


การสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรโดยวิธีการตกตะกอนไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่วิทยุ



นางสาวสุจิตรา พรหมนิมิตร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3726-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS OF DIAMOND-LIKE CARBON THIN FILM BY RADIO FREQUENCY PLASMA ENHANCED  
CHEMICAL VAPOR DEPOSITION TECHNIQUE



Miss Sujira Promnimit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Master of Science in Physics

Department of Physics  
Faculty of Science  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2003  
ISBN 974-17-3726-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรโดยวิธีการตกตะกอนไอเชิง  
เคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่วิทยุ  
โดย นางสาวสุจิรา พรหมนิมิตร  
สาขาวิชา ฟิสิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมณะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจร อยู่ดี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ศาสตราจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิต ศรีตระกูล)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน)

นางสาวสุจิตรา พรหมนิมิตร : การสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรโดยวิธีการตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่วิทยุ (SYNTHESIS OF DIAMOND – LIKE CARBON THIN FILM BY RF PECVD TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ ยรรยง, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์, 63 หน้า.

ISBN 974-17-3726-2.

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาระบบการตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่วิทยุ (RF-PECVD) ควบคุมผ่านขดลวดเหนี่ยวนำระนาบ โดยใช้เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุที่ 13.56 MHz เป็นต้นกำเนิด ก๊าซผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทนถูกส่งเข้าสู่ระบบเพื่อเป็นตัวกลางพลาสมา เพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรบนแผ่นรองรับ ได้แก่ อะลูมิเนียม และกระจกใสได้ เมื่อกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรเสร็จสิ้น ฟิล์มที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดและการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยวิธีรามานสเปกโทรสโกปี

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ฟิสิกส์  
สาขาวิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2546

ลายมือנית.....  
ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4372452223: MAJOR PHYSICS

KEY WORD: DIAMOND LIKE CARBON THIN FILM / INDUCTIVELY COUPLE PLASMA / DISCHARGE HYSTERESIS / RAMAN SPECTRUM / RF-PECVD IN A PLANAR COIL

SUJIRA PROMNIMIT: SYNTHESIS OF DIAMOND-LIKE CARBON THIN FILMS BY RF-PECVD TECHNIQUE. THESIS ADVISOR: DR. BOONCHOAT PAOSAWATYANYONG, THESIS COADVISOR: ASSIST. PROF. KIRANANT RATTANATAMMAPAN, 63 pp. ISBN 974-17-3726-2.

In this research, a planar coil inductively coupled radio frequency plasma enhanced chemical vapor deposition (RF-PECVD) system is developed. A 13.56 MHz. RF generator is utilized as a power source of the system. The mixture of Hydrogen and Methane is used in the system as plasma media. Diamond-like carbon (DLC) thin films are deposited onto aluminum and glass slide substrates under various growth conditions. The DLC thin films are analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Raman Spectroscopy.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Physics

Field of study Physics

Academic year 2002

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ และสามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผศ. กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ถ่ายทอดความรู้ความสามารถในการทำงาน รวมทั้งให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณ กรรมการทุกท่าน ที่ตรวจสอบ และให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการแก้ไข วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ขจรยศ อยู่ดี และนิสิตกลุ่มสารกึ่งตัวนำ แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย สำหรับความเอื้อเฟื้อในอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงาน

ขอขอบคุณ คุณบุญเหลือ เกาถาวรชัย เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี สำหรับการถ่ายภาพลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

ขอขอบคุณ คุณทนง ลีลาวัฒนสุข เจ้าหน้าที่สถาบันวิจัย และพัฒนาอัญมณี และเครื่องประดับแห่งชาติ สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่ได้จากการทดลองโดยวิธีทางรามานสเปกโทรสโกปี

ขอขอบคุณ คุณอนุสร อติเรกกิตติคุณ คุณหรรษา บุญฮ้าว และหจก. นเรศ-โลหะซัพพลาย ที่ให้การสนับสนุน และช่วยเหลือในการสร้างชิ้นส่วนของระบบสุญญากาศ

ขอขอบคุณ นางสาวอรอนงค์ แซ่มเล็ก เป็นอย่างยิ่ง ที่คอยช่วยเหลือแบ่งปัน เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัย และเป็นเพื่อนที่ดีของผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ นายสมบุรณ์ อ่ำเมือง นายดุสิต งามรุ่งโรจน์ นางสาว ชนิษฐา หงส์-เลิศกุล และนายไพรัช คำสิงห์ ที่ให้ความช่วยเหลืองานด้านต่าง ๆ พร้อมกำลังใจที่ดีมาตลอด

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ คุณย่า คุณพ่อ คุณแม่ น้องชาย น้องสาว และเพื่อนทุกคนที่ให้อาใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สุจิตรา พรหมนิมิต

# สารบัญ

หน้า

|       |  |    |
|-------|--|----|
|       | บทคัดย่อภาษาไทย.....                             | ง  |
|       | บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                          | จ  |
|       | กิตติกรรมประกาศ.....                             | ฉ  |
|       | สารบัญ.....                                      | ช  |
|       | สารบัญภาพ.....                                   | ฅ  |
|       | สารบัญตาราง.....                                 | ญ  |
| บทที่ |  |    |
| 1     | บทนำ.....  | 1  |
|       | 1.1 ความเป็นมา และเหตุจูงใจ.....                 | 2  |
|       | 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                 | 2  |
|       | 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....               | 2  |
|       | 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....                   | 2  |
|       | 1.5 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....         | 3  |
| 2     | ทฤษฎีเบื้องต้น.....                              | 4  |
|       | 2.1 พลาสมา.....                                  | 4  |
|       | 2.2 การตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมา.....      | 7  |
|       | 2.3 การกำเนิดพลาสมาโดยวิธี RF-PECVD แบบ ICP..... | 8  |
|       | 2.4 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC.....               | 9  |
| 3     | การวิเคราะห์ฟิล์มบาง DLC.....                    | 12 |
|       | 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....     | 12 |
|       | 3.2 รามานสเปกโทรสโกปี.....                       | 14 |
| 4     | การพัฒนาระบบ RF-PECVD แบบ ICP.....               | 17 |
|       | 4.1 ระบบสุญญากาศ.....                            | 19 |
|       | 4.2 ส่วนของการส่งถ่ายพลังงาน.....                | 20 |
|       | 4.2.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ.....  | 20 |
|       | 4.2.2 วงจรปรับค่าความขัด.....                    | 20 |
|       | 4.2.3 ขดลวดระนาบ.....                            | 23 |

| บทที่   | หน้า |
|---|------|
| 4.3 ส่วนของการควบคุมการไหลของก๊าซ.....  | 25   |
| 4.4 ส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าตัวแปรของระบบ.....  | 25   |
| 4.4.1 Rogowski coil.....  | 25   |
| 4.4.2 High voltage capacitive probe.....  | 29   |
| 5 ขั้นตอนการทดลอง ผลสรุป และอภิปราย.....  | 33   |
| 5.1 การทดสอบลักษณะส่อ I-V ของระบบ RF-PECVD แบบ ICP.....                                       | 33   |
| 5.1.1 การดำเนินการทดสอบลักษณะส่อ I-V ของระบบ<br>RF-PECVD แบบ ICP.....                         | 33   |
| 5.1.2 ผลการทดลอง และการอภิปรายผล<br>ของความสัมพันธ์ลักษณะส่อ I-V ของระบบ .....                | 34   |
| 5.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC.....  | 38   |
| 5.2.1 การดำเนินงานในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC.....  | 38   |
| 5.2.2 ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC .....                               | 41   |
| 5.2.2.1 ความหนาของฟิล์มบาง DLC.....   | 41   |
| 5.2.2.2 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ฟิล์มบาง DLC<br>โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด..... | 42   |
| 5.2.2.3 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ฟิล์มบาง DLC<br>โดยรามานสเปกโทรสโกปี.....                   | 45   |
| 6 สรุปผลการทดลอง.....   | 48   |
| 6.1 สรุปผลการทดลอง.....   | 48   |
| 6.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....   | 48   |
| 6.3 ข้อเสนอแนะ.....   | 49   |
| รายการอ้างอิง.....  | 50   |
| ภาคผนวก.....  | 53   |
| ก การออกแบบระบบ .....   | 54   |
| ข อัตราการรั่ว และความดันสุดท้ายของระบบสุญญากาศ.....  | 60   |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....   | 63   |



## สารบัญรูป

| รูปที่      | หน้า  |
|-------------|---|
| รูปที่ 2.1  | โครงสร้างของพลาสมา.....5  |
| รูปที่ 2.2  | แผนผังแสดงระบบโดยรวมในวิธี PECVD.....8  |
| รูปที่ 2.3  | แผนผังแสดงระบบ RF-PECVD แบบ ICP โดย Ito, et al. <sup>[11]</sup> .....10   |
| รูปที่ 2.4  | แผนผังแสดงระบบ RF-PECVD แบบ ICP โดย Liew, et al. <sup>[19]</sup> .....11  |
| รูปที่ 3.1  | แสดงผลลักษณะผิวหน้าฟิล์มที่ได้จากการทดลองของ Ito, et al. <sup>[11]</sup> .....13  |
| รูปที่ 3.2  | แสดงผลลักษณะผิวหน้าฟิล์มที่ได้จากการทดลองของ Liew, et al. <sup>[19]</sup> .....14   |
| รูปที่ 3.3  | แสดงผลรามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง DLC<br>บนแผ่นซิลิคอนที่ได้จากงานวิจัยของ Ito, et al. <sup>[11]</sup> .....16                       |
| รูปที่ 3.4  | แสดงผลรามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง DLC<br>บนแผ่นซิลิคอนที่ได้จากงานวิจัยของ Liew, et al. <sup>[19]</sup> .....16                      |
| รูปที่ 4.1  | แผนผังแสดงระบบ RF-PECVD แบบ ICP ที่จัดสร้าง.....17  |
| รูปที่ 4.2  | ภาพถ่ายแสดงระบบ RF-PECVD แบบ ICP ที่จัดสร้าง.....18   |
| รูปที่ 4.3  | ภาพถ่ายภาชนะสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัย.....19   |
| รูปที่ 4.4  | แผนผังวงจรปรับค่าความขดที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในระบบ RF-PECVD แบบ ICP.....21   |
| รูปที่ 4.5  | ภาพแสดงวงจรปรับค่าความขดที่สร้างขึ้นสำหรับระบบ RF-PECVD แบบ ICP.....21  |
| รูปที่ 4.6  | ภาพถ่ายแสดงขดลวดระนาบ.....23  |
| รูปที่ 4.7  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงความเหนียวนำ ( $X_L$ ) ของขดลวด<br>ระนาบ และความถี่ที่ได้รับ (f).....24                 |
| รูปที่ 4.8  | แผนผังโครงสร้างของ Rogowski coil และวงจรที่ร่วมในการวัดค่ากระแส.....26  |
| รูปที่ 4.9  | แสดงแผนผังวงจรสำหรับการสอบเทียบค่าวัดของ Rogowski coil.....26   |
| รูปที่ 4.10 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของ<br>Rogowski coil กับศักย์ไฟฟ้าของ Pearson probe.....28                                   |
| รูปที่ 4.11 | โครงสร้างของ High voltage capacitive probe.....29   |
| รูปที่ 4.12 | แผนผังแสดงวงจรการสอบเทียบค่าวัดของ<br>High voltage capacitive probe โดยใช้<br>High voltage resistive probe เป็นตัวสอบเทียบ.....30 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

ญ

| รูปที่      | หน้า  |
|-------------|---|
| รูปที่ 4.13 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของ High voltage resistive probe ( $V_{ro}$ ) กับ ศักย์ไฟฟ้า High voltage capacitive probe ( $V_{ca}$ ).....32 |
| รูปที่ 5.1  | แสดงแผนผังการวัดกระแสไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าของขดลวดระนาบ.....33  |
| รูปที่ 5.2  | แสดงภาพถ่ายของอาร์กอนพลาสติกในระดั E-mode และ H-mode.....34   |
| รูปที่ 5.3  | แสดงภาพถ่ายของไฮโดรเจนพลาสติกในระดั E-mode และ H-mode.....35  |
| รูปที่ 5.4  | รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า กับกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุสำหรับอาร์กอนพลาสติก.....35   |
| รูปที่ 5.5  | รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า กับกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุสำหรับไฮโดรเจนพลาสติก.....36  |
| รูปที่ 5.6  | รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า กับกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุสำหรับอาร์กอน พลาสติก.....37  |
| รูปที่ 5.7  | รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า กับกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุสำหรับไฮโดรเจนพลาสติก.....37  |
| รูปที่ 5.8  | แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง DLC บนแผ่นอะลูมิเนียม $Al_1$ จากกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่ 0.5 sccm ของก๊าซมีเทน.....42                     |
| รูปที่ 5.9  | แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง DLC บนแผ่นอะลูมิเนียม $Al_4$ จากกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่ 1.7 sccm ของก๊าซมีเทน.....42                     |
| รูปที่ 5.10 | แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง DLC บนแผ่นกระจกสไลด์ ที่ถ่ายจากกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่ 0.8 sccm ของก๊าซมีเทน.....43                      |
| รูปที่ 5.11 | แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง DLC บนแผ่นกระจกสไลด์ที่ถ่ายจากกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่ 0.5 sccm ของก๊าซมีเทน.....44                       |

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 5.12 รูปแสดงรามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง DLC<br>บนแผ่นอะลูมิเนียมทำการสังเคราะห์ที่ความดัน 1 torr<br>และพลังงานที่ให้แก่ระบบ 400 วัตต์..... | 45   |
| รูปที่ 5.13 รูปแสดงรามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง DLC<br>บนกระจกสไลด์ทำการสังเคราะห์ที่ความดัน 1 torr<br>และพลังงานที่ให้แก่ระบบ 400 วัตต์.....      | 46   |



## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ของ Pearson probe<br>และค่าศักย์ไฟฟ้าขาออกของ Rogowski coil..... | 27   |
| ตารางที่ 4.2 ศักย์ไฟฟ้าที่วัดโดย High voltage resistive probe<br>และ High voltage capacitive probe.....           | 31   |
| ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลของตัวแปรที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง<br>DLC สำหรับแผ่นอะลูมิเนียม.....                   | 39   |
| ตารางที่ 5.2 แสดงข้อมูลของตัวแปรที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง<br>DLC สำหรับกระจกสไลด์.....                        | 40   |
| ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความหนาของฟิล์มบาง DLC ที่ได้.....  | 41   |



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และเหตุจูงใจ

เพชร (Diamond) คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษทั้งทางด้านฟิสิกส์ เคมี และไฟฟ้า จนเป็นที่ยอมรับกันมานาน เป็นวัสดุที่มีความแข็งที่สุด มีความต้านทานต่อกระแสไฟฟ้าสูง และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้น<sup>[1]</sup> ด้วยสมบัติเด่นข้างต้นทำให้นักวิทยาศาสตร์จำนวนมากทำการวิจัย และค้นคว้าด้านต่าง ๆ ของเพชรจนสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร หรือฟิล์มบาง DLC ซึ่งเป็นฟิล์มบางคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับเพชร และมีสมบัติคล้ายคลึงกับเพชรผลึกเดี่ยว (Single crystal of diamond) ได้สำเร็จ เนื่องจากฟิล์มบาง DLC มีความหลากหลายในการประยุกต์ทางด้านวัสดุศาสตร์ ส่งผลให้ฟิล์มบาง DLC มีความสำคัญต่อวงการอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น สารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แสง และเครื่องมือกลต่าง ๆ รวมถึงด้านอื่น ๆ อีกมาก<sup>[2]</sup>

ปัจจุบัน ฟิล์มบาง DLC สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการต่าง ๆ อาทิ วิธี Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) และ Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (MW PECVD)<sup>[3]</sup> เป็นต้น ส่วนในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำวิธีการตกตะกอนไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่คลื่นวิทยุ (Radio frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition; RF-PECVD) ซึ่งวิธี RF-PECVD ได้รับพลังงานจากเครื่องกำเนิดความถี่คลื่นวิทยุขนาด 13.56 MHz โดยควมผ่านวงจรปรับค่าความขัด (Impedance Matching Network) ไปยังขดลวดระนาบ (Planar induction coil) ขดลวดระนาบจะทำหน้าที่ในการส่งพลังงานสู่ก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในระบบให้เปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมาเพื่อใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง DLC บนแผ่นอะลูมิเนียม และกระจกสไลด์ ส่วนก๊าซที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ในงานวิจัยนี้ได้แก่ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน และก๊าซไฮโดรเจน หลังจากกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC เสร็จสิ้นจะทำการวิเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ที่สังเคราะห์ได้ต่อไป

เหตุจูงใจในการใช้วิธี RF PECVD สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC เนื่องจากปัจจุบัน RF PECVD เป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้ผลฟิล์มที่มีคุณภาพ และเป็นที่น่าสนใจอย่างมากในการใช้สังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC โดยระบบมีข้อดีคือ ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 400 องศาเซลเซียส<sup>[4]</sup> จึงเหมาะแก่การสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC บนวัสดุจำพวกโลหะ และวัสดุทั่วไปที่นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรมชั้นสูง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สร้าง และพัฒนาระบบ RF-PECVD แบบ Inductively coupling plasma (ICP)
2. สังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ด้วยระบบที่จัดสร้างลงบนแผ่นรองรับ (substrate) ที่เป็นอะลูมิเนียม และกระจกสไลด์
3. วิเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ที่สังเคราะห์ได้

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ระบบ RF-PECVD แบบ ICP เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC
2. ได้รับความรู้ และทักษะด้านต่าง ๆ ในงานสร้างระบบ RF-PECVD และการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC
3. ความสามารถในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC จากระบบที่จัดสร้าง
4. เป็นแนวทางนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านวัสดุศาสตร์ และการเคลือบฟิล์มบางโดยระบบ RF-PECVD แบบ ICP ต่อไป

## 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยหลักการสร้างระบบ RF-PECVD แบบ ICP
2. สร้าง และทดสอบระบบ RF-PECVD แบบ ICP
3. สังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC จากระบบ RF-PECVD ที่จัดสร้าง
4. วิเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ที่ได้
5. อภิปราย สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

## 1.5 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท บทแรกกล่าวถึง พื้นหลัง เหตุจูงใจ และขั้นตอนการทำวิจัยอย่างคร่าว ๆ

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยคือ นิยามของพลาสมา วิธี RF-PECVD ทฤษฎีการกำเนิดพลาสมา และการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ในระบบดังกล่าว

บทที่ 3 กล่าวถึง ทฤษฎีเบื้องต้นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope; SEM) และการวิเคราะห์ทางรามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)

บทที่ 4 อธิบายส่วนประกอบของเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบ RF-PECVD แบบ ICP

บทที่ 5 กล่าวถึงวิธีการดำเนินการทดลอง ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของการทดสอบลักษณะเฉพาะของระบบในรูปแบบของกระแสและความต่างศักย์ ส่วนที่ 2 กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์เชิงรามาน

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### ทฤษฎีเบื้องต้น

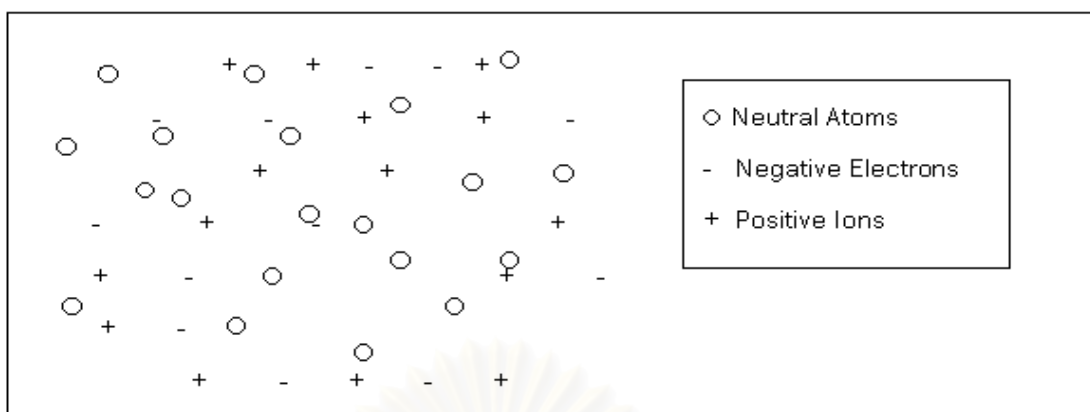
ในปัจจุบัน มนุษย์ได้คิดค้นระบบการให้กำเนิดพลาสมาหลายวิธีด้วยกัน โดยมีจุดประสงค์ที่จะนำพลาสมาไปใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม ซึ่งพลาสมาเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการผลิตวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมด้านการเคลือบฟิล์ม ดังนั้นการสร้างระบบให้กำเนิดพลาสมาที่มีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็น เนื่องจากพลาสมามีคุณสมบัติเฉพาะแตกต่างจากสถานะของสสารทั่วไปหลายประการ ดังนั้นก่อนการสร้างระบบการให้กำเนิดพลาสมา จึงต้องศึกษาธรรมชาติของพลาสมา วิธีการกำเนิดพลาสมา รวมไปถึงเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการให้กำเนิดพลาสมาเสียก่อน ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึง นิยามของพลาสมา การสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC วิธีการตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมา การกำเนิดพลาสมาด้วยวิธีการตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่วิทยุ

#### 2.1 พลาสมา

พลาสมาคือสถานะที่ 4 ของสสาร หากมองถึงคุณสมบัติเชิงมหภาคแล้วพลาสมาเป็นสสารที่ประกอบด้วย อิเล็กตรอน อะตอม และโมเลกุล ทั้งที่ถูกไอออไนซ์ และไม่ถูกไอออไนซ์ เข้าไว้ด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในการรวมตัวดังกล่าวอนุภาคจะประพฤติในลักษณะรวมกันเป็นหนึ่งเดียวเรียกว่า พฤติกรรมหมู่ (collective behavior) และจะแสดงสภาพความเป็นกลางโดยรวมออกมา<sup>[2]</sup> แต่เมื่อพิจารณาถึงส่วนย่อยต่าง ๆ ของพลาสมา สภาพความเป็นกลางดังกล่าวจะเป็นเพียงลักษณะเสมือนที่พิจารณาจากปริมาตรทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตามภายในพลาสมาประกอบด้วยอนุภาคส่วนหนึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุ ดังนั้นพลาสมาจึงมีอันตรกิริยาต่อสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งต่างจากสสารที่เป็นกลางในสถานะอื่น ๆ เช่น ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ทำให้ต้องมีการศึกษาพลศาสตร์ของพลาสมาในลักษณะเฉพาะ<sup>[3]</sup>

คำว่า “พลาสมา” ถูกตั้งขึ้นในปี ค.ศ.1927 โดย Irving Langmuir<sup>[1]</sup> เนื่องจากเขาทำงานเกี่ยวกับชิ้นส่วนทางไฟฟ้า ซึ่งเกี่ยวข้องกับก๊าซที่ถูกไอออไนซ์ (ionized) เขาได้สังเกตเห็นถึงความคล้ายคลึงกันระหว่างการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนความเร็วสูง และ ไอออนต่าง ๆ กับการไหลของเลือดที่ประกอบด้วย เม็ดเลือดแดง เม็ดเลือดขาว และจุลินทรีย์ต่าง ๆ จึงได้นิยามก๊าซในสภาวะนั้นว่า พลาสมา<sup>[1]</sup>





รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพลาสมา

สสารที่สถานะพลาสมา พิจารณาได้จาก 3 เงื่อนไขดังนี้

- 1.) ขนาดของพลาสมา ( $L$ ) ต้องมีขนาดใหญ่กว่าความยาวของเดอว์บาย ( $L \gg \lambda_D$ )

พิจารณาได้จากศักย์ภายในพลาสมา เมื่อศักย์ภายในพลาสมาถูกรบกวนโดยศักย์จากภายนอก จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การกั้นของเดอว์บาย (Debye Shielding) <sup>[4]</sup> ขึ้นภายในพลาสมา เป็นพฤติกรรมหมู่ที่เกิดขึ้นล้อมรอบสิ่งรบกวนเป็นปริมาตรทรงกลมเรียกว่า ทรงกลมของเดอว์บาย (Debye Sphere) โดยมีรัศมีของทรงกลมของเดอว์บายเป็นค่าความยาวของเดอว์บาย ( $\lambda_D$ ) จากปรากฏการณ์การกั้นของเดอว์บาย ทำให้ศักย์ภายในทรงกลมของเดอว์บายที่ล้อมสิ่งรบกวนมีค่าเป็นศูนย์เสมือนว่าไม่มีการรบกวนเกิดขึ้นกับพลาสมาบริเวณภายนอกทรงกลมของเดอว์บายรอบสิ่งรบกวนนั้น ดังนั้นเงื่อนไขแรกในการพิจารณาสสารที่สถานะพลาสมาคือ พิจารณาจากค่าความยาวของเดอว์บายจะต้องมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของพลาสมา

- 2.) ความหนาแน่นของประจุ ( $N_D$ ) ภายในทรงกลมของเดอว์บายมีค่ามาก ( $N_D \gg 1$ )

เงื่อนไขที่ 2 นี้ เป็นผลพวงจากเงื่อนไขที่ 1 คือความหนาแน่นของประจุภายในทรงกลมของเดอว์บาย ( $N_D$ ) นั้นต้องมีค่ามาก โดยส่งผล  $\lambda_D = (k_B T_e \epsilon_0 / N_D e^2)^{1/2}$  ในข้อแรกเป็นจริง <sup>[4]</sup>

เมื่อ

$k_B$  = ค่านิจของโบลส์มาน

$\epsilon_0$  = permittivity of free space =  $1/(36\pi 10^9)$  ฟารัด/เมตร

$T_e$  = อุณหภูมิของอิเล็กตรอนภายในพลาสมา  
 $e$  = ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

3.) ความถี่พลาสมา ( $\omega_p$ ) มีค่าสูงกว่าความถี่ของแหล่งรบกวน ( $\omega_p \gg \omega$ )

เงื่อนไขสุดท้าย พิจารณาจากความถี่การสั่นของพลาสมาต้องมีค่ามากเมื่อเทียบกับความถี่ของแหล่งรบกวน ( $\omega$ )<sup>[4]</sup> หมายถึง ถ้าพลาสมาถูกรบกวนด้วยความถี่ค่าหนึ่งจากแหล่งรบกวนแล้วพลาสมาจะคงสภาพความเป็นพลาสมาอยู่ได้ก็ต่อเมื่อความถี่ของพลาสมาจะต้องมากกว่าความถี่ของแหล่งรบกวน

ในปัจจุบันมนุษย์สามารถสร้างพลาสมาขึ้นได้หลายวิธี โดยมีระบบหลายแบบในการให้กำเนิดพลาสมา เช่น Tokamak, Microwave Plasmas, Inductively Coupling Plasmas (ICP) และ Capacitively Coupling Plasmas (CCP)<sup>[5]</sup> เป็นต้น ซึ่งจะให้กำเนิดพลาสมาที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น Tokamak จะให้กำเนิดพลาสมาที่มีพลังงาน และอุณหภูมิสูงมาก (>1,000,000 K) Microwave Plasma ให้กำเนิดพลาสมาที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 5000 – 7000 K และ ICP ให้กำเนิดพลาสมาที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 6000-8000 K<sup>[5]</sup>

ระบบแบบ ICP จะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดความถี่คลื่นวิทยุ และขดลวดเหนี่ยวนำ ระบบแบบ ICP เริ่มทำงานโดยการส่งความถี่คลื่นวิทยุผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ กระแสในขดลวดเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเป็นไปตามกฎของ บีโอดี และซาวาร์ต เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นโดยรอบขดลวด สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวถ่ายทอดพลังงานไปยังโมเลกุลของก๊าซในระบบ เมื่อโมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานสูงมากพอจะเกิดการแตกตัว และเข้าสู่สถานะของพลาสมา พลาสมาที่เกิดจากระบบแบบ ICP เรียกว่า H-type discharge<sup>[3]</sup>

ระบบแบบ CCP จะประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดความถี่คลื่นวิทยุ ภาชนะสุญญากาศ และขั้วไฟฟ้าบวก และลบ (electrode) ระบบแบบ CCP เริ่มทำงานโดยการส่งคลื่นความถี่วิทยุไปยังขั้วไฟฟ้า ความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้ง 2 จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (E) ขึ้นโดยรอบสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวถ่ายทอดพลังงานไปยังโมเลกุลของก๊าซในระบบ เมื่อโมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานสูงมากพอจะเกิดการแตกตัว และเข้าสู่สถานะของพลาสมา พลาสมาที่เกิดจากระบบแบบ CCP เรียกว่า E-type discharge<sup>[3]</sup>

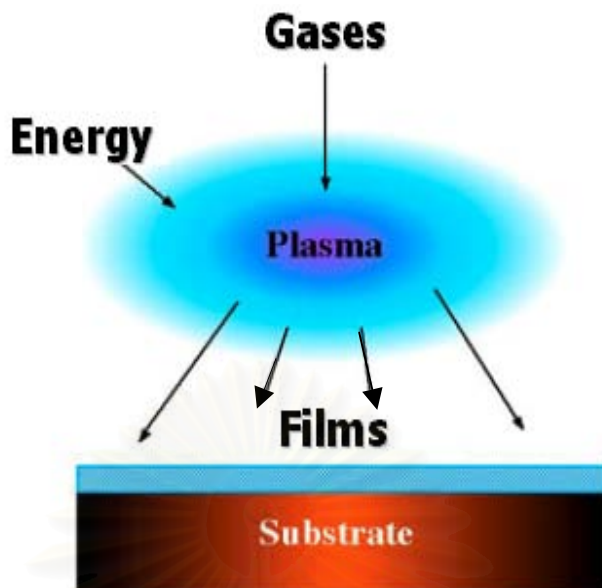
การกำเนิดพลาสมาในระบบแบบ ICP กับระบบแบบ CCP มีส่วนคล้ายคลึงกัน แต่พลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่นของอนุภาคพลาสมา เพราะว่า

การกำเนิดพลาสมาด้วยระบบแบบ ICP มีข้อดีเหนือกว่าระบบแบบ CCP คือสามารถสร้างพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูงกว่าที่ความดันเท่ากัน [3] การควบคุม และการระบายความร้อนในระบบแบบ ICP ทำได้ง่ายกว่าระบบแบบ CCP เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำติดตั้งอยู่ภายนอกภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ระบบแบบ ICP ได้รับความนิยมสูงเพราะเป็นระบบที่สามารถผลิตพลาสมาได้ที่อุณหภูมิไม่สูง ระบบแบบ ICP ไม่มีขั้วไฟฟ้า (electrode) ภายในระบบจึงเป็นระบบที่มีความสะอาดมากกว่า เนื่องจากไม่เกิดการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้าในขณะที่ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมากระทบบ

แต่เนื่องจากการกำเนิดพลาสมาด้วยระบบแบบ CCP ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดความถี่คลื่นวิทยุ ภาชนะสุญญากาศ และขั้วไฟฟ้า ซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะสุญญากาศ ดังนั้นเมื่อก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาแล้วขั้วไฟฟ้าจะเกิดการสึกกร่อน ทำให้ระบบสกปรกได้

## 2.2 การตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมา

ในปัจจุบันมีวิธีการในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC หลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ วิธีการตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมา (Plasma enhanced chemical vapor deposition; PECVD) ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยปฏิกิริยาการรวมตัวกันของก๊าซเพื่อสังเคราะห์ของแข็งที่อาจเป็นฉนวน หรือตัวนำลงบนแผ่นรองรับ (substrate) โดยอาศัยพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำในการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี RF-PECVD ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในวิธี PECVD และเป็นกรให้กำเนิดพลาสมาแบบ ICP ลักษณะเฉพาะของวิธี PECVD คือจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือสารตั้งต้นในสถานะของก๊าซ ส่วนที่สองคือส่วนของพลังงานเป็นส่วนที่ให้แกสารตั้งต้นเพื่อเปลี่ยนสถานะจากก๊าซไปเป็นพลาสมาเพื่อร่วมเกิดปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์ฟิล์มลงบนผิวของแผ่นรองรับ และส่วนที่สามคือแผ่นรองรับที่ต้องการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี PECVD แผนผังโดยรวมของวิธี PECVD แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนผังแสดงระบบโดยรวมในวิธี PECVD

### 2.3 การกำเนิดพลาสมาโดยวิธี RF-PECVD แบบ ICP

การกำเนิดพลาสมาโดยวิธี RF-PECVD แบบ ICP ที่ความดันต่ำ พลังงานที่อะตอม และโมเลกุลของก๊าซได้รับนั้นอาจได้จาก สนามไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุ<sup>[3,6]</sup> คลื่นไมโครเวฟ<sup>[7]</sup> หรือเลเซอร์<sup>[8,9]</sup> ซึ่งขึ้นกับ ลักษณะเฉพาะของระบบนั้น ๆ

สำหรับวิธี RF-PECVD แบบ ICP นั้น พลังงานที่ทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนเซชันนั้นมาจาก แหล่งกำเนิดความถี่คลื่นวิทยุที่ 13.56 MHz ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายพลังงานกระแสสลับให้แก่ระบบ พลังงานจะถูกส่งผ่านไปยังขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งอยู่ภายนอกภาชนะสุญญากาศเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นบริเวณขดลวดเหนี่ยวนำ และสนามไฟฟ้าจะผ่านเข้าไปภายในภาชนะสุญญากาศ ทำให้อิเล็กตรอนของก๊าซซึ่งเป็นสารตั้งต้นเกิดความเร่งอันเนื่องจากแรงของลอเรนซ์ ดังสมการข้างล่าง

$$\vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_B = q_e \vec{E} + q_e \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

$$\vec{F} = m_e (d\vec{v} / dt) \quad (2.2)$$

เมื่อ

|             |                              |
|-------------|------------------------------|
| $\vec{F}$   | = แรงลอเรนซ์                 |
| $\vec{F}_E$ | = แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า      |
| $\vec{F}_B$ | = แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก   |
| $m_e$       | = มวลอิเล็กตรอน              |
| $t$         | = เวลา                       |
| $\vec{v}$   | = ความเร็วของอิเล็กตรอน      |
| $\vec{B}$   | = สนามแม่เหล็ก               |
| $\vec{E}$   | = สนามไฟฟ้า                  |
| $q_e$       | = ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน |

โมเลกุลของก๊าซชนกันจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานขึ้น อนุภาคบางส่วนจะมีพลังงานสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิภายในระบบสูงขึ้นตามไปด้วย หากพลังงานที่ก๊าซได้รับสูงมากกว่าค่าพลังงานไอออไนเซชัน (Ionization energy) ของก๊าซนั้น ก๊าซจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เมื่อเกิดไอออนมากขึ้นก๊าซจะเข้าสู่สถานะพลาสมา พลาสมาที่เกิดจะประกอบด้วย ไอออน อิเล็กตรอน และอะตอมที่เป็นกลาง การชนกันของอนุภาคดังกล่าวเป็นการชนแบบยืดหยุ่น และไม่ยืดหยุ่น<sup>[4]</sup>

การชนแบบยืดหยุ่นเป็นการชนที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานแต่มีการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้นภายใน ส่วนการชนแบบไม่ยืดหยุ่นจะมีการสูญเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อม อาจอยู่ในรูปแสง เสียง หรือความร้อน เป็นต้น การชนแบบยืดหยุ่นเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำสุดซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2 eV และการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานสูงสุดซึ่งมีค่ามากกว่า 15 eV ประเด็นสำคัญคือ มวลของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมวลของอะตอม ดังนั้นการชนแบบยืดหยุ่นจึงมีค่าพลังงานที่ส่งถ่ายในแต่ละครั้งน้อยมาก หากสนามไฟฟ้า (E) มีค่ามากพอ อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้า และเกิดการชนกันหลาย ๆ ครั้งทำให้เกิดการไอออไนเซชัน ศักย์ของอิเล็กตรอนจึงมีค่ามากขึ้น เมื่อพลังงานมากพอในที่สุดสถานะพลาสมาจะเกิดขึ้น

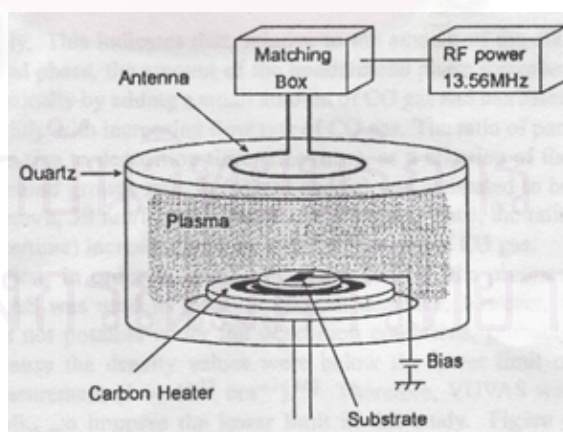
สิ่งสำคัญที่สุดในการรักษาสถานะพลาสมานั้นคือ Electron impact ionization<sup>[4]</sup> โดยอิเล็กตรอนเริ่มต้นทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลของก๊าซหลุดออกมา และทำให้โมเลกุลของก๊าซมีสภาวะเป็นบวก จากนั้นอิเล็กตรอนเริ่มต้น และอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากโมเลกุลจะเข้าไปชนโมเลกุลตัวอื่นทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระบวนการเกิดไอออไนเซชันเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณ ดังนั้นจึงจะสามารถรักษาสถานะพลาสมาไว้ได้



## 2.4 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC

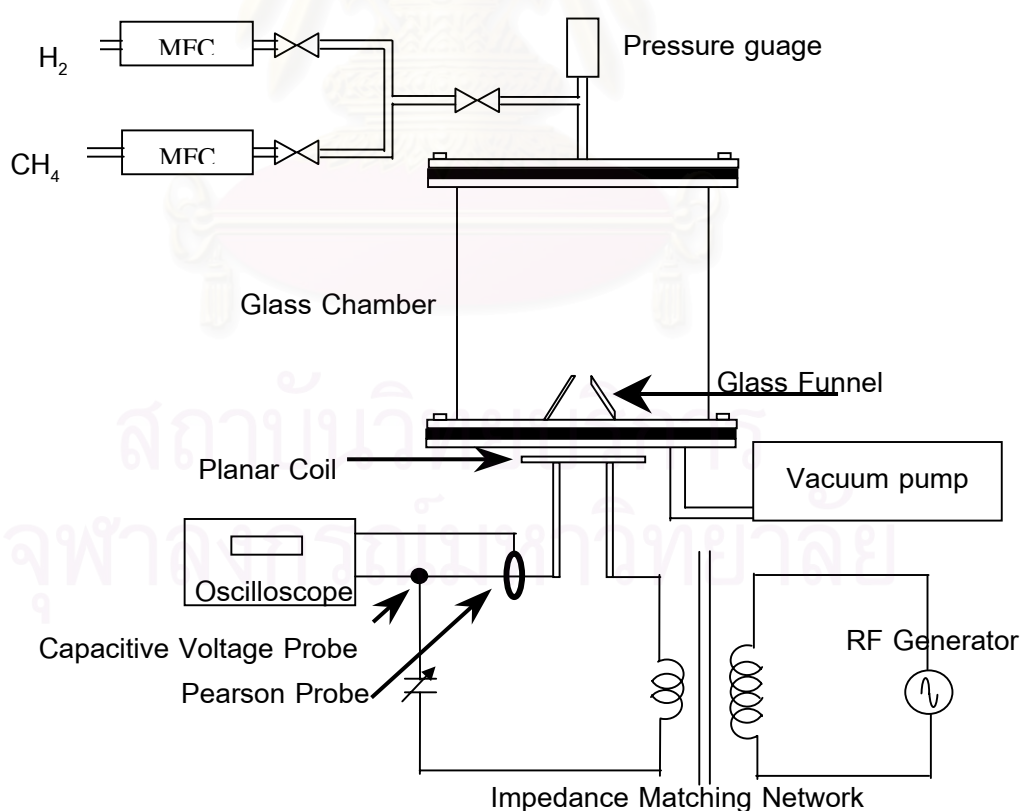
ปัจจุบันวิธีสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีสามารถหาอ่านได้จากวารสารทั้งใน และนอกประเทศ ซึ่งแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันขึ้นกับรูปแบบ และวิธีการที่ใช้ ขอยกตัวอย่างพอสังเขปดังนี้

Ito, et al. <sup>[11]</sup> ได้ติดตั้งระบบ RF-PECVD แบบ ICP เพื่อการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ลงบนแผ่นรองรับซิลิคอน ที่ความดัน 11 ปาสคาล ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ระบบนี้ประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำที่ขดเป็นวงกลมจำนวน 1 รอบ (one-turn coil antenna) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. วางอยู่บนแผ่นควอทซ์ และภาชนะสุญญากาศ ผิวแผ่นรองรับของซิลิคอนจะถูกขัดด้วยผงเพชร ขนาด 30  $\mu\text{m}$  และทำความสะอาดแผ่นรองรับด้วยคลื่นความถี่สูง ในอ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) ด้วยสารละลายเอทานอลเป็นเวลา 30 นาที ในกระบวนการสังเคราะห์ แผ่นรองรับจะถูกทำให้ร้อนด้วย Resistive Carbon Heater ที่อุณหภูมิ 970 K เพื่อลดค่าความต่างศักย์ระหว่างพลาสมา และแผ่นรองรับ ก๊าซที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คือ  $\text{CH}_4$ , CO และ  $\text{H}_2$  จากการทดลองพบว่าคุณภาพของฟิล์มที่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของก๊าซที่ใช้ รายงานผลการทดลองจากการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง DLC ที่ได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พบว่ามีลักษณะเป็นเกล็ด (grain) ขนาด 90 nm และทำการวิเคราะห์ทางรามานสเปกโทรสโกปี สังเกตพบพีคของรามานสเปกตรัมที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  และ  $1230\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคที่เป็นลักษณะเฉพาะของเพชร (diamond phase) และแกรไฟต์ (nondiamond phase)



รูปที่ 2.3 แผนผังแสดงระบบ RF-PECVD แบบ ICP โดย Ito, et al. <sup>[11]</sup>

Liew, et al. <sup>[19]</sup> ได้พัฒนาระบบ RF-PECVD แบบ ICP ขึ้นเพื่อสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ลงบนแผ่นรองรับซิลิคอน ซึ่งแผนผังของระบบแสดงไว้ดังรูปที่ 2.4 ระบบประกอบด้วยขวดวอเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 cm วางอยู่ใต้แผ่นควอทซ์ ซึ่งอยู่ด้านล่างภาชนะสุญญากาศ ผิวของแผ่นรองรับซิลิคอนถูกขัดด้วยผงเพชรขนาด 0.1  $\mu\text{m}$  จากนั้นล้างออกด้วยสารละลาย อะซิโตน เมทานอล และเอทานอล ตามลำดับ สุดท้ายทำความสะอาดแผ่นรองรับด้วยคลื่นความถี่สูง ในอ่างอัลตราโซนิกด้วยน้ำดีไอออไนซ์ (deionized) เป็นเวลา 10 นาที ในระหว่างการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ต่อการสังเคราะห์ 1 แผ่นรองรับ พบว่าแผ่นรองรับร้อนขึ้นประมาณ  $800^{\circ}\text{C}$  ถึง  $950^{\circ}\text{C}$  สารตั้งต้นในการสังเคราะห์คือ ก๊าซ ไฮโดรเจน และก๊าซมีเทน จากการทดลองพบว่าปริมาณก๊าซมีเทนที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นมีผลต่อคุณภาพและโครงสร้างของฟิล์มที่ได้ จากการวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้าฟิล์มบาง DLC ที่ได้โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีลักษณะเป็นแบบ polygon crystalline เก็ด็ด และดอกกะหล่ำ (cauliflower) เป็นส่วนใหญ่ และการวิเคราะห์ทางรามานสเปกโทรสโกปีพบพีคในช่วง  $1355\text{-}1560\text{ cm}^{-1}$  และ  $1580\text{-}1590\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคที่เป็นลักษณะเฉพาะของเพชรและแกรไฟต์ ผลการทดลองดังกล่าว จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยนี้ในบทที่ 5 ละเอียดอีกครั้ง



รูปที่ 2.4 แผนผังแสดงระบบ RF-PECVD แบบ ICP โดย Liew, et al. <sup>[19]</sup>

## บทที่ 3

### การวิเคราะห์ฟิล์มบาง DLC

การศึกษาวเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ที่เตรียมขึ้นมาโดย RF-PECVD แบบ ICP โดยการใช้อุปกรณ์จูลทรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด เพื่อศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง DLC และวิธีทางรามานสเปกโทรสโกปีเพื่อศึกษาโครงสร้างฟิล์มบางที่เตรียมขึ้น

#### 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดประกอบด้วย Electron gun เป็นขั้วแคโทดทำหน้าที่กำเนิดอิเล็กตรอนจาก Filament และแอโนดทำหน้าที่เร่งกลุ่มอิเล็กตรอนด้วยศักย์ไฟฟ้าในช่วง 1kV ถึง 40 kV กลุ่มอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยเลนส์บีบแสง (condensing lens) และปรับโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดยังประกอบด้วย Scanning coils ทำหน้าที่ในการเคลื่อนลำอิเล็กตรอนไปบนระนาบ x-y เมื่อลำอิเล็กตรอนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนโฟกัสลงบนผิวของตัวอย่าง จะทำให้เกิดอันตรกิริยากันระหว่าง อิเล็กตรอนที่ถูกยิงลงมา และอะตอมของตัวอย่าง ผลของอันตรกิริยาดังกล่าวจะถูกเก็บข้อมูลโดยหัววัด (detector) ซึ่งสามารถนำมาใช้ศึกษาลักษณะผิวหน้าและถูกแปลงเป็นข้อมูลที่ต้องการโดยชุดระบบทางอิเล็กทรอนิกส์

อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ยิงลงมาชนกับอะตอมของตัวอย่าง สามารถแบ่งได้ 2 แบบ ตามลักษณะการชนคือ แบบยืดหยุ่น (Elastic) และแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) ซึ่งทั้งสองลักษณะจะให้สัญญาณ (Signal) ที่จะนำมาใช้งานแตกต่างกัน

##### 3.1.1 การชนแบบยืดหยุ่น

เมื่ออิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งเป็นอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) ตกกระทบลงบนตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิกระเจิงออกมา และมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนซึ่งน้อยมากให้กับอะตอมของตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาเรียกว่า Back scatter electron ซึ่งสามารถนำสัญญาณดังกล่าวมาสร้างเป็นสัญญาณภาพบนจอ CRT ได้



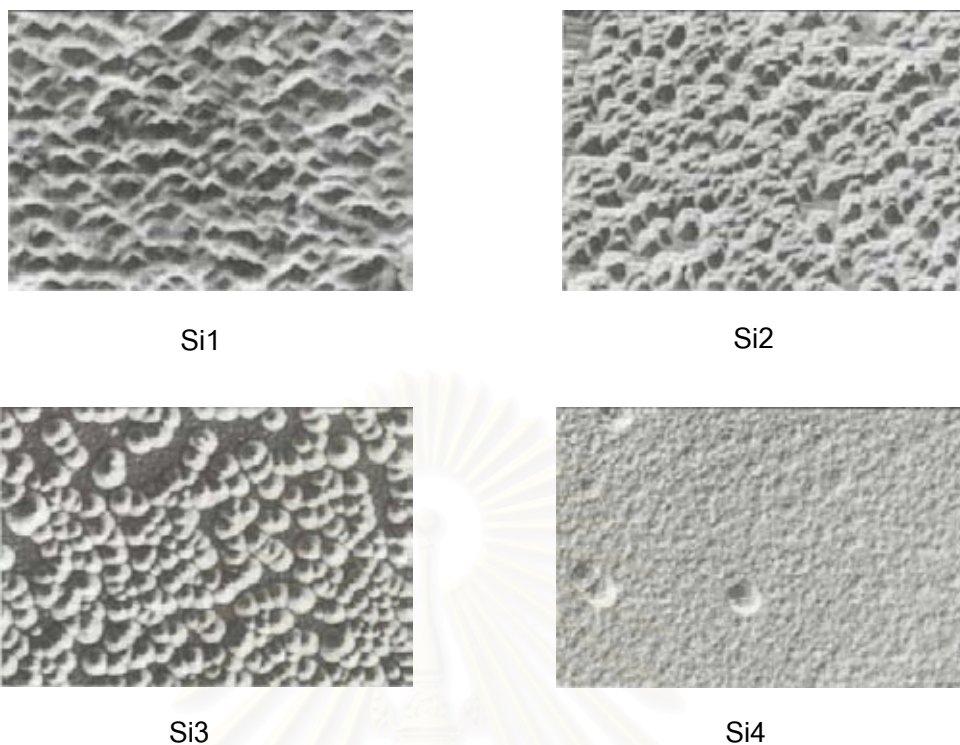
### 3.1.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น

กลุ่มของอิเล็กตรอนปฐมภูมิเมื่อชนกับอะตอมของตัวอย่างแล้วจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ และเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของตัวอย่างทำให้เกิด อิเล็กตรอนทุติยภูมิ Auger electrons Characteristic x-ray เป็นต้น ซึ่งห้วงสามารถวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นวงในของอะตอมตัวอย่าง ถ้าพลังงานที่ให้มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นวงในของอะตอมตัวอย่างจะทำให้อิเล็กตรอนชั้นวงในหลุดออกมา อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่า อิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสามารถนำไป ศึกษาถึงลักษณะผิวหน้าของตัวอย่างได้

ดังเช่น ผลการทดลองของ Ito, et al. <sup>[11]</sup> ดังรูปที่ 3.1 ผลลักษณะผิวหน้าฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นเกล็ดเพชร และรูปที่ 3.2 แสดงผลลักษณะผิวหน้าฟิล์มที่ได้จากการทดลองของ Liew, et al. <sup>[19]</sup> ซึ่งปริมาณก๊าซมีเทนต่อก๊าซไฮโดรเจนนั้นแตกต่างกันไปในแต่ละแผ่นรองรับ Si1, Si2, Si3 และ Si4 ใช้ปริมาณก๊าซมีเทนต่อก๊าซไฮโดรเจนในการสังเคราะห์เท่ากับ 0.8%, 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ ผลลักษณะผิวหน้าฟิล์มของ Si1 และ Si2 เป็นแบบ polygon crystalline ส่วน Si3 และ Si4 เป็นแบบดอกกะหล่ำ



รูปที่ 3.1 แสดงผลลักษณะผิวหน้าฟิล์มที่ได้จากการทดลองของ Ito, et al. <sup>[11]</sup>



รูปที่ 3.2 แสดงผลลักษณะผิวหน้าฟิล์มที่ได้จากการทดลองของ Liew, et al. <sup>[19]</sup>

### 3.2 รามานสเปกโทรสโกปี

เทคนิคทางรามานสเปกโทรสโกปี อาศัยหลักการการกระเจิงของรามาน (Raman Scattering) ซึ่งเกิดขึ้นโดยการส่งลำแสงโมโนโครมาติก ที่มีความเข้มสูงเช่น ลำแสงเลเซอร์ผ่านไป ยังตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์แล้วทำการศึกษาและวิเคราะห์แสงที่กระเจิงออกมา กระบวนการเกิดกระเจิงนั้นเกิดจากโฟตอนตกกระทบกับตัวอย่างแล้วเกิดการสูญเสียพลังงาน ที่กล่าวถึงนั้น เป็นส่วนที่ถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้างโฟตอนที่กระเจิงออกมาและกระบวนการสั้นของอะตอม การกระเจิงอาจเป็นกระบวนการแบบสโตกส์ (stokes process) หรือแอนติสโตกส์ (anti-stokes process)

#### 3.2.1 การกระเจิงแบบสโตกส์

เมื่อโฟตอนจากแสงเลเซอร์ มีพลังงาน  $h\nu_L$  ผ่านเข้าไปกระทบโมเลกุลของสารจะ เกิดอันตรกิริยาขึ้นโดยมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไป เกิดการรบกวนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน (electronic configuration) ทำให้โมเลกุลนั้นไปสู่สถานะใหม่ซึ่งเรียกว่า สถานะเสมือน (virtual state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียรเมื่อกลับสู่สถานะเสถียรจะปลดปล่อยโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ  $h\nu_1$  พลังงานที่ลดน้อยลงไปจะทำให้เกิดการสั้น หรือการหมุนควงของอะตอม ซึ่งเป็นระดับของ

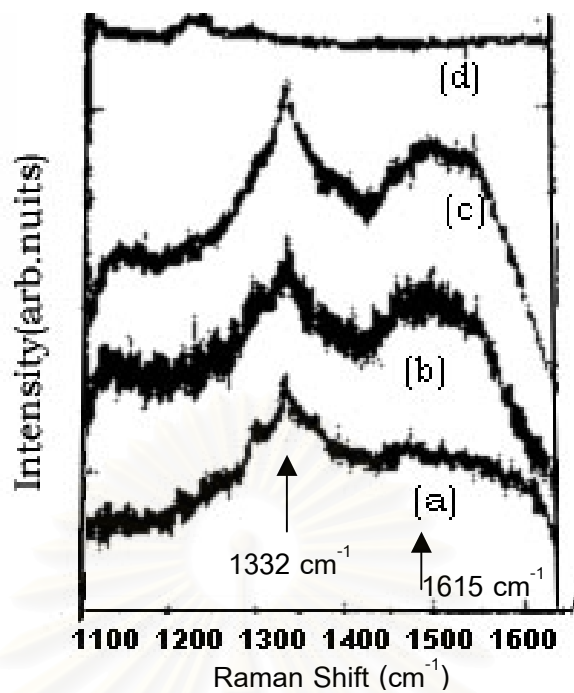
พลังงานซึ่งอยู่ในย่านของอินฟราเรด ดังนั้นพลังงานที่เหลือ  $h\nu_L - h\nu_1$  จึงเป็นพลังงานของโฟตอนที่กระเจิงโดยให้สเปกตรัมออกมาเป็นเส้นของสโตกส์ (stokes lines)

### 3.2.2 การกระเจิงแบบแอนติสโตกส์

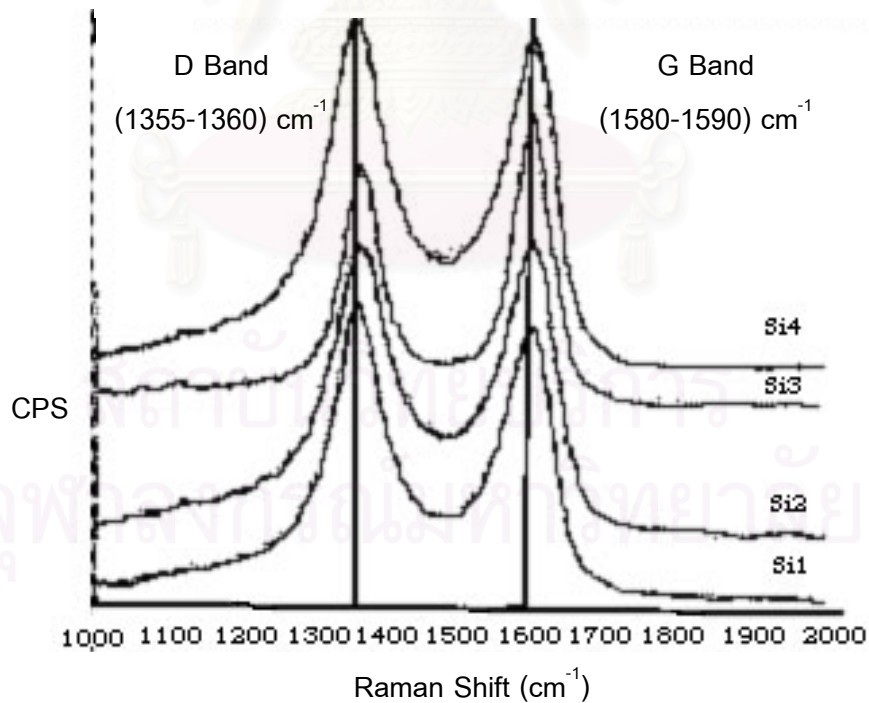
กระบวนการนี้เกิดจากกรณีที่โฟตอนที่ผ่านเข้าไปในโมเลกุลแล้วได้รับพลังงานจากโมเลกุล ทำให้โฟตอนนั้นมีพลังงานสูงขึ้น เมื่อชนกันโมเลกุลทำให้โมเลกุลเข้าสู่สถานะเสมือนสูงขึ้น และเมื่อเกิดการกระเจิงจึงให้พลังงานเป็น  $h\nu_L + h\nu_1$  เรียกว่า เส้นของแอนติสโตกส์ (anti-stokes line) โดยทั่วไปแล้วเส้นของสโตกส์ที่ได้จะมีความเข้มมากกว่าเส้นของแอนติสโตกส์ ประสิทธิภาพของการเกิดอันตรกิริยานี้ขึ้นอยู่กับอิเล็กทรอนิกส์ในโมเลกุลถูกรบกวนได้ง่ายเพียงใดคือสมบัติสภาพมีขั้วได้ (polarizability) ของสาร ถ้าสมบัติสภาพมีขั้วได้ของโมเลกุลถูกเปลี่ยนไป ในระหว่างการสั่นของโมเลกุลจะมีผลต่อการเกิด การเลื่อนเส้นของรามาน จากการเกิดอันตรกิริยานั้นคือ โมเลกุลที่ทำให้แสงโมโนโครมาติกเกิดการกระเจิง แล้วเกิดการเลื่อนเส้นของรามาน (Raman shifted lines) ได้ โมเลกุลนั้นจะต้องเกิดการสั่นแล้วทำให้สมบัติสภาพมีขั้วได้ของสารนั้นเปลี่ยนไป

การวิเคราะห์เริ่มต้นจากแสงโมโนโครมาติก ถูกปรับโฟกัสไปยังตัวอย่าง ด้วยเลนส์ และแสงกระเจิงที่ได้จะถูกบีบให้เป็นลำแสงโดยเลนส์อีกตัว เพื่อส่งไปยัง Monochrometer และความเข้มของแสงกระเจิงนั้นวัดด้วย photo multiplier ผลที่ได้จากวิธีการทางรามานสเปกโทรสโกปีจะแสดงเป็นกราฟของรามานสเปกตรัม แกนนอนแสดงผลของการเลื่อนเส้นของรามาน และแกนตั้งแสดงผลความเข้มของแสงที่กระเจิง เช่น ผลการวิเคราะห์ทางรามานสเปกโทรสโกปีจากการทดลองของ Ito, et al.<sup>[11]</sup> และจากการทดลองของ Liew, et al.<sup>[19]</sup> แสดงดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.3 และ รูปที่ 3.4 ต่างปรากฏรามานสเปกตรัมที่พีคบริเวณ  $1332\text{ cm}^{-1}$  และพีคที่บริเวณ  $1615\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งได้มีการนิยามพีคทั้ง 2 ว่าเป็น G band และ D band ตามลำดับ พีคที่บริเวณ G band เป็นพีคที่แสดงลักษณะเฉพาะของเพชร โดยมีพันธะคาร์บอนแบบ  $sp^2$  และ  $sp^3$  ปนกันอยู่ แต่หากเป็นพันธะคาร์บอนแบบ  $sp^3$  ลักษณะของพีคจะแหลมคมอย่างเด่นชัด และพีคที่บริเวณ D band เป็นพีคที่แสดงลักษณะเฉพาะของแกรไฟต์ โดยมีพันธะคาร์บอนแบบ  $sp^2$  ซึ่งลักษณะของพีคจะโค้งมนต่างจากพีคของพันธะคาร์บอนแบบ  $sp^3$



รูปที่ 3.3 แสดงผลรามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง DLC บนแผ่นซิลิคอน  
ได้จากงานวิจัยของ Ito, et al. <sup>[11]</sup>

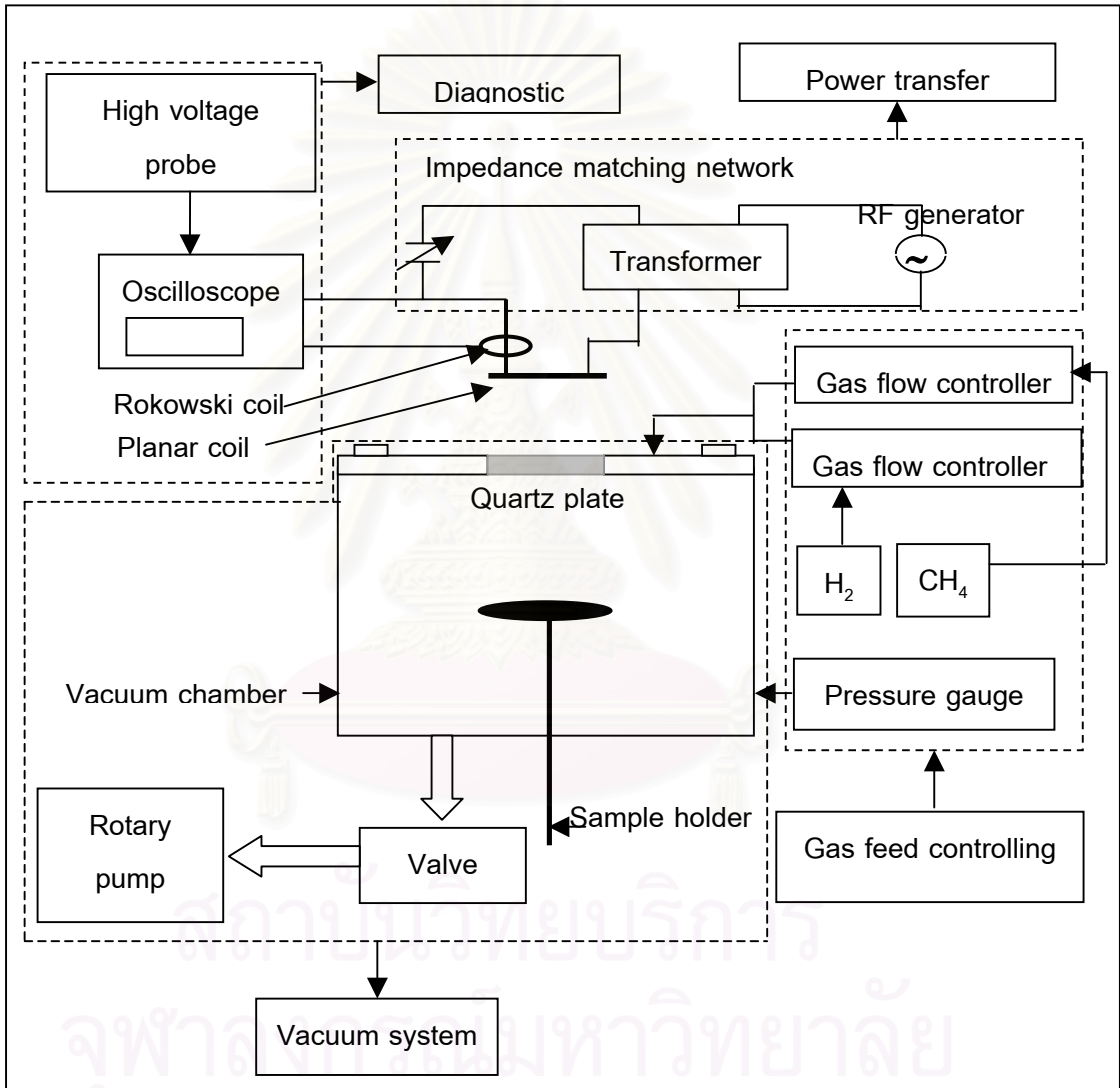


รูปที่ 3.4 แสดงผลรามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง DLC บนแผ่นซิลิคอนที่  
ได้จากงานวิจัยของ Liew, et al. <sup>[19]</sup>

## บทที่ 4

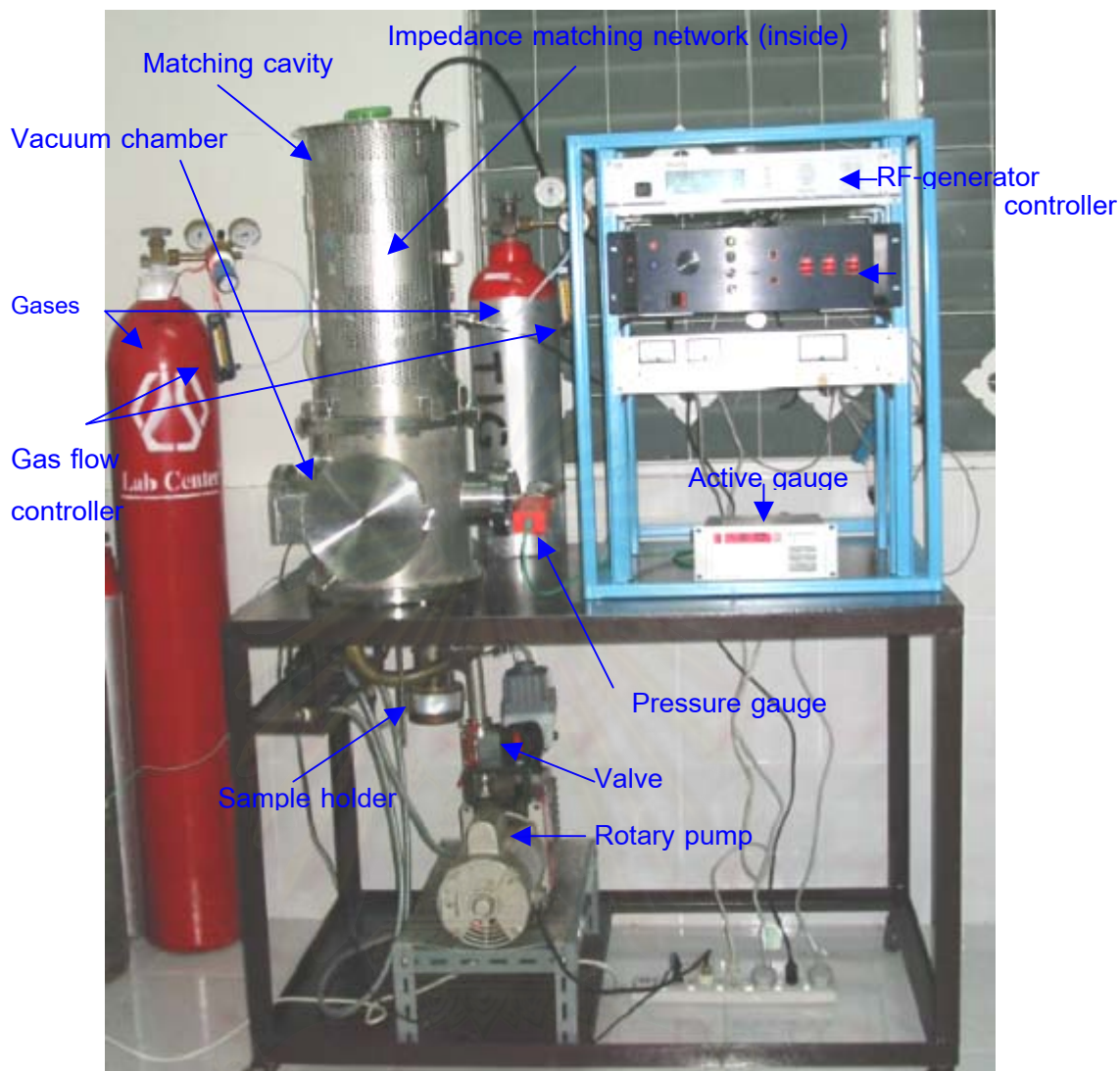
### การพัฒนาระบบ RF-PECVD แบบ ICP

ระบบ RF-PECVD แบบ ICP ที่พัฒนาขึ้นดังแผนผังที่แสดงในรูปที่ 4.1 และภาพถ่ายของระบบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แผนผังแสดงระบบ RF-PECVD แบบ ICP ที่จัดสร้าง





รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายแสดงระบบ RF-PECVD แบบ ICP ที่จัดสร้าง

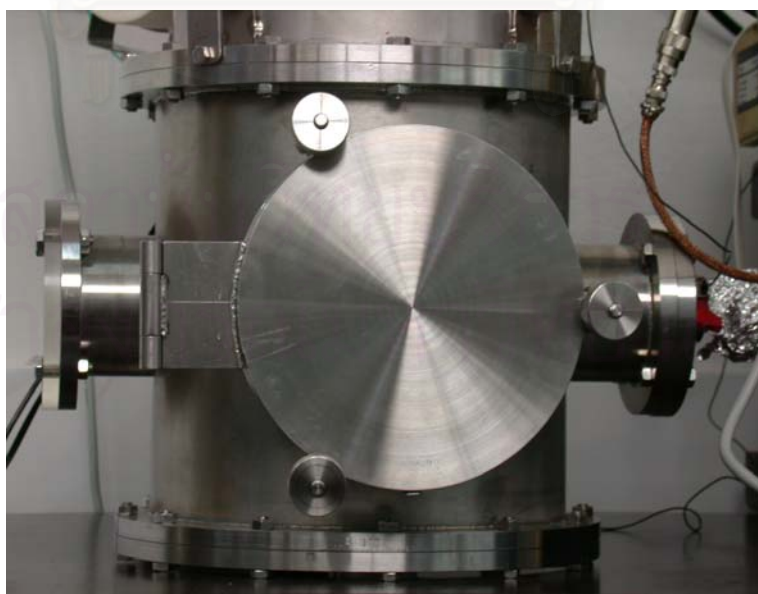
ระบบ RF-PECVD แบบ ICP ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ที่ทำงานร่วมกันคือ

- (1) ส่วนระบบสุญญากาศ (Vacuum system)
- (2) ส่วนการส่งถ่ายพลังงาน (Power transfer)
- (3) ส่วนการควบคุมการไหลของก๊าซ (Controlling of gas feed)
- (4) ส่วนอุปกรณ์การวัดค่าตัวแปรต่างๆ ในระบบ (Diagnostic)

#### 4.1 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือ ภาชนะสุญญากาศ เครื่องสูบลูโรตารี และวาล์ว ในงานวิจัยทำการกำเนิดพลาสมาในช่วงระดับความดัน 0.5 ถึง 1 torr จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบระบบสุญญากาศอย่างเหมาะสม ส่วนการคำนวณหาอัตราการรั่วของภาชนะสุญญากาศ และค่าความดันสุดท้ายของระบบสุญญากาศซึ่งเป็นค่าที่จำเป็นต้องทราบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

ภาชนะสุญญากาศเป็นส่วนสำคัญของระบบเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี หรือกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC นั้นจะเกิดขึ้นภายในภาชนะสุญญากาศ ดังนั้นการออกแบบภาชนะให้เหมาะสมกับการใช้งานจึงใช้แสดงตนเลขเป็นวัสดุหลัก เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทาน ฉีกย่อยต่อปฏิกิริยาเคมี และไม่เกิดสนิม ถ้ามีสนิมเกิดขึ้นจะทำให้ระบบสกปรก ด้านหน้าถูกออกแบบเป็นประตูสำหรับการนำชิ้นงานเข้า และออกจากระบบ ส่วนด้านล่างมีช่องต่อกับเครื่องสูบลูโรตารีโดยผ่านวาล์ว ซึ่งวาล์วจะทำหน้าที่ในการปรับอัตราการสูบลูอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศด้านข้างยังมีช่องสำหรับต่อกับอุปกรณ์อื่น ๆ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เป็นช่องต่อกับหัววัดความดันที่ปลายด้านหน้าของอุปกรณ์นี้จะอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศส่วนอีกปลายหนึ่งอยู่ด้านนอก ฉะนั้นการติดตั้งต้องมีการป้องกันการรั่วซึมบริเวณช่องว่างต่าง ๆ เพื่อไม่ให้เกิดการรั่วซึมของอากาศจากภายนอกเข้าสู่ภายในภาชนะสุญญากาศ ในส่วนนี้ได้เลือกใช้ยางโอริงเป็นหลักในการป้องกันการรั่วซึม และได้แสดงแบบการสร้างแต่ละชิ้นส่วนของภาชนะสุญญากาศไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายภาชนะสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัย

ด้านบนของภาชนะสุญญากาศถูกปิดด้วยแผ่นปิดสแตนเลส (Cover plate) ซึ่งออกแบบให้มีช่องสำหรับให้ก๊าซเข้าสู่ระบบ และรองรับการติดตั้งแผ่นควอทซ์ แผ่นควอทซ์จะทำหน้าที่เป็นหน้าต่างไดอิเล็กตริก (Dielectric window) มีสมบัติพิเศษคือ ยอมให้สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กผ่านได้ เปรียบเป็นช่องผ่านของพลังงานที่จะให้แก่ก๊าซภายในระบบนั่นเอง

## 4.2 ส่วนของการส่งถ่ายพลังงาน

ส่วนของการส่งถ่ายพลังงาน (Power transfer) ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF-generator) วงจรปรับค่าความขัด (Impedance matching network) และขดลวดระนาบ (Planar coil) รายละเอียดในแต่ละส่วนมีดังนี้

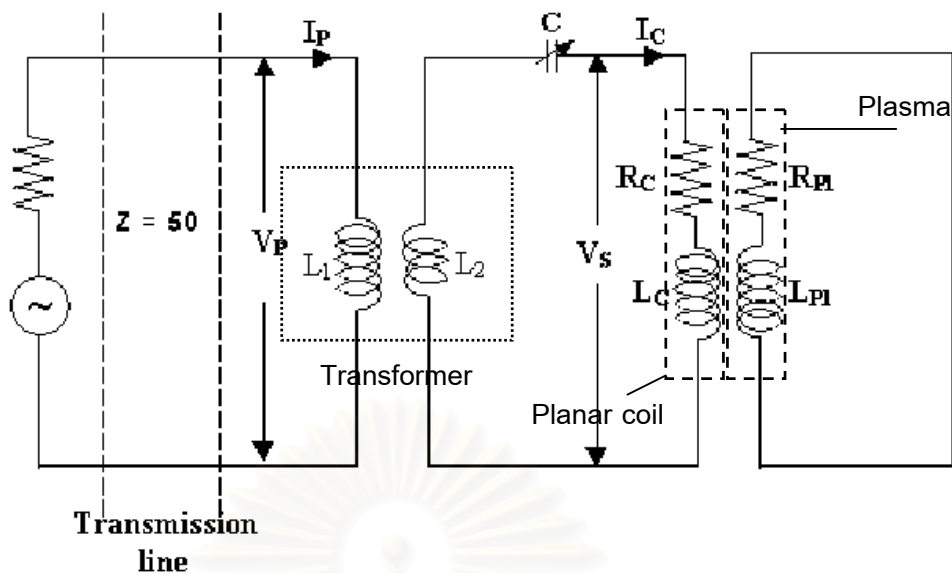
### 4.2.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ

แหล่งให้พลังงานหลักของระบบที่สร้างคือเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุยี่ห้อ Dressler รุ่น Cesar 1310 ผลิตสัญญาณที่ความถี่ 13.56 MHz ปรับกำลังสูงสุดได้ 1000 Watt จากระบบ RF-PECVD ที่สร้างขึ้นได้ออกแบบให้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ Cesar 1310 ซึ่งมีความต้านทานขาออก  $50 \Omega$  ส่งคลื่นวิทยุผ่านสายส่งสัญญาณ (coaxial) ขนาด  $50 \Omega$  ยาว 1 เมตร โดยผ่านวงจรปรับค่าความขัดเพื่อส่งสัญญาณไปยังขดลวดระนาบ สายส่งสัญญาณควรใช้ให้สั้นมากที่สุด เนื่องจากหากสายส่งสัญญาณมีขนาดยาวเกินไปจะทำให้ค่าความจุ และค่าความต้านทานของระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สายส่งสัญญาณขนาดยาว 1 m

### 4.2.2 วงจรปรับค่าความขัด

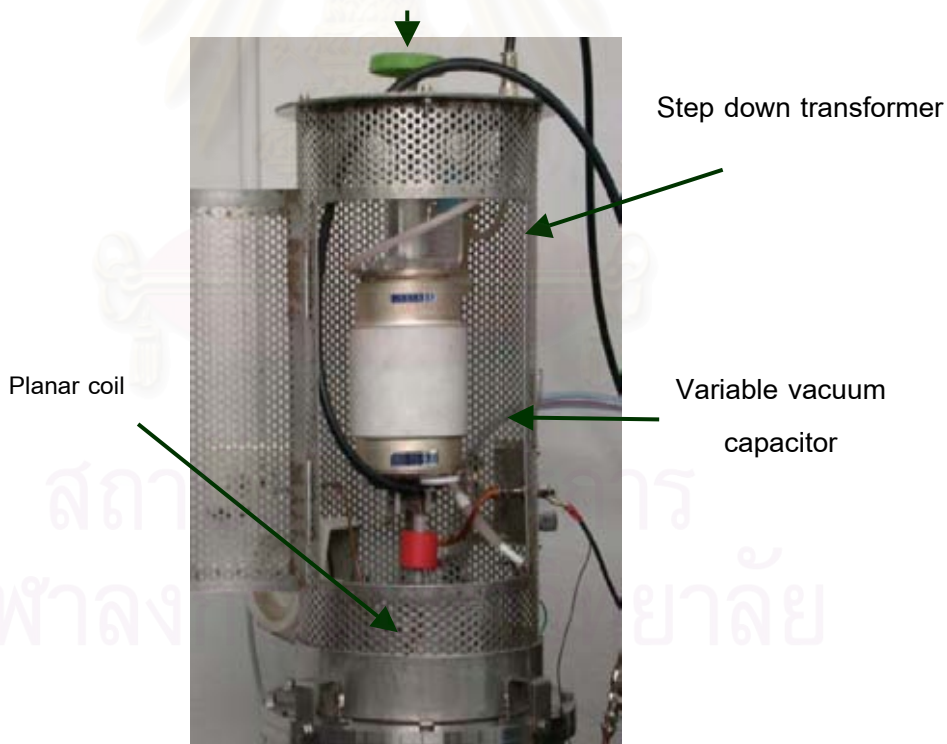
วงจรปรับค่าความขัดเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งของระบบ RF-RECVD แบบ ICP เนื่องจากเป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ และพลาสมาภายในภาชนะสุญญากาศ ดังนั้นเพื่อให้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุสามารถส่งพลังงานไปยังพลาสมาได้มากที่สุด จึงต้องปรับค่าความขัดให้ได้ค่าสัญญาณที่สะท้อนกลับจากระบบน้อยที่สุด เพื่อความกระจ่ายยิ่งยวดสามารถพิจารณาได้จากแผนผังของวงจรปรับค่าความขัดเมื่อต่อเข้ากับระบบดังรูปที่ 4.4 ภาพถ่ายแสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจรปรับค่าความขัดที่ได้สร้างขึ้นตามแผนผัง และการคำนวณตามที่แสดงไว้ดังรูปที่ 4.5





รูปที่ 4.4 แผนผังวงจรปรับค่าความขัดในระบบ RF-PECVD แบบ ICP

Tuning knob of variable vacuum capacitor



รูปที่ 4.5 ภาพแสดงวงจรปรับค่าความขัดที่สร้างขึ้นสำหรับระบบ RF-PECVD แบบ ICP

วงจรปรับค่าความขัดประกอบด้วย 3 ส่วนคือ หม้อแปลง ตัวเก็บประจุปรับค่าได้ และขดลวดระนาบ หม้อแปลงที่ใช้ในระบบเป็นหม้อแปลงลง (Step down transformer) แบบ 7:1 สร้างโดยอาศัยการคำนวณจากทฤษฎีของหม้อแปลง เพื่อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งานเพราะค่าความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุมีค่าความต้านทานขาออก  $50 \Omega$  และพลาสมาเป็นตัวนำที่ดีมาก จึงให้มีค่าความต้านทานเท่ากับ  $1 \Omega$  เพื่อความสะดวกในการสร้างส่วนของวงจรปรับค่าความขัดของระบบ

$$a = \frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (4.1)$$

โดยที่

- $a$  = อัตราส่วนของการแปลง  
 $N_p$  = จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ  
 $N_s$  = จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

$$a^2 = \frac{V_p / I_p}{V_s / I_s} \quad (4.2)$$

นิยาม  $Z_p = V_p / I_p$  และ  $Z_L = V_s / I_s$

นั่นคือ ปรับค่าความขัดของวงจรที่มีค่าเหมาะสมต่อไป โดยที่

- $Z_p$  = อิมพีแดนซ์ของขดลวดปฐมภูมิ  
 = ค่าความต้านทานขาออกของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ  
 =  $50 \Omega$   
 $Z_L$  = อิมพีแดนซ์ของโหลด  
 = ค่าความต้านทานของพลาสมาที่ใช้ในการทดลอง =  $1 \Omega$

ดังนั้นจะได้อัตราส่วนของการแปลง ( $a$ ) ในการสร้างหม้อแปลงมีค่าประมาณ 7

เมื่อหม้อแปลงทำการแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าสัญญาณที่แปลงจะถูกส่งต่อไปยังตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ขนาด 30-800 pF เพื่อส่งสัญญาณไปให้ขดลวดระนาบ ซึ่งตัวเก็บประจุสุญญากาศแบบปรับค่าได้ (Variable vacuum capacitor) จะถูกปรับค่าความจุเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ โดยทำให้ค่าความขั้ด  $X_L = X_C$  ทำให้กระแสที่ไหลไปยังขดลวดระนาบนั้นมีค่าสูงสุด ขดลวดระนาบทำหน้าที่เป็นเสาอากาศในการส่งคลื่นพลังงานแก่พลาสมาภายในระบบ วงจรปรับค่าความขั้ดจะถูกติดตั้งไว้ภายในอุปกรณ์ป้องกันกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุ โดยออกแบบเป็นตะแกรงสแตนเลส และมีประตูอยู่ด้านหน้า เรียกว่า Matching cavity เพื่อป้องกัน RF stray ที่เกิดขึ้นจากส่วนของวงจรปรับค่าความขั้ดไปรบกวนการทำงานของเครื่องมือวัดที่มีส่วนประกอบเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ภายนอกได้ แผนภาพโครงสร้างของ Matching cavity ดังแสดงในรูปที่ ก.7 ในภาคผนวก ก

#### 4.2.3 ขดลวดระนาบ

ขดลวดระนาบทำขึ้นจากท่อทองแดงกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 มม. นำมาขดเป็นวงซ้อนกันดังแสดงในรูปที่ 4.6 นำขดลวดระนาบทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำโดยใช้เครื่องวัด Precision LCR ที่ความถี่ต่าง ๆ ป้อนให้แก่ขดลวดระนาบ ทำการบันทึกค่าความต้านทานเชิงความเหนี่ยวนำของขดลวดระนาบเมื่อความถี่เปลี่ยนค่าไป จากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวไปสร้างกราฟระหว่างความต้านทานเชิงความเหนี่ยวนำ ( $X_L$ ) กับความถี่ ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งค่าความชันของกราฟดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำได้เท่ากับ 35  $\mu\text{H}$  วิธีการคำนวณได้แสดงไว้ในส่วนท้ายของหัวข้อนี้



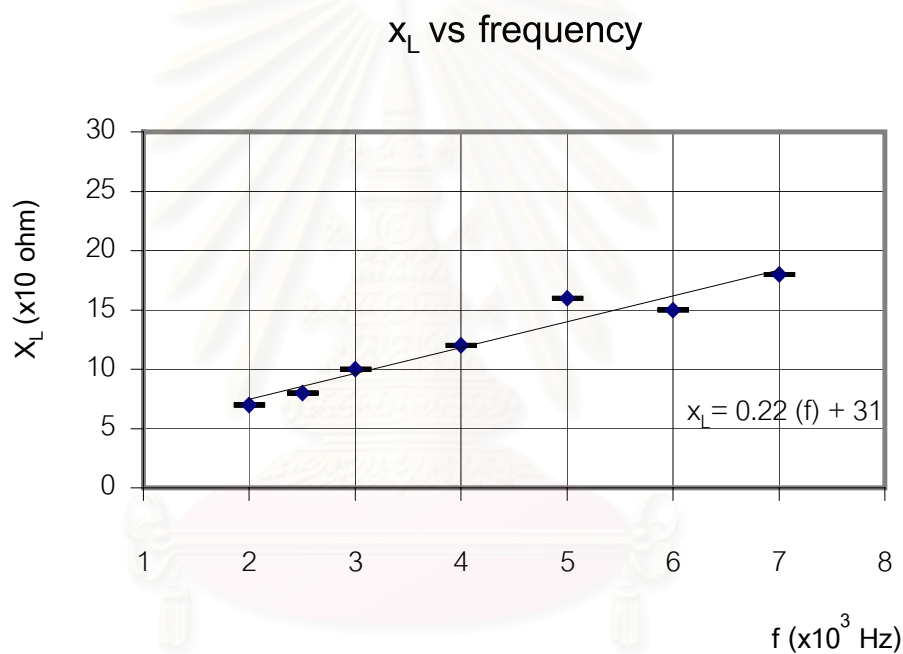
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายแสดงขดลวดระนาบ

ค่าความขัดของขดลวดแสดงดังสมการ

$$X_L = 2\pi fL \quad (4.4)$$

เมื่อ

- $X_L$  = ความต้านทานเชิงความเหนี่ยวนำของขดลวดระนาบ  
 $f$  = ความถี่จากเครื่องวัด Precision LCR  
 $L$  = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดระนาบ



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านเชิงความเหนี่ยวนำของขดลวดระนาบ ( $X_L$ ) และความถี่ที่ได้รับ ( $f$ )

จากกราฟที่ 4.7 หาค่าความชันได้เป็น 0.22 นำไปคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดระนาบเป็น 35  $\mu\text{H}$

$$\begin{aligned} L &= 0.22 / [2(1000)\pi] \\ &= 35 \mu\text{H} \\ \therefore L &= 35 \mu\text{H} \end{aligned}$$

### 4.3 ส่วนการควบคุมการไหลของก๊าซ

ส่วนนี้เป็นส่วนที่ประกอบด้วยหัววัดความดัน ตัวควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (Gas flow controller) วาล์ว และสารตั้งต้นสถานะก๊าซ ในงานวิจัยเป็นการสร้างระบบเพื่อใช้สังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ดังนั้นสารตั้งต้นจึงเป็นก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทน เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซที่เข้าสู่ระบบมีผลต่อความดันของระบบ และยังเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของฟิล์มบาง<sup>[9,10]</sup> ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซเข้าสู่ระบบ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (Gas flow controller) เป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของก๊าซก่อนเข้าสู่ระบบ โดยแสดงค่าในหน่วย sccm (Standard center cubic per minute) หรือ ml/min

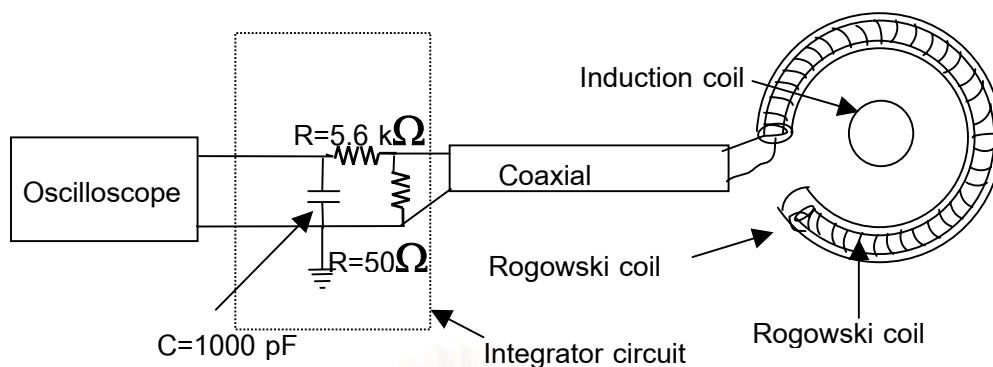
ตัวควบคุมอัตราการไหลสำหรับก๊าซไฮโดรเจนสามารถปล่อยก๊าซไฮโดรเจนปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 284 ml/min และตัวควบคุมอัตราการไหลสำหรับก๊าซมีเทนนั้นสามารถปล่อยก๊าซมีเทนปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 16.8 ml/min ซึ่งวางอยู่ระหว่างถังก๊าซ และท่อสามทางหรือตัวกักแก๊สผสม ซึ่งก๊าซจะถูกปล่อยออกจากถังผ่านตัวควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไปยังตัวกักก๊าซผสม ตัวกักก๊าซผสมเป็นส่วนที่ก๊าซทั้งสองชนิดได้ผสมกันก่อนเข้าสู่ระบบโดยมีวาล์วเป็นตัวควบคุมปริมาณการไหลของก๊าซผสมก่อนเข้าสู่ระบบอีกครั้ง หัววัดความดันเป็นตัวบอกค่าความดันภายในระบบ และในงานวิจัยนี้ได้ใช้หัววัดแบบพิรานีซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของความต้านทานของขดลวดที่เปลี่ยนแปลงไปตามการนำความร้อนของก๊าซ ช่วงความดันที่หัววัดแบบพิรานีสามารถวัดได้คือ ช่วง 760 ถึง  $1 \times 10^{-3}$  torr

### 4.4 ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้หาค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบ

สำหรับงานวิจัยนี้ในส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบ ประกอบด้วย Rogowski coil, High voltage capacitive probe และเครื่องวัดระดับสัญญาณ (Oscilloscope)

#### 4.4.1 Rogowski coil

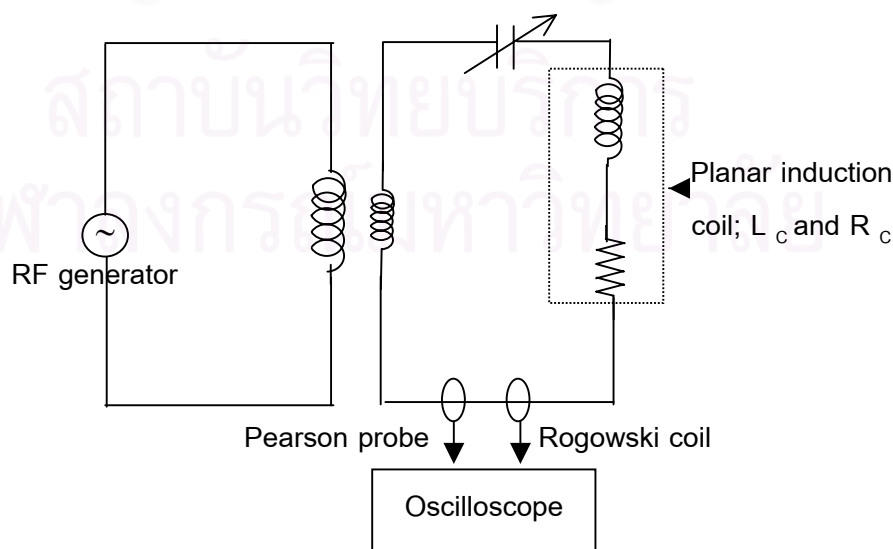
โดยทั่วไป Rogowski coil เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่ากระแสไฟฟ้าสลับ Rogowski coil มีลักษณะเป็นวงของขดลวดทองแดงที่ขดเป็นเกลียว (Helical coil) หลายรอบโดยมีแกนเป็นอากาศ (Air core) ทำให้ Rogowski coil นั้นมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำจึงสามารถตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ดี<sup>[12]</sup> ดังนั้นสามารถนำไปสวมเข้ากับบริเวณที่ต้องการวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้โดยไม่มีการรบกวนต่อระบบ ดังรูปที่ 4.8 ในงานวิจัยนี้ใช้ Rogowski coil ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดระนาบ



รูปที่ 4.8 แผนผังโครงสร้างของ Rogowski coil และวงจรที่ร่วมในการวัดค่ากระแส

สำหรับการทดลองในด้านพลาสมานั้น ค่ากระแสที่ใช้ในระบบจะมีปริมาณมาก และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว วิธีที่ง่ายที่สุดในการวัดค่ากระแสของระบบ RF-PECVD แบบ ICP คือ การวัดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดระนาบโดยใช้ Rogowski coil เป็นตัววัดค่ากระแสไฟฟ้างกล่าว Rogowski coil จะทำหน้าที่เสมือนหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current transformer) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วัดได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด<sup>[19]</sup>

ก่อนการใช้งานอุปกรณ์ด้านการวัดจะต้องผ่านการสอบเทียบค่าการวัดกับ อุปกรณ์มาตรฐานเสียก่อน เพื่อให้การวัดมีค่าที่ถูกต้อง งานวิจัยนี้ก็เช่นเดียวกัน Rogowski coil ที่ ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ผ่านการสอบเทียบค่าการวัดกับ Pearson probe รุ่น 150 ผลิตโดย Pearson electronics co., Ltd ซึ่งวิธีการสอบเทียบค่าการวัดได้แสดงเป็นแผนผัง วงจรดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงแผนผังวงจรสำหรับการสอบเทียบค่าวัดของ Rogowski coil



ติดตั้งอุปกรณ์ทั้งสองเข้ากับระบบ ดังรูปที่ 4.9 โดยเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ปรับค่าได้ ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตาม ในแต่ละค่าของความจุไฟฟ้าเราจะวัดค่าศักย์ไฟฟ้าขาออก (Output voltage) <sup>[19]</sup> โดย Rogowski coil และ Pearson probe แสดงผลผ่านหน้าจอออกซิลโดสโคป ค่าศักย์ไฟฟ้าขาออกที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ของ Pearson probe และค่าศักย์ไฟฟ้าขาออก Rogowski coil

| ศักย์ไฟฟ้าที่วัดโดย<br>Pearson probe<br>$V_P$ (Volt) <sub>pp</sub> | ศักย์ไฟฟ้าที่วัดโดย<br>Rogowski coil<br>$V_R$ (Volt) <sub>pp</sub> |
|--|--|
| 2.56   | 11.2   |
| 2.72   | 12.0   |
| 3.04   | 14.0   |
| 3.28   | 14.4   |
| 3.60   | 16.4   |
| 4.24   | 18.8   |
| 4.72   | 19.6   |
| 5.04   | 21.2   |
| 5.36   | 23.2   |
| 5.84   | 24.4   |
| 6.32   | 27.2   |

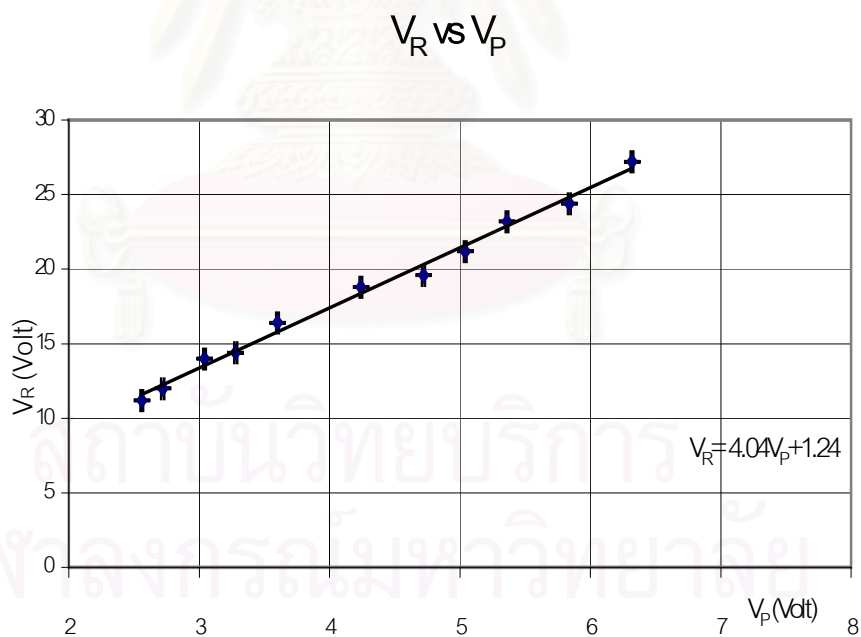
จากสมการ

$$I = K_P V_P = K_R V_R \quad (4.5)$$

เมื่อ

- $I$  = กระแสไฟฟ้า
- $K_P$  = ค่าแฟคเตอร์ในการสอบเทียบของ Pearson probe = 2 A/Volt
- $K_R$  = ค่าแฟคเตอร์ในการสอบเทียบของ Rogowski coil
- $V_P$  = ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จาก Pearson probe
- $V_R$  = ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จาก Rowgowski coil

จากนั้นนำข้อมูลตามตารางที่ 4.1 ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของ Rogowski coil กับศักย์ไฟฟ้าของ Pearson probe ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของ Rogowski coil ( $V_R$ ) กับศักย์ไฟฟ้าของ Pearson probe ( $V_P$ )



จากกราฟในรูปที่ 4.10 เราสามารถคำนวณค่าความชันได้เป็น 4.04 ดังนั้น

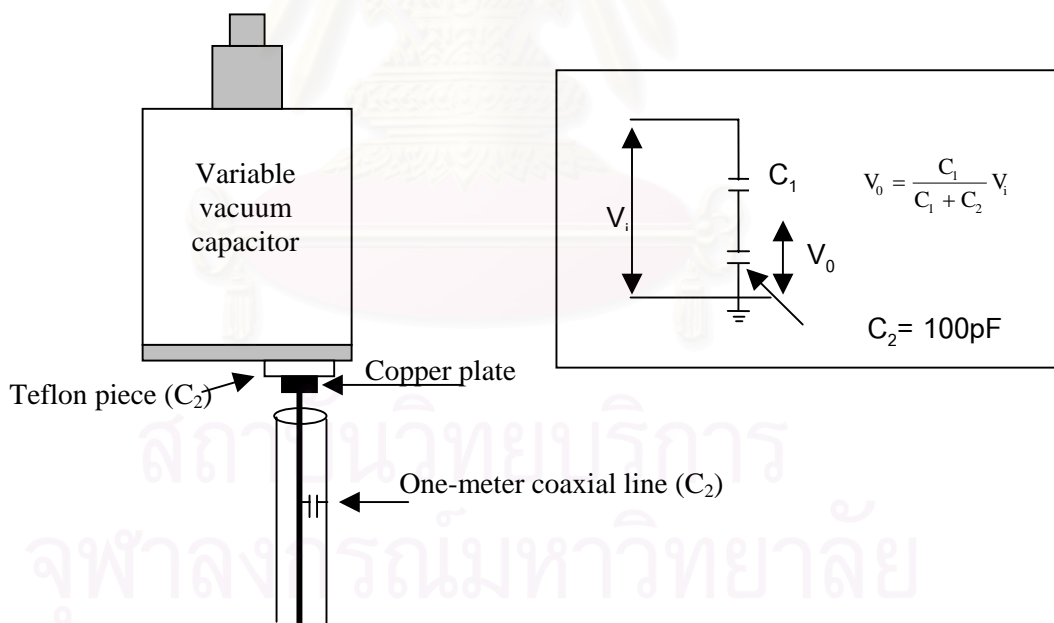
$$\text{Slope} = V_R / V_P \quad (4.6)$$

$$\therefore K_R = 0.495 \text{ A/Volt}$$

แพคเตอร์ในการสอบเทียบค่าวัดของ Rogowski coil ( $K_R$ ) มีค่าเท่ากับ 0.495 A/Volt ดังนั้นเมื่อทำการวัดค่ากระแสด้วย Rogowski coil แล้วต้องทำการคูณค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ด้วย 0.495 A/Volt ซึ่งผลที่ได้เป็นกระแสในหน่วย A <sup>[19]</sup>

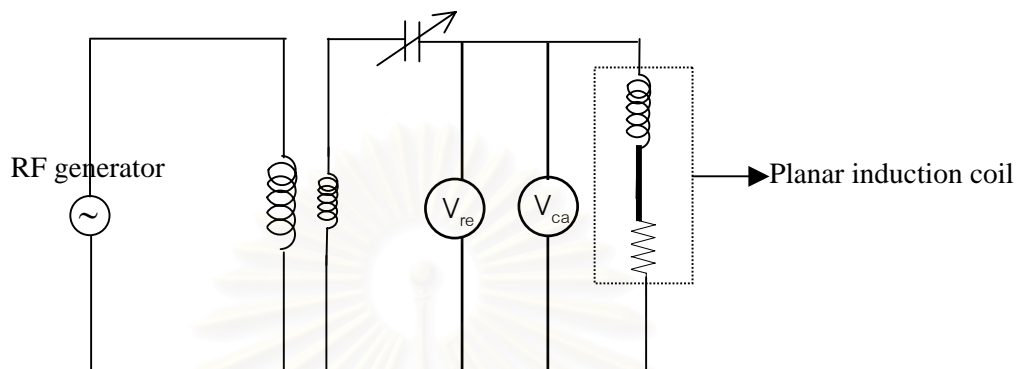
#### 4.4.2 High voltage capacitive probe

งานวิจัยนี้ได้สร้าง High voltage capacitive probe ขึ้นเพื่อใช้ในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของขดลวดระนาบ (Planar coil) ประกอบด้วย สายส่งสัญญาณ (coaxial) ขนาด 1 เมตร และแผ่นเทฟลอน ประกอบกันดังรูปที่ 4.11 โดยใช้หลักการของ voltage divider เพื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ก่อนแสดงผลที่หน้าจอออสซิลโลสโคป



รูปที่ 4.11 โครงสร้างของ High voltage capacitive probe

High voltage capacitive probe เป็นอุปกรณ์การวัดที่สร้างขึ้นเองจึงต้องมีการสอบเทียบค่าวัดกับอุปกรณ์มาตรฐาน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ High voltage resistive probe ของ Agilent รุ่น 10076A ดังรูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งในการวัด และแผนผังวงจรในการสอบเทียบค่าวัดของ High voltage capacitive probe



รูปที่ 4.12 แสดงแผนผังวงจรการสอบเทียบค่าวัดของ High voltage capacitive probe โดยใช้ High voltage resistive probe เป็นตัวสอบเทียบ

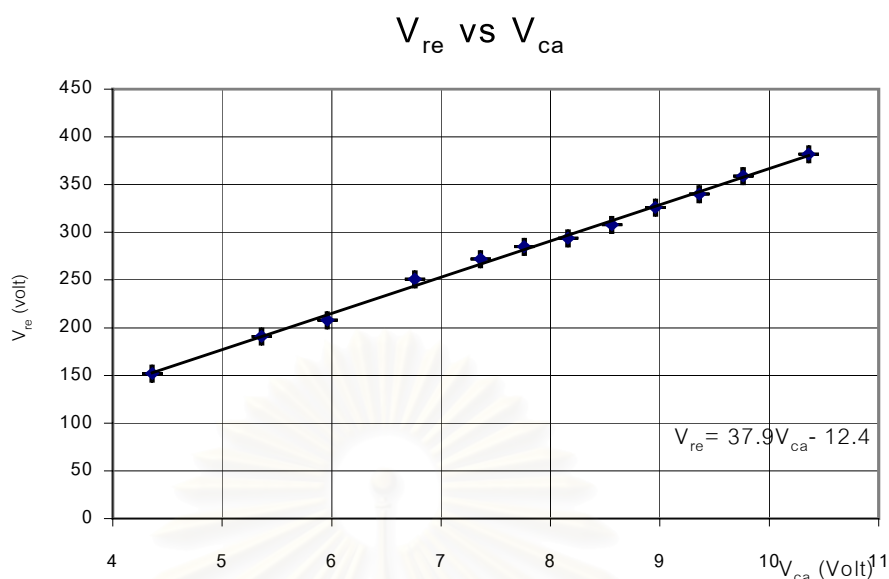
โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.12 การติดตั้ง High voltage capacitive probe และ High voltage resistive probe เข้ากับระบบเพื่อทำการสอบเทียบค่าวัดของ High voltage capacitive probe โดยต่อ High voltage resistive probe ขนานกับ High voltage capacitive probe แล้วนำไปต่อขนานกับขดลวดระนาบ (Planar coil) จากนั้นทำการปรับค่ากำลังไฟฟ้าของ ความถี่คลื่นวิทยุ และบันทึกผลค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จาก High voltage capacitive probe และค่า ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จาก High voltage resistive probe โดยแสดงผลการวัดผ่านหน้าจอ ออสซิลโลสโคป ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ศักย์ไฟฟ้าที่วัดโดย High voltage resistive probe และ High voltage capacitive probe

| ศักย์ไฟฟ้าที่วัดโดย<br>resistive probe<br>$V_{re}$ (Volt) | ศักย์ไฟฟ้าที่วัดโดย<br>capacitive probe<br>$V_{ca}$ (Volt) |
|---|--|
| 152   | 4.36   |
| 191   | 5.36   |
| 208   | 5.96   |
| 251   | 6.76   |
| 272   | 7.36   |
| 285   | 7.76   |
| 294   | 8.16   |
| 308   | 8.56   |
| 326   | 8.96   |
| 340   | 9.36   |
| 359   | 9.79   |
| 383   | 10.36  |

จากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จาก High voltage resistive probe กับศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จาก High voltage capacitive probe ผลที่ได้นำไปสร้างเป็นกราฟดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของ High voltage resistive probe ( $V_{re}$ ) กับศักย์ไฟฟ้าของ High voltage capacitive probe ( $V_{ca}$ )

พิจารณารูปที่ 4.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทั้งสองอุปกรณ์วัดได้นั้นเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน ดังนั้นผลความสอดคล้องซึ่งหาจากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.13

จากสมการ

$$V = V_{re} = K_{ca} V_{ca} \quad (4.7)$$

เมื่อ

$V_{re}$  = ศักย์ไฟฟ้าที่วัดด้วย High voltage resistive probe

$V_{ca}$  = ศักย์ไฟฟ้าที่วัดด้วย High voltage capacitive probe

$K_{ca}$  = ค่าแฟคเตอร์ในการสอบเทียบของ High voltage capacitive probe

ดังนั้นค่าแฟคเตอร์ในการสอบเทียบของ High voltage capacitive probe คือ

$$\therefore K_{ca} = 37.9$$

ค่าที่ได้จะนำไปคูณกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่แสดงบนหน้าจอของซิลิโคนไดโปกก็จะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าจริงที่วัดได้

## ขั้นตอนการทดลอง ผลสรุป และอภิปราย

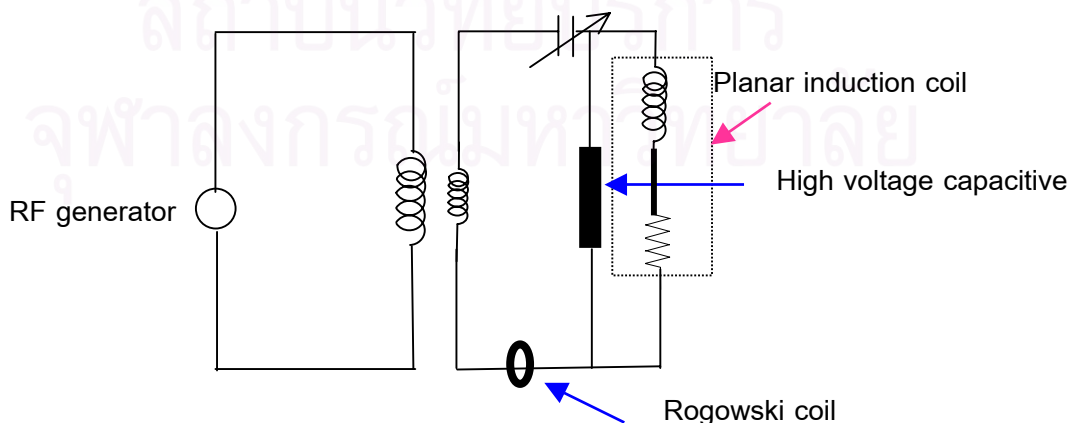
ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบระบบ RF-PECVD แบบ ICP ที่จัดสร้างขึ้น ผลการทดสอบพิจารณาได้จากลักษณะสัณฐานไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้า (I-V characteristic) ของระบบ ซึ่งตัวกลางพลาสมา (plasma media) ที่ใช้ในระบบเป็นก๊าซ 2 ชนิดได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซอาร์กอน เพื่อหาความสัมพันธ์ของลักษณะสัณฐาน I-V ของระบบในการใช้งานสังเคราะห์ฟิล์มบางต่อไป ส่วนที่สองเป็นการนำระบบดังกล่าวไปใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร และทำการวิเคราะห์ฟิล์มที่ได้ด้วย วิธีการที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

### 5.1 การทดสอบลักษณะสัณฐาน I-V ของระบบ RF-PECVD แบบ ICP

กราฟลักษณะสัณฐาน I-V นั้นเป็นความสัมพันธ์ที่แสดงถึงลักษณะเฉพาะของระบบ ในงานวิจัยนี้จะแสดงค่าดังกล่าวด้วยกระแสไฟฟ้า (I) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ของขดลวดระนาบภายในระบบ

#### 5.1.1 การดำเนินการทดสอบลักษณะสัณฐาน I-V ของระบบ RF-PECVD แบบ ICP

ในการทดลองนี้เราใช้ Rogowski coil เป็นอุปกรณ์ในการตรวจรับค่ากระแสของขดลวดระนาบ และ High voltage capacitive probe เพื่อตรวจรับค่าศักย์ไฟฟ้าของขดลวดระนาบโดยนำ Rogowski coil สวมเข้ากับขาข้างใดข้างหนึ่งของขดลวดระนาบ และนำ High voltage capacitive probe ต่อขนานกับขดลวดระนาบดังแผนผังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงแผนผังการวัด กระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าของขดลวดระนาบ

เริ่มต้นโดยการสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศไปที่ความดัน  $1.5 \times 10^{-2}$  torr จากนั้นจึงปล่อยก๊าซซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางพลาสมาเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยทำการควบคุมความดันไว้ที่ 0.5 torr แล้วจึงให้ส่วนของการทำงานโดยป้อนกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุ (RF power) ให้แก่ระบบ โดยเริ่มปรับกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุจากช่วง 0-350 วัตต์ ทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าของขดลวดระนาบในแต่ละค่ากำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุปรับเปลี่ยนไป จากนั้นจึงค่อย ๆ ทำการปรับค่ากำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุลดลงมายังค่า 0 วัตต์ แล้วทำการบันทึกผลเช่นเดียวกัน

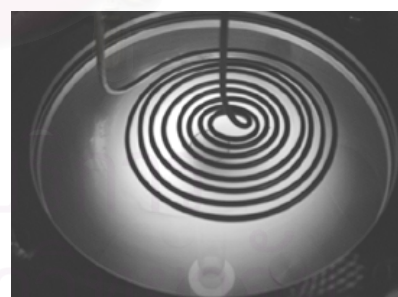
### 5.1.2 ผลการทดลอง และการอธิบายผลของความสัมพันธ์ลักษณะส่อ I-V ของระบบ

จากการทดสอบลักษณะส่อ I-V ของระบบในช่วงกำลังที่ใช้ สังเกตเห็นด้วยตาเปล่าพบความเปลี่ยนแปลงของพลาสมาที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็น 2 ระดับอย่างชัดเจน ระดับแรกเกิดที่ค่ากำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุต่ำ ๆ พลาสมามีลักษณะกระจายตัว และมีความสว่างไม่มากนัก ส่วนระดับที่สองเกิดขึ้นที่ค่ากำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุที่สูงกว่าระดับแรก พลาสมาที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นลูกบอลกลม และมีความสว่างมากกว่า

จากเอกสารทางวิชาการหลายฉบับได้นิยามพลาสมาที่เกิดขึ้นในระดับแรกว่าเป็น Capacitive mode หรือ E-mode และระดับที่สอง นิยามว่าเป็นพลาสมาในระดับ Inductive mode หรือ H-mode <sup>[11,13]</sup> ไม่ว่าตัวกลางพลาสมาจะเป็นก๊าซไฮโดรเจน หรือก๊าซอาร์กอน พลาสมาก็มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบเดียวกัน ดังรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 ดังนี้

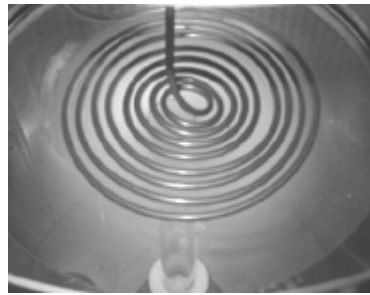


E-mode



H-mode

รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายแสดงอาร์กอนพลาสมาในระดับ E-mode และระดับ H-mode ตามลำดับ



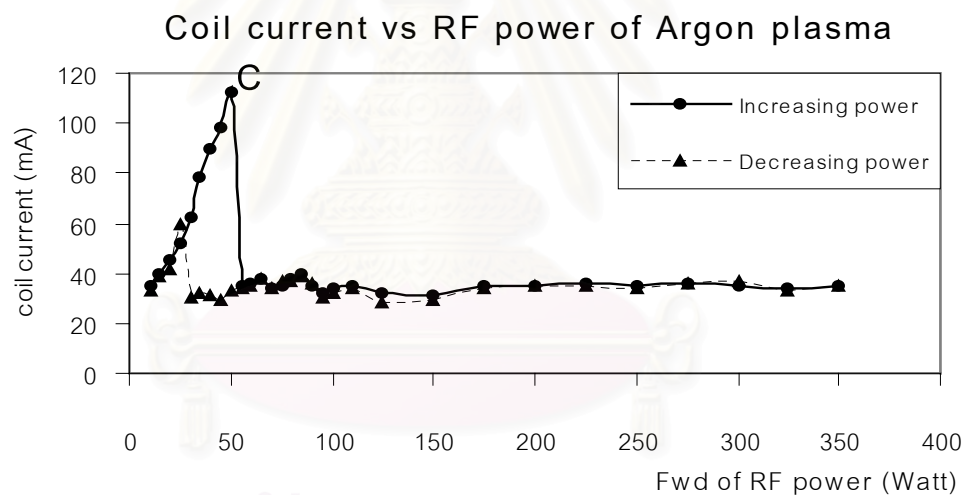
E-mode



H-mode

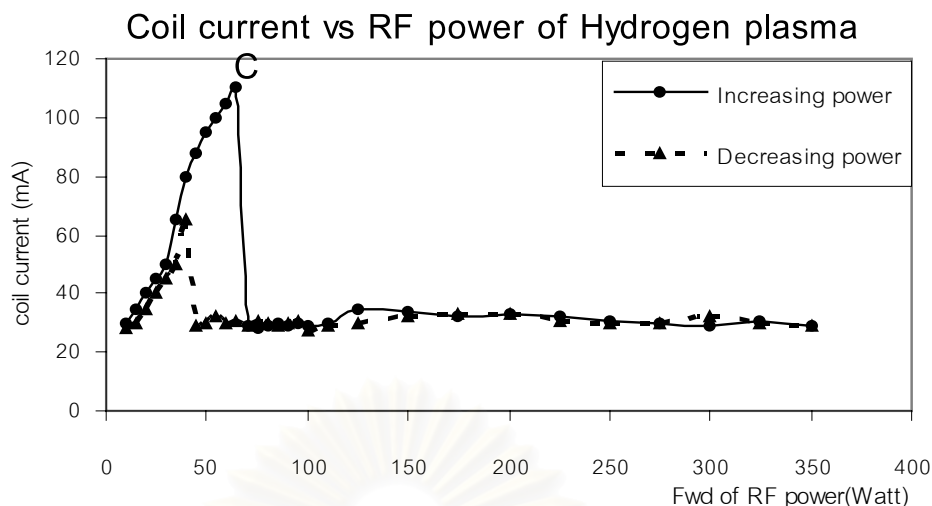
รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายแสดงไฮโดรเจนพลาสมาในระดับ E-mode และระดับ H-mode ตามลำดับ

จากผลของกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าของขดลวดระนาบที่ได้สามารถนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าของขดลวดระนาบกับกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุ แสดงดังรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุสำหรับอาร์กอนพลาสมา

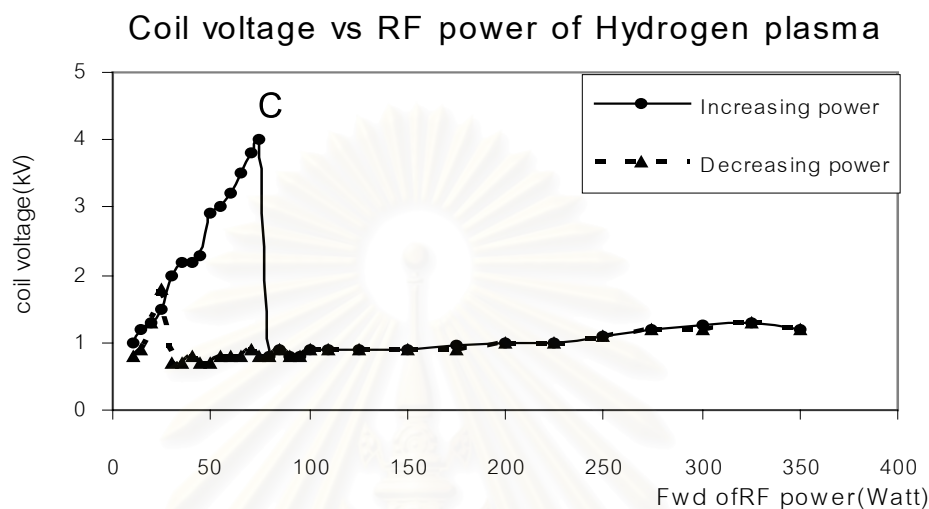




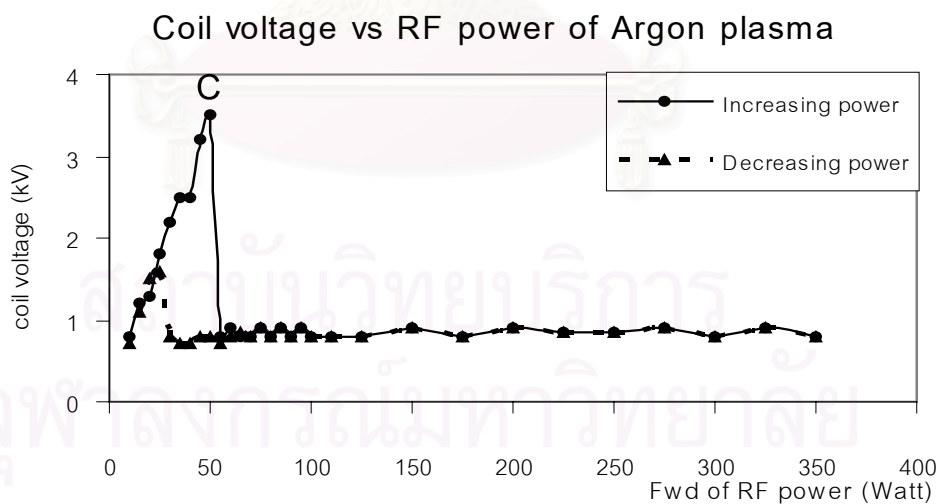
รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุสำหรับไฮโดรเจนพลาสมา

พิจารณาจากรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 พบว่าลักษณะที่ได้สอดคล้องกับระดับการเปลี่ยนแปลงของพลาสมาทั้ง 2 ระดับ ส่วนในรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 หากพิจารณาจุด C เป็นจุดของการเปลี่ยนระดับของพลาสมา ซ้ายมือของกราฟจะเป็นพลาสมาในระดับ E-mode และส่วนขวามือเป็นพลาสมาในระดับ H-mode อธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าช่วงความถี่คลื่นวิทยุให้แก่ระบบ กระแสที่ไหลในขดลวดระนาบจะมีค่าเพิ่มตาม ดังปรากฏเป็นลักษณะที่สามารถประมาณได้ในแบบเชิงเส้น ในด้านซ้ายของจุด C คือสนามไฟฟ้าที่เกิดจากขดลวดระนาบจะถ่ายทอดพลังงานไปยังโมเลกุลของก๊าซเป็นส่วนใหญ่ ทำให้โมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานมากพอที่จะแตกตัวเข้าสู่สถานะของพลาสมา ส่วนสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นยังไม่มีผลต่อระบบ พลาสมาในสถานะนี้เรียกว่าพลาสมาในระดับ E-mode<sup>[11,19]</sup> เมื่อทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุกระทั่งเลยจุด C จะพบว่ากระแสที่ไหลภายในขดลวดระนาบนั้นมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แม้จะทำการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุมากขึ้นก็ตาม ค่ากระแสที่ไหลภายในขดลวดระนาบนั้นยังคงมีค่าเกือบคงที่ไม่ต่างจากเดิมมากนัก เนื่องจากผลการเหนี่ยวนำร่วม (Mutual induction) ที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดระนาบกับพลาสมา นั้นเป็นไปตามกฎของเลนส์ (Lenz's law) และด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้ายังผลที่ขดลวดระนาบมีค่าเกือบคงที่ในช่วงที่สถานะพลาสมาเป็น H-mode ทำให้พลาสมาในระดับ H-mode มีความหนาแน่นของพลาสมาสูงกว่าระดับ E-mode หากเพิ่มกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุมากขึ้นพบว่าความสว่างของพลาสมา ก็ยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อค่อย ๆ ลดค่ากำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุลงจนถึง 0 วัตต์ สังเกตพบว่าความสว่างของพลาสมาจะลดลงตามค่ากำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุที่ลดลง และ

เมื่อถึงค่ากำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุค่าหนึ่ง สังเกตได้จากกราฟจะอยู่บริเวณใกล้เคียงจุด C ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดจะเพิ่มขึ้นทันทีนั่นคือ พลาสมาได้มีการเปลี่ยนระดับจาก H- mode ไปเป็น E- mode



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุสำหรับอาร์กอนพลาสมา



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุสำหรับไฮโดรเจนพลาสมา

พิจารณารูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 มีลักษณะกราฟที่คล้ายคลึงกับรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 นั่นคือมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน และสามารถอธิบายได้ในลักษณะดังกล่าวเช่นกัน กราฟลักษณะส่อ I-V ของระบบทั้งหมดที่ได้แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ Hysteresis

ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการทดลองของ Thien<sup>[14]</sup> และผลการทดลองของ Maurice, et al.<sup>[15]</sup> พบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพลาสมา 2 ระดับเช่นกัน และลักษณะส่อ I-V ของระบบต่างแสดงปรากฏการณ์ Hysteresis ในแบบเดียวกัน

## 5.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC

หลังจากทำการหาลักษณะส่อ I-V ของระบบเรียบร้อยแล้ว ได้นำระบบมาทำการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC บนแผ่นอะลูมิเนียม และกระจกสไลด์

### 5.2.1 การดำเนินงานในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC

จากการค้นคว้าข้อมูลเอกสารเชิงวิชาการ และงานตีพิมพ์หลายฉบับ<sup>[20,21]</sup> พบว่าการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ที่ดีนั้น ต้องมีกระบวนการเตรียมผิวหน้าของแผ่นรองรับที่เหมาะสมซึ่งมีหลายวิธีด้วยกัน อาทิ Agitation, Spinning treatment และ Scratch treatments<sup>[7]</sup> เป็นต้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี scratch treatment โดยต้องเตรียมผิวหน้าแผ่นรองรับก่อนเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์ ทำการขัดผิวหน้าแผ่นรองรับด้วยผงเพชร (Natural diamond powder) ขนาด 0.5  $\mu\text{m}$  และผงเพชรที่ค้างอยู่บนผิวหน้าแผ่นรองรับจะถูกเป่าออกด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำแผ่นรองรับดังกล่าวมาทำความสะอาดด้วยสารละลายอะซิโตน และสารละลายเอทานอล ตามลำดับ สุดท้ายนำแผ่นรองรับดังกล่าวไปผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยน้ำดีไอออนไนซ์ (deionized) ในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที จึงนำแผ่นรองรับไปซังน้ำหนัก และบันทึกผล

เมื่อแผ่นรองรับผ่านกระบวนการเตรียมผิวหน้าด้วยวิธี Scratch treatments และซังน้ำหนักเรียบร้อยแล้ว แผ่นรองรับจะถูกนำไปวางบนตัวจับแผ่นรองรับ (Sample holder) ซึ่งตั้งอยู่ในภาชนะสุญญากาศ จากนั้นจึงเริ่มให้ระบบทำงานโดยให้เครื่องสูบลูโรตารีทำการสูบลูอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศจนความดันภายในภาชนะมีค่าประมาณ  $1.5 \times 10^{-2}$  torr แล้วหยุดเครื่องสูบลูโรตารี ปลอ่ยก๊าซผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ จากนั้นทำการสูบลูอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศอีกครั้ง ทำเช่นนี้เพื่อลดการปนเปื้อนภายในภาชนะสุญญากาศพร้อมกับการปรับวาล์วเพื่อปรับอัตราการไหลของก๊าซผสมก่อนปลอ่ยเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ กระทั่งความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 1.0 torr ซึ่งเป็นค่าความดันที่ต้องควบคุมให้คงที่ตลอดการสังเคราะห์ฟิล์ม

เมื่อส่วนของระบบสุญญากาศ และส่วนควบคุมอัตราการไหลของก๊าซทำงานจนกระทั่งความดันของระบบเข้าสู่สมดุลแล้วจึงให้ส่วนส่งจ่ายพลังงานเริ่มทำงาน โดยเปิดเครื่องกำเนิดความถี่คลื่นวิทยุเพื่อให้กำลังไฟฟ้าของความถี่คลื่นวิทยุแก่ระบบ แล้วทำการปรับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเพื่อให้การสะท้อนกลับของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุจากระบบมีค่าน้อยที่สุด

ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ในแต่ละครั้งต้องมีการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นแตกต่างกันดังแสดงตามตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลของตัวแปรที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC บนแผ่นอะลูมิเนียม

| แผ่นรองรับ<br>ตัวแปรในการ<br>การสังเคราะห์   | Al <sub>1</sub> | Al <sub>2</sub> | Al <sub>3</sub> | Al <sub>4</sub> |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ระดับของพลาสมา                               | H-mode          | H-mode          | H-mode          | H-mode          |
| กำลังไฟฟ้าของความถี่<br>คลื่นวิทยุ<br>(Watt) | 400             | 400             | 400             | 400             |
| ความดันในระบบ<br>(Torr)                      | 1.0             | 1.0             | 1.0             | 1.0             |
| อัตราการไหลของ H <sub>2</sub><br>(sccm)      | 100             | 100             | 100             | 100             |
| อัตราการไหลของ CH <sub>4</sub><br>(sccm)     | 0.5             | 0.7             | 1.0             | 1.7             |
| เวลาในการสังเคราะห์<br>(ชั่วโมง)             | 25              | 25              | 25              | 25              |

พิจารณาข้อมูลตามตารางที่ 5.1 กรณีใช้แผ่นวัสดุรองรับการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC เป็น อะลูมิเนียมทั้งหมด 4 แผ่นรองรับ ได้แก่ Al<sub>1</sub>, Al<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub> และ Al<sub>4</sub> ตัวแปรในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DCL ที่ถูกควบคุมให้คงที่ในทุกแผ่นรองรับ ตลอดระยะเวลาในการสังเคราะห์ด้วย ระดับของพลาสมาที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC เป็น H-mode กำลังไฟฟ้าของ

ความถี่คลื่นวิทยุที่ให้แก่วัสดุเท่ากับ 400 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ต่อ 1 แผ่นรองรับ เท่ากับ 25 ชั่วโมง ทำการสังเคราะห์ที่ความดัน 1.0 torr อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 100 sccm ส่วนตัวแปรในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ที่มีค่าต่างกันในแต่ละแผ่นรองรับคือ อัตราการไหลของก๊าซมีเทน

ตารางที่ 5.2 แสดงข้อมูลของตัวแปรที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC บนกระจกสไลด์

| แผ่นรองรับ<br>ตัวแปรในการ<br>สังเคราะห์      | GI <sub>1</sub> | GI <sub>2</sub> | GI <sub>3</sub> |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| ระดับของพลาสมา                               | H-mode          | H-mode          | H-mode          |
| กำลังไฟฟ้าของความถี่<br>คลื่นวิทยุ<br>(Watt) | 400             | 400             | 400             |
| ความดันในระบบ<br>(Torr)                      | 1.0             | 1.0             | 1.0             |
| อัตราการไหลของ H <sub>2</sub><br>(sccm)      | 100             | 100             | 100             |
| อัตราการไหลของ CH <sub>4</sub><br>(sccm)     | 0.8             | 1.8             | 5.0             |
| เวลาในการสังเคราะห์<br>(ชั่วโมง)             | 10              | 10              | 10              |

พิจารณาข้อมูลในตารางที่ 5.2 กรณีกระจกสไลด์ทั้งหมดประกอบด้วย 3 แผ่นรองรับ ได้แก่ GI<sub>1</sub>, GI<sub>2</sub> และ GI<sub>3</sub> สำหรับกระจกสไลด์ตัวแปรในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ที่ถูกควบคุมให้คงที่ทุกแผ่นรองรับนั้นเหมือนกับกรณีของแผ่นอะลูมิเนียมจะต่างกันเฉพาะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เท่านั้น กระจกสไลด์ใช้เวลาในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC เท่ากับ 10 ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่าเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์บนแผ่นอะลูมิเนียม เนื่องจากความสามารถในการทนต่อความร้อนของกระจกสไลด์ต่ำกว่าแผ่นอะลูมิเนียม ส่วนอัตราการไหลของก๊าซมีเทนก็ต่างกันในแต่ละแผ่นรองรับดังเช่นข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 5.2

เมื่อการสังเคราะห์เสร็จสิ้น แผ่นรองรับจะถูกนำไปซังน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาของฟิล์มบาง DLC ที่ได้โดยใช้ค่าความหนาแน่นของฟิล์มบาง DLC เท่ากับ  $2.1 \text{ g/cm}^3$ <sup>[16]</sup>

## 5.2.2 ผลการทดลอง และการอธิบายผลการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC

### 5.2.2.1 ความหนาของฟิล์มบาง DLC

ความหนาของฟิล์มคำนวณได้จากน้ำหนัก ซึ่งขึ้นกับปริมาณของก๊าซมีเทนที่ใช้ในแต่ละแผ่นรองรับดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความหนาของฟิล์มบาง DLC ที่ได้

| แผ่นรองรับ<br>ตัวแปรในการ<br>สังเคราะห์         | Al <sub>1</sub> | Al <sub>2</sub> | Al <sub>3</sub> | Al <sub>4</sub> | Gl <sub>1</sub> | Gl <sub>2</sub> | Gl <sub>3</sub> |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ความหนาของ<br>ฟิล์มบาง DLC<br>( $\mu\text{m}$ ) | 3.2             | 1.8             | 1.4             | 5.0             | 1.5             | 0.7             | 4.0             |
| อัตราการไหลของ<br>CH <sub>4</sub><br>(sccm)     | 0.8             | 1.8             | 5.0             | 5.5             | 0.7             | 1.0             | 1.7             |

พิจารณาค่าความหนาของฟิล์มบาง DLC จากตารางที่ 5.3 พบว่าได้ฟิล์มที่มีความหนามากที่สุด สำหรับแผ่นกระจกสไลด์ที่อัตราการไหลของก๊าซมีเทน 1.7 sccm และสำหรับแผ่นอะลูมิเนียม ที่อัตราการไหลของก๊าซมีเทน 5.5 sccm และสังเกตได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซมีเทนเข้าสู่ระบบมากขึ้นจะทำให้ได้ความหนาของฟิล์มมากขึ้นเช่นกัน

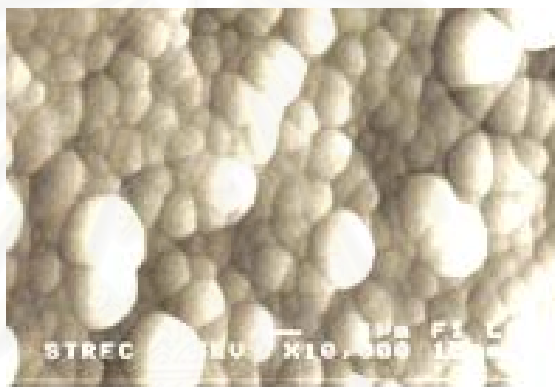


### 5.2.2.2 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ฟิล์มบาง DLC โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

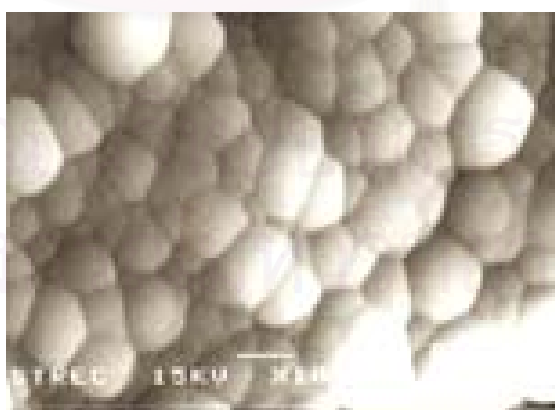
นำฟิล์มบาง DLC ที่เตรียมขึ้นตามตารางที่ 5.1 และ 5.2 มาตรวจสอบลักษณะผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พร้อมทั้งภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง DLC ที่ได้

#### - ฟิล์มบาง DLC บนแผ่นอะลูมิเนียม

ภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของฟิล์มบาง DLC บนแผ่นอะลูมิเนียมแสดงในรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง DLC บนแผ่นอะลูมิเนียม Al<sub>1</sub> จากกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่ 0.5 sccm ของก๊าซมีเทน



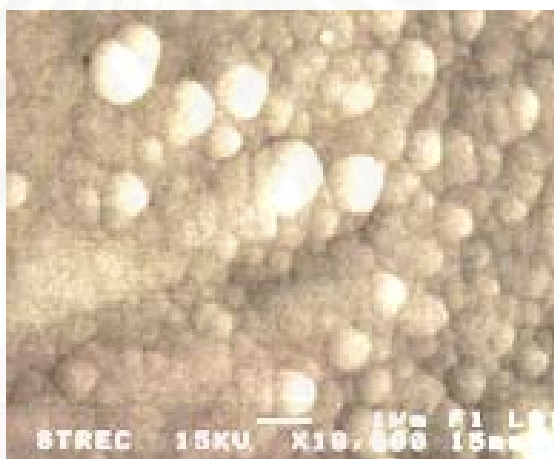
รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง DLC บนแผ่นอะลูมิเนียม Al<sub>4</sub> จากกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่ 1.7 sccm ของก๊าซมีเทน



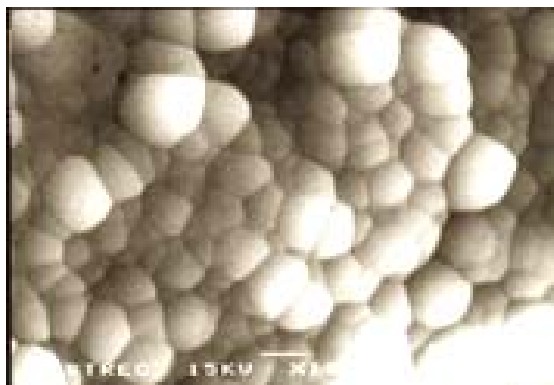
จากรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 พบว่าลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง DLC ที่ได้นั้นมีโครงสร้างเป็นแบบดอกกะหล่ำทั้งหมด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดอกกะหล่ำที่ได้บนผิวหน้าของฟิล์มบางนั้นไม่สอดคล้องกับปริมาณก๊าซมีเทนที่ใช้ พบว่าที่ 0.5% ของปริมาณก๊าซมีเทนต่อก๊าซไฮโดรเจนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดอกกะหล่ำประมาณ 0.25 ถึง 1  $\mu\text{m}$  และที่ 1.7% ของปริมาณก๊าซมีเทนต่อก๊าซไฮโดรเจน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดอกกะหล่ำประมาณ 0.5 ถึง 2  $\mu\text{m}$  ส่วนที่ 0.7% และ 1.0 % มีโครงสร้างเป็นดอกกะหล่ำเช่นเดียวกัน และมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของดอกกะหล่ำประมาณ 0.2 ถึง 0.7  $\mu\text{m}$

#### -ฟิล์มบาง DLC บนกระจกสไลด์

ภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของฟิล์มบาง DLC บนกระจกสไลด์ แสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.10 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง DLC บนแผ่นกระจกสไลด์ที่ถ่ายจากกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่ 0.8 sccm ของก๊าซมีเทน



รูปที่ 5.11 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง DLC บนแผ่น  
กระจกใสที่ถ่ายจากกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอน  
แบบส่องกวาด ที่ 0.5 sccm ของก๊าซมีเทน

จากรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 พบว่าลักษณะผิวหน้าฟิล์มบาง DLC ที่ได้นั้นมีโครงสร้างเป็นดอกกะหล่ำทั้งหมด และขนาดโครงสร้างของดอกกะหล่ำบนผิวหน้าของฟิล์มบางที่ได้นั้นไม่สอดคล้องกับปริมาณของก๊าซมีเทนที่ใช้ในการสังเคราะห์เช่นกัน ซึ่งผลที่ได้เช่นเดียวกับลักษณะผิวหน้าฟิล์มที่เกิดบนแผ่นอลูมิเนียม พบว่าที่ปริมาณก๊าซมีเทนต่อก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 0.8 % จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกกะหล่ำประมาณ 0 ถึง 1.5  $\mu\text{m}$  และในปริมาณก๊าซมีเทน 5.0 % จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกกะหล่ำประมาณ 0.25 ถึง 1.5  $\mu\text{m}$  ส่วนปริมาณก๊าซมีเทน 1.8% จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดอกกะหล่ำประมาณ 0.1 ถึง 1.0  $\mu\text{m}$  ดังนั้นฟิล์มบาง DLC ที่ได้นั้นจะมีลักษณะผิวหน้าเป็นแบบดอกกะหล่ำทั้งหมด ไม่ว่าจะแผ่นรองรับจะเป็นแผ่นอะลูมิเนียม หรือกระจกใส เพียงแต่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกกะหล่ำแตกต่างกันไป และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกกะหล่ำจะมีขนาดใหญ่ที่สุดที่ปริมาณก๊าซมีเทนค่าหนึ่งเท่านั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้พบว่า ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะแตกต่างจากผลการทดลองของ Ito, et al. <sup>[11]</sup> ดังรูปที่ 3.1 แต่เมื่อนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Liew, et al. <sup>[19]</sup> พบว่าในแต่ละแผ่นรองรับมีลักษณะผิวหน้าฟิล์มบาง DLC คล้ายคลึงกับแผ่นรองรับของ Liew, et al. <sup>[19]</sup> ที่เคลือบบนแผ่นซิลิคอน Si2 และ Si3

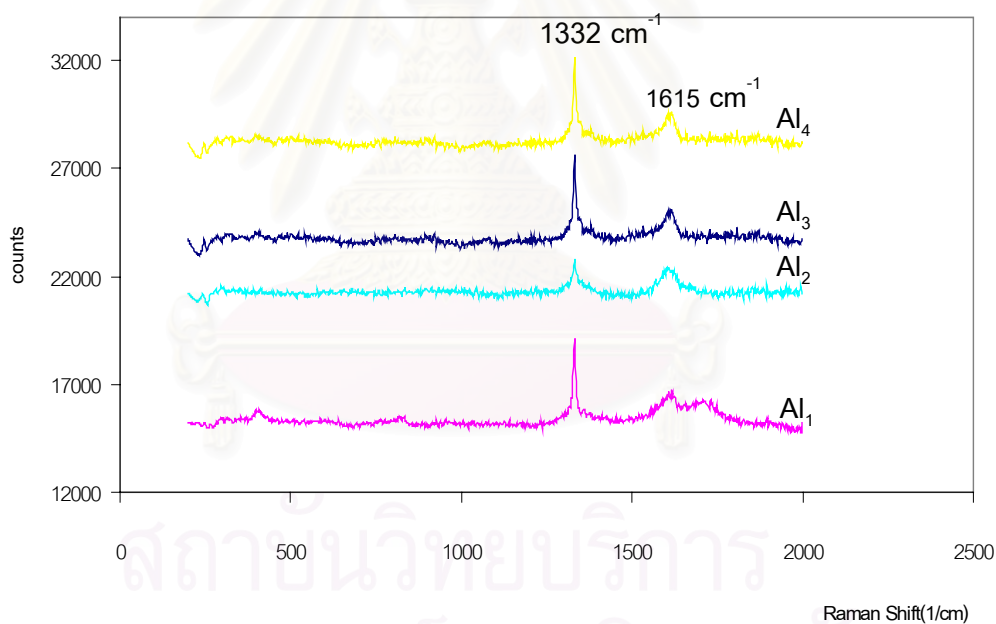
เนื่องจากมีลักษณะผิวหน้าฟิล์มเป็นแบบดอกกะหล่ำเหมือนกัน เพียงแต่ลักษณะผิวหน้าฟิล์มบาง DLC ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีลักษณะผิวหน้าฟิล์มที่ต่อเนื่อง และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของดอกกะหล่ำมีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากชนิดแผ่นรองรับ และการวางตำแหน่งของขดลวดระนาบภายในระบบที่ต่างกัน เปรียบเทียบได้จากรูปที่ 2.4 และรูปที่ 4.1

### 5.2.2.3 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ฟิล์มบาง DLC โดยรามานสเปกโทรสโกปี

นำฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นตามตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 นำมาตรวจสอบโครงสร้างด้วยการวิเคราะห์สเปกตรัมแบบรามานเพื่อยืนยันว่าฟิล์มที่ได้เป็นฟิล์มบาง DLC

#### -ฟิล์มบาง DLC บนแผ่นอะลูมิเนียม

กราฟแสดงรามานสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ทางรามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบาง DLC บนแผ่นอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 5.12



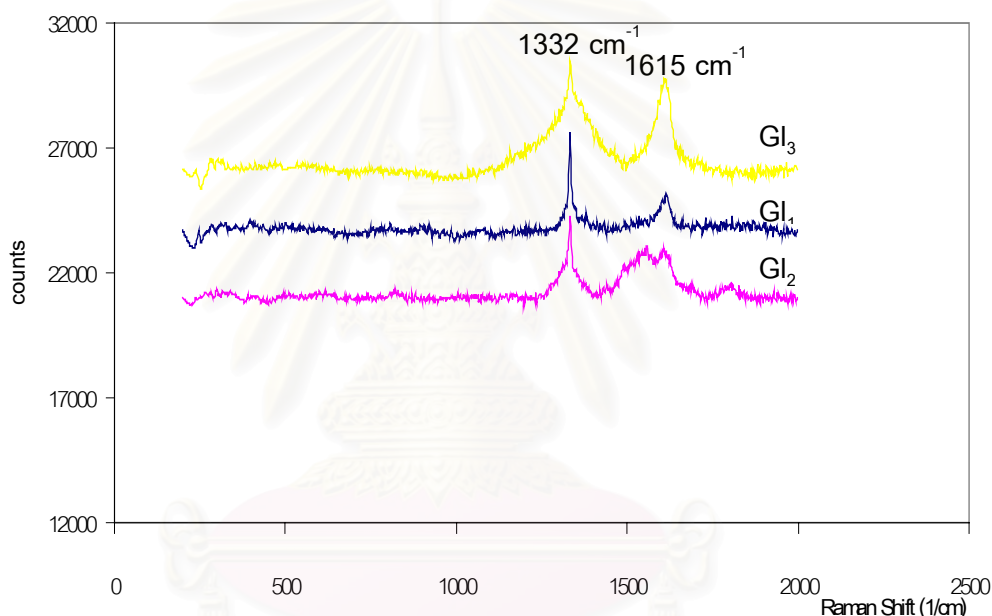
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงรามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง DCL บนแผ่นอะลูมิเนียมที่ความดัน 1 torr และพลังงานที่ให้แก่ระบบ 400 วัตต์

จากการพิจารณาในรูปที่ 5.12 พบว่าทุกแผ่นรองรับจะได้กราฟแสดงรามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง DLC ที่ปรากฏพิก 2 พิกขึ้นอย่างเด่นชัดคือ พิกที่บริเวณ  $1332\text{ cm}^{-1}$  และพิกที่บริเวณ  $1615\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งพิก  $1332\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับพิกที่แสดงลักษณะเฉพาะของเพชร แต่มีพันธะแบบ  $sp^3$  และ  $sp^2$  ปนกันอยู่ซึ่งเป็นพันธะของคาร์บอน<sup>[19,20,21]</sup> และพิก  $1615\text{ cm}^{-1}$  เป็น

ลักษณะเฉพาะของแกรไฟต์ซึ่งมีพันธะแบบ  $sp^2$  เท่านั้น ในทุกแผนรองรับพบว่าการเกิดพันธะแบบ  $sp^3$  เกิดขึ้นมากกว่าพันธะแบบ  $sp^2$  เนื่องจากปริมาณก๊าซมีเทนที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นแตกต่างกัน สังเกตได้จากรามานสเปกตรัมที่บริเวณ  $1332\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีคที่มีลักษณะแหลมคมแสดงลักษณะเฉพาะของพันธะแบบ  $sp^3$  อย่างเด่นชัด

### -ฟิล์มบาง DLC บนกระจกสไลด์

กราฟแสดงรามานสเปกตรัม ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางรามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบาง DLC บนกระจกสไลด์ แสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 รูปแสดงรามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง DLC บนกระจกสไลด์ทำการสังเคราะห์ที่ความดัน 1 torr และพลังงานที่ให้แก่ระบบ 400 วัตต์

พิจารณารูปที่ 5.13 สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า รามานสเปกตรัมที่ได้จะปรากฏเป็นพีค 2 พีคอย่างเด่นชัดได้แก่ พีคที่บริเวณ  $1332\text{ cm}^{-1}$  และพีคที่บริเวณ  $1615\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับผลที่แสดงในรูปที่ 5.12 สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน เมื่อนำผลรามานสเปกตรัมไปทำการเปรียบเทียบกับผลรามานสเปกตรัมของ Ito, et al. <sup>[11]</sup> และ Liew, et al. <sup>[19]</sup> พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ในบทที่ 3

พิจารณาจากรูปที่ 5.12, 5.13, 3.3 และรูปที่ 3.4 พบว่ามีลักษณะรามานสเปกตรัมคล้ายคลึงกันคือ ปรางูเป็นพีค 2 พีคอย่างเด่นชัด และพีคที่ปรากฏแสดงถึงลักษณะเฉพาะของเพชร และมีพีคที่แสดงลักษณะเฉพาะของแกรไฟต์รวมอยู่ด้วย เพียงแต่ความแหลมคมของพีคแตกต่างกัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบ และสร้างระบบเพื่อสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC โดยวิธีการตกตะกอนไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่วิทยุ แบบ ICP จากผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางที่ได้ยืนยันว่าสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC ได้ ระบบการสังเคราะห์ฟิล์มบางใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุที่ 13.56 MHz ผ่านวงจรปรับค่าความขัด ซึ่งทำหน้าที่ปรับความต้านทานของแหล่งกำเนิดพลังงานให้เหมาะสมกับความต้านทานของพลาสมา พลังงานจากเครื่องกำเนิดพลังงานจะส่งผ่านมายังขดลวดเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ก๊าซภายในภาชนะสุญญากาศเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมา ผลการทดสอบลักษณะส่อ I-V ของระบบที่สร้างนั้นแสดงปรากฏการณ์ Hysteresis และมีรูปแบบคงเดิมไม่ว่าตัวกลางพลาสมาจะเกิดจากก๊าซใดก็ตาม

ผลการวิเคราะห์การสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC บนแผ่นอะลูมิเนียม และแผ่นกระจกสไลด์ พบว่าสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางลงบนแผ่นอะลูมิเนียม และกระจกสไลด์ได้ด้วยระบบที่สร้างขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณก๊าซมีเทนนั้นมีผลต่อการสังเคราะห์ และคุณภาพของฟิล์มบาง DLC นำฟิล์มบาง DLC ที่เตรียมได้ที่ความดัน 1.0 torr มาทำการวิเคราะห์โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พบว่าพื้นผิวของฟิล์มบางมีลักษณะคล้ายดอกกะหล่ำ และจากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปีพบพีคปรากฏที่บริเวณ  $1332\text{ cm}^{-1}$  และที่บริเวณ  $1615\text{ cm}^{-1}$  จึงยืนยันได้ว่าฟิล์มบางที่ได้มีโครงสร้างคล้ายเพชร

#### 6.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้แบบ และระบบ RF-PECVD แบบ ICP เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC
2. ได้รับความรู้ และทักษะต่าง ๆ ในการสร้างระบบในวิธี RF-PECVD และการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC
3. ได้ฟิล์มบาง DLC จากระบบ RF-PECVD แบบ ICP ที่จัดสร้าง



### 6.3 ข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นเพียงผลเริ่มต้นในการนำระบบที่สร้างขึ้นมาใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง DLC โดยวิธีการตกตะกอนไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่วิทยุ ถ้าต้องการให้ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่ได้มีโครงสร้าง และลักษณะผิวหน้าที่ดีขึ้น ต้องมีการปรับหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับระบบที่สร้าง อาจนำระบบสุญญากาศขั้นสูงมาใช้กับระบบ เพื่อให้ภายในภาชนะสุญญากาศมีการปนเปื้อนน้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรมีคุณภาพที่ดีมากขึ้น <sup>[29,30]</sup>



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Stern, D.P., and Peredo, M. Plasma Physics History. Available from: <http://www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/whplasma.html>. [2003, January 22].
- [2] Vossen, J., and Kern, W. Thin Film Processes. New York: Academic Press, 1991.
- [3] Kortshagen, U., Gibson, N.D., and Lawler, J.E. On the E-H mode transition in RF inductive discharges. J.Phys. D:Appl.Phys. 29(1996): 1224-1236.
- [4] Chapman, B. Glow Discharge Processes Sputtering and Plasma Etching. USA: John Wiley&Sons, 1980.
- [5] Smith, D.L. Thin-Film Deposition. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [6] Sun, Z., Xu, S., and Ostrikov, K.N. E and H regions of plasma enhanced chemical vapor deposition of diamond like carbon film in low frequency inductively coupled plasma reactor. Diamond and Related Materials .11 (2002): 92-97.
- [7] Paosawatyanong, B. Frequency dependent response of Diamond Schottky Barrier diode to large and small electrical signals. Doctoral dissertation, Department of Electrical Engineering, Michigan State University, 1998.
- [8] Raizer, Y.P. Gas Discharge Physics. New York: Springer-Verlag, 1987.
- [9] Amornkitbamrung, V., and Topon, O.O. Surface and quality modification of diamond – like carbon films by CO<sub>2</sub> laser heating assisted hot filament chemical vapor deposition. [2003]. Available from: <http://www/conferences.unimelb.edu.au/icndst-8/presentations.html>
- [10] Liew, W.S. Studies On The Characteristics Of RF Planar Inductively Coupled Plasma And Its Applications. Bachelor Report, Department of Physics, University of Malaya, Kuala Lumpur, 1998/1999.
- [11] Ito, H., Teii, K., Ishikawa, M., Hori, M., Takeo, T., Kato, T., and Goto, T. Diamond Deposition and Behavior of Atomic Carbon Species in a Low-Pressure Inductively Coupled Plasma. J.Phys. D:Appl.Phys. 38(1999): 4504-4507.
- [12] Plasma Research Laboratory. Exploring Plasma. [2003]. Available from: <http://www.prl.dcu.ie/prlhome.html>

- [13] Fayoumi, I., Jones, I.R., and Turner, V.M. Hysteresis in the E- to H-mode transition in a planar coil, inductively coupled rf argon discharge. J.Phys.D:Apply.Phys. 31(1998): 3082-3094.
- [14] Thien, V.K. A small planar coil inductively coupled plasma system. Master Report, Plasma Research Laboratory, Department of Physics, University of Malaya, Kuala Lumpur, 1998/1999.
- [15] Maurice, C., Feijen, F.H.R., and Kroesen, G.W.M. Langmuir probe measurements in an ICP. [2001]. Available from: <http://www.phys.tue.nl/FLTPD/poster/maurice.pdf>
- [16] Yen, B.K., Geisler, J.T.M., and Paul, H.K. Effect of N /doping on Structure and Properties of DLC films. Produced by Plasma Beam Deposition. [2002]. Available from: <http://www.almaden.ibm.com/sst/images/im/20images/overcoat.pdf>.
- [17] Kang, D.K., Ha, S.C., and Kim, K.B. Evaluation of the ion bombardment energy for growing diamond-like carbon films in an electron cyclotron resonance plasma enhanced chemical vapor deposition. J.Vacuum Science. A 16(4) (Jul/Aug 1998) : 2625-2631.
- [18] Asakura, Y., Chattopadhyay, K.K., Matsumoto, S., and Hirakuri, K. Diamond synthesis in capacitively coupled 13.56 MHz radio frequency plasma using parallel plate electrodes with the addition of direct current power. J. Vacuum Science. A 16(6) (Nov/Dec 1998): 3185-3189.
- [19] Liew, W.S., Wong, C.S., and Low, Y.H. PECVD of Diamond-Like Carbon Thin Film On Silicon Substrate With RF Planar Coil Inductively Coupled Plasma. The Regional Conference on Plasma Research, Thailand. (2000): 160-163.
- [20] Kuo, K., and Asmussen, K. An experimental study of high pressure synthesis of diamond films using a microwave cavity plasma reactor. Diamond and Related Materials. 6 (1997):1097-1105.
- [21] Tsuda, M., Oikawa, K., Furukawa, S., Sekine, C., and Hata, M. Mechanism of the step Growth of diamond crystals with carbon atoms. J.Electrochem.Soc. 139(5) (May 1992): 1403-1488.
- [22] เมธิณี ช่างต่อ. การพัฒนาระบบสุญญากาศ. โครงการนิสิตชั้นปีที่ 4, ภาควิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปีการศึกษา 2542.

- [23] Windischman, H., Epps, G.F., Cong, Y., and Collins, R. Intrinsic stress in diamond films prepared by microwave plasma CVD. J.Phys.D:Appl.Phys. 69. (1991) 2231-2237.
- [24] ชัยวิทย์ ศิลาวัชานาไณย. ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. : ห้างหุ้นส่วนจำกัดการพิมพ์, 2526.
- [25] แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1. พระนคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2539.
- [26] Roth, J.R. Industrial plasma Engineering Volume 1: principles. Department of electrical and computer engineering University of Tennessee, Knoxville, 1995.
- [27] Roth, J.R. Industrial plasma Engineering Volume 2: Applications to Nonthermal Plasma Processing. Department of electrical and computer engineering University of Tennessee, Knoxville, 2001.
- [28] นิพนธ์ สุขุม. Kinetic theory of gases and gas discharge. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2521.
- [29] Sato, F., Saito, N., Hirano, Y., Jayatissa, A.H., and Kunitharu. Diamond-like bonds in amorphous hydrogenated carbon films induced by x-ray irradiation. J. Vacuum Science. A 16(4) (Jul/Aug 1998): 2553-2555.
- [30] May, P.W., Hohn, S., and Ashfold, M.N.R. Field emission from chemical vapor deposited diamond and diamond-like carbon films: Investigations of surface damage and conduction mechanisms. J.Phys. D: Appl. Phys. 84 (3): 1618-1625.



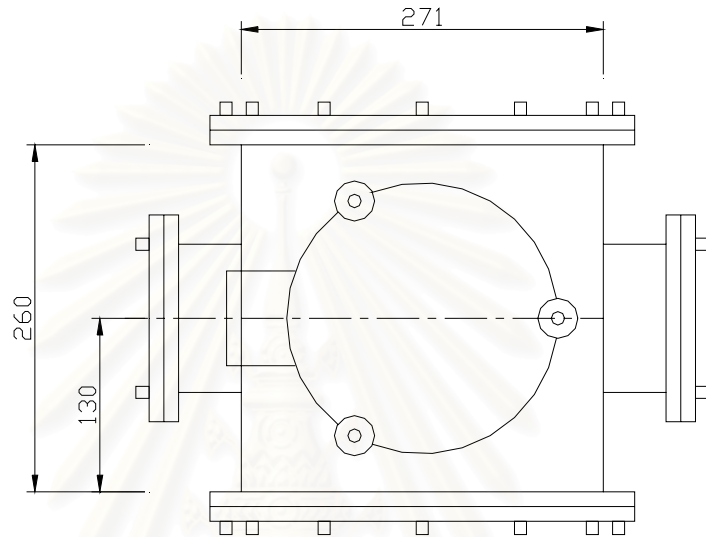
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

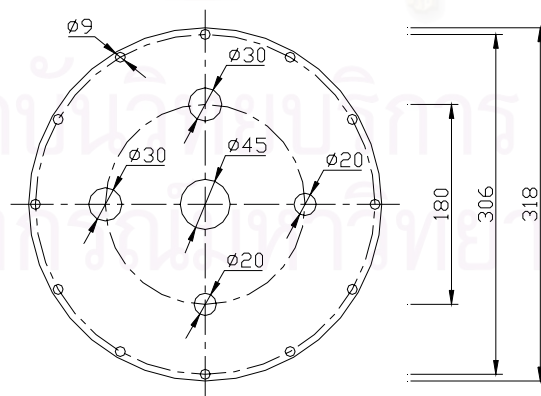
## ภาคผนวก ก

### การออกแบบระบบ

ก.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของภาชนะสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัย

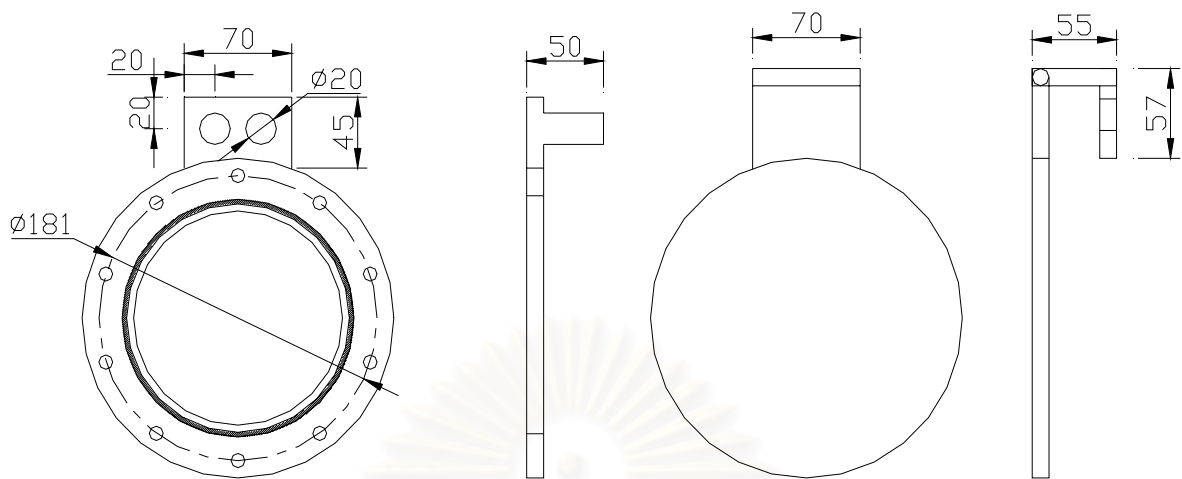


รูปที่ ก.1 แผนภาพแสดงลักษณะของภาชนะสุญญากาศ (หน่วย มิลลิเมตร)

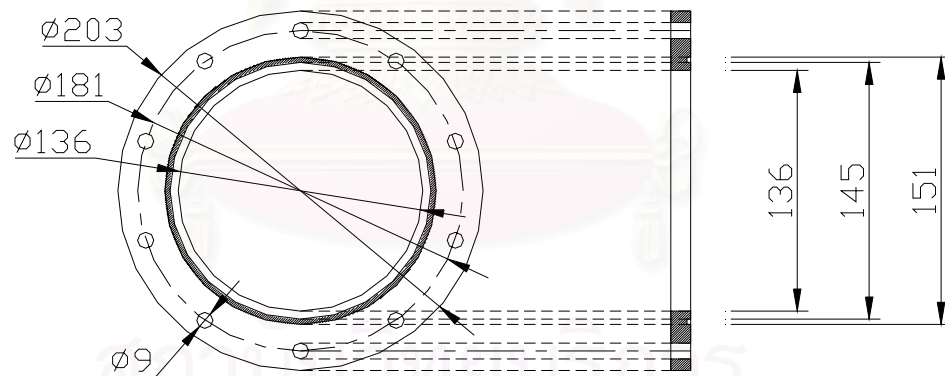


รูปที่ ก.2 แสดงแผนภาพแผ่นปิดด้านล่างของภาชนะสุญญากาศ (หน่วย มิลลิเมตร)





รูปที่ ก.3 แผนภาพแสดงประตูด้านหน้าของภาชนะสุญญากาศ (หน่วย มิลลิเมตร)

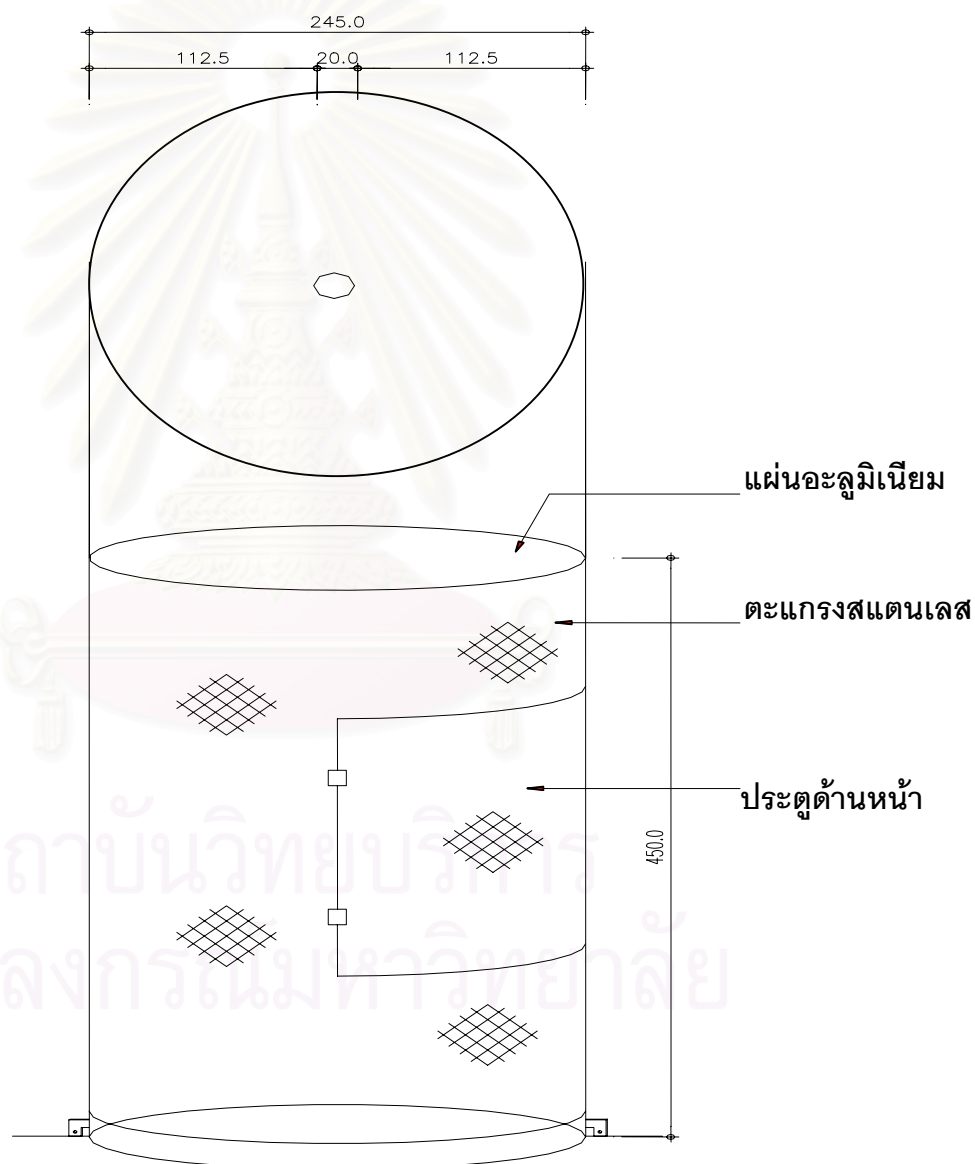


รูปที่ ก.4 แสดงแผนภาพหน้าแปลนด้านหน้าของภาชนะสุญญากาศ (หน่วย มิลลิเมตร)



## ก.2 Matching cavity

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบอุปกรณ์ป้องกันการรบกวนจากคลื่นความถี่วิทยุโดยออกแบบเป็นตะแกรงสแตนเลส และมีประตูอยู่ด้านหน้าเรียก Matching cavity โดยมีหม้อแปลงตัวเก็บประจุปรับค่าได้ และขดลวดระนาบ เป็นส่วนประกอบของวงจรปรับค่าความขัดติดตั้งไว้ภายในเพื่อป้องกัน RF stray ที่เกิดขึ้นจากส่วนนี้ไปรบกวนยังส่วนของเครื่องมือวัดที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่วางอยู่ภายนอกได้

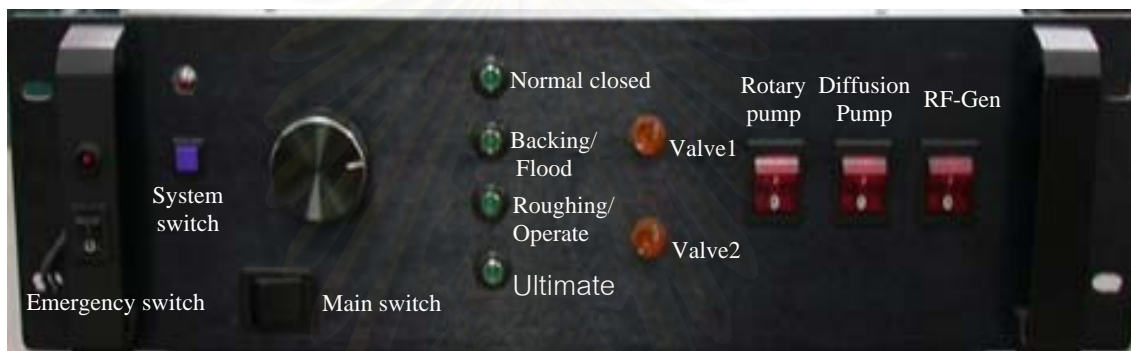


รูปที่ ก.7 แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างของ Matching cavity (หน่วย มิลลิเมตร)

### ก.3 ตัวควบคุมระบบ และระดับสุญญากาศขั้นสูง

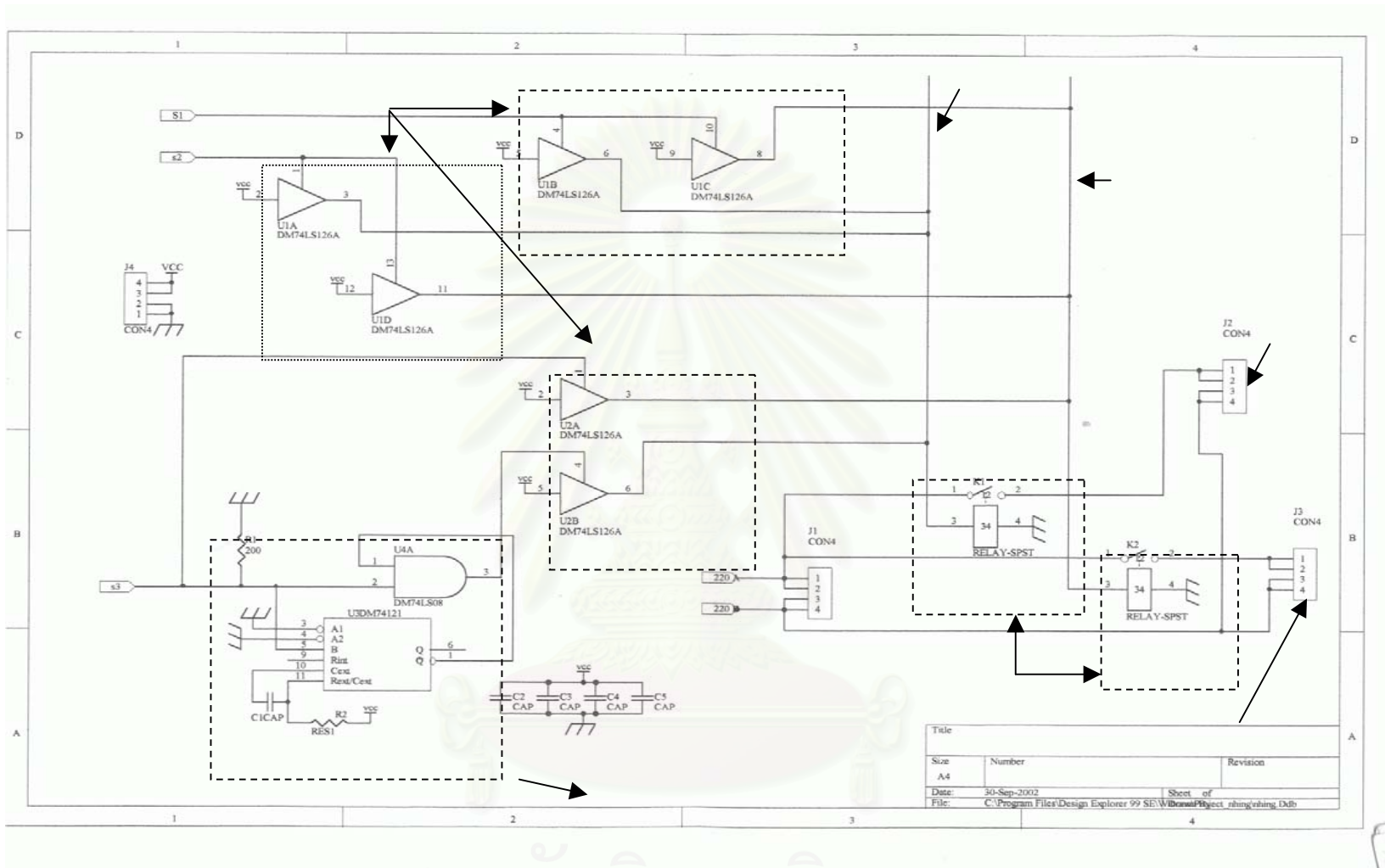
งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมระบบ และระดับสุญญากาศขั้นสูง เพื่อรองรับงานวิจัยในการพัฒนาการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรในอนาคต

ส่วนประกอบของวงจรรีเลย์เทอร์มินัล ในการควบคุมการทำงานของวาล์ว 2 ตัว เป็นหลัก เนื่องจากระบบสุญญากาศขั้นสูงประกอบด้วย เครื่องสูบอากาศ 2 ตัว คือเครื่องสูบโรตารี และเครื่องสูบแพร่ไอ ทั้ง 2 ส่วนนี้อาศัยการทำงานร่วมของวาล์ว 2 ตัว เรียกว่าการทำงานแบบ backing และ roughing ซึ่งทำงานสอดคล้องกันขึ้นกับภาวะการทำงานของระบบในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง



รูปที่ ก.8 ภาพถ่ายของ ตัวควบคุมระบบ และระดับสุญญากาศขั้นสูง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.9 แสดงแผนผังวงจรถวลีเก็ททรอนิกส์ในการควบคุมการทำงานของวาล์วทั้งสองในระบบสุญญากาศขั้นสูงของตัวควบคุมระบบ และระดับสุญญากาศขั้นสูง

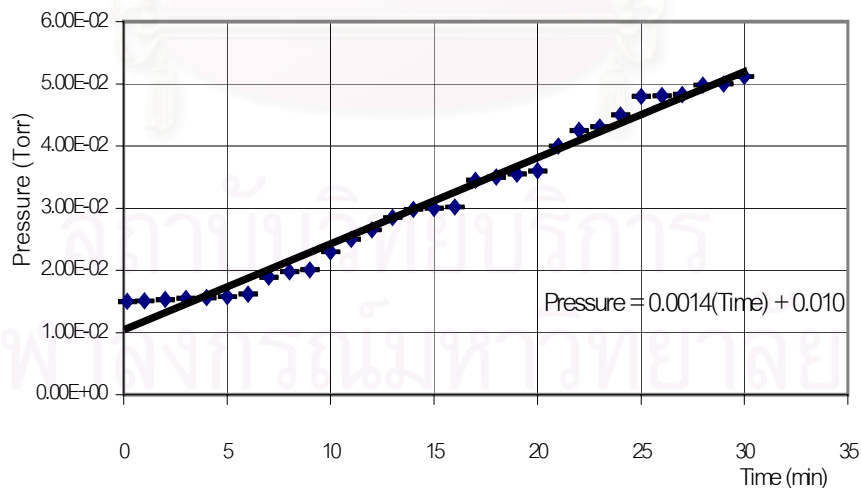
## ภาคผนวก ข

### อัตราการรั่ว และความดันสุดท้ายของระบบสุญญากาศ

#### ข.1 อัตราการรั่วของภาชนะสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศประกอบด้วยภาชนะสุญญากาศ เครื่องสูบอากาศ ไม่ว่าจะ ออกแบบให้สมบูรณ์อย่างไร ยังคงพบการรั่วจากภายนอกสู่ภายในเสมอ หรืออาจเกิดรั่วภายใน ภาชนะสุญญากาศเอง เนื่องมาจากการหลุดออกของก๊าซจากผิวภาชนะ การตรวจสอบจะช่วยให้ ทราบว่าระบบสุญญากาศที่ออกแบบนั้น สามารถใช้งานได้ในระดับใด ซึ่งตรวจสอบโดยการหา ความดันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลานั้นคือ ปริมาณของก๊าซที่ทำให้ความดันเพิ่มขึ้น 1 torr ใน ปริมาตร 1 ลิตร ภายในเวลา 1 วินาที จากงานวิจัยนี้ ได้ทำการตรวจสอบอัตราการรั่วของภาชนะ สุญญากาศโดย สูบอากาศในภาชนะสุญญากาศแล้ว หยุดการทำงานของเครื่องสูบอากาศ บันทึก ค่าความดันที่เปลี่ยนไปในแต่ละนาที จากนั้นนำผลที่ได้ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันภายในภาชนะสุญญากาศ กับเวลา กราฟดังกล่าวแสดงดังรูปที่ ข.1

Pressure vs Time



รูปที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน กับเวลาในภาชนะสุญญากาศ



พิจารณารูปที่ ข.1 จะได้ความดันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในภาชนะสุญญากาศ เท่ากับ  $1.4 \times 10^{-3} \text{ torr}\cdot\text{s}^{-1}$  ซึ่งภาชนะสุญญากาศมีปริมาตรเท่ากับ 1.1 ลิตร จะได้อัตราการรั่วของ ภาชนะสุญญากาศ (I) เท่ากับ  $2.5 \times 10^{-5} \text{ torr}\cdot\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$

## ข.2 ค่าความดันสุดท้ายของระบบสุญญากาศ

ค่าความดันสุดท้ายของระบบสุญญากาศสามารถคำนวณได้จากทฤษฎี ซึ่งการ คำนวณระบบสุญญากาศนั้นสามารถเทียบได้กับการคำนวณวงจรไฟฟ้า

|                   |    |                   |
|-------------------|----|-------------------|
| ความดัน (P)       | -> | ศักย์ไฟฟ้า (V)    |
| การไหลของก๊าซ (Q) | -> | กระแสไฟฟ้า (I)    |
| ปริมาตร (V)       | -> | ความจุไฟฟ้า (C)   |
| การนำ (G)         | -> | 1/ความต้านทาน (R) |

จากสมการ

$$P_F = P_p + \frac{L}{G_{\text{eff}}}$$

และ

$$\frac{1}{G_{\text{eff}}} = \frac{1}{G_c} + \frac{1}{G_l} + \frac{1}{G_v} + \frac{1}{G_p}$$

โดยที่

$P_F$  = ความดันสุดท้ายของระบบ

$P_p$  = ความดันสุดท้ายของเครื่องสูบอากาศ

$G_{\text{eff}}$  = ค่าอัตราการนำของก๊าซรวม

L = การนำของภาชนะสุญญากาศ

$G_l$  = การนำของท่อ

$G_v$  = การนำของวาล์ว

$G_p$  = การนำของเครื่องสูบอากาศ

เนื่องจากอุปกรณ์ของระบบส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกสามารถ คำนวณหาค่าการนำ (G) ของทรงกระบอกได้จากสมการด้านล่างนี้

$$G = \frac{12.1 \times \phi^3}{l}$$

เมื่อ

$l$  = ความยาวของทรงกระบอก

$\phi$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก

จะได้

$$G_C = 2.02 \times 10^4 \text{ l/s } (\phi = 27 \text{ cm}, l = 26 \text{ cm})$$

$$G_P = 2.36 \text{ l/s}$$

$$G_I = 4.78 \text{ l/s } (\phi = 2.41 \text{ cm}, l = 35.56 \text{ cm})$$

$$G_V = 6.20 \text{ l/s } (\phi = 1.6 \text{ cm}, l = 8 \text{ cm})$$

$$\therefore G_{\text{eff}} = 1.26 \text{ l/s}$$

ซึ่งค่าการนำของภาชนะสุญญากาศ (L) คำนวณได้จากสมการ

$$L = I + A \times O$$

เมื่อ

$$I = \text{อัตราเร็วของระบบสุญญากาศ} = 2.5 \times 10^{-5} \text{ torr.l.s}^{-1}$$

$$A = \text{พื้นที่ผิวทั้งหมดของภาชนะสุญญากาศ} = 3124.31 \text{ cm}^2$$

$$O = \text{อัตราการคายก๊าซของสแตนเลส} = 0.25 \times 10^{-7} \text{ torr.l.s}^{-1} \cdot \text{cm}^2$$

$$\therefore L = 1.0 \times 10^{-4} \text{ torr.l.s}^{-1}$$

เนื่องจากความดันสุดท้ายของเครื่องสูบลูโรตารีเท่ากับ  $1.5 \times 10^{-3}$  ดังนั้นจะได้ค่าความดันสุดท้ายของระบบคือ

$$\therefore P_F = 1.4 \times 10^{-3} \text{ torr}$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุจิรา พรหมนิมิตร เกิดเมื่อวันที่ 2 กรกฎาคม 2520 บ้านเลขที่ 40/8 ถ.พูนสวัสดิ์ ต. รุสะมิแล อ.เมือง จ.ปัตตานี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาฟิสิกส์ จาก มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก เมื่อปี พ.ศ. 2542 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท (วท.ม.) สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2543 ระหว่างการศึกษาได้รับทุนพัฒนาอาจารย์ ในระดับปริญญาโท-เอก จากทบวงมหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย