจะน้อย และผิวเรียบ[43] แต่ถ้าอุณหภูมิของสารชิ้นฐานสูงจะมีผลทำให้ฟิล์มแน่น เนื่องจากจะทำให้อนุภาค diffuse บนพื้นผิวดี แต่ที่อุณหภูมิสูงไม่ได้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเรียบของฟิล์ม[40]

ลักษณะโดยทั่วไปของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์แบ่งออกเป็นสองชนิดคือ CrN (fcc) และ Cr_2N (hcp) โดย Cr_2N มีความแข็งเด่นกว่าเนื่องจากฟิล์มมีโครงสร้างแบบ dense ส่วน CrN มีโครงสร้างแบบ columnar[44] ฟิล์มที่มีโครงสร้าง CrN จะมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่า Cr_2N และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำกว่า Cr_2N [36] นอกจากนี้ฟิล์ม CrN จะมีการยึดเกาะกับสารรองรับได้ดีกว่าฟิล์ม Cr_2N [38]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้กล่าวถึงอุปกรณ์ เครื่องมือ และ ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ประกอบด้วย (1) เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง (2) เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบ รีแอคตีฟ ดีซี สปัตเตอริง (3) การเตรียมชิ้นงานสำหรับการเคลือบฟิล์มบาง (4) การเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ และ (5) ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. ส่วนการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

1.1 เครื่องเคลือบสุญญากาศ เป็นระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง โดยเป็นเครื่องที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1.2.1 เป้าสารเคลือบเป็นเป้าโครเมียม มีความบริสุทธิ์ 99.97 %

1.2.2 ชิ้นงาน (Substrate) มี 2 ชนิดคือ

- กระจกสไลด์และแผ่นซิลิกอน สำหรับทดสอบการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

- ใบมีดตัดคว้านใส้สับปะรด ที่เป็นชิ้นงานจริงจากบริษัท ซึ่งมี 2 ขนาด คือ ขนาดสั้นสำหรับตัดเปลือกสับปะรด (รูปที่ 3-1)และ ขนาดยาวสำหรับตัดใส้สับปะรด (รูปที่ 3-2)

1.2.3 ก๊าซ (Gas) ประกอบด้วยก๊าซ 2 ชนิดคือ

- ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.999% เป็นก๊าซสปัตเตอร์ (Sputtered Gas)

- ก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.995% เป็นก๊าซไวปฏิกิริยา (Reactive Gas)

2. ส่วนการหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

2.1 X-Ray Diffractrometer สำหรับศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคและเฟสของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง X-Ray Diffractrometer รุ่น Rint 2000 (Rigaku Corporation)

2.3 EDX (Energy Dispersive X-ray Fluorescent) สำหรับศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ด้วยเครื่อง SEM โดยวิเคราะห์เชิงปริมาณแบบ ZAF

2.2 STM สำหรับศึกษาลักษณะพื้นผิวในระดับจุลภาคของ ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

รูปที่ 3-1 ใบมีดตัดคว้านใส้สับปะรด ขนาดสั้นสำหรับตัดเปลือกสับปะรด

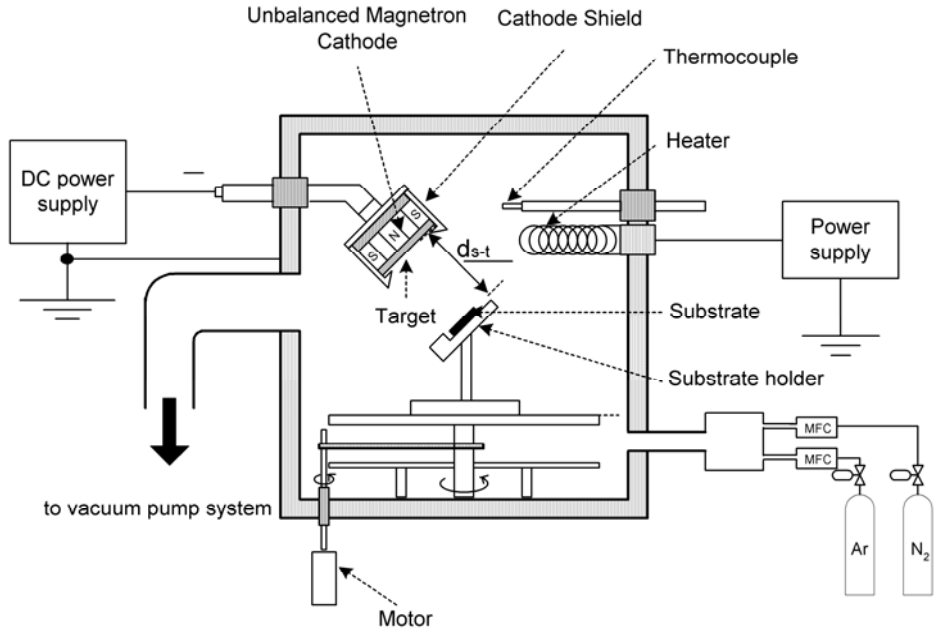
รูปที่ 3-2 ใบมีดตัดคว้านใส้สับปะรด ขนาดยาวสำหรับตัดใส้สับปะรด

3.2 เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบ รีแอคตีฟ ดีซี สปัตเตอริง

ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ในงานวิจัยนี้เตรียมจากเครื่องเคลือบในสุญญากาศระบบดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง (รูปที่ 3-3) ด้วยเทคนิครีแอคตีฟ สปัตเตอริง ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมภายใต้สภาวะสุญญากาศ ดังนั้นเพื่อให้ฟิล์มบางที่ได้มีคุณภาพและสมบัติตามที่ต้องการ จะต้องลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศให้อยู่ในระดับ 10^{-6} mbar ทั้งนี้ส่วนประกอบของเครื่องเคลือบระบบสปัตเตอริงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของระบบสุญญากาศ (Vacuum System) และ ส่วนของระบบเคลือบ (Coating System) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ส่วนของระบบสุญญากาศ เป็นส่วนในการสร้างสภาวะสุญญากาศ ประกอบด้วยห้องเคลือบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 353.0 mm สูง 370.0 mm ระบบเครื่องสูบสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องสูบแบบแพร่ไอ มีเครื่องสูบกลโรตารีเป็นเครื่องสูบท้าย การวัดความดันในห้องเคลือบใช้มาตรวัดความดันของ PFEIFFER ประกอบด้วย ส่วนแสดงผลรุ่น TPG262 และมาตรวัดความดันชนิด Compact Full Range Gauage รุ่น PKR251

2. ส่วนของระบบเคลือบ เป็นส่วนในการตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ประกอบด้วยแมกนีตรอนคาโทด ขนาด 2 นิ้ว ระบายความร้อนด้วยน้ำติดตั้งเป้าโครเมียม (99.97%) ที่คาโทดพร้อมภาคจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ใช้ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซสปัตเตอร์ ใช้ก๊าซไนโตรเจนเจนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซไวปฏิกิริยา สำหรับการจ่ายก๊าซอาร์กอนและก๊าซไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบจะควบคุมด้วย Mass Flow Controller ของ MKS type247D



รูปที่ 3-3 ส่วนประกอบหลักของส่วนของระบบการเคลือบของเครื่องเคลือบ

3.3 <u>การเตรียมชิ้นงานสำหรับการเคลือบฟิล์มบาง</u>

ชิ้นงานที่ใช้สำหรับการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิดคือ ชิ้นงานทดสอบได้แก่ กระจกสไลด์ แผ่นซิลิกอน และ ชิ้นงานจากบริษัท คือ มีดตัดคว้านใส้สับปะรด โดยชิ้นงานทั้งหมดก่อนนำมาเคลือบจะต้องนำมาทำความสะอาดสิ่งสกปรกก่อน ได้แก่ คราบฝุ่น ไขมัน สารอินทรีย์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผิวชิ้นงานที่สะอาด ทำให้ฟิล์มที่เคลือบยึดติดแน่นลงบนผิวหน้าของชิ้นงาน

สำหรับการทำความสะอาดชิ้นงาน เริ่มจากนำชิ้นงานไปล้างด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) โดยใช้อัลตราโซนิกส์ เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) โดยใช้อัลตราโซนิกส์ เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปล้างต่อด้วยไอโซโพรพานอล (Isopropanal) โดยใช้อัลตราโซนิคอีก 10 นาที นำชิ้นงานขึ้นด้วยคีมคีบ เป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง จากนั้นนำชิ้นงานใส่เข้าในภาชนะสุญญากาศเพื่อรอการเคลือบ

รูปที่ 3-4 ขั้นตอนการล้างชิ้นงาน

3.4 การเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

การเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ในภาชนะสุญญากาศด้วยวิธี รีแอคตีฟ ดีซี สปัตเตอริงของงานวิจัยนี้มีรายละเอียดพอสรุปได้ดังนี้ แหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสตรงถูกติดตั้งเข้ากับระบบเคลือบโดยต่อศักย์ไฟฟ้าลบเข้ากับขั้วคาโทดและต่อศักย์ไฟฟ้าบวก (หรือ Ground) กับภาชนะสุญญากาศ เป้าโครเมียมจะถูกติดตั้งกับขั้วคาโทด โดยด้านบนของคาโทดจะต่อกับระบบไหลเวียนน้ำเย็นเพื่อใช้ระบายความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณคาโทดจากการสปัตเตอร์ของไอออนอาร์กอนที่บริเวณผิวหน้าเป้า ส่วนชิ้นงานถูกวางบนแผ่นรองรับที่ติดตั้งบนแท่นวางที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ส่วนอุปกรณ์ Control Unit ที่เชื่อมต่อกับ Mass Flow Controller (MFC) ใช้บังคับการทำงานของเครื่องควบคุมการปล่อยก๊าซอย่างละเอียด เพื่อควบคุมอัตราไหลของก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจนที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยค่าอัตราไหลของก๊าซจะมีหน่วยเป็น Standard Cubic Centimeter per Minute at STP (sccm)

สำหรับขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีรายละเอียดดังนี้

1. นำชิ้นงานที่ล้างทำความสะอาดแล้ว วางบนแท่นวางชิ้นงาน ปิดฝาภาชนะสุญญากาศ

2. สร้างสภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศ จนความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ 3×10^{-5} mbar ซึ่งจะใช้เป็นค่าความดันพื้น (Pb) ของระบบก่อนที่จะทำการเคลือบฟิล์ม บันทึกค่าความดัน Pb ที่อ่านได้

3. ปล่อยก๊าซอาร์กอนและก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ ตามค่าที่กำหนดไว้

4. ป้อนศักย์ไฟฟ้าลบให้แก่คาโทด เพื่อเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มลงบนชิ้นงาน พร้อมทั้งบันทึกผลค่าต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ค่ากระแสไฟฟ้า (I) และความดันรวม (P_t) ที่เกิดขึ้นขณะเริ่มเคลือบฟิล์ม และทำการเคลือบฟิล์ม ตามเวลา (t) ที่กำหนด

6. หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเคลือบฟิล์ม ปิดแหล่งจ่ายไฟ ปิดก๊าซอาร์กอน ปิดก๊าซไนโตรเจน และปล่อยอากาศเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ เพื่อนำชิ้นงานออก

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

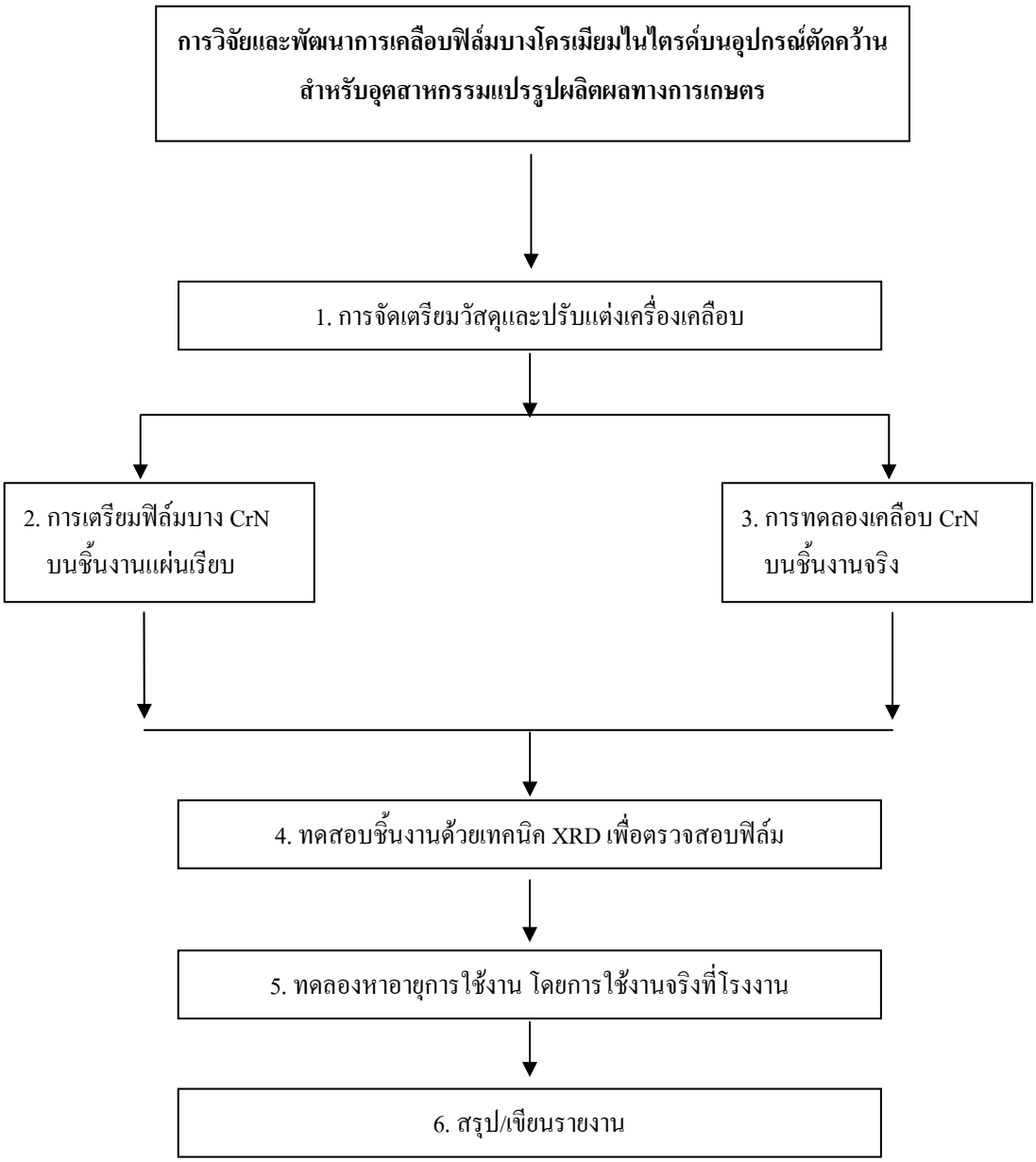
1. การปรับแต่งเครื่องเคลือบ เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการเคลือบฟิล์มบางลงบนชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก ที่มีรูปทรงกระบอก (3 มิติ) ทำให้ต้องมีการปรับเครื่องเคลือบให้สามารถจับชิ้นงานลักษณะทรงกระบอกให้สร้างเคลือบในขณะที่ทำการหมุนได้ด้วย ขณะนี้ห้องปฏิบัติการวิจัยฯ มีระบบเครื่องสูบสุญญากาศ (vacuum pump system) และภาชนะสุญญากาศแล้ว แต่ยังขาดอุปกรณ์สุญญากาศบางส่วน เช่น วาล์วสุญญากาศต่างๆ และส่วนการเคลือบ (coating parts) ได้แก่ คาโทด แท่นจับชิ้นงาน ชุดหมุนชิ้นงาน ชุดไบแอสและชุดให้ความร้อน ทำให้ต้องมีการปรับแต่งเครื่องเคลือบและสร้างอุปกรณ์บางส่วนเพื่อนำไปติดตั้งให้เครื่องเคลือบพร้อมทำงาน

2. การเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาเทคนิคและการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนชิ้นงานที่เป็นแผ่นเรียบเพื่อหาเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ก่อนการเคลือบจริง เนื่องจากในโครงการนี้จะเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยเทคนิครีแอคตีฟ สปัตเตอริง ซึ่งเป็นกระบวนการที่จำเป็นต้องมีการควบคุมอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ในระบบเพื่อให้ชั้นเคลือบตามต้องการ ในขั้นนี้จะต้องหาเงื่อนไขการเคลือบแล้วนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD ว่าฟิล์มบางที่ได้คือฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์หรือไม่ รวมถึงการทดสอบเกี่ยวกับขั้นตอนการเคลือบ เช่น การหมุนชิ้นงาน การให้ความร้อน การไบแอสชิ้นงานฯลฯ เพื่อใช้เป็นแนวทาง สำหรับการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนชิ้นงานจริงต่อไป

4. การเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนชิ้นงานจริง ขั้นนี้จะใช้ผลและแนวทางการศึกษาที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมา สำหรับใช้เคลือบชิ้นงานจริง ก่อนนำไปทดสอบการใช้งานจริงที่โรงงานเพื่อทดสอบการใช้ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบแล้วว่ามีคุณภาพอย่างไร

5. การทดลองใช้ชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ขั้นนี้เป็นการทดสอบอายุของชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบว่าระหว่างชิ้นงานที่เคลือบและไม่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์จะมีอายุการใช้งานแตกต่างกันอย่างไร โดยเป็นการทดสอบการใช้งานจริงที่โรงงาน

6. สรุปและเขียนรายงาน ขั้นนี้จะเป็นการสรุปผลและเขียนรายงานการวิจัย



รูปที่ 3-5 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการศึกษา

บทนี้จะได้กล่าวถึงผลและอภิปรายผลการศึกษาของงานวิจัยแบ่งเป็น 4 ส่วน ดังนี้คือ (1) การปรับแต่งเครื่องเคลือบ (2) การศึกษาเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (3) การเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนใบมีดตัดใส้สับปะรด (4) การทดลองใช้ใบมีดตัดคว้านใส้สับปะรดที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

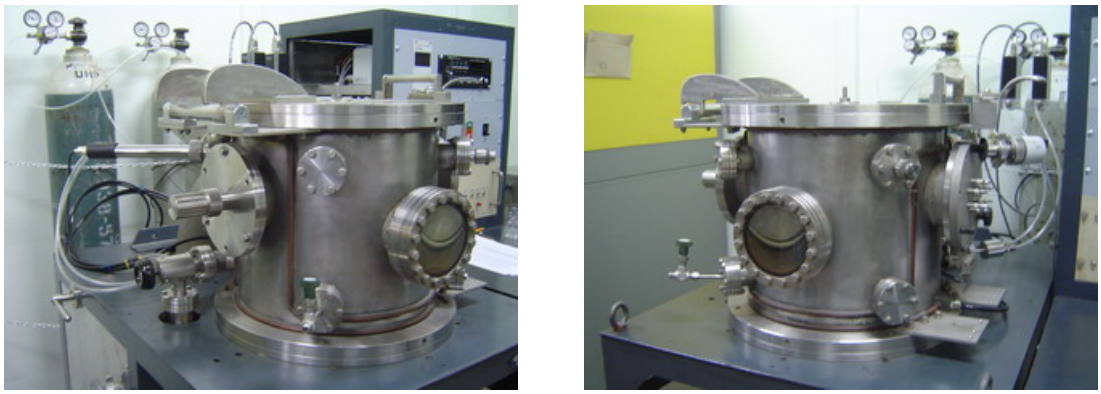
4.1 การปรับแต่งเครื่องเคลือบ

ส่วนนี้เป็นการจัดเตรียมเครื่องเคลือบในสุญญากาศให้พร้อมสำหรับการทำงานเคลือบชิ้นงานที่เป็นตัวอย่างจากบริษัท โดยปรับแต่งเครื่องเคลือบจากเครื่องเคลือบเดิมของคณะผู้วิจัยเพื่อให้เหมาะสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ เครื่องเคลือบที่ปรับแต่งแล้วของงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 4-1 โดยได้ปรับแต่งในส่วนสุญญากาศให้พร้อมทำงานและได้ออกแบบคาโทดสำหรับสร้างสารเคลือบแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงพร้อมภาคจ่ายไฟเพิ่มเติมด้วย

รูปที่ 4-1 เครื่องเคลือบในสุญญากาศระบบสปัตเตอริง ที่ใช้ในโครงการวิจัย

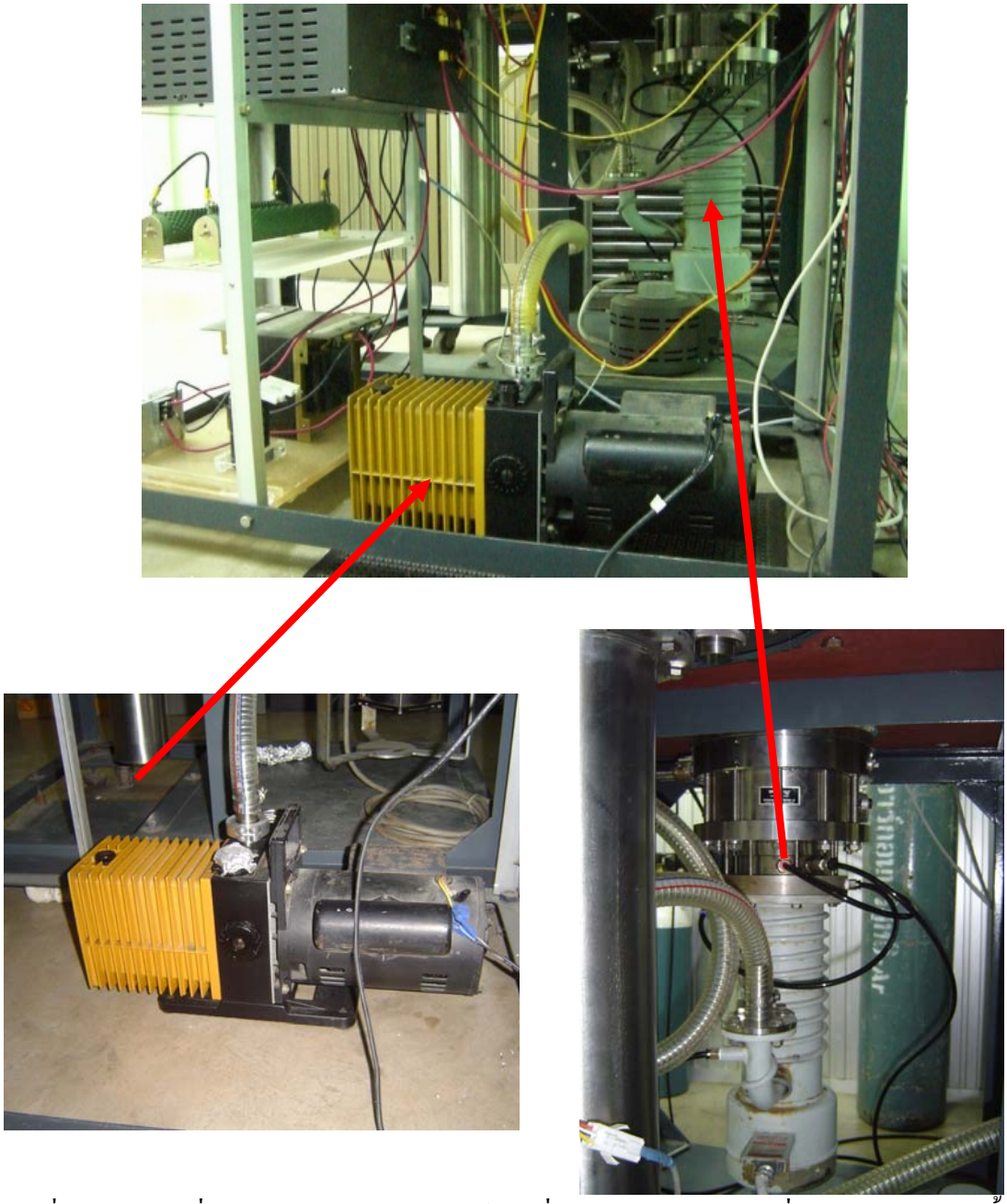
เครื่องเคลือบที่ใช้งานวิจัยนี้หลังการปรับแต่ง มีส่วนประกอบสำคัญต่างๆ จำนวน 11 ส่วน คือ (1) ภาชนะสุญญากาศ (2)ระบบเครื่องสูบสุญญากาศ (3) ระบบวาล์วสุญญากาศ (4) ระบบควบคุมการจ่ายก๊าซอย่างละเอียด (5) ระบบมาตรวัดความดัน (6) ชุดจับชิ้นงาน (7) แมกนีตรอนคาโทด (8) ภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูง (9) ชุดให้ความต่างศักย์ไบแอสชิ้นงาน (10) ชุดให้ความร้อนชิ้นงาน และ (11) ตู้ควบคุมหลัก ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1. ภาชนะสุญญากาศ มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากสเตนเลส (รูปที่ 4-2) มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 353 mm. ความสูง 370 mm. รอบภาชนะสุญญากาศมีช่องสำหรับติดอุปกรณ์ต่างๆ จำนวน 12 ช่อง แบ่งเป็นช่องกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm จำนวน 4 ช่อง และ ช่องกลมขนาด 4 cm จำนวน 8 ช่อง สำหรับแผ่นปิดบน (top plate) ของภาชนะสุญญากาศมีขนาด 450 mm มีช่องสำหรับต่ออุปกรณ์ จำนวน 1 ช่อง ในส่วนของแผ่นฐาน (base plate) ของภาชนะสุญญากาศมีขนาด 450 mm และมีช่องเปิดขนาด 12 cm จำนวน 1 ช่องอยู่ตรงกลางสำหรับต่อพอร์ตส่วนขยายสำหรับจับชิ้นงาน พร้อมหน้าแปลนขนาด 3 cm สำหรับต่ออุปกรณเพิ่มจำนวน 6 ช่อง และเจาะช่องเปิดขนาดเล็ก 1 cm จำนวน 1 ช่องสำหรับต่อฟีดทรูชนิดหมุน (rotatable feed through)



รูปที่ 4-2 ภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบในสุญญากาศที่ใช้ในโครงการ

2. ระบบเครื่องสูบสุญญากาศ สำหรับสร้างสภาวะสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศให้อยู่ในระดับที่ทำงานได้ (ประมาณ 10^{-6} mbar) ระบบเครื่องสูบสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องสูบสุญญากาศ 2 แบบคือ เครื่องสูบกลโรตารี แบบ 2 สถานะ อัตราการสูบประมาณ 12 m^3/hr และเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน อัตราสูบ (N_2) ประมาณ 550 l/s (รูปที่ 4-3)



รูปที่ 4-3 ระบบเครื่องสูบสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องสูบกลโรตารีและเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน

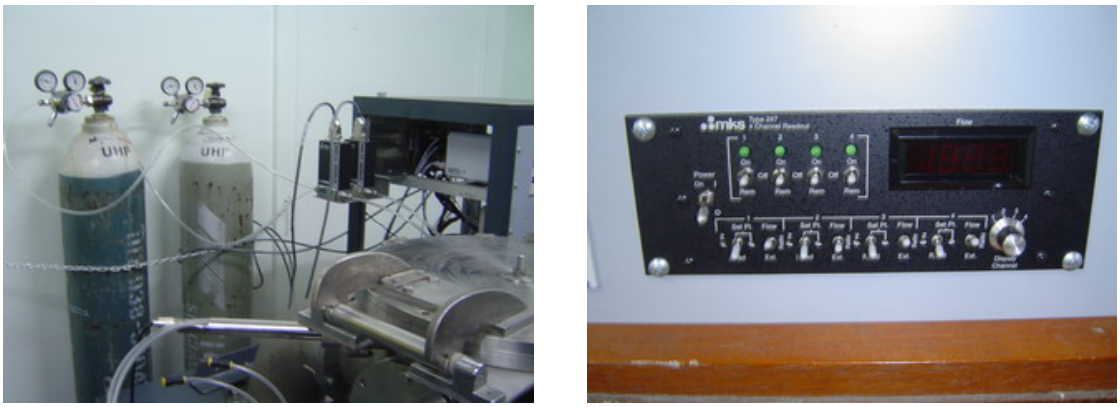
3. ระบบวาล์วสุญญากาศ มีการปรับแต่งวาล์วสุญญากาศสูงชนิดแผ่น (plate valve) ให้สามารถเปิด-ปิดระหว่างเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน กับภาชนะสุญญากาศ (รูปที่ 4-4) โดยควบคุมการเปิดปิดวาล์วด้วยระบบคานกระดก และสามารถปรับหน้าวาล์วให้เปิดได้กว้าง-แคบเพื่อควบคุมอัตราสูบได้ นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งวาล์วสุญญากาศหยาบ (roughing valve) ระหว่างภาชนะสุญญากาศกับเครื่องสูบกลโรตารีเพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศต่ำในภาชนะสุญญากาศ และมีวาล์วท้าย (backing valve) ทำหน้าที่เปิด-ปิด ท่อท้ายของเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันกับเครื่องสูบกลโรตารี (รูปที่ 4-5)

รูปที่ 4-4 วาล์วสุญญากาศสูงและระบบคานกระดกเพื่อเปิดปิดวาล์วของเครื่องเคลือบ

รูปที่ 4-5 วาล์ว roughing และ วาล์ว backing ของเครื่องเคลือบ

4. ระบบควบคุมการจ่ายก๊าซอย่างละเอียด ใช้ควบคุมการจ่ายก๊าซที่ในกระบวนการเคลือบ (รูปที่ 4-6) เป็นของ MKS รุ่น Type247 พร้อมทรานสดิวเซอร์ของ MKS รุ่น MASS-FLO โดยก๊าซที่ใช้ในระบบคือก๊าซอาร์กอนและก๊าซไนโตรเจน (ความบริสุทธิ์สูงมาก 999.9 UHP) เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยมีการติดตั้งภาชนะผสมก๊าซเพื่อผสมก๊าซอาร์กอนและก๊าซไนโตรเจน ก่อนที่ก๊าซผสมทั้งสองชนิดจะถูกปล่อยเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ

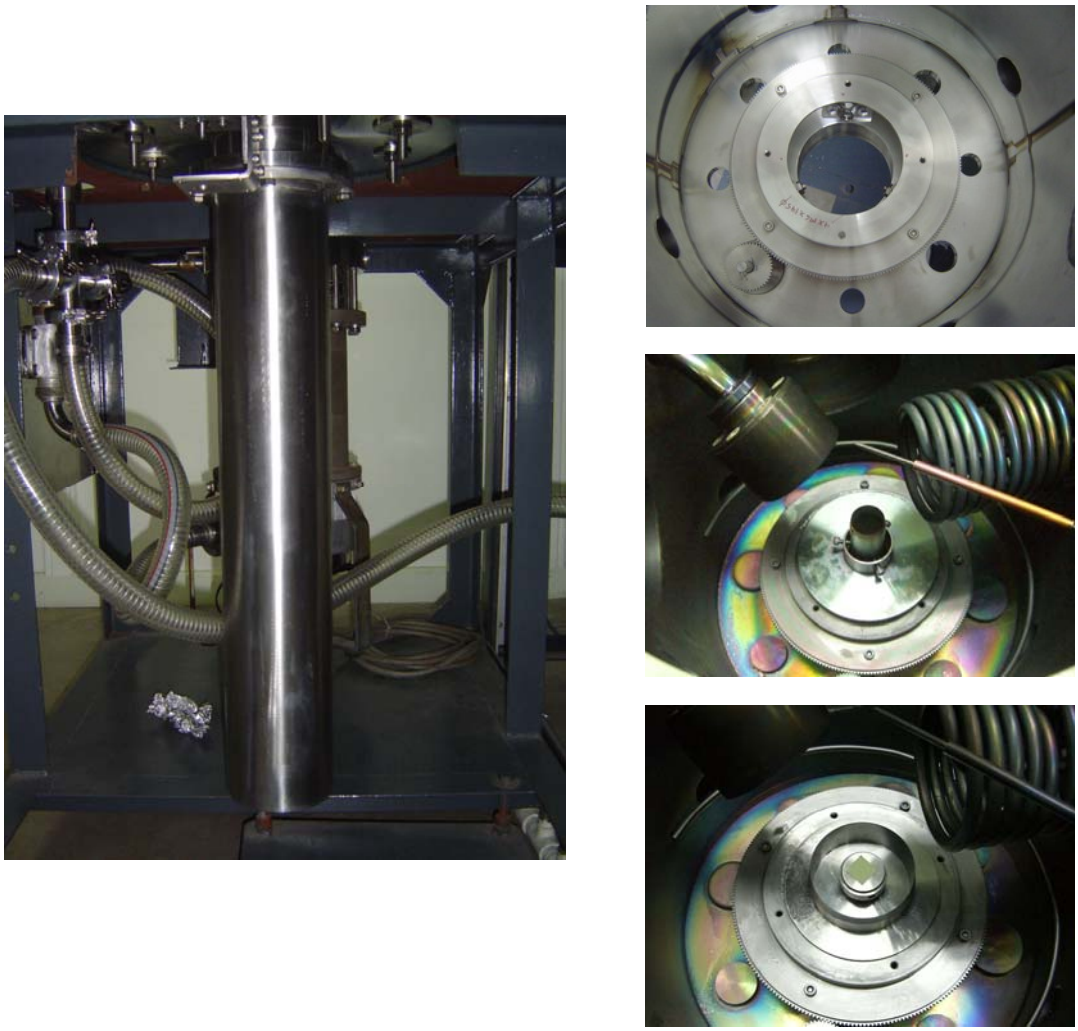
5. ระบบมาตรวัดความดัน สำหรับวัดความดันของเครื่องเคลือบใช้ของ Pfeiffer รุ่น dual gauge (รูปที่ 4-7) ที่ติดตั้งหัววัดชนิด full range ที่มีความสามารถอ่านค่าความดันได้ต่อเนื่องตั้งแต่ความดันบรรยากาศไปจนถึงระดับสุญญากาศสูงมาก ติดตั้งไว้ที่พอร์ตด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ



รูปที่ 4-6 ชุดควบคุมการปล่อยก๊าซอย่างละเอียดพร้อมทรานสดิวเซอร์

รูปที่ 4-7 มาตรวัดความดันแบบ full range พร้อมชุดแสดงผล

6. ชุดจับชิ้นงาน เป็นส่วนที่ออกแบบเฉพาะให้สามารถติดตั้งใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรด ใบมีดปอกเปลือกสับปะรด ทั้งในแบบหัวตัดสั้นและแบบยาว (23 นิ้ว) โดยทำการปรับแต่งพอร์ตในส่วนแผ่นฐานให้สามารถติดตั้งแท่นวางล้อมอเตอร์เกียร์ที่สร้างจากแผ่นสเตนเลส ตัดขึ้นรูปอย่างแม่นยำด้วยเลเซอร์ให้เป็นแผ่นเกียร์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 15 cm และมีเกียร์ตัวเล็กที่ส่งกำลังจากมอเตอร์ที่ควบคุมรอบการหมุนได้ที่ติดตั้งอยู่ภายนอก โดยส่งกำลังผ่านเพลาที่ออกแบบให้ติดตั้งอยู่ในฟีดทรูชนิดหมุนที่สามารถหมุนได้โดยสุญญากาศไม่รั่วซึม บนแผ่นมอเตอร์เกียร์ได้ออกแบบให้สามารถติดตั้งแท่นวางใบมีดชนิดสั้น และสามารถปรับระยะความสูงของแท่นได้ ทั้งนี้เพื่อรองรับการเคลือบใบมีดชนิดยาวประมาณ 23 นิ้ว จึงมีการสร้างภาชนะส่วนขยายรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11.5 cm ยาว 68.2 cm อยู่ติดกับแผ่นฐานของภาชนะสุญญากาศ โดยออกแบบให้สามารถถอดออก เมื่อไม่ต้องการใช้งานได้เพื่อผลการลดปริมาตรรวมของภาชนะสุญญากาศ (รูปที่ 4-8)

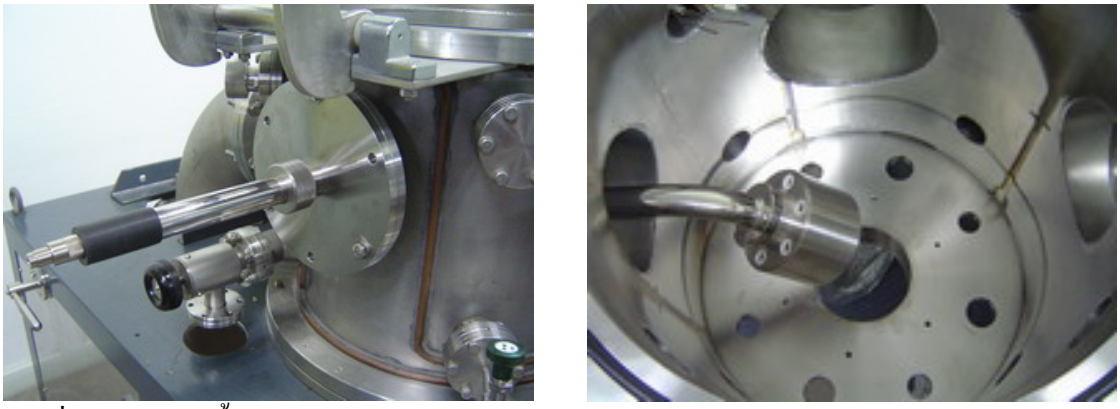


รูปที่ 4-8 ส่วนต่อขยาย ชุดจับชิ้นและชุดเกียร์ส่งกำลังสำหรับหมุนชิ้นงาน

7. แมกนีตรอนคาโทด ได้สร้างแมกนีตรอนคาโทดขนาด 2 นิ้ว ที่มีส่วนต่อขยายรูปโค้ง ให้หน้าเป้าสารเคลือบทำมุม 45 องศา (รูปที่ 4-9 – 4-11) เพื่อให้เคลือบชิ้นงานที่มีลักษณะ 3 มิติได้ทั้งชิ้นงาน โดยสร้างส่วนต่อขยายของคาโถด เป็นฟิดทรู ที่มีความโค้ง สามารถติดตั้งไว้ที่พอร์ตด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ โดยออกแบบให้สามารถปรับระยะยื่นเข้า – ออกของฟิดทรู ในกรณีที่ต้องการเคลือบใบมีดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางต่างๆ กันได้

รูปที่ 4-9 ชิ้นส่วนของแมกนีตรอนคาโทดพร้อมส่วนประกอบที่สร้างขึ้นสำหรับเคลือบชิ้นงาน 3 มิติ

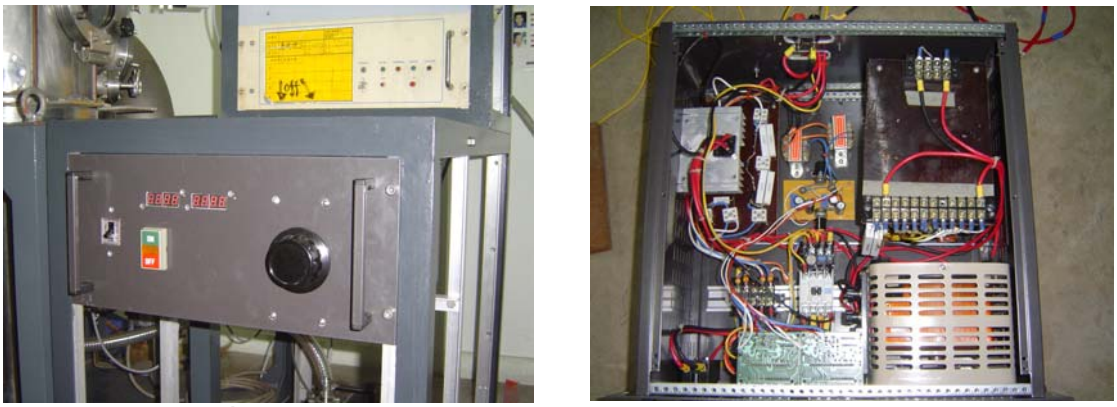
รูปที่ 4-10 ลักษณะของแมกนีตรอนคาโทดที่ประกอบเรียบร้อย



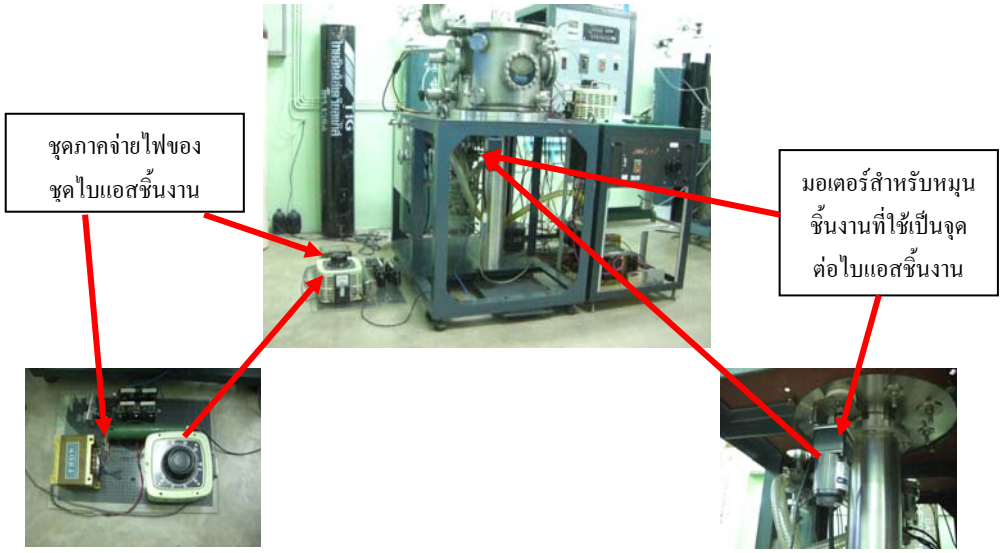
รูปที่ 4-11 การติดตั้งคาโทดกับพอร์ตด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ และตำแหน่งคาโทดในภาชนะ

8. ภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูง เพื่อใช้กับคาโทดที่ออกแบบและสร้างขึ้น ภาคจ่ายไฟฟ้า (รูปที่ 4-12) สามารถจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูง (750 V) และกระแสสูงสุดไม่เกิน 1 A ที่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง เป็นระบบที่ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า step up จาก AC 220 V เป็น AC 750 V 1A จากนั้นผ่านเข้าวงจรเรกูเลเตอร์ไดโอดชนิดทวีแรงดัน และวงจรกรองเพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรง DC 750 V 1 A ในระบบจ่ายไฟฟ้านี้สามารถควบคุมศักย์ไฟฟ้าได้จากการปรับค่าแรงดันขาเข้าหม้อแปลงด้วยวาริแอก ทำให้แรงดันกระแสตรงขาออกมีค่าแปรตามการปรับค่าแรงดันที่วาริแอก สามารถอ่านค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายออกพร้อมกับค่ากระแสภาระ (Load current) จากมิเตอร์ชนิดดิจิตอลที่ติดตั้งไว้กับเครื่อง

9. ชุดให้ความต่างศักย์ไบแอสชิ้นงาน เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับจ่ายให้กับแท่นวางชิ้นงาน ปรับค่าได้ในช่วง 0-500 V โดยต่อเข้ากับมอเตอร์ของชุดหมุนชิ้นงาน (รูปที่ 4-13)

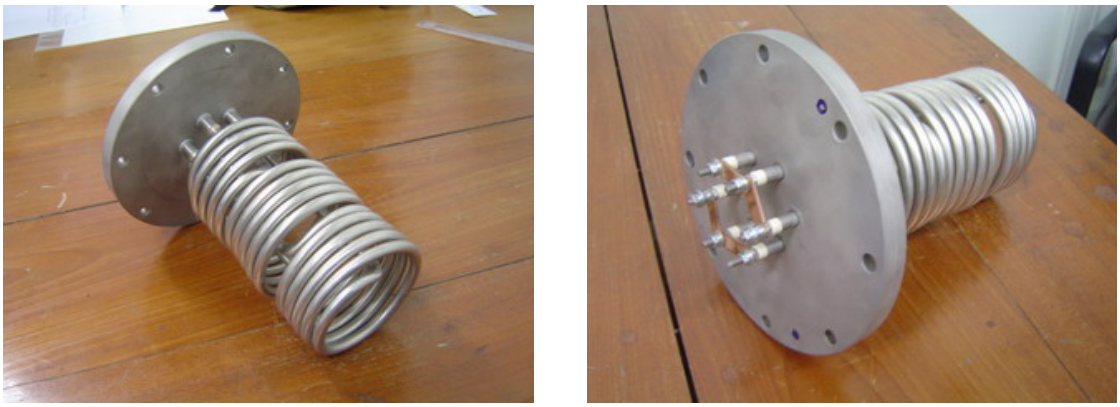


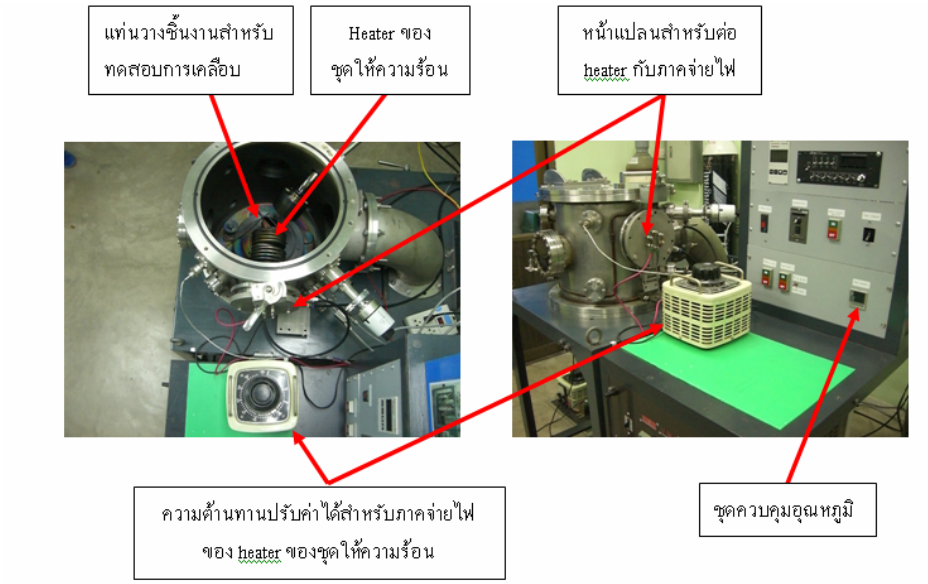
รูปที่ 4-12 ภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูงกระแสสูงสำหรับคาโทด



รูปที่ 4-13 ชุดให้ความต่างศักย์ไบแอสชิ้นงาน

10. ชุดให้ความร้อนชิ้นงาน ในการปรับปรุงสมบัติของชั้นเคลือบฟิล์มบางให้มีสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งจุลภาค การยึดเกาะ ให้มีสมบัติที่ดีขึ้นนั้น จำเป็นต้องมีกระบวนการปรับปรุงผิวขณะที่ทำการเคลือบ เช่น การให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน การจ่ายแรงดันไบอัสให้กับชิ้นงาน หรือการเหนี่ยวนำให้เกิดกระบวนการ bombardment ของอนุภาคพลังงานสูงที่ผิวหน้าชิ้นงาน เพื่อผลให้เกิดโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบที่หนาแน่นขึ้น ทำให้สมบัติกายภาพต่างๆของฟิล์มชั้นเคลือบดีขึ้น ได้สร้างชุดให้ความร้อนชนิดแผ่รังสีจากลวดความร้อน โดยสร้างให้เป็นฟีดทรูต่อเข้าทางด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4-14 โดยชุดให้ความร้อนนี้สามารถจ่ายความร้อนให้กับชิ้นงานได้ตลอดเวลา แม้ว่าจะทำการเคลือบอยู่ เนื่องจากลวดความร้อนถูกหุ้มด้วยฉนวนและแยกขั้วไฟฟ้าไม่ให้สัมผัสกับระบบขณะทำการเคลือบ จึงไม่เกิดการลัดวงจร ความร้อนจะส่งผ่านสู่ชิ้นงานด้วยกระบวนการแผ่รังสีความร้อนจึงไม่มีผลรบกวนต่อระบบเคลือบและไม่ต้องต่อสายหรือสื่อนำความร้อนสู่ชิ้นงานแต่อย่างใด



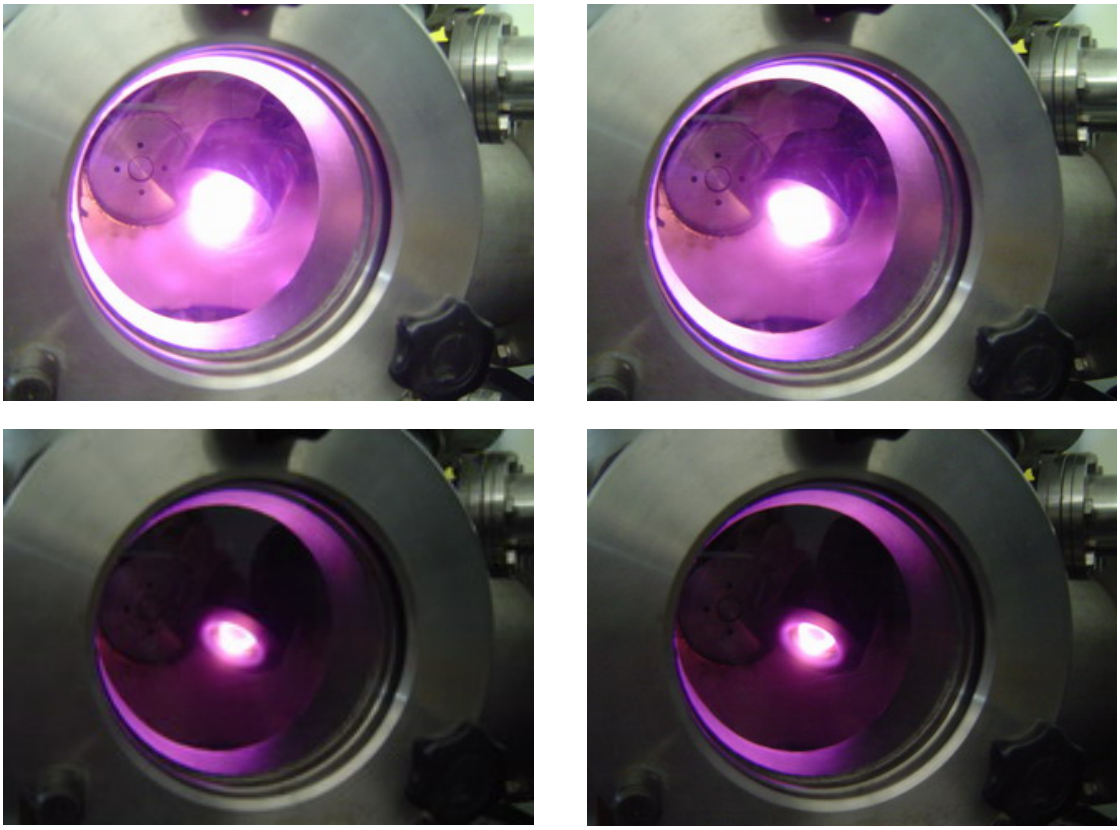


รูปที่ 4-14 ชุดให้ความร้อนแก่ชิ้นงานชนิดแผ่รังสีจากลวดร้อนและลักษณะการติดตั้งชุดควบคุม

11. ตู้ควบคุมหลัก (main control unit) และแท่นวางระบบสุญญากาศ เป็นตู้ที่สร้างจากเหล็ก L-bar หนา 6 mm เพื่อการรับน้ำหนักของภาชนะสุญญากาศและกล่องอุปกรณ์ต่างๆ ยึดด้วยสลักเพื่อเป็นส่วนโครงของตู้ และใช้เหล็กแผ่น 5 mm ทำส่วนผนังต่างๆ เมื่อประกอบเป็นโครงสร้างเรียบร้อยแล้ว ได้ทาสีอะครีลิกเพื่อกันสนิมทั้งหมด (รูปที่ 4-15)

รูปที่ 4-15 ลักษณะตู้ควบคุมหลักของเครื่องเคลือบ

เมื่อประกอบและติดตั้งเครื่องเคลือบทั้งระบบแล้วได้ทดสอบการทำงานของเครื่องเคลือบ ใน 2 ส่วนคือ ส่วนระบบสุญญากาศและส่วนการเคลือบ โดยในการของระบบสุญญากาศพบว่า ระบบเครื่องสูบสุญญากาศสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ต่ำสุด $8x10^{-6}$ mbar ภายในเวลา 45 นาที ซึ่งเพียงพอสำหรับการเคลือบด้วยเทคนิคสปัตเตอริง จากนั้นได้ทดสอบในส่วนการเคลือบ โดยการสร้าง glow discharge ด้วยคาโทดและภาคจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่สร้างขึ้นจาก การทดลองพบว่า แมกนีตรอนคาโทดที่สร้างขึ้นสามารถสร้าง glow discharge (รูปที่ 4-16) และเกิดฟิล์มบางของโลหะตกเคลือบบนชิ้นงาน



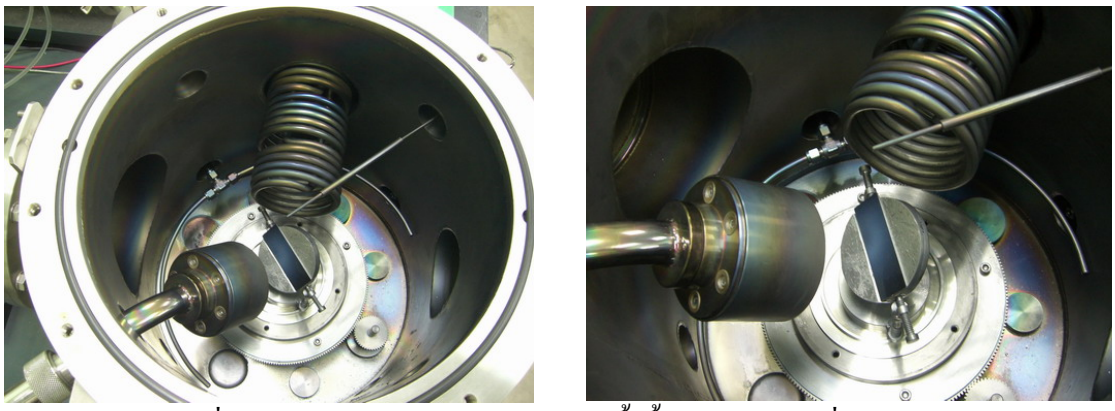
รูปที่ 4-16 ลักษณะของ glow discharge ของแมกนีตรอนคาโทดเมื่อจ่ายกระแสในปริมาณต่างกัน

4.2 การเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

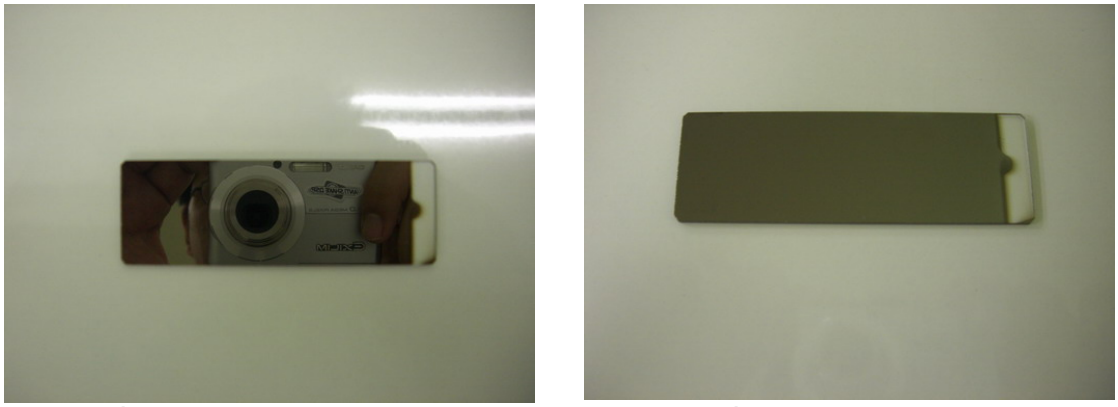
ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาเทคนิคและการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนชิ้นงานที่เป็นแผ่นเรียบเพื่อหาเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ก่อนการเคลือบชิ้นงานจริง เนื่องจากในโครงการนี้จะเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยเทคนิครีแอคตีฟ สปัตเตอริง ซึ่งเป็นกระบวนการที่จำเป็นต้องมีการควบคุมอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ในระบบเพื่อให้ชั้นเคลือบตามต้องการ ในขั้นนี้จะต้องหาเงื่อนไขการเคลือบแล้วนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD ว่าฟิล์มบางที่ได้คือฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์หรือไม่ก่อนนำไปเคลือบบนชิ้นงานจริงต่อไป

จากการทดลองเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยเครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นโดยลักษณะการติดตั้งชิ้นงานแสดงในรูปที่ 4-17 บนกระจกแผ่นเรียบและ บนแผ่นซิลิคอน โดยใช้อุณหภูมิขณะเคลือบต่างๆ กัน จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อตรวจสอบเฟสของฟิล์มบางที่ได้ และใช้เทคนิค EDX เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี มีผลดังนี้คือ

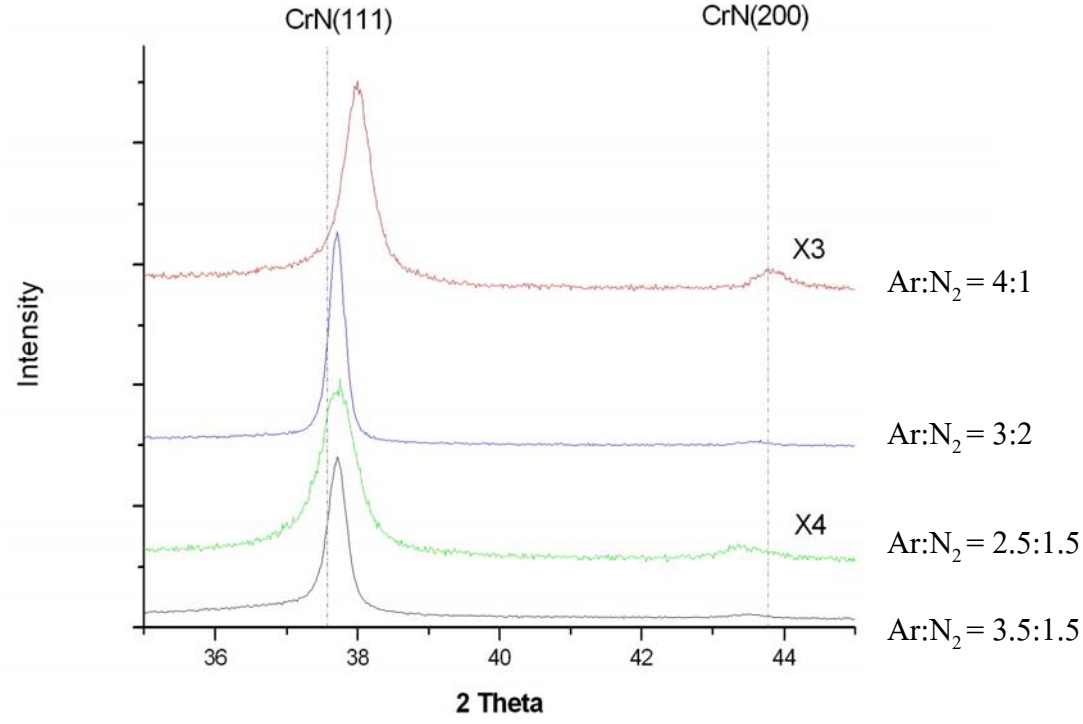
1. ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ Si(100) ที่เงื่อนไขการเตรียมอุณหภูมิชิ้นงานขณะเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆกัน ฟิล์มบางที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่พอสังเกตได้เบื้องต้นคือ เป็นฟิล์มสีดำเข้มเป็นมันวาว สะท้อนแสงดี มีการยึดเกาะที่ดี มีความเรียบลื่น (รูปที่ 4-18) และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม CrN ที่เคลือบด้วยสัดส่วนก๊าซอาร์กอนต่อไนโตรเจนต่างๆกัน พบว่า สัดส่วนของก๊าซผสมที่ต่างกันให้ผลต่อโครงสร้างของผลึกฟิล์มบางที่ต่างกัน พบว่าที่สัดส่วนก๊าซอาร์กอนต่อไนโตรเจน 4:1 เกิดการเลื่อน (shift) ของสเปกตรัมของระนาบ CrN (111) อย่างชัดเจนแสดงว่าที่ระนาบนี้เป็นระนาบผลึกที่ไม่สมบูรณ์แต่สามารถตรวจพบการเกิดระนาบ CrN (200) ที่เป็นระนาบที่เราต้องการ(prefer orientation) เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาสัดส่วนก๊าซอื่นๆ พบว่าไม่เกิดการเลื่อนของระนาบ CrN (111) มากนัก แสดงว่าผลึกที่เตรียมได้ มี stoichiometry ที่ดี และที่สัดส่วนก๊าซ $Ar:N_2$ = 2.5:1.5 พบการเกิดระนาบ CrN (200) ซึ่งเป็นระนาบที่ต้องการ (รูปที่ 4-19)



รูปที่ 4-17 ตำแหน่งและลักษณะการติดตั้งชิ้นงานภายในเครื่องเคลือบ

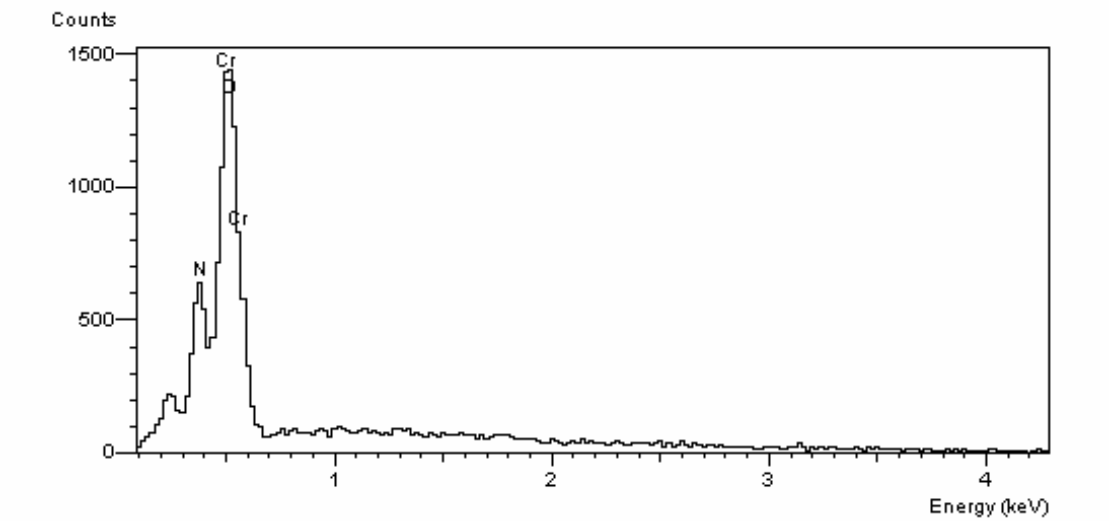


รูปที่ 4-18 ลักษณะของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ตัวอย่างที่เคลือบบนกระจกแผ่นเรียบ



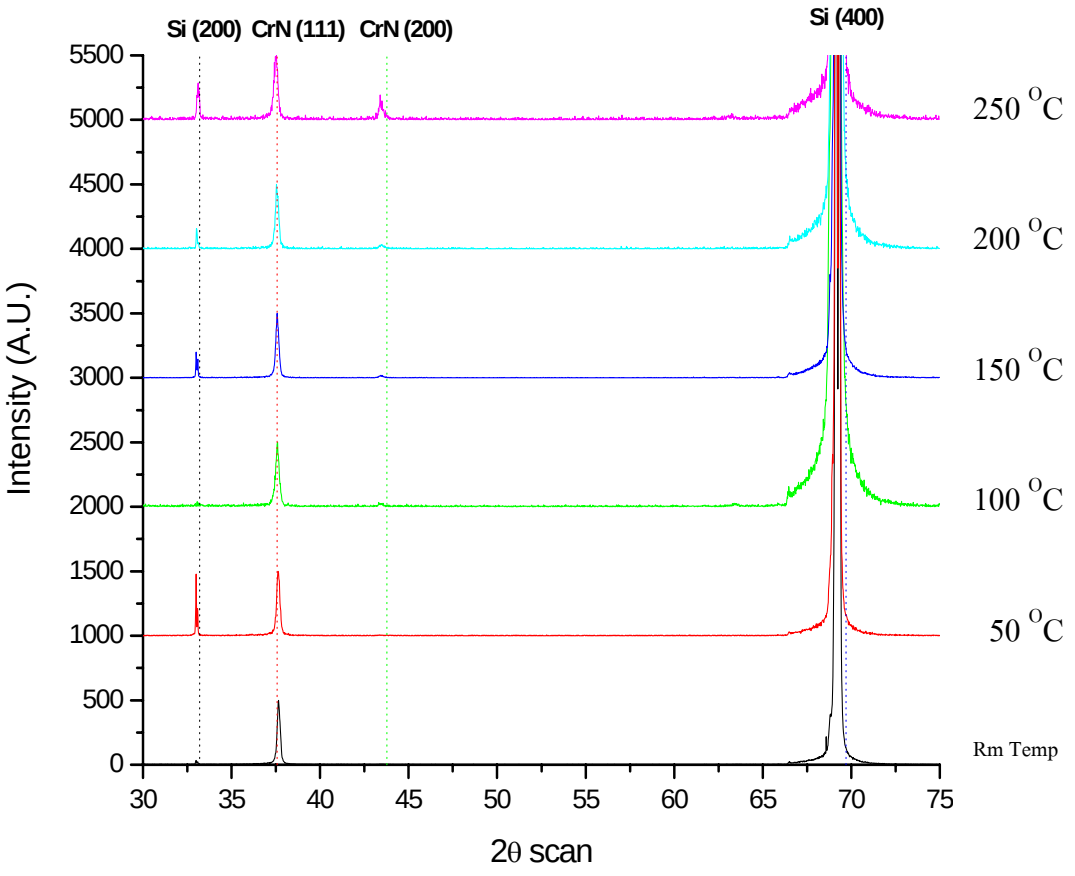
รูปที่ 4-19 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม CrN ที่เคลือบด้วยสัดส่วนก๊าซ $Ar:N_2$ ต่างๆ

2. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยเทคนิค EDX (Energy Dispersive X ray fluorescent) พบว่า ฟิล์มบางที่ได้มีส่วนประกอบของโครเมียมและไนโตรเจน (รูปที่ 4-20)



รูปที่ 4-20 สเปกตรัมการเรืองรังสีเอกซ์จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX

3. การวิเคราะห์ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เตรียมขึ้นด้วยเงื่อนไขอุณหภูมิต่างๆ มีระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ 2 ระนาบ และเมื่อเทียบ diffraction angles ที่ได้กับฐานข้อมูลสามารถระบุระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ทั้งสองระนาบนี้เป็น CrN(111) และ CrN(200) โดยไม่พบการเลี้ยวเบนจากระนาบอื่น ทั้งนี้เมื่อพิจารณา พีกจากระนาบการเลี้ยวเบนทั้ง 2 เทียบกับอุณหภูมิชิ้นงานขณะเคลือบ พบว่าความสูงของพีกของ CrN(200) จะมีพีกที่สูงขึ้นตามค่าอุณหภูมิสารรองรับที่สูงขึ้น แสดงว่าอุณหภูมิของสารรองรับมีผลต่อ orientation ของผลึกในระนาบนี้ จากนั้น ได้นำ ค่ามุมของการเลี้ยวเบน (2θ spectrum) นี้มาวิเคราะห์ เพื่อหาโครงสร้างและสมบัติของผลึกที่ประกอบด้วย ค่าคงที่ผลึก d-spacing และสภาพความเป็นผลึกที่วัดจาก FWHM ของแต่ละระนาบพบว่า CrN(111) เมื่อใช้สมการของแบรกก์ $2\,d\sin\theta = n\lambda$ โดยใช้ $Cu_{K\alpha}$ที่มีค่าความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 A° ในการวัดสามารถคำนวณหาค่า d ของ CrN (111) และค่าคงที่ lattice (a) ของ bulk CrN ได้เท่ากับ 2.3922 A° และ 4.1434 A° ตามลำดับ



รูปที่ 4-21 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนแผ่นซิลิคอนเตรียมที่อุณหภูมิสารรองรับต่างกัน

จากข้อมูลที่ได้ พบว่า ค่าคงที่ผลึกและ d-spacing ของฟิล์มบางที่ได้จะมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ของ Bulk CrN เมื่อเตรียมฟิล์มให้มีอุณหภูมิสารรองรับสูงขึ้นและพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง FWHM กับอุณหภูมิ พบว่าค่า FWHM มีค่าแปรตามอุณหภูมิ แสดงว่าสภาพความเป็นผลึกเมื่อพิจารณาจาก CrN(111) มีความเป็นผลึกสูงขึ้นตามอุณหภูมิชิ้นงานขณะเคลือบและ CrN(200) มีค่าคงที่ผลึก d-spacing และ FWHM เป็นดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ผลึกและ d-spacing ของ CrN (111)

ตัวอย่าง	T_s(°C)	โครงสร้าง	d (Å) CrN(111)	Lattice const. CrN(111) (Å)	FHWM CrN(111)
CrN009	Rm temp.	CrN (111)	2.3866	4.1337	0.323 ± 0.013
CrN010	50	CrN (111)	2.3890	4.1379	0.346 ± 0.022
CrN011	100	CrN (111) , CrN(200)	2.3903	4.1401	0.478 ± 0.090
CrN012	150	CrN (111) , CrN(200)	2.3915	4.1422	0.432 ± 0.066
CrN013	200	CrN (111) , CrN(200)	2.3939	4.1464	0.559 ± 0.060
CrN014	250	CrN (111) , CrN(200)	2.3939	4.1464	0.631 ± 0.006

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ผลึกและ d-spacing ของ CrN (200)

ตัวอย่าง	T_s(°C)	โครงสร้าง	D (Å) CrN(200)	Lattice const. CrN(200) (Å)	FHWM CrN(200)
CrN011	100	CrN(200)	2.0797	4.1594	0.557±0.034
CrN012	150	CrN(200)	2.0806	4.1612	0.526±0.195
CrN013	200	CrN(200)	2.0788	4.1576	0.561±0.082
CrN014	250	CrN(200)	2.0788	4.1576	0.611±0.060

จากสมการของแบรกก์ $2d \sin\theta = n\lambda$ โดยในการวัดใช้ Cu Kα ที่มีค่าความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 A° สามารถคำนวณหาค่า d ของ CrN (200) และค่าคงที่ผลึก (a) ได้เท่ากับ 2.0664 A° และ 4.1328 A° ตามลำดับ

จากข้อมูลที่ได้ พบว่า ค่าคงที่ผลึกและ d-spacing ของฟิล์มบางที่ได้จะมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ของ Bulk CrN เมื่อเตรียมฟิล์มให้มีอุณหภูมิสารรองรับสูงขึ้น และพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง FWHM กับอุณหภูมิ พบว่าค่า FWHM มีค่าแปรตามอุณหภูมิ แสดงว่าสภาพความเป็นผลึกเมื่อพิจารณาจาก CrN(200) มีความเป็นผลึกโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน

4. เมื่อนำฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่เตรียมบนแผ่นซิลิคอน ด้วยเงื่อนไขอุณหภูมิแผ่นรองรับขณะเคลือบที่ต่างกันไปศึกษาแผนภาพพื้นผิวในระดับนาโนเมตร ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพพื้นผิวแบบ STM เพื่อดูผลของอุณหภูมิของสารรองรับต่อสภาพพื้นผิวในระดับนาโน มีผลศึกษาดังนี้

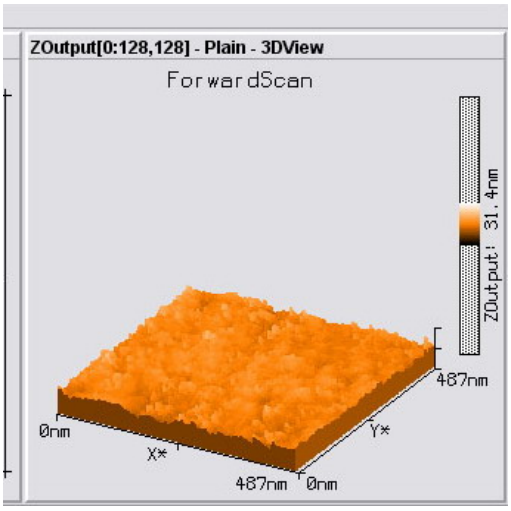
1. เมื่อพิจารณาภาพพื้นผิวเชิงจุลภาคด้วยเทคนิค STM พบว่าอุณหภูมิแผ่นรองรับขณะเคลือบ มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางCrN โดยฟิล์มจะมีขนาดเม็ดเกรนโตขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2. ที่เงื่อนไขอุณหภูมิห้อง ฟิล์มจะมีโครงสร้างเป็นเม็ดเกรนแหลม มีขนาดเล็ก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดโครงสร้างที่เป็นเม็ดเกรนใหญ่ขึ้นและมีความเรียบแทรกปนกับโครงสร้างเกรนเล็กแหลม และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 200 ^{o}C พบว่าเกรนใหญ่ที่มีความเรียบเป็นจำนวนมากกว่าเกรนเล็กแหลม

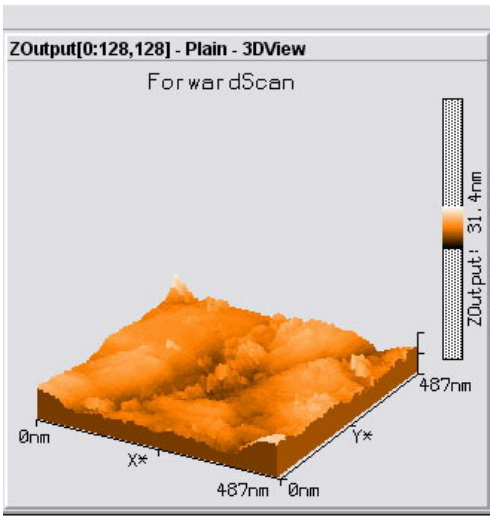
เมื่อพิจารณาจากภาพพื้นผิวที่ถ่ายจากเทคนิค STM พบว่าอุณหภูมิของแผ่นรองรับซิลิคอนขณะเคลือบมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของฟิล์ม โดยพบว่าเมื่อเคลือบฟิล์มที่อุณหภูมิห้อง จะได้โครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มเป็นเม็ดเล็กละเอียด แหลม ขณะที่เมื่ออุณหภูมิแผ่นรองรับสูงขึ้น ฟิล์มจะมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ โดยจะเกิดเม็ดเกรนที่โตขึ้นปะปนกับเม็ดเกรนเล็ก โดยปริมาณเม็ดเกรนโตที่เกิดแทรกขึ้น มีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 50 100 และ 150 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแผ่นรองรับให้สูงขึ้นเป็น 200 และ 250 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างพื้นผิวในระดับจุลภาคที่มีระเบียบขึ้น มีเม็ดเกรนที่มีขนาดโตขึ้น และมีความเรียบมากขึ้น

เมื่อเทียบผลการทดลองนี้กับผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าผลของอุณหภูมิมีผลต่อการเติบโตของระนาบ CrN (200) ที่เป็น prefer orientation แสดงให้เห็นว่ายิ่งเพิ่มอุณหภูมิ การเกิดระนาบนี้และลักษณะพื้นผิวจุลภาคที่ได้มีความสอดคล้องกัน การที่พื้นผิวจุลภาคมีระเบียบ มีเม็ดเกรนที่โตและราบเรียบ มีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม เช่น ความแข็งจุลภาค สมบัติเชิงไตรโบโลยีต่างๆ

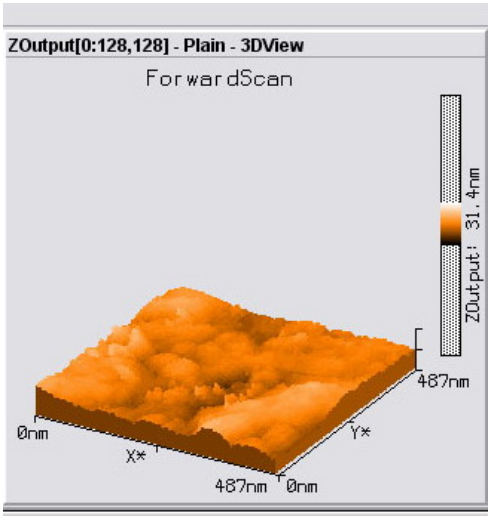
5. เมื่อนำฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ชุดที่เคลือบด้วยสัดส่วนความดันก๊าซอาร์กอนต่อไนโตรเจนต่างกัน และฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ชุดที่เคลือบด้วยสัดส่วนเงื่อนไขอุณหภูมิแผ่นรองรับขณะเคลือบที่ต่างกัน ไปทดสอบความแข็งและการทนต่อการขูดขีดตามมาตรฐาน ASTM D3363-05 พบว่า ฟิล์มบางทุกเงื่อนไขการเคลือบผ่านการทดสอบการทนต่อการขูดขีดตามมาตรฐาน ASTM D3363-05 โดยฟิล์มทุกชิ้นสามารถทนต่อการขูดขีดด้วยแท่งกราไฟต์ความแข็ง 6H ที่เป็นค่าสูงสุดตามมาตรฐาน ส่วนผลการขูดขีดเป็นแบบ gauge hardness คือไม่เกิดรอยขูดเมื่อลากผิวฟิล์มด้วยแท่งกราไฟต์เบอร์ 6H เป็นระยะลาก 3 mm ตามข้อกำหนด



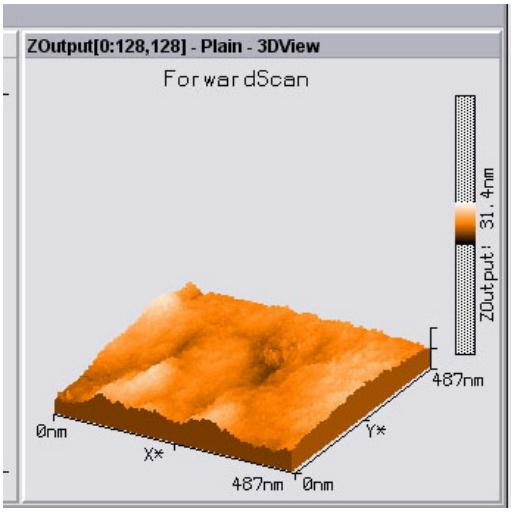
STMของ CrNอุณหภูมิห้อง



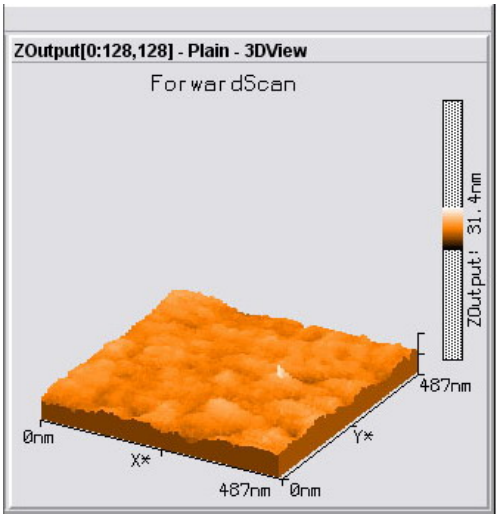
อุณหภูมิสารรองรับ 50 °C



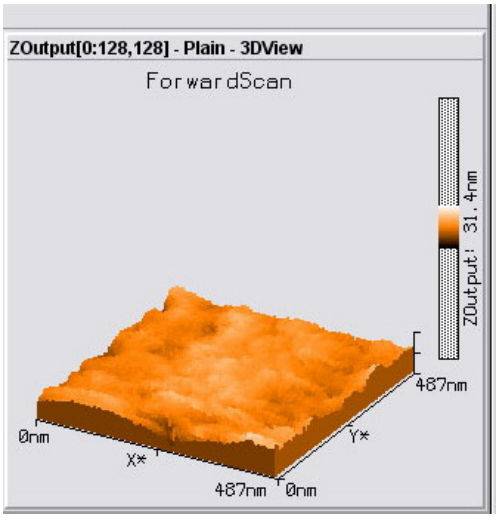
อุณหภูมิสารรองรับ 100 °C



อุณหภูมิสารรองรับ 150 °C

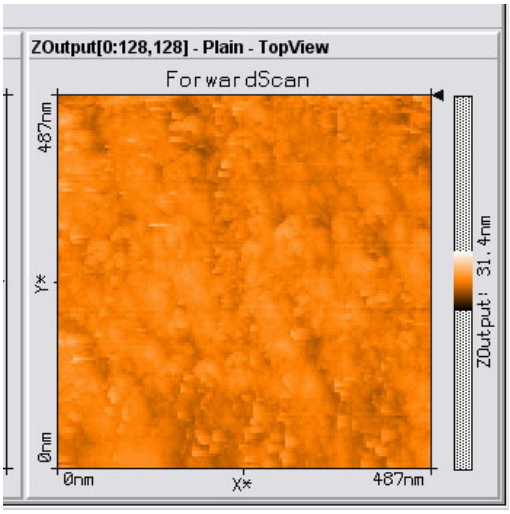


อุณหภูมิสารรองรับ 200 °C

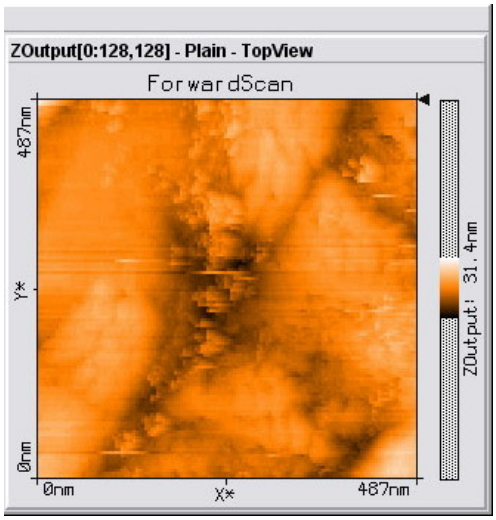


อุณหภูมิสารรองรับ 250 °C

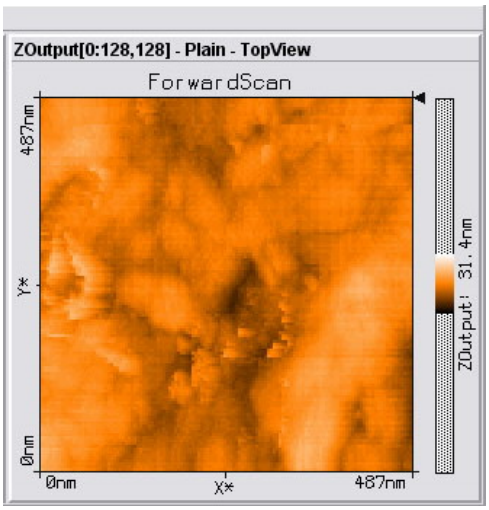
รูปที่ 4-22 แผนภาพพื้นผิวด้านข้างจากเทคนิค STM ของฟิล์มบาง CrN ที่เตรียมบนแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน



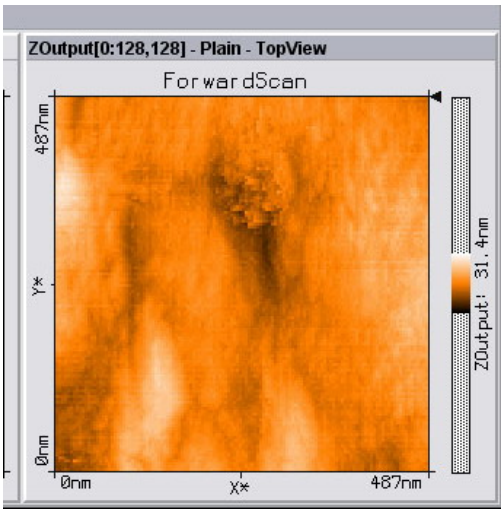
STMของ CrNอุณหภูมิห้อง



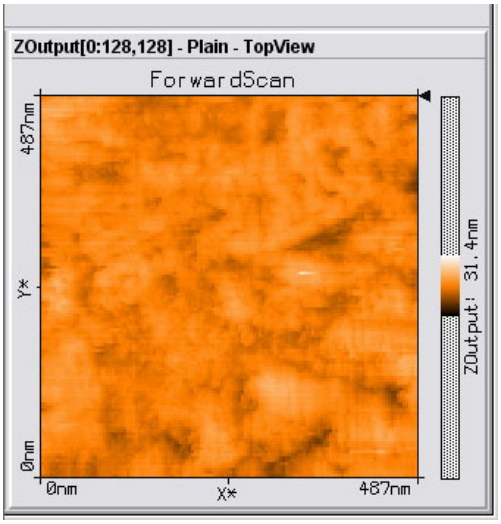
อุณหภูมิสารรองรับ 50 °C



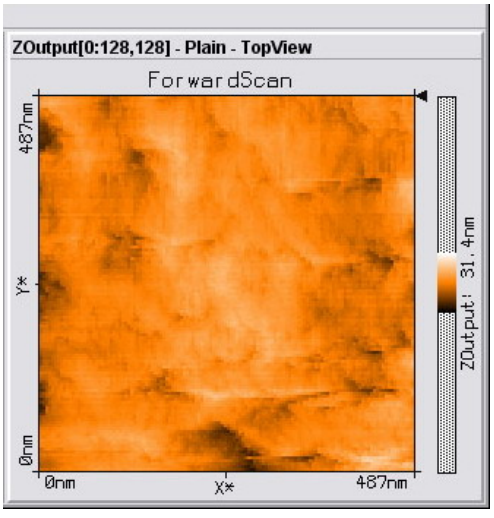
อุณหภูมิสารรองรับ 100 °C



อุณหภูมิสารรองรับ 150 °C



อุณหภูมิสารรองรับ 200 °C



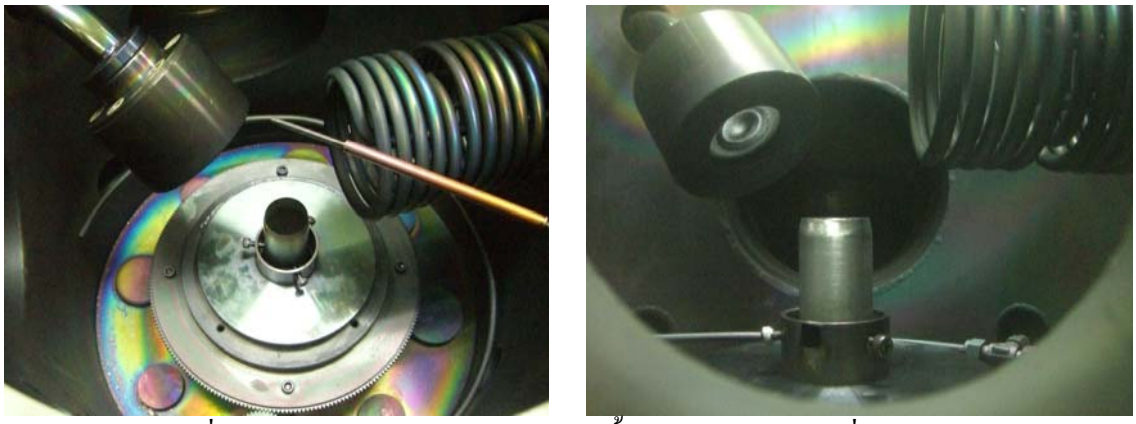
อุณหภูมิสารรองรับ 250 °C

รูปที่ 4-23 แผนภาพพื้นผิวด้านบนจากเทคนิค STM ของฟิล์มบาง CrN เตรียมบนแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน

4.3 การเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนใบมีดตัดกว้านใส้สับปะรด

ส่วนนี้จะเป็นการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนชิ้นงานจริงของบริษัทซึ่งเป็นใบมีดตัดกว้านใส้สับปะรด โดยอาศัยแนวทางการเตรียมจากการศึกษาที่ผ่านมา (ในหัวข้อ 4.2) ก่อนจะนำไปทดลองใช้งานจริงที่บริษัทต่อไป โดยในขั้นนี้จะทดลองเคลือบใบมีดทั้ง 2 ขนาด (สั้นและยาว) รูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25 แสดงการติดตั้งชิ้นงานของใบมีดทั้ง 2 ขนาด ทั้งนี้ระหว่างการเคลือบจะมีการให้ความต่างศักย์ไบแอสให้กับชิ้นงานด้วย

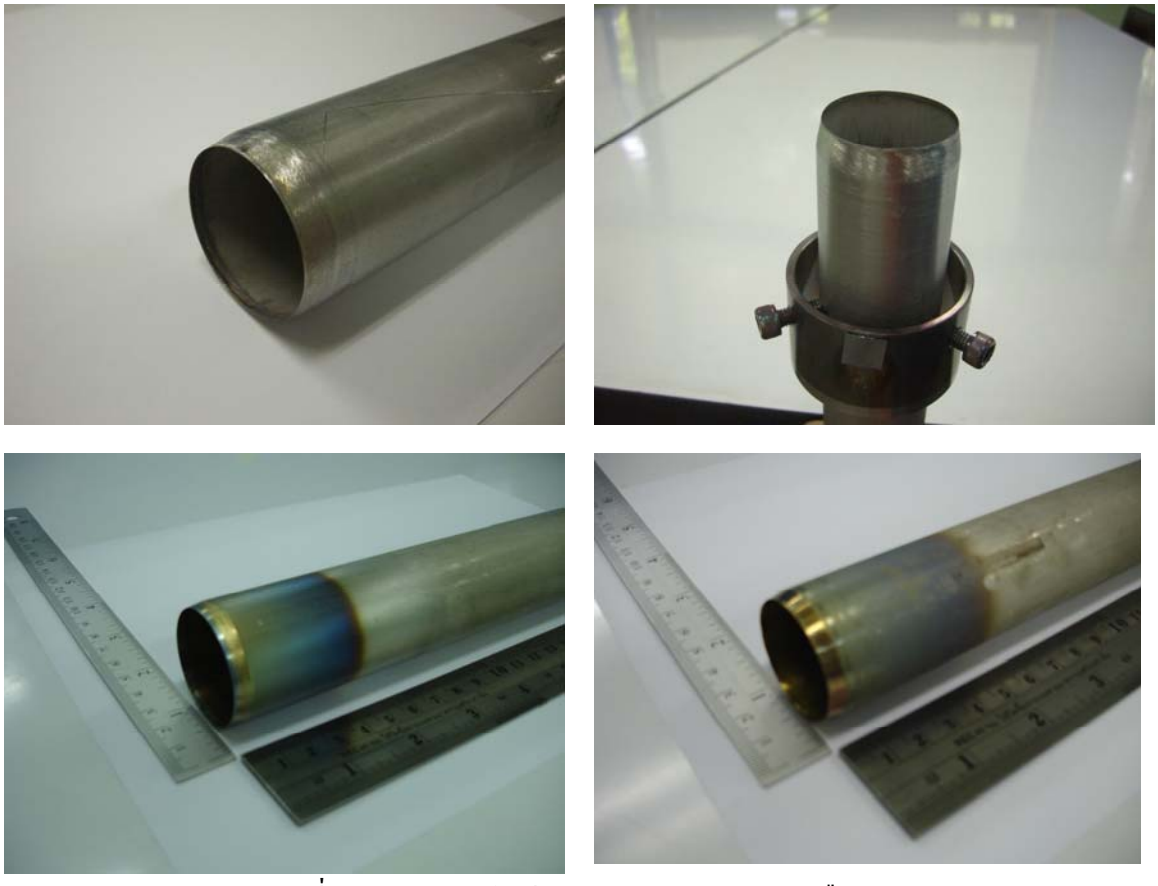
รูปที่ 4-24 ตำแหน่งและลักษณะการติดตั้งใบมีดสั้นภายในเครื่องเคลือบ



รูปที่ 4-25 ตำแหน่งและลักษณะการติดตั้งใบมีดยาวภายในเครื่องเคลือบ

ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนชิ้นงานจริงที่เคลือบด้วยเงื่อนไขต่างๆ กัน เมื่อพิจารณาฟิล์มบางที่ได้ด้วยตาเปล่าพบว่ามีลักษณะทางกายภาพที่พอสังเกตได้เบื้องต้นคือ เป็นฟิล์มสีดำเข้มเป็นมันวาว สะท้อนแสงดี (รูปที่ 4-26 และ รูปที่ 4-27)

รูปที่ 4-26 ลักษณะใบมีดสั้นก่อนและหลังการเคลือบ



รูปที่ 4-27 ลักษณะใบมีดยาวก่อนและหลังการเคลือบ

4.4 <u>การทดลองใช้ใบมีดตัดกว้านใส้สับปะรดที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์</u>

เมื่อได้ชิ้นงานจริง (ใบมีดตัดกว้านใส้สับปะรด) ที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์เรียบร้อยแล้วได้ส่งชิ้นงานให้ทางบริษัท ทดลองใช้งานจริง โดยการทดลองใช้งานจะเป็นการใช้งานจริงโดยเจ้าหน้าที่ประจำของบริษัท และจะพิจารณาอายุการใช้งานชิ้นงานจริงที่เคลือบฟิล์มเทียบกับชิ้นงานจริงที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม พบว่า ชิ้นงานจริงที่เคลือบฟิล์มมีอายุการใช้งานนานกว่าชิ้นงานจริงที่ไม่ได้เคลือบ ทั้งนี้ปกติแล้วเจ้าหน้าที่ของบริษัทจะต้องหยุดเครื่องเพื่อเปลี่ยนใบมีดทุกวัน แต่หลังจากการใช้ใบมีดที่ผ่านการเคลือบฟิล์มพบว่าใบมีดมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าชิ้นงานที่เคลือบด้วยค่าความต่างศักย์ไบแอสต่ำจะมีอายุการใช้งานน้อยกว่าชิ้นงานที่เคลือบด้วยค่าความต่างศักย์ไบแอสสูง และจะได้ว่าชิ้นงานที่เคลือบสามารถยืดอายุการใช้งานได้สูงสุด 9 เท่าสำหรับใบมีดสั้น และ 6 เท่าสำหรับใบมีดยาว แสดงให้เห็นว่าการเคลือบใบมีดด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์สามารถช่วยยืดอายุการใช้งานใบมีดตัดสับปะรดได้

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบอายุการใช้งานของชิ้นงานที่ไม่เคลือบและเคลือบฟิล์มบางที่เงื่อนไขต่างๆ

ชิ้นงาน	อายุการใช้งาน (วัน)	
	ใบมีดสั้น	ใบมีดยาว
ชิ้นงานปกติไม่เคลือบ	1	1
ชิ้นงานที่เคลือบ CrN ด้วย ไบแอส -50 V	3	2
ชิ้นงานที่เคลือบ CrN ด้วย ไบแอส -80 V	7	3
ชิ้นงานที่เคลือบ CrN ด้วย ไบแอส -100 V	9	6

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

1. การปรับแต่งเครื่องเคลือบ เครื่องเคลือบที่ใช้งานวิจัยนี้หลังการปรับแต่ง มีส่วนประกอบสำคัญต่างๆ จำนวน 11 ส่วน คือ (1) ภาชนะสุญญากาศ (2)ระบบเครื่องสูบสุญญากาศ (3) ระบบวาล์วสุญญากาศ (4) ระบบควบคุมการจ่ายก๊าซอย่างละเอียด (5) ระบบมาตรวัดความดัน (6) ชุดจับชิ้นงาน (7) แมกนีตรอนคาโทด (8) ภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูง (9) ชุดให้ความต่างศักย์ไบแอสชิ้นงาน (10) ชุดให้ความร้อนชิ้นงาน และ (11) ตู้ควบคุมหลัก แต่ละส่วนมีรายละเอียดสรุปได้ดังนี้

1.1 ภาชนะสุญญากาศ ทรงกระบอกทำจากสเตนเลส เส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 353 mm. ความสูง 370 mm. รอบภาชนะสุญญากาศมีช่องสำหรับติดอุปกรณ์ต่างๆ จำนวน 12 ช่อง แผ่นปิดบนมีขนาด 450 mm มีช่องสำหรับต่ออุปกรณ์ จำนวน 1 ช่อง แผ่นฐานมีขนาด 450 mm มีช่องเปิดขนาด 12 cm อยู่ตรงกลางสำหรับต่อพอร์ตส่วนขยายสำหรับจับชิ้นงาน พร้อมหน้าแปลนขนาด 3 cm สำหรับต่ออุปกรณเพิ่มจำนวน 6 ช่อง และเจาะช่องเปิดขนาดเล็ก 1 cm จำนวน 1 ช่อง

1.2 ระบบเครื่องสูบสุญญากาศ ประกอบด้วยเครื่องสูบสุญญากาศ 2 แบบคือ เครื่องสูบกลโรตารี แบบ 2 สถานะ อัตราการสูบประมาณ 12 m^3/hr และเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมัน อัตราสูบ (N_2) ประมาณ 550 l/s สร้างสภาวะสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศในระดับ ประมาณ 10^{-6} mbar

1.3 ระบบวาล์วสุญญากาศ มีวาล์วสุญญากาศสูงชนิดแผ่นสำหรับเปิด-ปิดระหว่างเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันกับภาชนะสุญญากาศ มีวาล์วสุญญากาศหยาบระหว่างภาชนะสุญญากาศกับเครื่องสูบกลโรตารีเพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศต่ำในภาชนะสุญญากาศ และมีวาล์วท้าย ทำหน้าที่เปิด-ปิด ท่อท้ายของเครื่องสูบแบบแพร่ไอน้ำมันกับเครื่องสูบกลโรตารี

1.4 ระบบควบคุมการจ่ายแก๊สอย่างละเอียด สำหรับควบคุมการจ่ายแก๊สที่ในกระบวนการ เป็นของ MKS รุ่น Type247 พร้อมทรานสดิวเซอร์ของ MKS รุ่น MASS-FLO โดยแก๊สที่ใช้ในระบบคือแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจน (ความบริสุทธิ์สูงมาก 999.9 UHP)

1.5 ระบบมาตรวัดความดัน สำหรับวัดความดันของเครื่องเคลือบใช้ของ Pfeiffer รุ่น dual gauge ชนิด full range ที่มีความสามารถอ่านค่าความดันได้ต่อเนื่องตั้งแต่ความดันบรรยากาศไปจนถึงระดับสุญญากาศสูงมาก ติดตั้งไว้ที่พอร์ตด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ

1.6 ชุดจับชิ้นงาน เป็นส่วนที่ออกแบบเฉพาะให้สามารถติดตั้งใบมีดตัดคว้านไส้สับปะรด ใบมีดปอกเปลือกสับปะรด ทั้งในแบบหัวตัดสั้นและแบบยาว

1.7 แมกนีตรอนคาโทด ขนาด 2 นิ้ว มีส่วนต่อขยายรูปโค้งเพื่อให้สามารถเคลือบชิ้นงานที่มีลักษณะ 3 มิติได้ทั้งชิ้นงาน ติดตั้งไว้ที่พอร์ตด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ โดยออกแบบให้สามารถปรับระยะการเคลือบที่เส้นผ่าศูนย์กลางต่างๆ กันได้

1.8 ภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูง เพื่อใช้กับคาโทดที่ ภาคจ่ายไฟฟ้านี้สามารถจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูง (750 V) และกระแสสูงสุดไม่เกิน 3 A

1.9 ชุดให้ความต่างศักย์ไบแอสชิ้นงาน เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับจ่ายให้กับแท่นวางชิ้นงาน ปรับค่าได้ในช่วง 0-500 V ต่อเข้ากับมอเตอร์ของชุดหมุนชิ้นงาน

1.10 ชุดให้ความร้อนชิ้นงาน เป็นฟีดทรูต่อเข้าทางด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ สามารถจ่ายความร้อนให้กับชิ้นงานได้ตลอดเวลา ความร้อนจะส่งผ่านสู่ชิ้นงานด้วยกระบวนการแผ่รังสีความร้อนจึงไม่มีผลรบกวนต่อระบบเคลือบและไม่ต้องต่อสายหรือสื่อนำความร้อนสู่ชิ้นงานแต่อย่างใด

1.11 ตู้ควบคุมหลักและแท่นวางระบบสุญญากาศ เป็นตู้ที่สร้างจากเหล็กสำหรับติดตั้งภาชนะสุญญากาศและกล่องอุปกรณ์ต่างๆ

2. <u>การศึกษาเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์</u> ได้ทดลองเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนกระจกสไลด์และแผ่นซิลิคอนโดยเงื่อนไขต่างๆ พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ คือ ใช้ความดันพื้นเท่ากับ $3x10^{-5}$ mbar อัตราส่วนความดันย่อยของก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 2.5:1.5 กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 230 W อุณหภูมิวัสดุรองรับขณะเคลือบเท่ากับ 250 ^{O}C ความต่างศักย์ไบแอสเท่ากับ -100 V เมื่อพิจารณาฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ที่ได้ด้วยตาเปล่าพบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะมันวาว เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มที่ได้ด้วยเทคนิค EDX พบว่า ฟิล์มที่ได้มีส่วนประกอบของโครเมียมและไนโตรเจน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ 2 ระนาบคือ CrN(111) และ CrN(200)

3. <u>การเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนใบมีดตัดใส้สับปะรด</u> ได้ทดลองเคลือบฟิล์มบางโครงเมียมไนไตรด์บนชิ้นงานจริงตามเงื่อนไขที่ได้จากขั้นที่ 2 พบว่า ฟิล์มที่ได้มันวาว อย่างไรก็ดีสีของฟิล์มที่เคลือบบนชิ้นงานจริงจะไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากความหนาของฟิล์มไม่เท่ากันทั้งชิ้นงาน ทำให้การสะท้อนแสงไม่เท่ากันสีที่เกิดจากการสะท้อนจึงแตกต่างกันด้วย โดยฟิล์มด้านบนของชิ้นงานจะหนาที่สุดส่วนด้านล่างจะบางที่สุด

4. <u>การทดลองใช้ใบมีดตัดคว้านใส้สับปะรดที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์</u> จากการทดลองใช้ชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของชิ้นงานที่เคลือบและไม่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์จริงที่โรงงาน และเปรียบเทียบโดยนำชิ้นงานไปตัดสับปะรดจริง จากการทดลองใช้งานพบว่า ชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีอายุการใช้งานนานกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบสูงสุด 9 เท่าสำหรับใบมีดสั้น และ 6 เท่าสำหรับใบมีดยาว แสดงให้เห็นว่าการเคลือบใบมีดด้วยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์สามารถช่วยยืดอายุการใช้งานใบมีดตัดสับปะรดได้

5.2 <u>ข้อเสนอแนะ</u>

1. เครื่องเคลือบที่ใช้มีขนาดเล็กทำให้สามารถเคลือบชิ้นงานได้ครั้งละหนึ่งชิ้น หากต้องการใช้งานจริงเชิงอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีการเคลือบอย่างต่อเนื่องและได้จำนวนมากในการเคลือบแต่ละครั้ง ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงหรือพัฒนาเครื่องเคลือบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

2. อัตราการสูบของเครื่องเคลือบยังต่ำไป ซึ่งจะส่งผลให้รอบการทำงานแต่ละครั้งใช้เวลานาน ดังนั้นเพื่อให้การทำงานแต่ละรอบการทำงานเร็วขึ้นควรเพิ่มอัตราการสูบของเครื่องสูบสุญญากาศ

3. เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะรูปทรง 3 มิติ มีเหลี่ยมมีมุม ทำให้การเคลือบด้วยกระบวนการสปัตเตอริง ที่ใช้อยู่ทั่วไปนั้นไม่สามารถเคลือบได้ทั่วชิ้นงาน อย่างไรก็ดีปัญหานี้อาจแก้ไขได้ด้วยปรับระบบเคลือบให้เป็นระบบไอออนเพลตติง หรือ เป็นระบบคาโทดิกอาร์ค ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถสร้างสารเคลือบได้กระจายและทั่วถึงกว่า

4. ระบบฟิล์มบางที่เตรียมในงานวิจัยนี้เป็นระบบฟิล์มบางชั้นเดียว อย่างไรก็ดีแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพยังสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนชั้นของฟิล์มให้มีลักษณะเป็นระบบฟิล์มหลายชั้นซึ่งจะทำให้ชั้นเคลือบที่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

5. การเคลือบฟิล์มบางของสารประกอบ ด้วยวิธีรีแอคตีฟสปัตเตอริง จะทำได้ค่อนข้างยาก ส่วนหนึ่งเนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับการเกิดฟิล์มบางที่ระยะต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวแปรที่มีผลต่อฟิล์มบางที่ได้ ทั้งนี้ตัวแปรที่มีผลมากที่สุดคือ ตำแหน่งของชิ้นงาน อย่างไรก็ดีปัญหานี้อาจแก้ได้ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบบคาโทดิกอาร์ค เนื่องจากการเคลือบวิธีนี้จะไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการเกิดฟิล์มบางที่ระยะต่างๆ

บรรณานุกรม

1. Bunshah, R.F., 1994, Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, 2nd ed., New Jersey, Noyes Publications, 861 p.
2. Wasa, K. and Hayakawa, S., 1992, Handbook of sputter deposition technology: principles, technology and applications, New Jersey, Noyes Publications, pp. 19-29.
3. สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์, พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และพิษณุ เจริญสมศักดิ์, 2529, การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิลม์บางด้วยวิธีสปัตเตอริง, รายงานการวิจัยประจำปี 2529 ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 115 หน้า.
4. Chapman, B., 1980, Glow Discharge Processes, New York, John Wiley & Sons, 406 p.
5. Maissel, L.I. and Gland, R., 1970, Handbook of Thin Film Technology, New York, McGraw-Hill.
6. Smith, D.L., 1995, Thin-film deposition: principle and practice, New York, McGraw-Hill, 616 p.
7. Bunshah, R.F., 1994, Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, 2nd ed., New Jersey, Noyes Publications, pp. 276.
8. Vossen, J.L. and Kerns, W., 1978, Thin Film Processes, New York, Academic Press, pp. 77.
9. Vossen, J.L. and Kerns, W., 1978, Thin Film Processes, New York, Academic Press, 552 p.
10. Rohde, S.L. and Munz, W.D., 1991, “Sputter Depostion” in Advanced Surface Coatings : a Handbook of Surface Engineering, Edited by Rickerby, D.S. and Matthews, A., New York, Chapman and Hall, pp. 103.
11. Bunshah, R.F., 1994, Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, 2nd ed., New Jersey, Noyes Publications, pp. 284.
12. Chapman, B., 1980, Glow Discharge Processes, New York, John Wiley & Sons, pp. 268.
13. Rohde, S.L. and Munz, W.D., 1991, “Sputter Depostion” in Advanced Surface Coatings : a Handbook of Surface Engineering, Edited by Rickerby, D.S. and Matthews, A., New York, Chapman and Hall, pp. 103-105.

14. Munz, W.D., 1991, “The Unbalanced Magnetron : Current Status of Development,” Surf. Coat Technology, Vol. 48, pp. 81-94.
15. Sproul, W.D., 1992, “Unbalanced Magnetron Sputtering,” 35th Annual Technical Conference Proceedings, Society of Vacuum Coaters, pp. 236-239.
16. Rickerby, D.S. and Matthews, A., 1991, Advanced Surface Coatings : a Handbook of Surface Engineering, New York, Chapman and Hall, 368 p.
17. Rickerby, D.S. and Matthews, A., 1991, Advanced Surface Coatings : a Handbook of Surface Engineering, New York, Chapman and Hall, pp. 34.
18. J. Xu, H. Umehara, I. Kojima, Appl. Surf.Sci. 201 (2002) 208.
19. C. Rebholz, H. Ziegele, Surf. Coat. Technol. 115 (1999) 222.
20. G. Berg, C. Friedrich, E. Broszeit, Surf. Coat. Technol. 86 (1996) 184.
21. B. Navinsek, P. Panjan, Surf. Coat. Technol. 74 (1995) 919.
22. 5. S.C. Lee, W.Y. Ho, W.L. Pao, Surf. Coat. Technol. 73 (1995) 34.
23. P.Hones, R. Sanjines, F.Levy, Surf. Coat. Technol. 94 (1997) 398.
24. C. Friedrich, G.Berg, Surf. Coat. Technol. 97 (1997) 661.
25. B. Navinsek, P. Panjan, J. Krusic, Surf. Coat. Technol. 98 (1998) 809.
26. X. Zeng, S. Zhang, J. Hsieh, Surf. Coat. Technol. 102 (1998) 108.
27. W.H. Zhang, J.H. Hsieh, Surf. Coat. Technol. 130 (2000) 240.
28. C. Nouveau, M.A. Djouadi, C. Deces, Surf. Coat. Technol. 142 (2001) 94.
29. P. Panjan, P. Cvahte, M. Cekada, B. Navinsek, I. Urankar, vacuum 61 (2001) 241.
30. 13. M.J. Jung, K.H. Nam, Y.M. Jung, J.G. Han, Surf. Coat. Technol. 171 (2003) 59.
31. J. Xu, H. Umehara, I. Kojima, Appl. Surf.Sci. 201 (2002) 208.
32. Z. Han, J. Tian, Q. Lai, X. Yu, G. Li, Surf. Coat. Technol. 162 (20030 189.
33. S. Logothetidis, P. Patsalas, K. Sarakinos, C. Charitdis, C. Metaxa, Surf. Coat. Technol. 180 (20040 637.
34. J.J Olaya, S.E. Rodil, S. Muhl, E. Sanchez, Thin solid films 474 (2005) 119.
35. K.H. Nam, M.J. Jung, J.G. Han, Surf. Coat. Technol. 131 (2000) 222.
36. G. Bertrand, H. Mahdjoub, C. Meunier, Surf. Coat. Technol. 126 (2000) 199.
37. L. Cunha, M. Anditschky, K. Pischow, Z. Wang, Thin solid films. 355 (1999) 465.
38. G. Berg, C. Friedrich, E. Broszeit, C. Berger, Surf. Coat. Technol. 86 (1996) 184.
39. Z. Han, J. Tian, Q. Lai, X. Yu, G. Li, Surf. Coat. Technol. 162 (2003) 189.
40. J. Xu, H. Umehara, I. Kojima, Appl. Surf.Sci. 201 (2002) 208.

41. A.P. Ehiasarian, W.D. Munz, L. Hultman, U. Helmersson, I. Petrov, Surf. Coat. Technol. 163 (2003) 267.
42. M.J. Jung, K.H. Nam, Y.M. Jung, J.G.Han, Surf. Coat. Technol. 171 (2003) 59.
43. P. Hones, R. Sanjines, F. Levy, Surf. Coat. Technol. 94 (1997) 398.
44. E. Broszeit, C. Friedrich, G. Berg, Surf. Coat. Technol. 115 (1999) 9.

ภาคผนวก ก

เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผน และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

ภาคผนวก ก
เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผน
และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

ตารางที่ ก-1 แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ

กิจกรรม	ผู้ปฏิบัติ	ช่วงเวลา					
		1	2	3	4	5	6
1. ปรับแต่งเครื่องเคลือบในส่วนสุญญากาศ	จักรพันธ์, สุรสิงห์	❋	❋				
2. ปรับแต่งเครื่องเคลือบในส่วนของส่วนการเคลือบ	จักรพันธ์, สุรสิงห์	❋	❋				
3. ทดสอบส่วนสุญญากาศ	จักรพันธ์, สุรสิงห์	❋	❋				
4. ทดสอบส่วนการเคลือบ	จักรพันธ์, สุรสิงห์	❋	❋				
5. ทดลองนำร่องเคลือบฟิล์มบางCrN	จักรพันธ์, สุรสิงห์,สุคคเณศ	❋	❋				
6. ปรับแต่งเพิ่มเติมส่วนสุญญากาศ	จักรพันธ์, สุรสิงห์			❋	❋		
7. ปรับแต่งเพิ่มเติมส่วนการเคลือบ	จักรพันธ์, สุรสิงห์			❋	❋		
8. ทดสอบส่วนสุญญากาศ/ส่วนการเคลือบ	จักรพันธ์, สุรสิงห์,สุคคเณศ			❋	❋		
9. เตรียมฟิล์มบางCrNบนแผ่นเรียบ	จักรพันธ์,สุคคเณศ			❋	❋		
10. ทดสอบสมบัติของฟิล์มCrNบนแผ่นเรียบ	จักรพันธ์,สุคคเณศ			❋	❋		
11. เตรียมฟิล์มCrNบนมีดตัดคว้านไส้สับปะรด	จักรพันธ์, สุรสิงห์,สุคคเณศ			❋	❋	❋	
12. ทดสอบหาอายุการใช้งานการตัดคว้านของมีดที่เคลือบCrN	จักรพันธ์,สุคคเณศ				❋	❋	❋
13. ทดสอบหาอายุการใช้งานการตัดคว้านของมีดที่ไม่เคลือบผิว	จักรพันธ์,สุคคเณศ				❋	❋	❋
14. เปรียบเทียบผลการตัดเพื่อหาข้อสรุป	จักรพันธ์,สุคคเณศ					❋	❋
17. รายงานความก้าวหน้า	จักรพันธ์, สุรสิงห์,สุคคเณศ		❋		❋		❋
18. สรุปผลการศึกษาและเขียนรายงานการวิจัยและพัฒนา	จักรพันธ์,สุคคเณศ					❋	❋

หมายเหตุ : เวลาในการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ช่วง ช่วงละ 3 เดือน

ตารางที่ ก-2 เปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอและที่ทำ ของโครงการในช่วง 6 เดือนแรก

กิจกรรม	เดือนที่					
	1	2	3	4	5	6
1. ปรับแต่งและทดสอบส่วนสุญญากาศ	←→					
	←→					
2. ปรับแต่งและทดสอบส่วนการเคลือบ	←→					
	←→					
3. การเตรียมฟิล์ม CrN นำร่องบนวัสดุแผ่นเรียบ	←→					
	←→					

หมายเหตุ : เส้นทึบ หมายถึง กิจกรรมที่เสนอตามโครงการ
เส้นประ หมายถึง กิจกรรมที่ทำในช่วง 6 เดือน

ตารางที่ ก-3 กิจกรรมและผลการดำเนินงานของโครงการในช่วง 6 เดือนแรก

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
1. การปรับแต่งและทดสอบส่วนสุญญากาศ	1. ได้ระบบสุญญากาศที่พร้อมทำงาน	1. ได้ผลตามที่คาดไว้	-
2. การปรับแต่งและทดสอบส่วนการเคลือบ	2. ได้ส่วนการเคลือบที่พร้อมทำงาน	2. ได้ผลตามที่คาดไว้	-
3. การเตรียมฟิล์ม CrN นำร่องบนวัสดุแผ่นเรียบ	3. ได้ข้อมูลเทคนิคการเตรียมฟิล์มบนวัสดุแผ่นเรียบ	3. ได้ผลตามที่คาดไว้	-

ตารางที่ ก-4 Output ของโครงการในช่วง 6 เดือนแรก

Output		ในกรณีล่าช้า (ผลสำเร็จไม่ถึง 100%) ให้ระบุสาเหตุและการแก้ไขที่ดำเนินการ
กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ/หรือจากการปรับแผน	ผลสำเร็จ(%)	
1. การปรับแต่งและทดสอบส่วนสุญญากาศ	100%	-
2. การปรับแต่งและทดสอบส่วนการเคลือบ	100%	-
3. การเตรียมฟิล์ม CrN นำร่องบนวัสดุแผ่นเรียบ	100%	-

ตารางที่ ก-5 เปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอและที่ทำ ของโครงการในช่วง 6 เดือนที่สอง

กิจกรรม	เดือนที่					
	7	8	9	10	11	12
1. การปรับแต่งเพิ่มเติมในส่วนสุญญากาศ	←→					
	←→					
2. การปรับแต่งเพิ่มเติมส่วนการเคลือบ	←→					
	←→					
3. การเตรียมฟิล์มบาง CrN บนแผ่นเรียบ	←→					
	←→					
4. การทดสอบฟิล์มบาง CrN ที่เตรียมจากขั้นที่ 3	←→					
	←→					
5. การเตรียมฟิล์มบาง CrN บนใบมีดตัดไส้สับปะรด	←→					
	←→					

หมายเหตุ : เส้นทึบ หมายถึง กิจกรรมที่เสนอตามโครงการ
เส้นประ หมายถึง กิจกรรมที่ทำในช่วง 6 เดือน

ตารางที่ ก-6 กิจกรรมและผลการดำเนินงานของโครงการในช่วง 6 เดือนที่สอง

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
1. การปรับแต่งเพิ่มเติมในส่วนสุญญากาศ	1. ได้ระบบสุญญากาศที่พร้อมทำงาน	1. ได้ผลตามที่คาดไว้	-
2. การปรับแต่งเพิ่มเติมส่วนการเคลือบ	2. ได้ส่วนการเคลือบที่พร้อมทำงาน	2. ได้ผลตามที่คาดไว้	-
3. การเตรียมฟิล์มบาง CrN บนแผ่นเรียบ	3. ได้ฟิล์มบางCrNบนวัสดุแผ่นเรียบ	3. ได้ผลตามที่คาดไว้	-
4. การทดสอบฟิล์มบางCrNที่เตรียมจากขั้นที่3	4. ได้ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง	4.ได้ผลตามที่คาดไว้	-
5. การเตรียมฟิล์มบาง CrN บนใบมีดตัดไส้สับปะรด	3. ได้มีดตัดไส้สับปะรดเคลือบฟิล์มบาง CrN	5. ได้ผลตามที่คาดไว้	-

ตารางที่ ก-7 Output ของโครงการในช่วง 6 เดือนที่สอง

Output		ในกรณีล่าช้า (ผลสำเร็จไม่ถึง 100%) ให้ระบุสาเหตุและการแก้ไขที่ดำเนินการ
กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ/หรือจากการปรับแผน	ผลสำเร็จ(%)	
1. การปรับแต่งเพิ่มเติมในส่วนสุญญากาศ	100%	-
2. การปรับแต่งเพิ่มเติมในส่วนการเคลือบ	100%	-
3. การเตรียมฟิล์มบาง CrN บนแผ่นเรียบ	100%	-
4. การทดสอบฟิล์มบางCrNที่เตรียมจากขั้นที่3	100%	-
5. การเตรียมฟิล์มบาง CrN บนใบมีดตัดไส้สับปะรด	100%	-

ตารางที่ ก-8 เปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอและที่ทำ ของโครงการในช่วง 6 เดือนที่สาม

กิจกรรม	เดือนที่					
	7	8	9	10	11	12
1. เตรียมฟิล์มCrNบนมีดตัดคว้านไส้สับปะรด	←→					
2. ทดสอบหาอายุการใช้งานการตัดคว้านของมีดที่เคลือบCrN	←→					
3. ทดสอบหาอายุการใช้งานการตัดคว้านของมีดที่ไม่เคลือบผิว	←→					
4. เปรียบเทียบผลการตัดเพื่อหาข้อสรุป	←→					
5. สรุปผลการศึกษาและเขียนรายงานการวิจัยและพัฒนา	←→					

หมายเหตุ : เส้นทึบ หมายถึง กิจกรรมที่เสนอตามโครงการ
เส้นประ หมายถึง กิจกรรมที่ทำในช่วง 6 เดือน

ตารางที่ ก-9 กิจกรรมและผลการดำเนินงานของโครงการในช่วง 6 เดือนที่สาม

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
- ทดสอบหาอายุการใช้งานการตัดคว้านไส้สับปะรดที่เคลือบฟิล์มบาง CrN และไม่เคลือบฟิล์มบาง CrN	- อายุการใช้งานการตัดคว้านไส้สับปะรดที่เคลือบ ฟิล์มบางCrN และไม่เคลือบฟิล์มบาง CrN	1. ได้ผลตามที่คาดไว้	-
- วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลทดลอง	- ข้อมูลเปรียบเทียบการใช้งาน	2. ได้ผลตามที่คาดไว้	-
- สรุปผลการศึกษาและเขียนรายงานการวิจัย	- รายงานการวิจัย	3. ได้ผลตามที่คาดไว้	-

ตารางที่ ก-10 Output ของโครงการในช่วง 6 เดือนที่สาม

Output		ในกรณีล่าช้า (ผลสำเร็จไม่ถึง 100%) ให้ระบุสาเหตุและการแก้ไขที่ดำเนินการ
กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ/หรือจากการปรับแผน	ผลสำเร็จ(%)	
- ทดสอบหาอายุการใช้งานการตัดคว้านไส้สับปะรดที่เคลือบฟิล์มบางCrN และไม่เคลือบฟิล์มบาง CrN	100%	-
- วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลทดลอง	100%	-
- สรุปผลการศึกษาและเขียนรายงานการวิจัย	100%	-

****

ภาคผนวก ข

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

นายจักรพันธ์ ถาวรธิรา

หัวหน้าโครงการวิจัย

ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล นายจักรพันธ์ ถาวรธิรา

ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาตราจารย์

ที่ทำงาน ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131.

โทรศัพท์/โทรสาร (038) 745-900 ต่อ 3084

E-mail

ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สถาบัน	ปี	สาขา
วท.ม.	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2540	ฟิสิกส์
วท.บ.	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2536	ฟิสิกส์

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

เทคโนโลยีสุญญากาศ, โซลิดสเตทฟิสิกส์

****

ประวัติส่วนตัว

นายสุรสิงห์ ไชยคุณ

นักวิจัย

ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล	นายสุรสิงห์ ไชยคุณ
ตำแหน่งทางวิชาการ	รองศาสตราจารย์ ระดับ 9
ที่ทำงาน	ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131.
โทรศัพท์/โทรสาร	(038) 745-900 ต่อ 3084
E-mail	chaikhun@bucc4.buu.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สถาบัน	ปี	สาขา
วท.ม.	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2528	ฟิสิกส์
กศ.บ.	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางแสน	2525	ฟิสิกส์

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

เทคโนโลยีสุญญากาศ, เทคโนโลยีฟิล์มบาง, อิเล็กทรอนิกส์, แหล่งกำเนิดไอออน

****

ประวัติส่วนตัว

ดร. สุคคเณศ ตุงคะสมิต

นักวิจัย

ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล	ดร. สุคคเณศ ตุงคะสมิต
ตำแหน่งทางวิชาการ	ผู้ช่วยศาตราจารย์
ที่ทำงาน	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
	พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10210
โทรศัพท์	02-2187552
โทรสาร	02-2531150
E-mail	Sukkaneste.T@chula.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สถาบัน	ปี	สาขา
Post-Doctoral	Chalmers University of Technology, Gothenberg, Sweden	2545	Material Physics
Ph.D.	Linköping University, Linköping, Sweden	2544	Material Physics
Licentiate of Engineering	Linköping University, Linköping, Sweden	2543	Material Physics
วท.ม.	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2538	ฟิสิกส์
วท.บ.	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2536	ฟิสิกส์

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

ฟิสิกส์ของฟิล์มบาง, เทคโนโลยีสุญญากาศ, การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของสาร

****