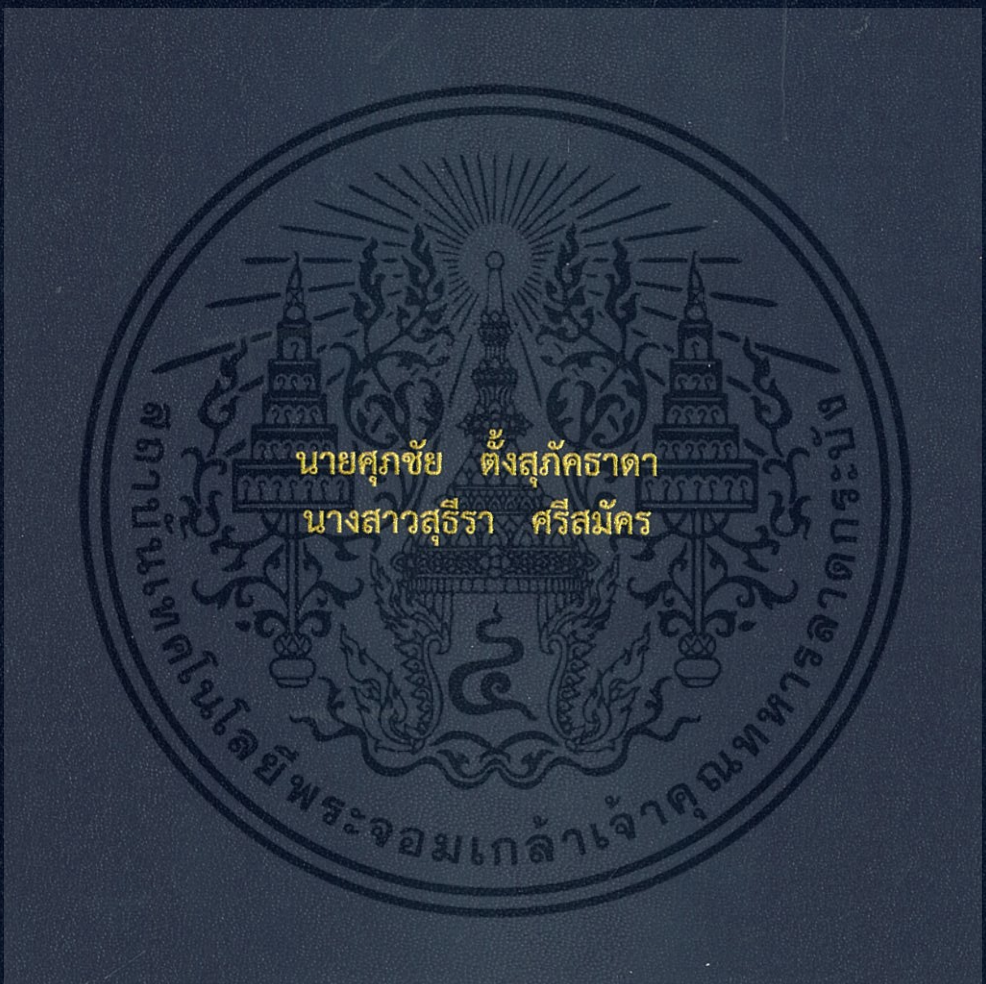
การพัฒนาระบบพลาสมาสำหรับประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิว

DEVELOPMENT OF PLASMA SYSTEM FOR SURFACE CLEANING APPLICATION



นายศุภชัย ตั้งสุภัคธาดา
นางสาวสุธีรา ศรีสมัคร

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาระบบพลาสมาสำหรับประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิว

DEVELOPMENT OF PLASMA SYSTEM FOR SURFACE CLEANING APPLICATION

นายศุภชัย ตั้งสุภัคธาดา

นางสาวสุธีรา ศรีสมัคร

b.11848784
l.

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149453
วัน.เดือน.ปี 8 ส.ค. 2561

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF PLASMA SYSTEM FOR SURFACE CLEANING APPLICATION

SUPACHAI TANGSUPAKTADA

SUTEERA SRISAMAK

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF

THE REQUIREMENT FOR

THE DEGREE OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)

DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การพัฒนาระบบพลาสมาสำหรับประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิว Development of Plasma System for Surface Cleaning Application
ชื่อนักศึกษา	นายศุภชัย ตั้งสุภัคธาดา รหัสนักศึกษา 56051222 นางสาวสุธีรา ศรีสมัคร รหัสนักศึกษา 56051230
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. อาภาภรณ์ สกุลการะเวก

คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการคุมสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร ภัทรียา ดำรงศักดิ์ ประธานกรรมการ	
ดร. กาจปัญญา สุวรรณสุขโข กรรมการ	
ดร. พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ	
ผศ.ดร. อาภาภรณ์ สกุลการะเวก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การพัฒนาระบบพลาสมาสำหรับประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิว

ชื่อนักศึกษา นายศุภชัย ตั้งสุภัคธาดา รหัสนักศึกษา 56051222
นางสาวสุธีรา ศรีสมัคร รหัสนักศึกษา 56051230

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

คณะ วิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อาภาภรณ์ สกุลการะเวก

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้สนใจในการทำความสะอาดผิววัสดุด้วยกระบวนการพลาสมา การปรับปรุงเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมา จะใช้ส่วนประกอบที่มีอยู่แล้วบางส่วน และทำการออกแบบและปรับปรุงในบางส่วนเพื่อทำให้ระบบสมบูรณ์ อีกทั้งยังศึกษาการเกิดพลาสมาของแก๊สอาร์กอน แก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจน ด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าต่างๆ แล้วศึกษาผลของความแตกต่างของการเกิดพลาสมาที่ได้ เพื่อเป็นข้อมูลความรู้ในการนำไปใช้กับระบบของเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมาที่เราปรับปรุงขึ้น โดยส่วนเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมาที่ได้ทำการออกแบบนั้น หลักๆมีในส่วนของฐานวางชิ้นงานและกล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส แล้วเมื่อเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมาทั้งหมดเสร็จสมบูรณ์แล้ว จึงทำการทดสอบระบบและทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อการทำความสะอาดชิ้นงาน โดยใช้แก๊ส 2 ชนิด คือ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สอาร์กอน ในการทำความสะอาดกระจกสไลด์ โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 20 วัตต์ และมีอัตราการไหลของแก๊สที่ 5,10,15 และ 20 sccm แล้วทำการเปรียบเทียบการทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยเทคนิคการทำความสะอาดทั้งหมด 3 เทคนิค คือ การทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาด ,การทำความสะอาดด้วยระบบอัลตราโซนิค และการทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมาโดยใช้เครื่องที่ทำการปรับปรุงและออกแบบขึ้น ซึ่งในโครงงานพิเศษนี้จะใช้การวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ในการวัดค่าความสะอาดของชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเทคนิคต่างๆ

คำสำคัญ: พลาสมาคลีนนิ่ง มุมสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Development of Plasma System for Surface Cleaning Application
Student	Mr. Supachai Tangsupaktada Student ID 56051222 Miss Suteera Srisamak Student ID 56051230
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic	2016
Advisor	Asst. Prof. Dr. Aparporn Sakulkalavak

Abstract

This special project is interested in cleaning the surface of materials using a plasma process, also known as Plasma Cleaning. By this special project, it has modified and developed a plasma cleaning machine by using some existing components and partially designed parts to complete the system. The project also studies on the plasma of argon, oxygen and nitrogen gas by radio frequency stimulation and the power supply. Then study the effect of plasma differentiation. The experimental data is used to apply the system of plasma cleaners that we will improve. By the plasma cleaner that was designed. Mainly designed in the base of workpiece and gas flow control box. Then when all the plasma cleaners are complete. The system was tested and the effect of gas flow and power on the workpiece was investigated. By using two types of gas: nitrogen and argon gas to clean the glass slides. It supplies 20 watts of power and has a gas flow rate of 5, 10, 15 and 20 sccm. Then compare the cleaning of the slide glass with 3 cleaning techniques: cleaning with a cleaning solution. , Ultrasonic cleaning and cleaning with a plasma cleaning machine using the machine has been improved. In this special project, the contact angle is used to measure the cleanliness of the workpiece cleaned by the above techniques.

Keywords: Contact angle , Plasma Cleaning

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับการช่วยเหลือและการสนับสนุนจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ซึ่งต้องกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อาภาภรณ์ สกุลการะเวก อาจารย์ประจำสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษนี้ ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหา ทำให้โครงงานพิเศษเล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ ที่ได้ให้คำแนะนำและสอนทักษะความรู้การทำงาน สนับสนุนอุปกรณ์และสอนการใช้เครื่องมือต่างๆ ในการทำโครงงานพิเศษนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ สาขาฟิสิกส์ ทุกคนที่คอยให้คำปรึกษาช่วยเหลือในหลายๆส่วนของโครงงานพิเศษนี้ และคอยให้กำลังใจในการทำงานตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ผู้คอยสนับสนุนเลี้ยงดูช่วยเหลือเป็นทุนทรัพย์และคอยเป็นแรงผลักดันให้ผู้จัดทำมีกำลังใจในการทำโครงงานพิเศษนี้ตลอดจนบุคคลต่างๆที่ให้ความช่วยเหลืออีกมาก ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณและขอบคุณไว้ในโอกาสนี้

ศุภชัย ตั้งสุภัคธาดา
สุธีรา ศรีสมัคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พลาสมา	3
2.1.1 การกำเนิดของพลาสมา	3
2.1.2 กระบวนการเกิดอนุภาคที่มีประจุ	3
2.1.3 แหล่งกำเนิดพลาสมา	4
2.1.4 อุณหภูมิของพลาสมา	5
2.1.5 เทคโนโลยี Low-pressure plasma	6
2.2 การปรับปรุงพื้นผิววัสดุ	7
2.2.1 การทำความสะอาดด้วยระบบอัลตราโซนิค	8
2.2.2 การทำความสะอาดด้วยระบบพลาสมา	8
2.3 การตรวจสอบความสะอาดของพื้นผิว	9
2.3.1 มุมสัมผัส	9
2.3.2 ประเภทของการวัดมุมสัมผัส	10
2.4 สเปกโตรมิเตอร์	11
2.5 ระบบสุญญากาศ	11
2.5.1 ปั๊มสุญญากาศ	12
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	14
3.1 ศึกษาสเปกตรัมของพลาสมาของแก๊สอาร์กอน ,แก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน	14
3.1.1 อุปกรณ์	14
3.1.2 ขั้นตอนการศึกษาสเปกตรัมของพลาสมาแต่ละชนิด	18
3.2 ออกแบบและสร้างชิ้นส่วนเพื่อปรับปรุงระบบเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา	19
3.2.1 ออกแบบและสร้างชิ้นส่วนเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา	19
3.2.2 สร้างกล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 การทำความสะอาดพื้นผิววัสดุด้วยเทคนิคต่างๆ	23
3.3.1 การทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาด	23
3.3.2 การทำความสะอาดผิววัสดุด้วยระบบอัลตราโซนิค	23
3.3.3 การทำความสะอาดผิววัสดุด้วยพลาสมา	24
3.3.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการทำความสะอาดผิววัสดุด้วยพลาสมา	25
3.3.5 การวัดมุมสัมผัส	25
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	27
4.1 ผลการทดลองการเกิดพลาสมา	27
4.1.1 แก๊สอาร์กอน	27
4.1.2 แก๊สไนโตรเจน	28
4.1.3 แก๊สออกซิเจน	29
4.2 ผลการทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงาน	30
4.2.1 ผลการวัดมุมสัมผัสก่อนการทำความสะอาด	30
4.2.2 ผลการวัดมุมสัมผัสหลังทำความสะอาดโดยใช้น้ำยาทำความสะอาด	31
4.2.3 ผลการวัดมุมสัมผัสหลังทำความสะอาดโดยใช้กระบวนการอัลตราโซนิค	33
4.2.4 ผลการวัดมุมสัมผัสหลังทำความสะอาดโดยใช้กระบวนการพลาสมา	35
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	38
5.1 สรุปผลการวิจัย	38
5.2 ข้อเสนอแนะ	38
เอกสารอ้างอิง	ฌ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กระบวนการทำความสะอาด	7
2.2 ช่วงความดันของระดับความเป็นสุญญากาศ	12
3.1 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก๊สแต่ละชนิด	18
3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิววัสดุด้วยพลาสมา	25
4.1 มุมสัมผัสของกระจกสไลด์และเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของมุมสัมผัส	32
4.2 มุมสัมผัสของกระจกสไลด์และเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของมุมสัมผัส	34

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างกระบวนการทำงานของ Low-pressure plasma	6
2.2 ชิ้นงานก่อนทำความสะอาดด้วย	9
2.3 ชิ้นงานระหว่างการทำความสะอาดด้วย	9
2.4 ชิ้นงานหลังการทำความสะอาดด้วย	9
2.5 มุมสัมผัส	10
2.6 ค่ามุมสัมผัสของวัสดุที่มีคุณสมบัติต่างๆ	10
2.7 มุมสัมผัสของพื้นผิวที่มีสิ่งปนเปื้อนและพื้นผิวที่สะอาด	10
2.8 การวัดมุมสัมผัสแบบ Tiling Plate Method	11
2.9 โครงสร้างภายในของ Rotary vane pump	12
2.10 โครงสร้างของ diffusion pump	13
3.1 ภาพรวมของระบบที่ใช้ในการศึกษาสเปกตรัม	14
3.2 แชมเบอร์	15
3.3 Rotary pump	15
3.4 Diffusion pump	15
3.5 ระบบทำความเย็น	16
3.6 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส	16
3.7 แหล่งจ่ายคลื่นความถี่วิทยุ	16
3.8 แก๊สอาร์กอน ,แก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจน	17
3.9 สเปกโตรมิเตอร์ และโปรแกรม Avasoft	17
3.10 ระบบควบคุมหลัก	17
3.11 แผนภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆ	18
3.12 แท่นวางชิ้นงาน	19
3.13 ฐานวางชิ้นงานและเสา	19
3.14 ฝาปิดแชมเบอร์	20
3.15 ฉนวนไฟฟ้า	20
3.16 อุปกรณ์กล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส	21
3.17 วงจรที่ใช้ในกล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส	21
3.18 กล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส	21
3.19 ภายในกล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส	22
3.20 ภาพรวมของระบบการทำความสะอาดผิววัสดุด้วยพลาสมา	22
3.21 ชิ้นงานระหว่างการทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาด	23
3.22 ชิ้นงานระหว่างการทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิค	24
3.23 ชิ้นงานระหว่างการทำความสะอาดด้วยพลาสมาโดยใช้แก๊สไนโตรเจน	24
3.24 ชิ้นงานระหว่างการทำความสะอาดด้วยพลาสมาโดยใช้แก๊สอาร์กอน	25
3.25 เครื่องวัดมุมสัมผัส	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 กราฟการเกิดพลาสมาของแก๊สอาร์กอน	27
4.2 กราฟการเกิดพลาสมาของแก๊สไนโตรเจน	28
4.3 กราฟการเกิดพลาสมาของแก๊สออกซิเจน	29
4.4 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์ชิ้นที่ 1	30
4.5 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์ชิ้นที่ 2	30
4.6 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์ชิ้นที่ 3	31
4.7 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์โดยใช้น้ำยาทาความสะอาดชิ้นที่ 1	32
4.8 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์โดยใช้น้ำยาทาความสะอาดชิ้นที่ 2	32
4.9 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์โดยใช้น้ำยาทาความสะอาดชิ้นที่ 3	32
4.10 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์โดยใช้กระบวนการอัลตราโซนิคชิ้นที่ 1	33
4.11 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์โดยใช้กระบวนการอัลตราโซนิคชิ้นที่ 2	33
4.12 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์โดยใช้กระบวนการอัลตราโซนิคชิ้นที่ 3	34
4.13 กราฟเปรียบเทียบมุมสัมผัสระหว่าง ก่อนทาความสะอาดหลังการทำความสะอาด ด้วยน้ำยาทาความสะอาด และ หลังการทาความสะอาดด้วยอัลตราโซนิค	34
4.14 ชิ้นงานภายในเครื่องทาความสะอาดผิวด้วยพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊ส 5 sccm	35
4.15 ชิ้นงานภายในเครื่องทาความสะอาดผิวด้วยพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊ส 10 sccm	35
4.16 ชิ้นงานภายในเครื่องทาความสะอาดผิวด้วยพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊ส 15 sccm	36
4.17 ชิ้นงานภายในเครื่องทาความสะอาดผิวด้วยพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊ส 20 sccm	36
4.18 ชิ้นงานภายในเครื่องทาความสะอาดผิวด้วยพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊ส 10 sccm	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการทำความสะอาดพื้นผิวของวัสดุที่จะนำไปใช้เป็นเรื่องสำคัญ เพราะความสะอาดของพื้นผิววัสดุนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพของวัสดุเมื่อนำไปใช้ในเงื่อนไขต่างๆ ดังนั้นจึงเกิดเทคโนโลยีที่หลากหลายของการทำความสะอาดมากขึ้น ซึ่งทุกวันนี้ในยุคที่เทคโนโลยีก้าวหน้ามากขึ้น ทำให้การทำความสะอาดในปัจจุบันนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งในแต่ละวิธีนั้น ก็จะมีจุดเด่น และจุดด้อยแตกต่างกันออกไป อีกทั้งในการเลือกวิธีการทำความสะอาดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ประการแรก คือ ลักษณะทางกายภาพหรือคุณสมบัติของพื้นผิวที่จะทำความสะอาด เราจะต้องทราบว่าพื้นผิวที่เราจะนำมาทำความสะอาดมีคุณสมบัติอย่างไร พื้นผิวบางชนิดอาจจะไม่เหมาะกับการทำความสะอาดโดยใช้ของเหลว เช่น โต๊ะไม้ ประการที่สอง คือ รูปทรงของวัสดุที่จะทำความสะอาด เช่น วัสดุอาจจะมีร่องลึก เป็นต้น ประการสุดท้ายคือความสะอาดของพื้นผิวที่เราต้องการ การทำความสะอาดโดยทั่วไปมักจะทำความสะอาดโดยใช้แรงช่วย เช่น การใช้ผ้าเช็ด ปัดด้วยไม้ปัดฝุ่น เป่าด้วยลม การดูด การล้างด้วยน้ำหรือแรงดันน้ำ ซึ่งวิธีเหล่านี้ มีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากมากนัก และมีความสะอาดของพื้นผิวในระดับหนึ่งแต่วิธีเหล่านี้ก็อาจมีความสะอาดที่ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการที่จะนำไปใช้งานทำให้บางครั้งอาจต้องมีการใช้สารเคมีเข้ามาช่วยแต่สารเคมีเหล่านั้นก็มักส่งผลกระทบต่อลักษณะที่มองเห็นหรืออาจจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากสารเคมี หรือแม้กระทั่งการทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิคที่สามารถทำความสะอาดได้ดีแต่ก็ยังมีข้อจำกัดมากมาย จึงทำให้ต้องมีการทำความสะอาดที่ดีขึ้นคือ การทำความสะอาดด้วยพลาสมา

พลาสมาเกิดจากการแตกตัวของอะตอมของแก๊ส เนื่องจากการได้รับพลังงานความร้อนหรือการได้รับการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้า ซึ่งการทำความสะอาด หรือการปรับปรุงพื้นผิววัสดุโดยการใช้พลาสมานั้น ทำได้โดยการให้พลังงานแก่แก๊ส ซึ่งแก๊สที่นำมาใช้ในระบบการทำความสะอาดเป็นการผสมระหว่างแก๊สหลายชนิด เช่น การผสมระหว่างแก๊สอาร์กอนและออกซิเจน เป็นต้น การทำความสะอาดพื้นผิววัสดุที่ต้องการ ด้วยกระบวนการทำความสะอาดโดยพลาสมา สามารถทำความสะอาดได้ดี ไม่มีผลกระทบต่อลักษณะที่มองเห็นหรือคุณสมบัติของวัสดุหรือชิ้นงาน รวมถึงมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายนอกที่ค่อนข้างน้อย ทางด้านสารเคมีตกค้าง ด้านความร้อน รวมทั้งมีการทำความสะอาดที่ทั่วถึง ในทุกบริเวณของพื้นผิวที่ต้องการ การทำความสะอาดด้วยพลาสมานั้นมีการวิจัยมากมาย เช่น J.Reyes-Herrera และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาการทำความสะอาดคาร์บอนด้วยกระบวนการพลาสมาคลีนนิ่งโดยใช้แก๊สผสม 2 ชนิด คือออกซิเจนกับอาร์กอน และ ไฮโดรเจนกับอาร์กอน โดยเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า (RF Power) ในการศึกษาปริมาณของแก๊สที่เปลี่ยนแปลง แล้วยังส่งผลถึงอัตราการทำความสะอาดด้วย นอกจากการทำความสะอาดแล้ว พลาสมายังสามารถสร้างชั้นของสารประกอบบนชิ้นงานได้ด้วย โดย Jiqiang Wu และคณะ [2] ได้ทำการศึกษา เกี่ยวกับกระบวนการออกซีไนไตรด์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของพื้นผิวเหล็ก AISI4140 ให้มีความหนา และความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีพลาสมา สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆได้มากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการทำความสะอาดพื้นผิวโดยไม่กระทบต่อคุณสมบัติดั้งเดิมของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นๆ ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการปรับปรุงเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมา โดยการออกแบบ ฐานวางชิ้นงาน กล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส จากนั้นทำการทดสอบเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมา โดยการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่จ่าย ชนิดของแก๊ส รวมถึงอัตราการไหลของแก๊ส

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมา
2. เพื่อศึกษาการเกิดพลาสมาของแก๊ส อาร์กอน ออกซิเจน และ ไนโตรเจน
3. เพื่อศึกษาผลของชนิดของแก๊สและอัตราการไหลของแก๊ส ที่มีต่อค่ามุมสัมผัสของชิ้นงาน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบฐานวางชิ้นงาน และกล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส
2. ศึกษาความแตกต่างของสเปกตรัมของพลาสมา ของแก๊ส ออกซิเจน อาร์กอนและ ไนโตรเจน ด้วย Optical Emission Spectroscopy
3. ศึกษาอิทธิพลของชนิดของแก๊สและอัตราการไหลของแก๊สที่มีต่อการทำความสะอาดชิ้นงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีทักษะความรู้ความเข้าใจในระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมา
2. มีทักษะความรู้ความเข้าใจในระบบการวัดมุมสัมผัส
3. ได้ทักษะในการทำระบบสุญญากาศ
4. สามารถสรุปความแตกต่างข้อดีข้อเสียของการทำความสะอาดโดยพลาสมาที่เงื่อนไขต่างๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสมา

สถานะของสสาร โดยปกติที่ทราบกันดีอยู่แล้ว มีอยู่ 3 สถานะคือ ของแข็ง ของเหลว และ แก๊ส ซึ่ง พลาสมา จัดได้ว่าเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เมื่ออุณหภูมิของสสารเพิ่มขึ้น สสารจะทำการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว จากสถานะของเหลวเป็นแก๊ส และสถานะแก๊ส เป็นพลาสมา เนื่องจาก สถานะพลาสมานั้น มีลักษณะเฉพาะที่มีความแตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน คือ แก๊สที่มีสภาพเป็นไอออน พลาสมาประกอบไปด้วย อนุภาคที่มีทั้งประจุบวก และประจุลบ ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์

บนโลกมีอนุภาคที่หนาแน่นมาก สสารจึงไม่ค่อยเกิดการแยกตัวทางไฟฟ้า แต่เมื่อความสูงจากพื้นโลกมากขึ้น จะทำให้เกิดการแยกตัวของสสารเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น นอกชั้นบรรยากาศ จึงมีพลาสมามากมาย พลาสมาที่สามารถพบได้ตามธรรมชาติ เช่น ปรากฏการณ์แสงเหนือ(Aurora borealis) และแสงใต้ (Aurora australis)

นอกเหนือจากพลาสมาตามธรรมชาติแล้ว มนุษย์ยังสามารถสร้างพลาสมาได้ ซึ่ง พลาสมาสามารถเกิดได้โดยให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่แก๊สที่มีความเป็นกลาง เมื่ออิเล็กตรอนอิสระได้รับพลังงานมากพอ จะทำให้เกิดการชนของอิเล็กตรอนอิสระ กับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) กระบวนการแตกตัวเป็นไอออนนี้ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการหลุดออกของอิเล็กตรอน และ เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้แก๊สแตกตัว และกลายเป็นพลาสมา พลาสมานั้นจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากสถานะอื่นๆ คือ ความยาวคลื่นเดอบาย จำนวนอนุภาค และ ความถี่พลาสมา

2.1.1 การกำเนิดของพลาสมา

พลาสมานั้นจะเกิดขึ้นเมื่ออะตอมของแก๊สนั้นได้รับพลังงานกระทั่งแตกตัวเป็นไอออน หรือทำให้อะตอมนั้นอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (Excited atom) ดังนั้น พลาสมาจึงประกอบด้วยอนุภาคหลักๆ คือ Positive Ion , Electron , Excited atom รวมถึงอะตอมที่ไม่เกิดการแตกตัว โดยกระบวนการหลักๆที่ทำให้เกิดการแตกตัวนั้น คือการชนของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานกับอะตอมของแก๊ส โดยอิเล็กตรอน จะดูดกลืนพลังงานจากแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า แล้วถ่ายเทให้กับอะตอมแก๊สด้วยการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (เป็นการชนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน ไปสู่อะตอมของแก๊ส ในรูปของพลังงานศักย์เพื่อใช้ในการแตกตัวเป็นไอออน) ซึ่ง electron impact ionization เป็นการบวนการสำคัญที่ทำให้สภาวะพลาสมาคงอยู่ต่อไปได้

2.1.2 กระบวนการเกิดอนุภาคที่มีประจุ

พลาสมานั้นสามารถเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมที่เป็นกลาง เกิดการแตกตัว ซึ่งการทำให้อะตอมเหล่านั้นแตกตัวสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแตกตัวเป็นไอออนโดยการชน (electron impact) และการแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง เป็นต้น ถ้าอัตราการเกิดของอิเล็กตรอนอิสระ เท่ากับหรือมากกว่าอัตราการสูญเสีย แสดงว่ามีพลาสมาเกิดขึ้น พลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกสุดหลุดออกจากอะตอม เรียกว่า พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (ionization energy) ในกรณีของแข็งได้รับพลังงาน แล้วอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของของแข็ง เรียกว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน (electron emission) และพลังงานที่น้อยที่สุดทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกได้เรียกว่า ฟังก์ชันงาน (work function) การแตกตัวเป็นไอออนและการปลดปล่อยอิเล็กตรอนนี้ เป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในการสร้างพลาสมา โดย โอกาสที่อะตอมของแก๊สภายในระบบจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักๆคือ

1. พลังงานของอิเล็กตรอน : electron energy มากกว่า ionization energy

2. ความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าชนอะตอมของแก๊ส : โอกาสในการชนขึ้นอยู่กับขนาดของอะตอมแก๊ส โดยถ้าขนาดของอะตอมแก๊สมีขนาดใหญ่ ก็จะมีโอกาสในการชนกับอิเล็กตรอนมากขึ้น แต่ในบางกรณี อย่างเช่น การแยกพันธะของ H2 gas ให้กลายเป็น H-atom ด้วย electron impact dissociation นั้นโอกาสในการชนนั้นมีค่อนข้างน้อย ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากขนาดโมเลกุลของ H2 นั้นมีขนาดเล็ก การเพิ่มโอกาสทำได้โดยใช้อนุภาคที่มีพลังงานเพียงพอกับ H-H bond และมีขนาดใหญ่กว่า electron ซึ่งอนุภาคที่เหมาะสมดังกล่าวคือ excited state ของอาร์กอน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวคือปรากฏการณ์ Penning effect

2.1.3 แหล่งกำเนิดพลาสมา

แหลงกำเนิดพลาสมาที่สนใจมีอยู่ด้วยกัน 3 ลักษณะ คือ

1. DC plasma source

แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดนี้ ให้กำเนิดพลาสมาได้ด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วในบริเวณที่มีอะตอมของแก๊ส อะตอมของแก๊สจะเกิดการแตกตัวเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจนมีพลังงานมากพอและวิ่งเข้าชนกับอะตอมของแก๊ส การที่สภาวะของพลาสมาจะคงอยู่ได้อย่างมีเสถียรภาพนั้น ไอออนที่เกิดขึ้นจะต้องถูกเร่งเข้าชนกับขั้วแคโทดเพื่อทำให้เกิด secondary electron แล้ว secondary electron เหล่านี้ก็จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าพุ่งชนกับอะตอมของแก๊สเพื่อให้เกิดพลาสมาต่อไป โดยทั่วไป ระบบ DC plasma จะต้องป้อนแรงดันสูงถึง 400 Volt จึงส่งผลให้พื้นผิวของตัวอย่างซึ่งวางอยู่บนขั้วแคโทดนั้นถูก sputtered ด้วยไอออนพลังงานไปด้วย

2. Microwave plasma source

Microwave plasma source ให้กำเนิดพลาสมาด้วยการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ (ความถี่ 2.45 GHz) และทำให้อะตอมแตกตัวเป็นไอออน แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟโดยทั่วไป จะให้ค่า field strength ประมาณ 30 V/cm แต่เนื่องจากเป็นคลื่นความถี่สูงกว่าคลื่นวิทยุหรือ RF จึงทำให้ amplitude มีค่าน้อยกว่า 10 um ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานที่อิเล็กตรอนจะสามารถดูดกลืนจากคลื่นได้เพียง 0.03 eV ต่อการเคลื่อนใน 1 ลูกคลื่น ซึ่งเป็นพลังงานที่น้อยมากเมื่อเทียบกับ ionization energy ของอะตอม จากหลักการสะสมพลังงานของอิเล็กตรอนใน AC source นั้น จะเห็นได้ว่า อิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของคลื่นความถี่ไมโครเวฟจะดูดกลืนพลังงานจากคลื่นได้มากเพียงพอกับ ionization energy ของอะตอมแก๊สนั้น จะต้องเกิดการชนแบบยืดหยุ่นกับอะตอมของแก๊สหลายครั้ง จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ Microwave plasma source ไม่สามารถทำงานได้ที่ความดันต่ำเท่ากับ DC plasma source หรือ RF plasma source

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงความดันที่เหมาะสมกับ microwave plasma source จะอยู่ในช่วง 0.65 – 13.3 mbar แต่ถ้าเป็นแก๊สฮีเลียม ซึ่งมีขนาดโมเลกุลค่อนข้างเล็กความดันที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 6.5 – 13.3 mbar

แต่ถ้านำสนามแม่เหล็ก (875 Gauss) เข้าใช้กับ Microwave plasma source ก็จะทำให้เกิดแหล่งกำเนิดพลาสมา แบบใหม่ขึ้น เรียกว่า Electron Cyclotron Resource Plasma Source (ECR plasma source) ซึ่งจะทำให้สามารถทำงานที่ความดันต่ำกว่า RF plasma source รวมทั้งยังให้ plasma density สูงกว่าอีกด้วย

3. RF plasma source

แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดนี้แตกต่างจาก DC plasma source ตรงที่แหล่งกำเนิดพลังงานเป็น Radio Frequency (RF) ซึ่ง RF source ที่ใช้กันโดยทั่วไปจะกำเนิดความถี่ 13.56 MHz และ field strength 10 V/cm โดยถ้ามี electron เคลื่อนที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าดังกล่าวในช่วงเวลา T/4 อิเล็กตรอนนั้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2.1×10^{8} cm.sec^{-1} แอมปลิจูด 2.42 cm ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานจากแหล่งกำเนิด ประมาณ 11.3 eV เท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอต่อการทำให้อะตอมแก๊สอาร์กอน (IE 15.7 eV) เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้

การแตกตัวของไอออนด้วย RF source เกิดขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนนั้นสามารถสะสมพลังงานได้เนื่องจาก RF source เป็น AC source โดยเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในอิทธิพลของสนามไฟฟ้า ถ้าในจังหวะที่สนามไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนทิศพอดีกับอิเล็กตรอนชนกับอะตอมแบบยืดหยุ่น จะทำให้อิเล็กตรอนนั้นเคลื่อนย้อนกลับในทิศทางเดิมและเป็นทิศทางสวนกับสนามไฟฟ้าเช่นเดิม จึงทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นอีก และเมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอหรือมากกว่า ionization energy ของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอม และเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยช่วงความดันที่เหมาะสมนั้นอยู่ในช่วง 10^{-3}-1 mbar

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ใน RF plasma source อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาอยู่ภายในแหล่งกำเนิด และ สามารถเก็บพลังงานสะสมไว้ให้มีค่ามากพอ แต่สำหรับ DC plasma source แล้ว อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่กลับเข้ามาใหม่ได้ ทำให้ภายในแหล่งกำเนิด DC plasma source จำเป็นจะต้องสร้างอิเล็กตรอนเข้ามาเติมให้กับระบบเรื่อยๆ ซึ่งอิเล็กตรอนดังกล่าวเกิดขึ้นได้จาก ion sputtering กับ cathode electrode หรือ อาจจำเป็นต้องมี filament ติดตั้งไว้ในระบบด้วย

2.1.4 อุณหภูมิของพลาสมา

Plasma temperature โดยทั่วไปแล้วมักจะหมายถึง electron temperature ภายในพลาสมา เนื่องจากภายในพลาสมาประกอบด้วยทั้ง ไอออน ,อิเล็กตรอน ,เรดิคอล และ อะตอมแก๊สที่เป็นกลาง อนุภาคเหล่านี้จะมีอุณหภูมิไม่เท่ากัน โดนอิเล็กตรอนในพลาสมาจะมีอุณหภูมิมากกว่า 10,000 K แต่ในขณะที่ไอออนหรืออะตอมของแก๊สจะมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ ด้วยสาเหตุนี้จะเห็นได้ว่า พลาสมาที่เกิดขึ้น ไม่ได้มีความร้อนจนสร้างความเสียหายให้กับระบบ เพราะการถ่ายเทความร้อนจากพลาสมาออกสู่สภาพแวดล้อม จะถ่ายเท่ผ่านทางอะตอมของแก๊ส เราจึงเรียกพลาสมาในลักษณะนี้ว่า Cold plasma แต่ถ้าความดันภายในระบบมีค่ามากขึ้น (ความดันมากกว่า 60 mbar โดยประมาณ) อุณหภูมิของอิเล็กตรอนจะมีค่าลดลง เพราะถ่ายเทให้กับอะตอมของแก๊ส จึงทำให้อุณหภูมิของอะตอมแก๊สสูงมากขึ้น (มากกว่า 1000 K)

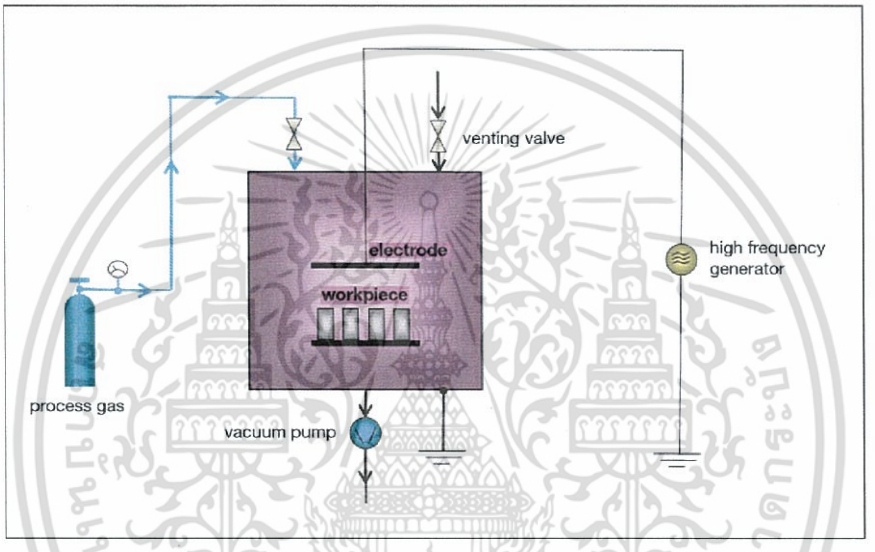
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษนี้ใช้เทคโนโลยีการทำความสะอาดด้วยพลาสมา โดยใช้ ระบบ Low-pressure plasma

2.1.5 เทคโนโลยี Low - pressure plasma

1. วิธีการทำงานของระบบ Low-pressure plasma

องค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของระบบคือ vacuum chamber ,ปั๊มสุญญากาศ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการสร้างพลาสมา ในภาพ จะแสดงถึงโครงสร้างกระบวนการทำงานของ Low-pressure plasma



รูปที่ 2.1 โครงสร้างกระบวนการทำงานของ Low-pressure plasma

2. ขั้นตอนของกระบวนการพลาสมา

ในขั้นตอนแรก ภายใน chamber จะถูกทำให้มีความดันต่ำโดยวิธีการปั๊มสุญญากาศที่ความดันประมาณ 0.1 มิลลิบาร์ จากนั้นแก๊ส เช่น ออกซิเจน จะถูกป้อนเข้ามาภายใน chamber และควบคุมความดัน จาก 0.1 เป็น 1.0 มิลลิบาร์ ต่อมาเมื่อเปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ต่อเข้ากับตัว chamber แก๊สที่อยู่ภายในเมื่อได้รับพลังงาน จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับกระบวนการพลาสมา

ในกระบวนการพลาสมาแต่ละครั้ง จะมีเงื่อนไขตัวแปร ที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับความต้องการนำไปใช้งานของชิ้นงาน หนึ่งในตัวเลือกของพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันคือปริมาตร ขนาด chamber ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่า ขนาด และ ปริมาณขององค์ประกอบที่จะเข้าสู่กระบวนการพลาสมา ระบบที่มีขนาดใหญ่ อาจมีปริมาตรภายใน chamber ถึง 10,000 ลิตร หรือมากกว่านั้น ในระบบของห้องปฏิบัติการเคมีจะอยู่ใช่วง 1-50 ลิตร รวมถึงขนาดของปั๊มสุญญากาศที่จะมีการปรับขนาดที่แตกต่างกันออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การปรับปรุงพื้นผิววัสดุ

การทำความสะอาดนั้น สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ การทำความสะอาดแบบเปียก (wet cleaning) และการทำความสะอาดแบบแห้ง (dry cleaning) ซึ่งการทำความสะอาดแบบเปียก หมายถึงการทำความสะอาดโดยใช้ ตัวทำละลาย (solvent) กรด (acids) และน้ำ ในการละลาย (dissolve) การออกซิไดซ์ (oxidize) การกัด (etch) และการชำระล้างเพื่อกำจัดฝุ่นผง สิ่งปนเปื้อน หรือสารเคมีตกค้างออกจากพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งการทำความสะอาดแบบเปียกนี้ มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก เนื่องจากมีอาจทำให้มีสารเคมีออกสู่สิ่งแวดล้อม รวมถึงมีการใช้น้ำปริมาณมาก ดังนั้นจึงนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีของการทำความสะอาด คือการทำความสะอาดแบบแห้งอย่างหนึ่ง ซึ่งการทำความสะอาดแบบแห้งนี้ มักจะใช้ปฏิกิริยาเคมีในสถานะที่เป็นแก๊ส โดยใช้พลังงานกระตุ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว พลังงานที่ใช้นั้น อาจอยู่ในรูปของความร้อน พลาสมา หรือรังสี เป็นต้น ซึ่งวิธีนี้ จะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการทำความสะอาดแบบแห้ง ไม่ทำให้เกิดมลภาวะ

วิธีการปรับสภาพพื้นผิว (surface treatment) ด้วยเทคนิคต่างๆนั้น โดยส่วนใหญ่แล้วมักเป็นกระบวนการทางเคมีหรือความร้อน ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน การทำความสะอาดพื้นผิวจะมีอยู่ 3 วิธี

ตารางที่ 2.1 กระบวนการทำความสะอาด

กระบวนการทำความสะอาด	วิธีการทำความสะอาด
Mechanically	Brush
Thermally	Dry up Temper Reduction of water shifts
Chemically	Organic solvents Forming gas UV-ozone Low-pressure plasma

กระบวนการเหล่านี้ อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งกายภาพ หรือ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้ ดังนั้น กระบวนการทำความสะอาดโดยพลาสมา จึงได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อใช้ทำความสะอาดพื้นผิว

พลาสมา ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆมากมาย ในทางการแพทย์ ถูกนำไปใช้การรักษาโรคผิวผิวหนัง และการรักษาบาดแผล เช่น การรักษาแผลเบาหวาน มะเร็งบางชนิด ในทางทันตกรรม พลาสมาถูกนำไปใช้ในการฆ่าเชื้อรากฟันเทียม นอกจากนี้ ในด้านอุตสาหกรรม พลาสมาถูกนำไปใช้เพื่อการถนอมอาหาร โดยการใช้พลาสมาในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์บางชนิด อันเป็นสาเหตุของอาหารเน่าเสียและโรคต่างๆ แต่ในโครงงานพิเศษชิ้นนี้ จะสนใจในส่วนของการปรับปรุงพื้นผิววัสดุหรือการทำความสะอาดด้วยพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การทำความสะอาดด้วยระบบอัลตราโซนิค

คลื่นเสียง เป็นคลื่นที่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ แบ่งออกเป็นช่วงที่ต่างๆกัน การเคลื่อนที่ของคลื่นเกิดจากการสั่นของโมเลกุลหรืออะตอมของตัวกลาง ซึ่งจะสั่นด้วยความถี่ค่าๆหนึ่ง เป็นที่ทราบกันดีว่า ความถี่เสียงสูงสุดที่มนุษย์สามารถได้ยินนั้นประมาณ 15 kHz ในขณะที่ความถี่ของอัลตราโซนิค สูงกว่า 20 kHz การทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิคนี้ สามารถทำความสะอาดได้ทั้งวัสดุที่มีขนาดใหญ่ หรือเล็กก็ได้ คลื่นความถี่ที่สูงนี้จะทำให้ฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกที่ไม่ต้องการบนพื้นผิวชิ้นงานนั้นหลุดออก โดยที่ไม่ทำให้ชิ้นงานเสียหาย

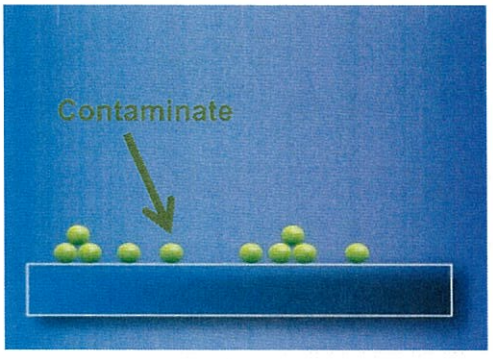
การทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิค มีข้อดีกว่าการทำความสะอาดแบบขัดถูธรรมดาหลายประการ เช่น การทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิคสามารถทำให้เกิดการสั่นของเนื้อสารในระดับโมเลกุลได้ โดยทำให้เกิดการแตกตัวภายใน (Violent Implosion) ทำให้มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูง สามารถทำความสะอาดในส่วนที่เป็นรอยแตก รอยแยก บนชิ้นงานได้ รวมทั้งเป็นการทำความสะอาดโดยไม่ทำลายผิวของชิ้นงาน ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อน สึกหรอบนชิ้นงานที่ถูกทำความสะอาด

2.2.2 การทำความสะอาดด้วยระบบพลาสมา (Plasma cleaning)

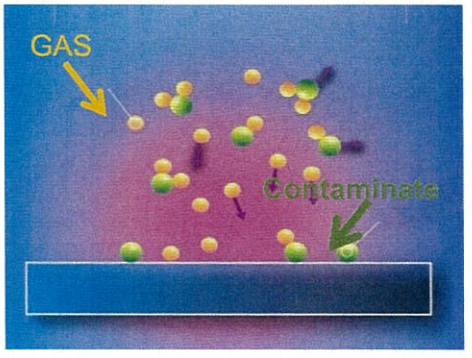
พลาสมาเกิดจากการแตกตัวของอะตอมที่เป็นกลาง เนื่องจากได้รับพลังงานความร้อนหรือได้รับการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานไอออไนเซชั่น การกำจัดสารปนเปื้อนบนพื้นผิวจึงทำได้โดยการใช้พลาสมาของก๊าซผสมระหว่างก๊าซอาร์กอน และก๊าซออกซิเจน พลาสมาของอาร์กอนจะกำจัดสารปนเปื้อนด้วยกระบวนการสปัตเตอริง ในขณะที่ออกซิเจนในรูปของอนุมูลอิสระ จะทำปฏิกิริยาเคมีกับสารปนเปื้อน เช่น คาร์บอนจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดเป็นสารประกอบในรูปของก๊าซ เช่น คาร์บอนไดออกไซหลุดออกจากพื้นผิว และถูกดูดออกจากระบบด้วยปั๊มสุญญากาศ ส่วนออกไซด์ของโลหะซึ่งเป็นตัวขัดขวางของการยึดติดของการเชื่อมลวดสามารถกำจัดได้โดยใช้พลาสมาของก๊าซผสมระหว่างก๊าซอาร์กอนและไฮโดรเจน โดยอนุมูลอิสระของไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของโลหะด้วยปฏิกิริยารีดักชั่น ทำให้ออกซิเจนหลุดออกจากพื้นผิวในรูปของไอน้ำ ส่วนพลาสมาของอาร์กอนจะเข้าชนพื้นผิวจนเกิดเป็นรอยขรุขระซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นที่ผิวของจุดเชื่อมช่วยให้จุดเชื่อมมีความแข็งแรงมากขึ้น

เทคโนโลยี พลาสมานั้น ถูกนำไปใช้ในต่างๆมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ด้านการทำความสะอาดพื้นผิววัสดุ คือการนำเอาสิ่งสกปรก ฝุ่นละอองหรือการปนเปื้อนต่างๆออกจากผิววัสดุ โดยปฏิกิริยาระหว่างพลาสมากับพื้นผิววัสดุนั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว เป็นการปรับปรุงเฉพาะพื้นผิวโดยไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติดั้งเดิมของวัสดุนั้นๆ อีกทั้งยังเป็นกระบวนการทำความสะอาดที่มิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพราะมีการใช้น้ำและสารเคมีที่รุนแรงน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ชิ้นงานก่อนทำความสะอาด



รูปที่ 2.3 ชิ้นงานระหว่างการทำความสะอาด

รูปที่ 2.4 ชิ้นงานหลังการทำความสะอาด

2.3 การตรวจสอบความสะอาดของพื้นผิว

การตรวจสอบความสะอาดของพื้นผิวสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งหนึ่งในนั้น คือ วิธีการวัด contact angle

2.3.1 มุมสัมผัส (Contact angle)

มุมสัมผัส (contact angle) คือ มุมที่คือบอกถึงคุณสมบัติการเปียกของพื้นผิวของของแข็งด้วยของเหลว โดยผ่าน Young's equation

Young's equation

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv}\cos(\theta)$$

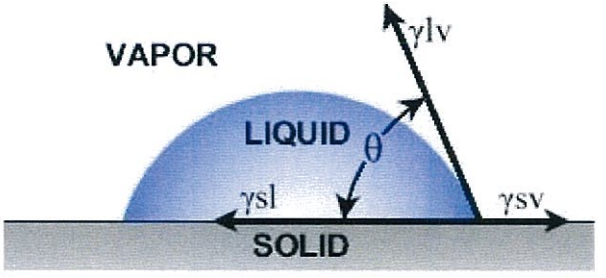
โดยที่ γ_{sv} คือ solid surface free energy

γ_{sl} คือ solid/liquid interfacial free energy

γ_{lv} คือ liquid surface free energy

θ คือ มุมสัมผัส (contact angle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 มุมสัมผัส

จากรูป contact angle คือ มุมระหว่างรอยต่อของของเหลวและก๊าซกับรอยต่อของของเหลวและของแข็ง ถ้ามุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่า 90° แสดงว่าพื้นผิวของวัสดุนั้นมีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 90° ขึ้นไปพื้นผิวของวัสดุนั้นมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า 150° แสดงว่าพื้นผิวของวัสดุนั้นมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (super hydrophobic) ดังแสดงในรูปที่ มุมสัมผัสไม่เพียงแต่บอกถึงความสามารถในการเปียกเท่านั้น แต่ยังสามารถบอกถึงความขรุขระของพื้นผิว และความสะอาดของพื้นผิวได้อีกด้วย ซึ่งถ้าหากว่าพื้นผิวมีความสะอาดมาก มุมสัมผัสจะน้อย

Hydrophilic surface มุมสัมผัสมีค่า น้อยกว่า 90°

Hydrophobic surface มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 90° ขึ้นไป

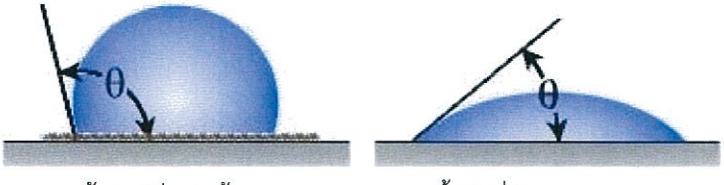
Superhydrophobic surface มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 150° ขึ้นไป

รูปที่ 2.6 ค่ามุมสัมผัสของวัสดุที่มีคุณสมบัติต่างๆ

2.3.2 ประเภทของการวัดมุมสัมผัส

2.3.2.1 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำที่ไม่เคลื่อนที่ (Static contact angle)

การวัดมุมสัมผัสด้วยวิธี static contact angle เป็นการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำหรือของเหลวที่ไม่มีการเคลื่อนที่ด้วยระยะเวลาสั้นๆ เมื่อหยดหยดน้ำลงไปบนพื้นผิวของของแข็งก็จะทำการถ่ายภาพแล้วนำไปวัดมุมสัมผัส ซึ่งการวัดแบบนี้เป็นที่นิยมนำมาใช้ส่วนมาก



พื้นผิวมีสิ่งปนเปื้อน

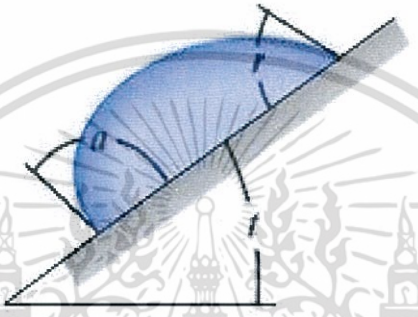
พื้นผิวที่มีความสะอาด

รูปที่ 2.7 มุมสัมผัสของพื้นผิวที่มีสิ่งปนเปื้อนและพื้นผิวที่สะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการวัดมุมสัมผัสแบบนี้ส่วนใหญ่มักจะถูกนำมาใช้ในการวัดค่าความสะอาดของพื้นผิว ซึ่งสิ่งปนเปื้อนสารอินทรีย์พวกนี้จะเป็นตัวขัดขวางคุณสมบัติการเปียก จากรูป จะเห็นได้ว่าเมื่อพื้นผิวที่มีคุณสมบัติ hydrophobic หรือมีค่ามุมสัมผัสมากถูกทำความสะอาด และได้รับการปรับสภาพเพื่อเอาสิ่งปนเปื้อนออก ค่ามุมสัมผัสก็จะลดลงกว่า ซึ่งถ้าหากว่าพื้นผิวมีความสะอาดมากขึ้นมุมสัมผัสก็จะน้อยลง และในขณะเดียวกัน คุณสมบัติการเปียกจะมากขึ้น และส่งผลให้พลังงานของพื้นผิวมากขึ้นด้วย

2.3.2.2 การวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวของของแข็งที่มีลักษณะเอียง (Tiling Plate Method)



รูปที่ 2.8 การวัดมุมสัมผัสแบบ Tiling Plate Method

จากรูป การวัดมุมสัมผัสด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวของของแข็งที่มีลักษณะเอียง เป็นการวัดมุมสัมผัสโดยการถ่ายภาพ sessile drop ทั้งสองข้าง (ทั้งซ้ายและขวา) จากรูป ในขณะที่พื้นผิวของของแข็งถูกทำให้เอียงจาก 0° จนถึง 90° มุมสัมผัสด้านบนที่เป็นเนินลาดลงมาจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมุมสัมผัสที่เนินด้านบนมีค่าลดลงมาตามลำดับ

2.4 สเปกโตรมิเตอร์

ในการวิเคราะห์แก๊สแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นภายในระบบพลาสมาของโครงงานพิเศษชิ้นนี้ ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์คือ สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer)

สเปกโตรมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ หรือเป็นเครื่องมือวัดเชิงแสงชนิดหนึ่งที่ใช้ในการตรวจวัดคุณสมบัติเฉพาะของแสง สเปกโตรมิเตอร์ คือ เครื่องวัดหาความเข้มของแสง (Intensity) ในช่วงความยาวคลื่นย่านต่างๆ เช่น UV / Visible / Near Infrared หรือ Infrared เป็นต้น โดยส่วนใหญ่แล้วมักถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อระบุชนิดของสสาร ผลของการวัดที่แตกต่างกันโดยส่วนใหญ่จะเกิดจากความเข้มของแสงที่แตกต่างกัน ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความยาวคลื่นของแสงถูกระบุเป็นหน่วยย่อยของเมตร หรือในบางครั้งก็ระบุเป็นสัดส่วนของพลังงานโฟตอน เช่น หมายเลขคลื่น หรือ อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมักมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นอยู่แล้ว เราใช้สเปกโทรมิเตอร์ในกระบวนการวิเคราะห์สเปกโทรสโกปี โดยสร้างเส้นสเปกตรัมขึ้น และตรวจวัดความยาวคลื่นกับความเข้ม สามารถวัดได้ตั้งแต่รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ ไปจนถึงรังสีอินฟราเรดไกล ถ้าย่านความถี่ของคลื่นที่สนใจตกอยู่ในย่านของสเปกตรัมที่ตามองเห็น มักเรียกการศึกษาเช่นนั้นว่า spectrophotometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ระบบสุญญากาศ

สุญญากาศ คือ ปริมาตรของช่องว่างที่ไม่มีสสารหรืออนุภาคอยู่เลย หรือความดันเป็นศูนย์ ซึ่งสุญญากาศดังกล่าวเรียกว่า “สุญญากาศสมบูรณ์” (perfect vacuum) แต่ในทางปฏิบัติแล้ว เราไม่สามารถทำให้ปริมาตรของช่องว่างไม่มีสสารอยู่ได้ ทำได้เพียงทำให้สสารเหลือน้อย หรือความดันเข้าใกล้ศูนย์ สุญญากาศแบบนี้เรียกว่า “สุญญากาศบางส่วน” (partial vacuum)

คุณภาพของสุญญากาศ คือ บอกถึงระดับของสภาวะที่เข้าใกล้สุญญากาศสมบูรณ์ว่าเข้าใกล้มากน้อยเพียงใด ความดันแก๊สที่เหลืออยู่ภายในระบบจะใช้เป็นตัววัดคุณภาพของสุญญากาศ โดยส่วนมากจะวัดความดันแก๊สในหน่วย Torr ความดันแก๊สที่มีค่าน้อยมากๆ นั่นหมายถึงระบบสุญญากาศมีคุณภาพดี ซึ่งระดับของคุณภาพของสุญญากาศแสดงดังนี้

ตารางที่ 2.2 ช่วงความดันของระดับความเป็นสุญญากาศ

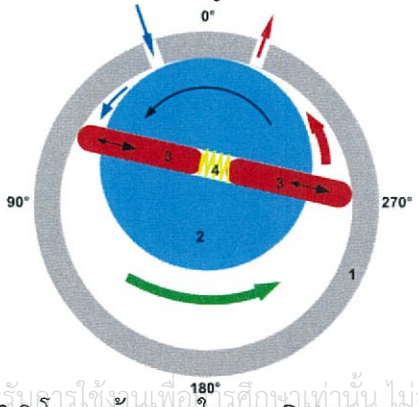
Vacuum quality	Pressure (Torr)
Atmospheric pressure	760
Low vacuum	760 to 25
Medium vacuum	25 to 1×10^{-3}
High vacuum	1×10^{-3} to 1×10^{-9}
Ultra high vacuum	1×10^{-9} to 1×10^{-12}
Extremely high vacuum	$< 1 \times 10^{-12}$
Perfect vacuum	0

2.5.1 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

ปั๊มสุญญากาศ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สูบอากาศจากระบบปิดที่ต้องการทำให้เป็นสุญญากาศ ซึ่งปั๊มสุญญากาศมีหลายชนิด และแต่ละชนิดก็จะมีประสิทธิภาพและช่วงความดันที่ทำงานได้แตกต่างกัน ในที่นี้ปั๊มสุญญากาศที่ให้ความสนใจมี 2 ชนิด ดังนี้

2.5.1.1 Rotary vane pump

Rotary vane pump จะสูบอากาศโดยเปิดช่องให้อากาศจากภายในแชมเบอร์ที่ต้องการทำให้เป็นสุญญากาศเข้ามาภายในปั๊ม จากนั้นก็จะทำการลดปริมาตรของอากาศที่เข้ามา จนความดันของอากาศภายในปั๊มมีค่ามากกว่าความดันบรรยากาศ ลิ้นที่ปิดช่องทางออกของปั๊มก็จะทนแรงดันไม่ไหวและเปิดให้อากาศภายในปั๊มออกไปสู่ความดันบรรยากาศ

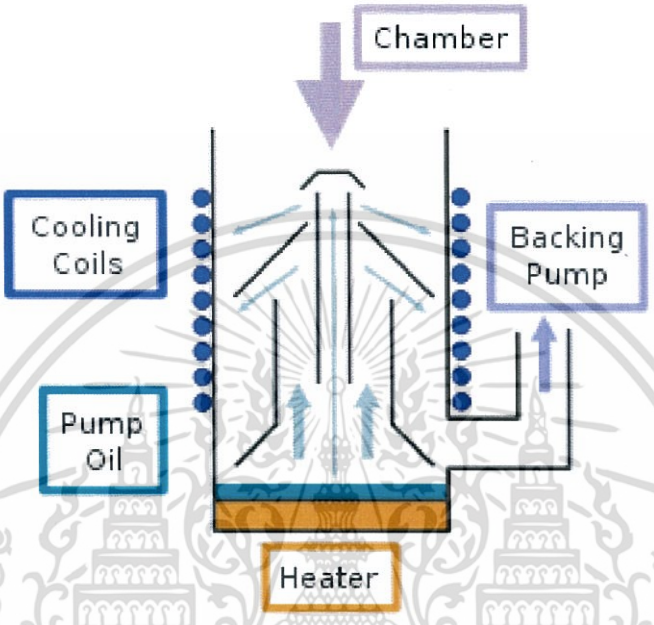


รูปที่ 2.9 โครงสร้างภายในของ Rotary vane pump

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป หมายเลข 1 จะเป็นผนังของปั๊ม หมายเลข 3 จะเป็นแกนหมุน หมายเลข 4 จะเป็นสปริง เมื่ออากาศเข้ามาแกนหมุนก็จะหมุนและลดปริมาตรของอากาศภายใน โดยที่สปริงจะทำหน้าที่ทำให้แกนหมุนปิดสนิทกับผนังของปั๊ม ช่วงการทำงานของ rotary vane pump จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึง 10^{-3} mbar

2.5.1.2 Diffusion pump



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของ diffusion pump

Diffusion pump เป็นปั๊มสุญญากาศที่ทำให้เป็นระบบสุญญากาศโดยใช้ไอความเร็วสูงไปจับกับโมเลกุลของแก๊สโดยตรง ทำให้ตรงกลับไปด้านล่างของปั๊ม และจะถูกสูบออกโดย backing pump ซึ่ง backing pump อาจจะใช้เป็น rotary vane pump

Diffusion pump ถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1915 โดย Wolfgang Gaede ไอที่ใช้ในการจับโมเลกุลของแก๊สจะเป็นไอของปรอท และถูกพัฒนาต่อโดย Irving Langmuir และ W. Crawford

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 Remote plasma cleaning of optical surfaces: Cleaning rates of different carbon allotropes as a function of RF powers and distances [1] โดย M. González Cuxart และคณะ งานวิจัยชิ้นนี้ ศึกษาการทำความสะอาดคาร์บอน อสัณฐานกับคาร์บอนคล้ายเพชรด้วยพลาสมาที่ได้จากแก๊สออกซิเจนกับอาร์กอน และ แก๊สออกซิเจนกับอาร์กอน โดยการเพิ่มกำลังไฟฟ้าและระยะทางระหว่างคาร์บอนกับแหล่งกำเนิด

2.6.2 Creation of superhydrophobic wood surface by plasma etching and thin-film deposition [3] โดย Linkun Xie และคณะ ได้ทำการวิจัยการสร้างไม้ที่มีคุณสมบัติ superhydrophobic ด้วยวิธีการ plasma etching โดยใช้แก๊สออกซิเจน และ กระบวน plasma deposition ซึ่งทั้งสองกระบวนการนี้ ใช้ระบบเดียวกันกับการทำพลาสมาคลีนนิ่ง

เอกสารนี้เป็นของ ได้รับอนุญาตให้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงงานพิเศษนี้สนใจการทำความสะอาดด้วยกระบวนการพลาสมา ซึ่งจะทำการสร้างพลาสมาขึ้นในระบบสุญญากาศ (Low-pressure plasma) ด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยคลื่นในย่านความถี่วิทยุ ทำให้แก๊สที่สนใจแตกตัวเป็นไอออนและเกิดพลาสมาขึ้นภายในระบบปิดที่มีการควบคุมความดัน ในการดำเนินงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาสเปกตรัมของพลาสมาของแก๊สอาร์กอน ,แก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจน โดยการปรับกำลังไฟฟ้า ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบและสร้างชิ้นส่วนเพื่อปรับปรุงระบบเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาเงื่อนไขในการทำความสะอาดผิววัสดุด้วยพลาสมา

3.1 ศึกษาสเปกตรัมของพลาสมาของแก๊สอาร์กอน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน

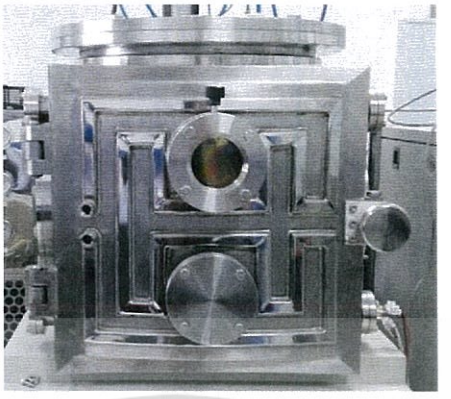
3.1.1 อุปกรณ์

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาสเปกตรัมของพลาสมาของแก๊สอาร์กอน ,แก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจน โดยจะใช้ระบบที่มีอยู่ก่อน เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการสร้างเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา ซึ่งระบบที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 ภาพรวมของระบบที่ใช้ในการศึกษาสเปกตรัม

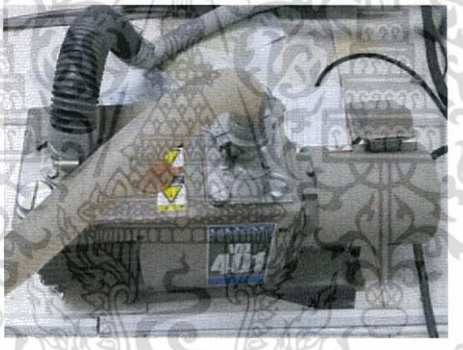
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- chamber คือ ภาชนะปิดที่ใช้ในการบรรจุแก๊สที่ต้องการจะทำให้แตกตัวเป็นพลาสมา



รูปที่ 3.2 แชมเบอร์

- Rotary pump ปั๊มสุญญากาศ ใช้ในการสูบอากาศออกจากแชมเบอร์และ diffusion pump ซึ่งจะทำงานในช่วงความดันบรรยากาศจนถึง 10^{-3} Torr



รูปที่ 3.3 Rotary pump

- Diffusion pump ปั๊มสุญญากาศ ใช้ในการสูบอากาศออกจากแชมเบอร์ ซึ่งจะทำงานในช่วงความดัน 10^{-3} Torr ลงไป

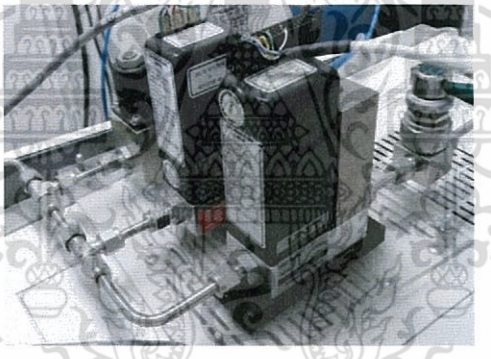
รูปที่ 3.4 Diffusion pump

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบทำความเย็น (cooling system) ใช้ในการลดอุณหภูมิให้กับระบบ และใช้ในการทำให้ไอน้ำมันภายใน diffusion เกิดการควบแน่น

รูปที่ 3.5 ระบบทำความเย็น

- อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวอุปกรณ์



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส

- แหล่งจ่ายคลื่นความถี่วิทยุ ใช้ในการให้พลังงานกับระบบ และทำให้แก๊สเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา

รูปที่ 3.7 แหล่งจ่ายคลื่นความถี่วิทยุ

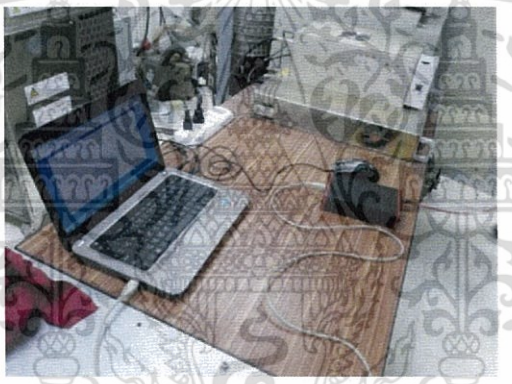
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

- แก๊สอาร์กอน ,แก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจน เป็นแก๊สที่ต้องการทำการศึกษา

รูปที่ 3.8 แก๊สอาร์กอน ,แก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจน

- สเปกโตรมิเตอร์ และโปรแกรม Avasoft ใช้ในการวัดสเปกตรัมของพลาสมา



รูปที่ 3.9 สเปกโตรมิเตอร์ และโปรแกรม Avasoft

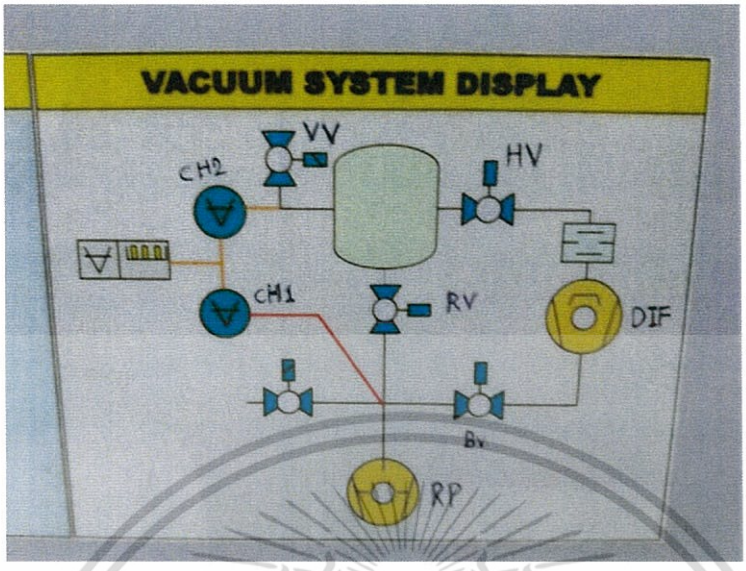
- ระบบควบคุมหลัก ใช้ในการเปิด/ปิด วาล์วต่างๆ ปั๊มสุญญากาศ อัตราการไหลของแก๊ส และแสดงความดันภายในแชมเบอร์

รูปที่ 3.10 ระบบควบคุมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

149453

3.1.2 ขั้นตอนการศึกษาสเปกตรัมของพลาสมาแต่ละชนิด



รูปที่ 3.11 แผนภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆ

3.1.2.1 ทำการเปิด rotary pump (RP) และจะเริ่มทำการสูบอากาศออกจากแชมเบอร์ โดยการเปิด rough valve (RV) จนความดันในแชมเบอร์มีค่าประมาณ 10^{-2} mbar

3.1.2.2 ทำการปิด RV และเปิด backing valve (BV) เพื่อสูบอากาศออกจาก diffusion pump (DIF) จนความดันมีค่าประมาณ 10^{-1} mbar จึงทำการเปิด diffusion pump

3.1.2.3 เปิดระบบทำความเย็น (cooling system) รอประมาณ 40 นาที เพื่อให้ diffusion pump ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.1.2.4 เปิด high vacuum valve (HV) เพื่อให้ diffusion pump สูบอากาศออกจากแชมเบอร์จนความดันภายในแชมเบอร์มีค่าประมาณ 10^{-5} mbar

3.1.2.5 ใส่แก๊สที่ต้องการศึกษาเข้าไปในแชมเบอร์ และจ่ายคลื่นความถี่วิทยุให้กับระบบแสดงดังตารางที่ 3.1

3.1.2.6 วัดสเปกตรัมโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ผ่านทาง view port นำผลที่ได้มาเขียนกราฟและวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 3.1 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก๊สแต่ละชนิด

ชนิดของแก๊ส	ช่วงของกำลังไฟฟ้าที่จ่าย
อาร์กอน	60 W ถึง 150 W
ไนโตรเจน	60 W ถึง 150 W
ออกซิเจน	60 W ถึง 180 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

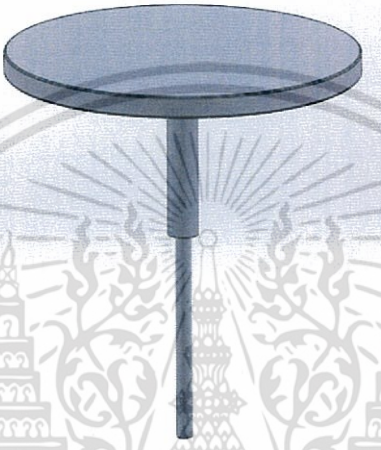
3.2 ออกแบบและสร้างชิ้นส่วนเพื่อปรับปรุงระบบเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา

ในขั้นตอนนี้จะทำการออกแบบและสร้างชิ้นงานบางส่วนของเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา เนื่องจากเครื่องมือส่วนอื่นของเครื่องทำความสะอาดนั้นมีแต่เดิมอยู่แล้ว รวมถึงการสร้างกล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส

3.2.1 ออกแบบและสร้างชิ้นส่วนเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา

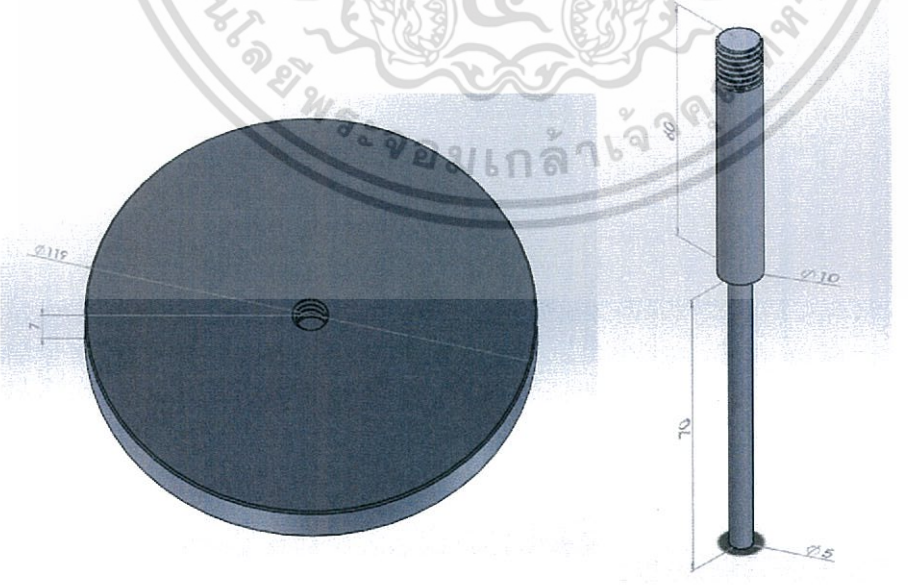
ในการออกแบบชิ้นส่วนนั้นใช้โปรแกรม Solid works ในการออกแบบ โดยมีชิ้นส่วนหลักอยู่ 3 ส่วนคือ

1. แท่นวางชิ้นงาน



รูปที่ 3.12 แท่นวางชิ้นงาน

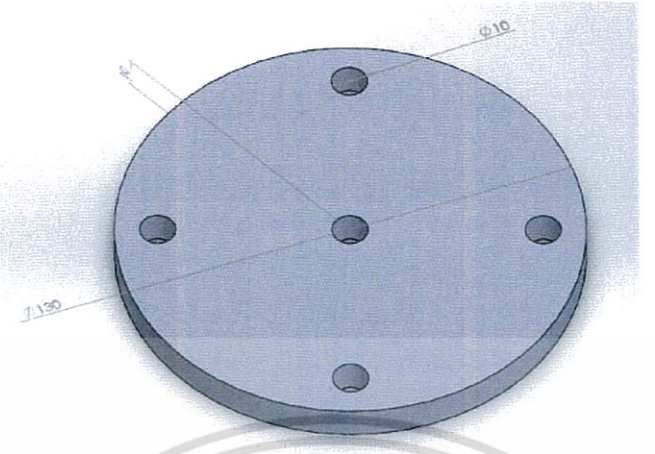
โดยฐานวางชิ้นงานนี้ จะประกอบด้วยชิ้นส่วนสองส่วนคือ เสา และ ฐานวางชิ้นงาน



รูปที่ 3.13 ฐานวางชิ้นงานและเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ฝาปิดแชมเบอร์



รูปที่ 3.14 ฝาปิดแชมเบอร์

3. ฉนวนไฟฟ้า

รูปที่ 3.15 ฉนวนไฟฟ้า

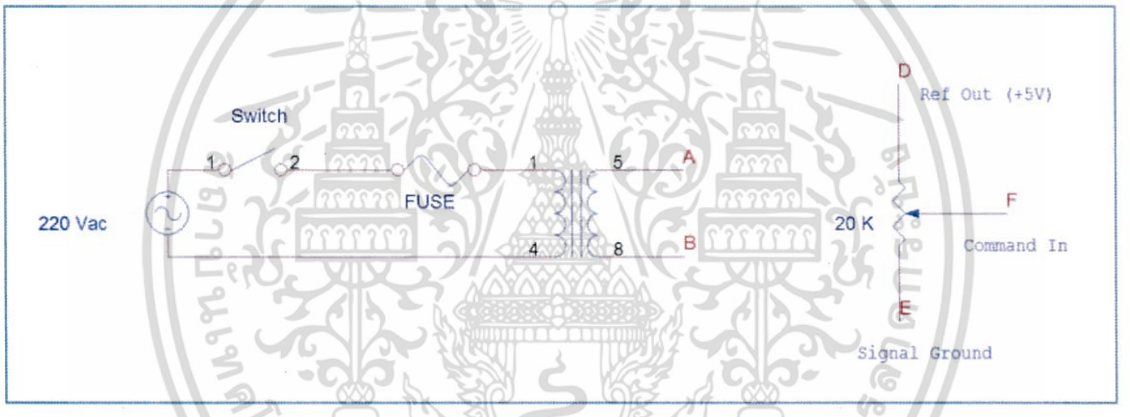
3.2.2 สร้างกล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส

อุปกรณ์

1. ตัวต้านทานปรับค่าได้
2. สวิตช์
3. หม้อแปลง
4. ฟิวส์ 1.5 A 250 V
5. เทอร์มินัลบล็อก
6. กล่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

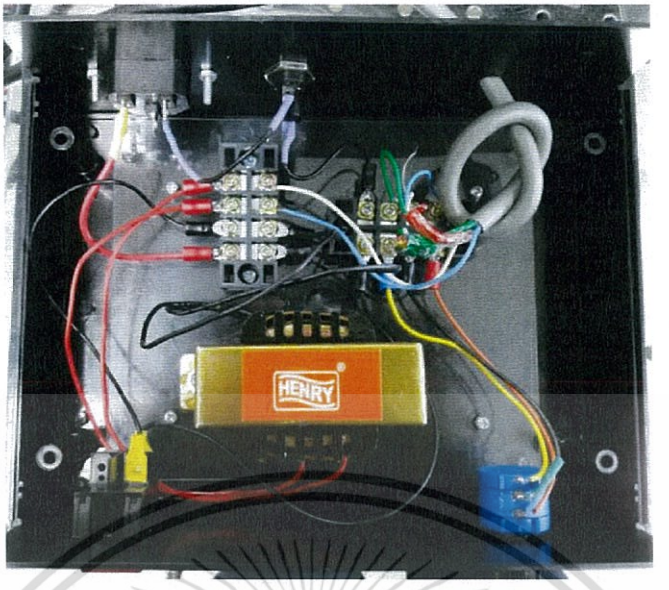
รูปที่ 3.16 อุปกรณ์กล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส



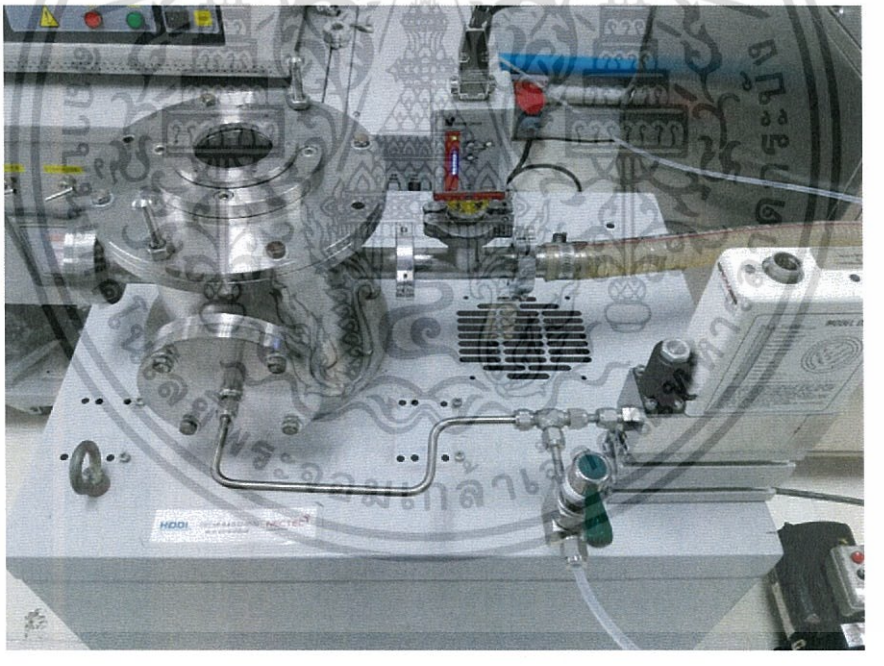
รูปที่ 3.17 วงจรที่ใช้ในกล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส

รูปที่ 3.18 กล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ภายในกล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส



รูปที่ 3.20 ภาพรวมของระบบการทำความสะอาดผิววัสดุด้วยพลาสมา

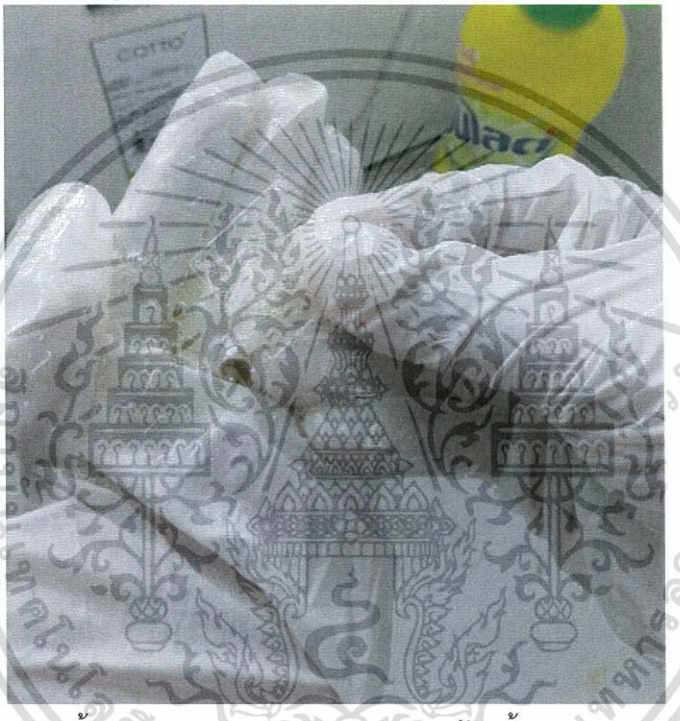
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทำความสะอาดผิววัสดุด้วยเทคนิคต่างๆ

3.3.1 การทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาด

กระบวนการทำความสะอาดผิววัสดุด้วยน้ำยาทำความสะอาด

1. นำชิ้นงานที่ต้องการทำความสะอาด ล้างด้วยน้ำสะอาดจากนั้นล้างคราบไขมันด้วยน้ำยาล้างจาน
2. เมื่อล้างคราบไขมันต่างๆแล้ว ล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้ง
3. เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
4. นำชิ้นงานไปวัดมุมสัมผัส



รูปที่ 3.21 ชิ้นงานระหว่างการทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาด

3.3.2 การทำความสะอาดผิววัสดุด้วยระบบอัลตราโซนิค

กระบวนการทำความสะอาดผิววัสดุด้วยระบบอัลตราโซนิค

1. นำชิ้นงานที่ต้องการทำความสะอาดไปล้างคราบไขมันด้วยน้ำยาล้างจาน
2. จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการล้างคราบไขมันแล้วไปแช่ ในบีกเกอร์ที่มี Acetone อยู่ในปริมาณที่ท่วมชิ้นงานทั้งหมด
3. นำบีกเกอร์ที่บบรจุชิ้นงานนั้น เข้าเครื่องอัลตราโซนิค ตั้งเวลาในการทำความสะอาดที่ 15 นาที
4. เมื่อผ่านไป15 นาที นำชิ้นงานออกจากเครื่องอัลตราโซนิค แล้วนำชิ้นงานไปจุ่มน้ำ DI
5. เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
6. นำชิ้นงานไปวัดมุมสัมผัส

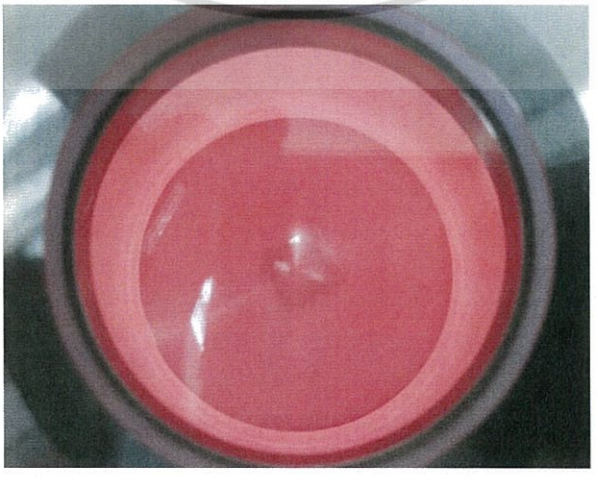
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.22 ชิ้นงานระหว่างการทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิค

3.3.3 การทำความสะอาดผิววัสดุด้วยพลาสมา

กระบวนการทำความสะอาดผิววัสดุด้วยพลาสมา

1. ล้างคราบไขมันบนผิวชิ้นงานด้วยน้ำยาล้างจาน จากนั้นนำไปแช่ใน Acetone
2. นำบีกเกอร์ Acetone ที่มีชิ้นงาน ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิค ตั้งเวลา 15 นาที
3. นำชิ้นงานออกจาก เครื่องอัลตราโซนิค ไปจุ่มน้ำ DI เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วย ไนโตรเจน
4. นำชิ้นงานใส่ลงในแชมเบอร์ที่เตรียมไว้ จากนั้นสูบอากาศออกจากแชมเบอร์กระทั่งความดันภายในแชมเบอร์อยู่ที่ประมาณ 4 ปาสคาล
5. จากนั้นเริ่มจ่ายแก๊สเข้าไปภายในแชมเบอร์แล้วทิ้งไว้ 5 นาทีเพื่อไล่แก๊สที่ไม่ต้องการออก จากแชมเบอร์
6. เปิดแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุที่กำลังไฟฟ้า 20 W เพื่อให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมา ทิ้งไว้ 5 นาที
7. ปิดแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ แล้วหยุดจ่ายแก๊ส จากนั้นปิด Rotary pump และเกจวัดความดัน
8. ค่อยๆปล่อยให้อากาศภายนอกเข้าไปในแชมเบอร์ เปิดฝาแชมเบอร์ แล้วนำชิ้นงานไปวัดมุมสัมผัส



รูปที่ 3.23 ชิ้นงานระหว่างการทำความสะอาดด้วยพลาสมาโดยใช้แก๊สไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.24 ชิ้นงานระหว่างการทำความสะอาดด้วยพลาสมาโดยใช้แก๊สอาร์กอน

3.3.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาการทำความสะอาดผิววัสดุด้วยพลาสมา

ในการทำความสะอาดผิววัสดุด้วยพลาสมาตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ชนิดของแก๊ส อัตราการไหลของแก๊ส และ กำลังไฟฟ้า

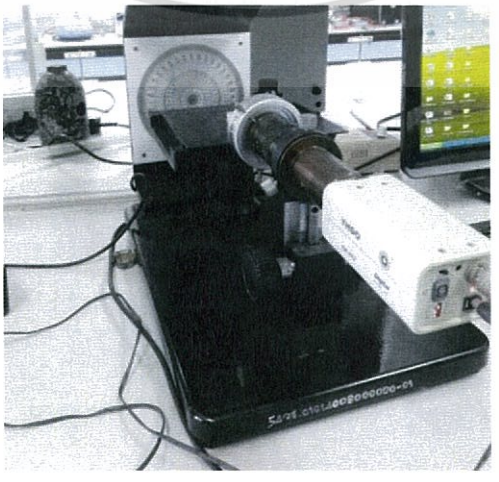
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทำความสะอาดผิววัสดุด้วยพลาสมา

ชนิดของแก๊ส	อัตราการไหลของแก๊ส (sccm)				กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)
Nitrogen	5	10	15	20	20	5
Argon	5	10	15	20	20	5

3.3.5 การวัดมุมสัมผัส

อุปกรณ์ในการวัด

1. เครื่องวัดมุมสัมผัส YHDO รุ่น YH-313
2. โปรแกรม JYSP-360 contact angle



รูปที่ 3.25 เครื่องวัดมุมสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการวัดมุมสัมผัส

1. เปิดโปรแกรมที่ใช้ในการวัดมุมสัมผัส JYSP-360 contact angle goniometer
2. จากนั้นเลือกโหมดการวัดแบบ pendant drop method-three point
3. วางกระจกสไลด์ที่ต้องการทำการวัดลงบนแท่นวางชิ้นงาน
4. ปรับโฟกัส และระยะของกระจกสไลด์ให้อยู่ในระนาบที่ตรงกับกล้องที่ปรากฏบนโปรแกรม
5. เมื่อได้ระยะที่ชัดและตรงแล้ว หยดน้ำลงบนกระจกสไลด์ จะเป็นดังรูป
6. กดปุ่ม measuring บนหน้าต่างของโปรแกรม
7. กดปุ่ม เพื่อทำการวัดทั้งหมดสามตำแหน่งของหยดน้ำ คือ Left ,Right และ Vertex
8. เมื่อได้ค่ามุมสัมผัสแล้ว ให้กดปุ่ม print screen เพื่อบันทึกค่าที่ได้

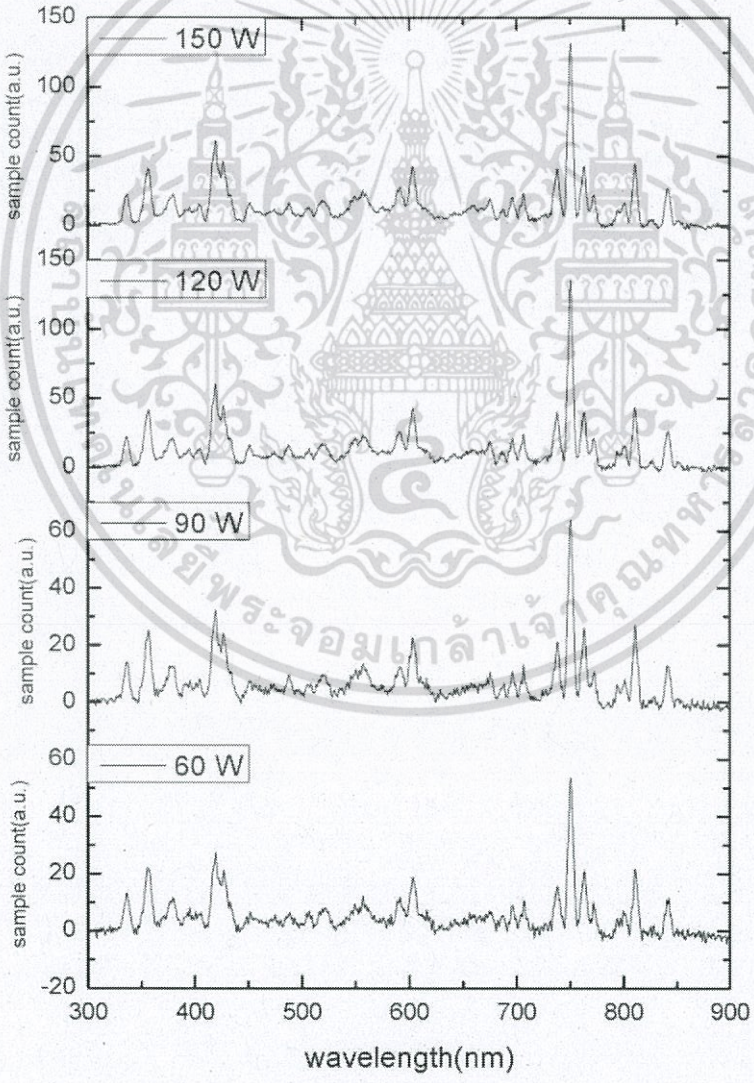
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากที่กล่าวมาในบทที่ 2 แล้วว่าการสร้างพลาสมาสามารถสร้างขึ้นได้จากแหล่งกำเนิดหลายแบบ การทดลองในโครงงานพิเศษนี้ ในขั้นตอนแรกใช้แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ Radio Frequency (RF) ที่ความดันบรรยากาศต่ำ โดยใช้แก๊สในการทดลอง ทั้งหมด 3 ชนิด คือ แก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สอาร์กอน และมีการให้กำลังไฟฟ้าแก่ระบบพลาสมาที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาความแตกต่างของการเกิดพลาสมาในแก๊สแต่ละชนิด ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการทดลองการเกิดพลาสมา

4.1.1 แก๊สอาร์กอน

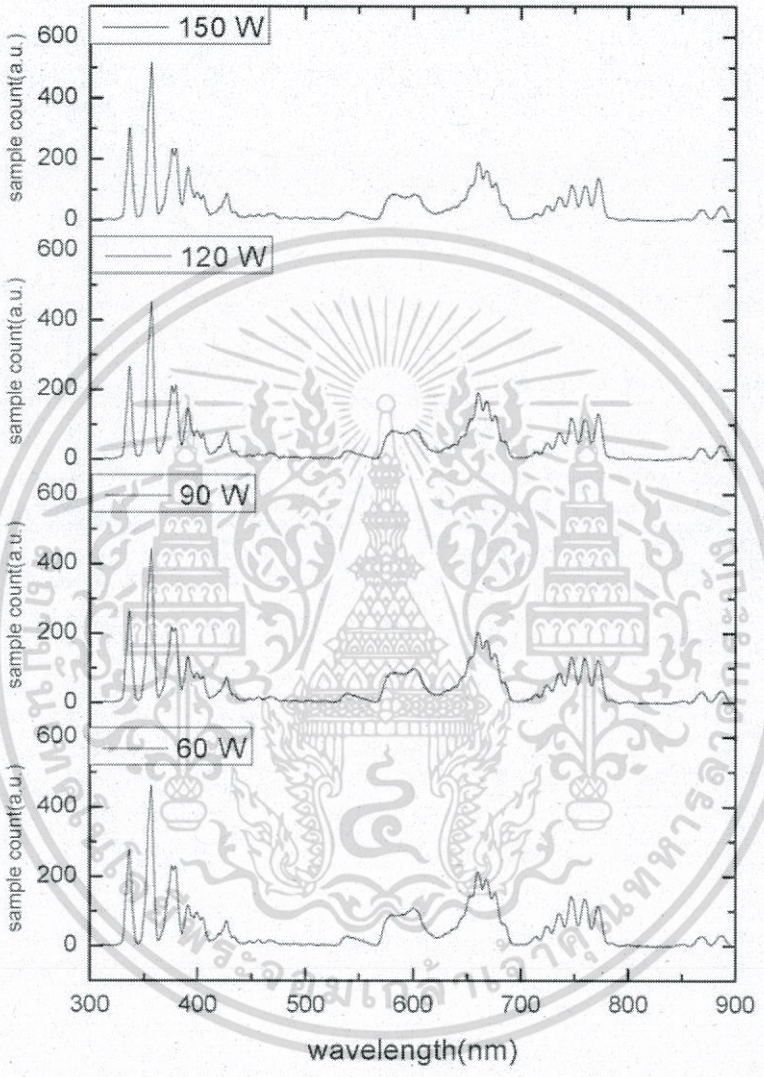


รูปที่ 4.1 กราฟการเกิดพลาสมาของแก๊สอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ การแตกตัวเป็นพลาสมาจะเพิ่มมากขึ้น สังเกตได้จากพีคความเข้มของแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ และความยาวคลื่นที่มีความเข้มมากที่สุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 750.3 nm

4.1.2 แก๊สไนโตรเจน

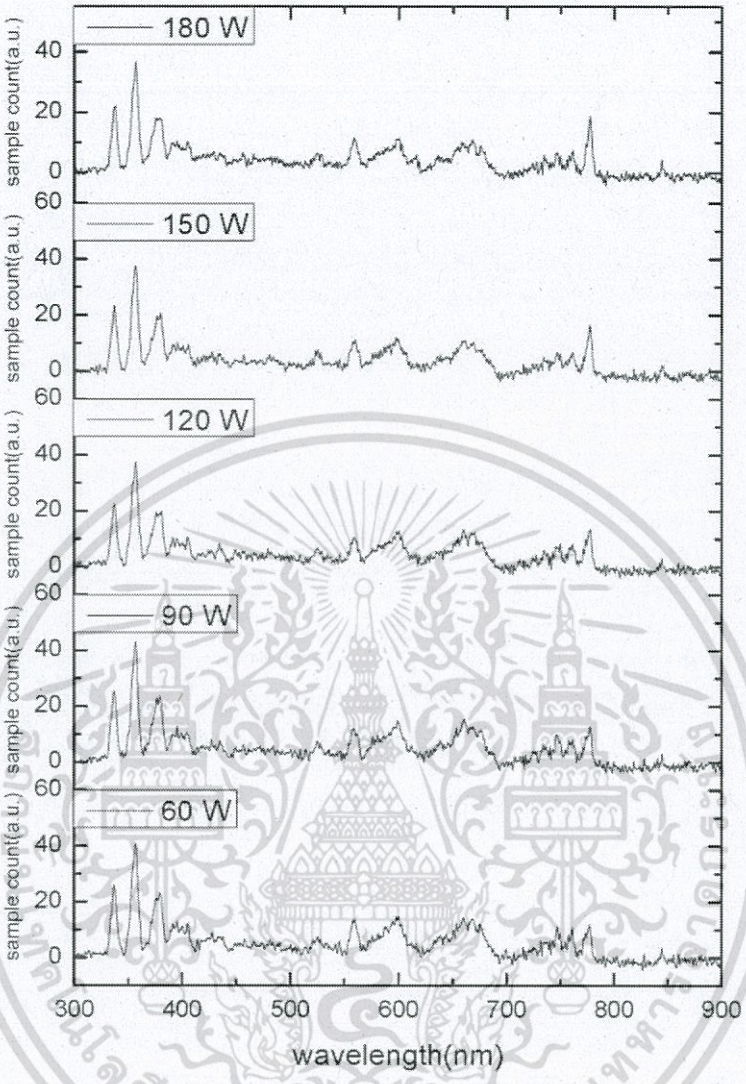


รูปที่ 4.2 กราฟการเกิดพลาสมาของแก๊สไนโตรเจน

จากกราฟพบว่า ความเข้มในช่วง 300 ถึง 400 nm เมื่อทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ ความเข้มมีแนวโน้มว่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กราฟนอกช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 400 nm มีแนวโน้มว่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 แก๊สออกซิเจน



รูปที่ 4.3 กราฟการเกิดพลาสมาของแก๊สออกซิเจน

พบว่าที่ความยาวคลื่น 777.31nm เท่านั้นที่เมื่อมีการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเข้มในแกน Y เพิ่มขึ้นเช่นกัน และ เมื่อเปรียบเทียบ จุดยอดแต่ละค่า กับฐานข้อมูล พบว่า ที่ความยาวคลื่น 777.31ตรงกับฐานข้อมูล ของการแตกตัวของแก๊สออกซิเจน

จากการที่โครงงานพิเศษนี้ได้มีการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนเพื่อปรับปรุงระบบเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา รวมถึงทำการออกแบบและสร้างกล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเพื่อใช้ในการทดลองการทำความสะอาดชิ้นงาน เมื่อได้ระบบเสร็จสมบูรณ์แล้วนั้น ได้ทำการทดสอบเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมาโดย ใช้ทำความสะอาดกระจกสไลด์ ที่เงื่อนไขต่างๆ ทั้ง ชนิดของแก๊ส และ อัตราการไหลของแก๊ส โดยผลที่ได้เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

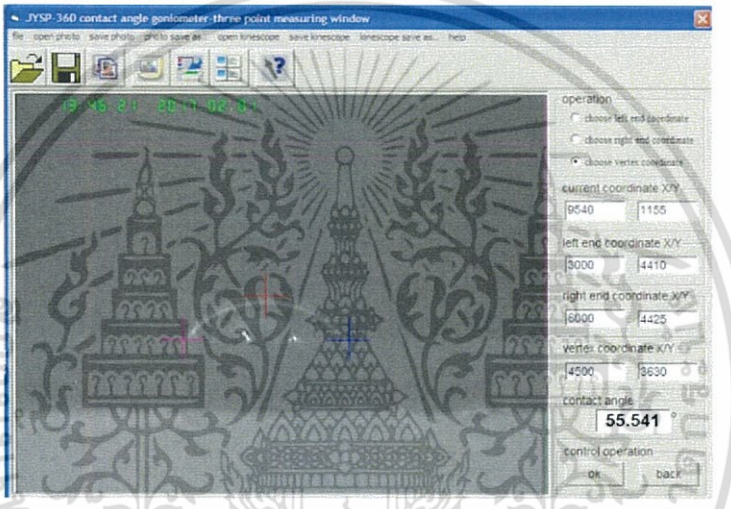
4.2 ผลการทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงาน

จากการศึกษาการเกิดพลาสมาของแก๊สสามชนิดคือ แก๊สอาร์กอน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจนนั้นข้างต้นพบว่าแก๊สออกซิเจน เป็นแก๊สที่ทำให้เกิดพลาสมายาก งานวิจัยนี้ จึงใช้แก๊สไนโตรเจนและแก๊สอาร์กอน ในการทำความสะอาดชิ้นงานโดยมีตัวแปรคือ ชนิดของแก๊ส และ อัตราการไหลของแก๊ส นอกจากการทำความสะอาดด้วยพลาสมาแล้ว งานวิจัยนี้ทดสอบการทำความสะอาดด้วยวิธีอื่น คือ การใช้น้ำยาทำความสะอาด และอัลตราโซนิค

4.2.1 ผลการวัดมุมสัมผัสก่อนการทำความสะอาด

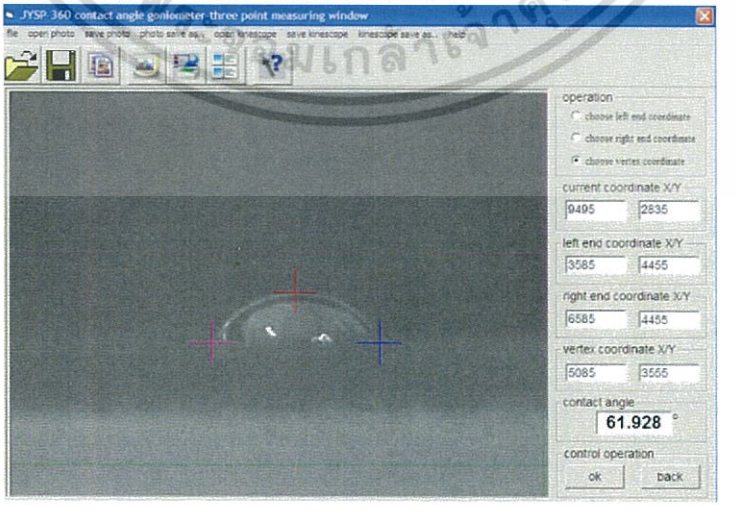
วัดมุมสัมผัสของกระจกสไลด์ทั้งหมด 3 ชิ้น

1. กระจกสไลด์ชิ้นที่ 1 วัดมุมสัมผัสได้ 55.541 องศา



รูปที่ 4.4 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์ชิ้นที่ 1

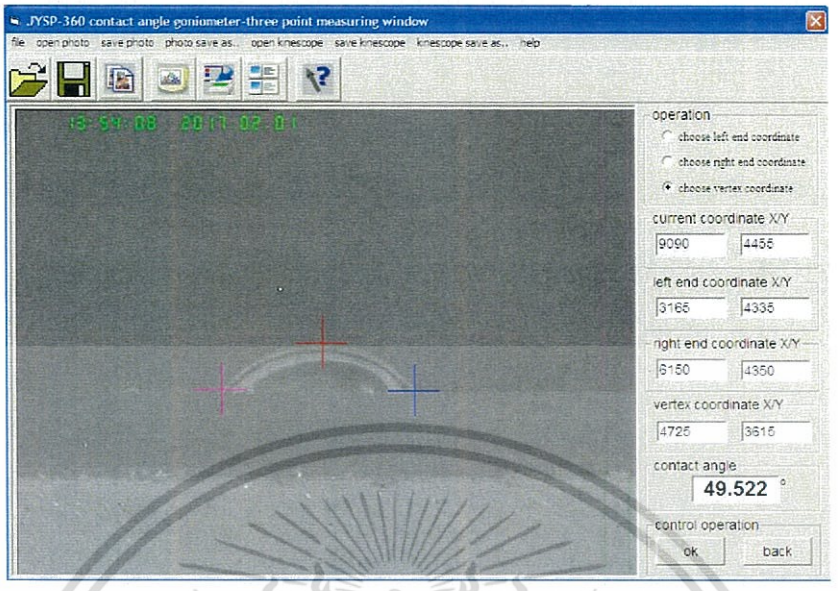
2. กระจกสไลด์ชิ้นที่ 2 วัดมุมสัมผัสได้ 61.928 องศา



รูปที่ 4.5 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์ชิ้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

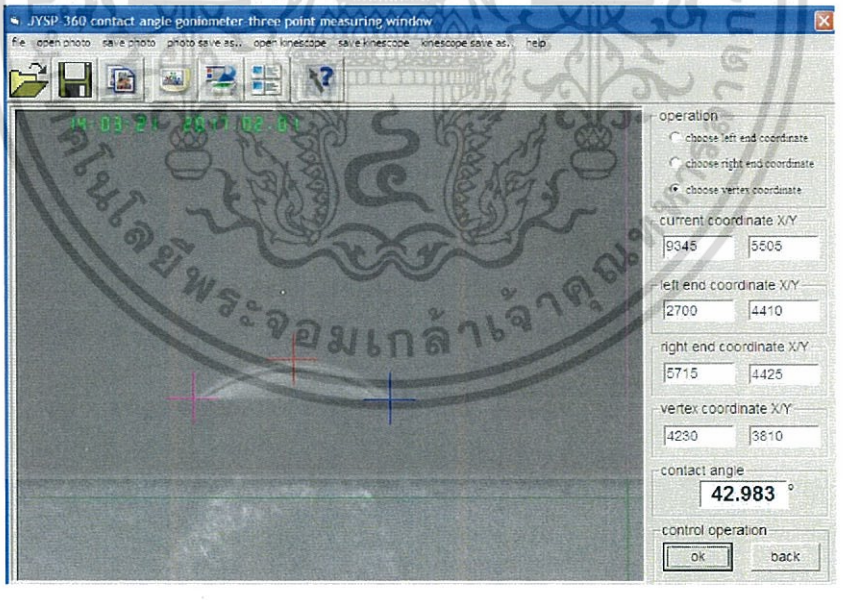
3. กระจกสไลด์ชิ้นที่ 3 วัดมุมสัมผัสได้ 49.522 องศา



รูปที่ 4.6 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์ชิ้นที่ 3

4.2.2 ผลการวัดมุมสัมผัสหลังทำความสะอาดโดยใช้น้ำยาทำความสะอาด

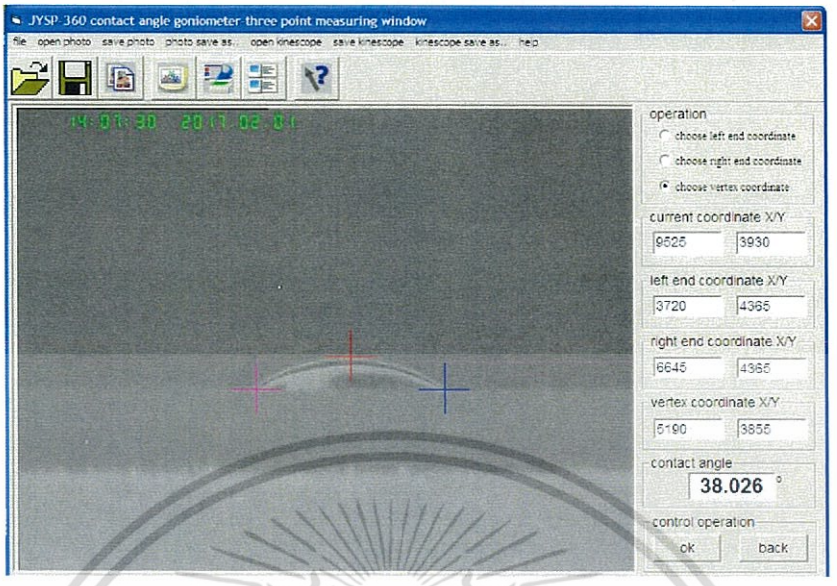
1. กระจกสไลด์ชิ้นที่ 1 วัดมุมสัมผัสได้ 42.983 องศา



รูปที่ 4.7 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์โดยใช้น้ำยาทำความสะอาดชิ้นที่ 1

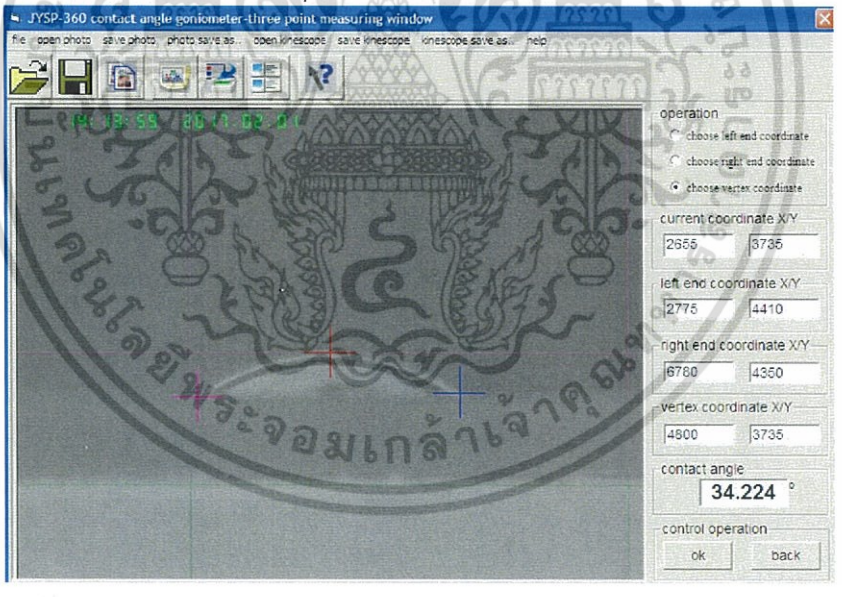
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระจกสไลด์ชิ้นที่ 2 วัดมุมสัมผัสได้ 38.026 องศา



รูปที่ 4.8 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์โดยใช้น้ำยาทำความสะอาดชิ้นที่ 2

3. กระจกสไลด์ชิ้นที่ 3 วัดมุมสัมผัสได้ 34.224 องศา



รูปที่ 4.9 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์โดยใช้น้ำยาทำความสะอาดชิ้นที่ 3

ตารางที่ 4.1 มุมสัมผัสของกระจกสไลด์และเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของมุมสัมผัส

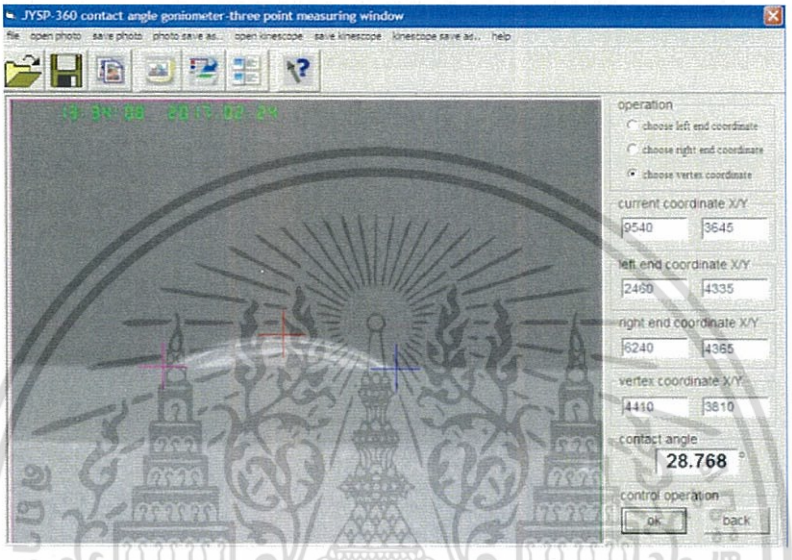
	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3
ไม่ผ่านการทำความสะอาด	55.5	61.9	49.5
ทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน	42.9	38.0	34.2
เปอร์เซ็นต์ที่ลดลง	22.7%	38.6%	30.9%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 กระจกสไลด์หลังจากที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยน้ำล้างจานแล้วนำมาวัดมุมสัมผัส จะได้ว่ามุมสัมผัสมีค่าลดลงโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์อยู่ในช่วง 20% ถึง 40% ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำยาล้างจานสามารถทำความสะอาดกระจกได้เล็กน้อยและความสะอาดที่มากขึ้นนั้นก็มีการกระจายตัวที่สูง

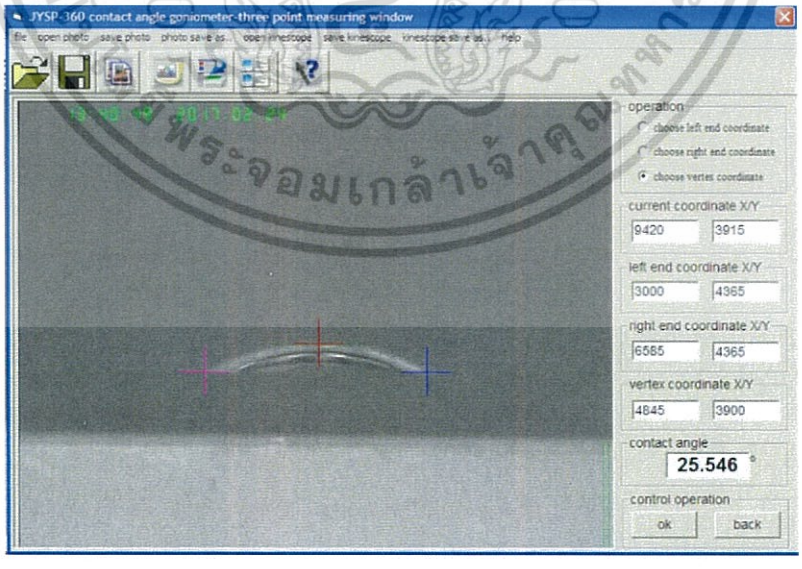
4.2.3 **ผลการวัดมุมสัมผัสหลังทำความสะอาดโดยใช้กระบวนการอัลตราโซนิค**

1. กระจกสไลด์ชิ้นที่ 1 วัดมุมสัมผัสได้ 28.768 องศา



รูปที่ 4.10 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์โดยใช้กระบวนการอัลตราโซนิคชิ้นที่ 1

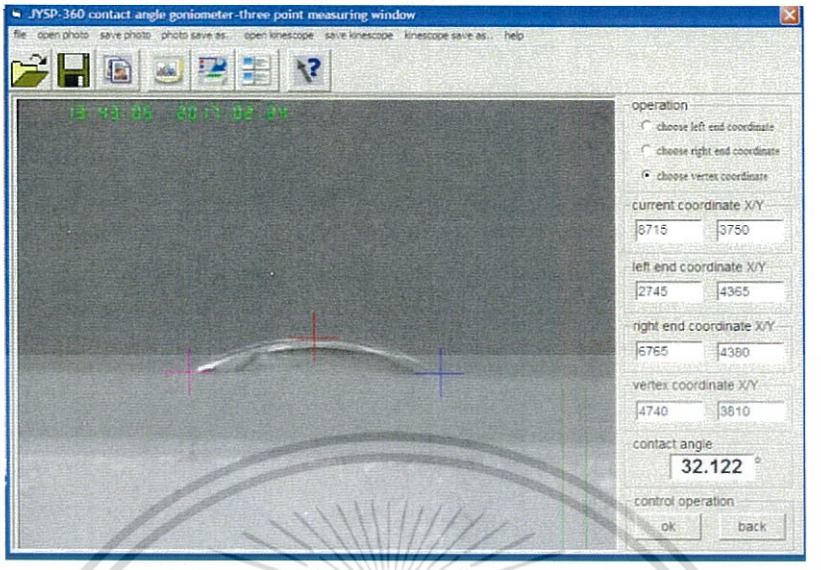
2. กระจกสไลด์ชิ้นที่ 2 วัดมุมสัมผัสได้ 25.546 องศา



รูปที่ 4.11 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์โดยใช้กระบวนการอัลตราโซนิคชิ้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กระจกสไลด์ชิ้นที่ 3 วัดมุมสัมผัสได้ 32.122 องศา

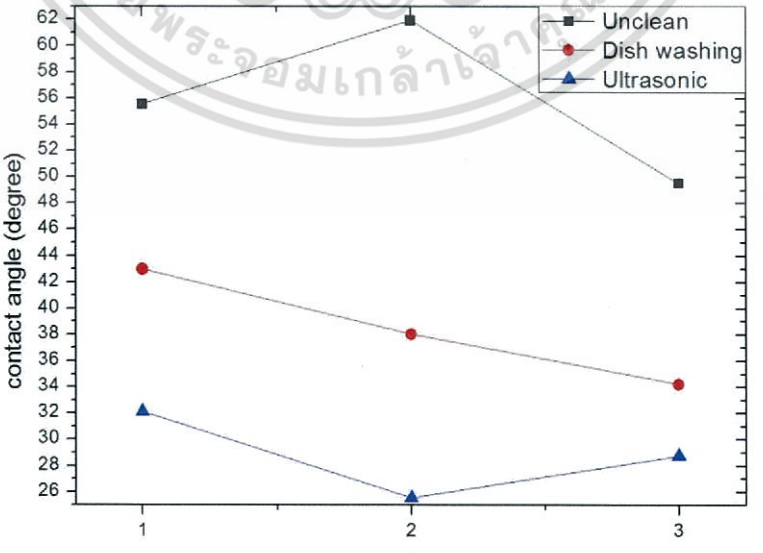


รูปที่ 4.12 มุมสัมผัสกระจกของกระจกสไลด์โดยใช้กระบวนการอัลตราโซนิคชิ้นที่ 3

ตารางที่ 4.2 มุมสัมผัสของกระจกสไลด์และเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของมุมสัมผัส

	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3
ไม่ผ่านการทำความสะอาด	55.5	61.9	49.5
ผ่านการทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิค	28.7	32.1	25.5
เปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของมุมสัมผัส	48.2%	48.1%	48.4%

จากตารางที่ 4.2 กระจกสไลด์ที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิค จะมีความสะอาดมากขึ้นปานกลาง และเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นมีการกระจายที่น้อย



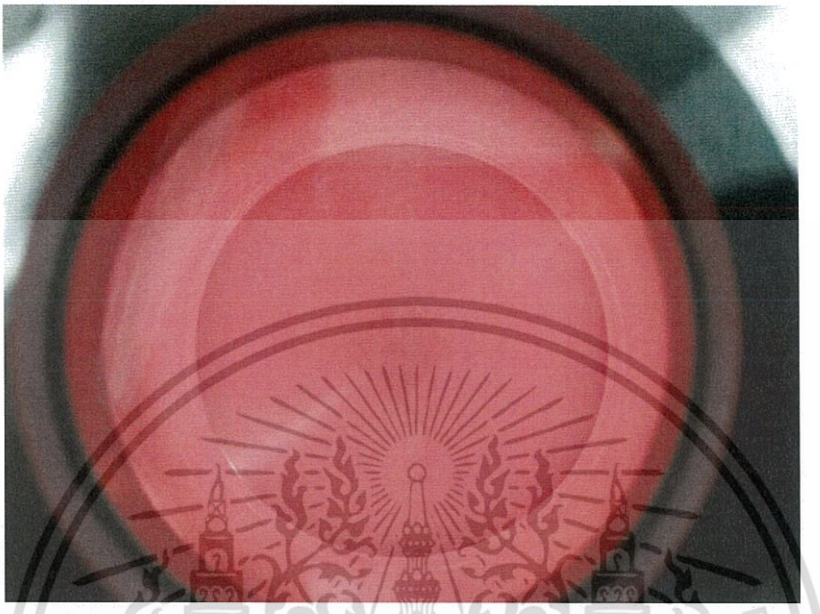
รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบมุมสัมผัสระหว่าง ก่อนทำความสะอาด หลังการทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาด และ หลังการทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการวัดมุมสัมผัสหลังทำความสะอาดโดยใช้กระบวนการพลาสมา

1. นำกระจกสไลด์เข้าเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมา โดยใช้แก๊สไนโตรเจน โดยใช้กำลังไฟฟ้าที่ 20 วัตต์

- อัตราการไหลของแก๊ส 5 sccm



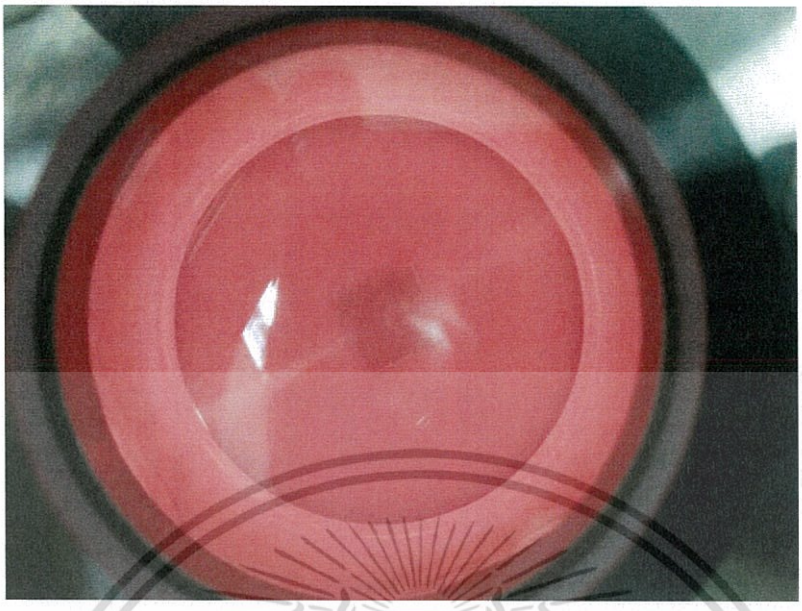
รูปที่ 4.14 ชิ้นงานภายในเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊ส 5 sccm

- อัตราการไหลของแก๊ส 10 sccm

รูปที่ 4.15 ชิ้นงานภายในเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊ส 10 sccm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราการไหลของแก๊ส 15 sccm



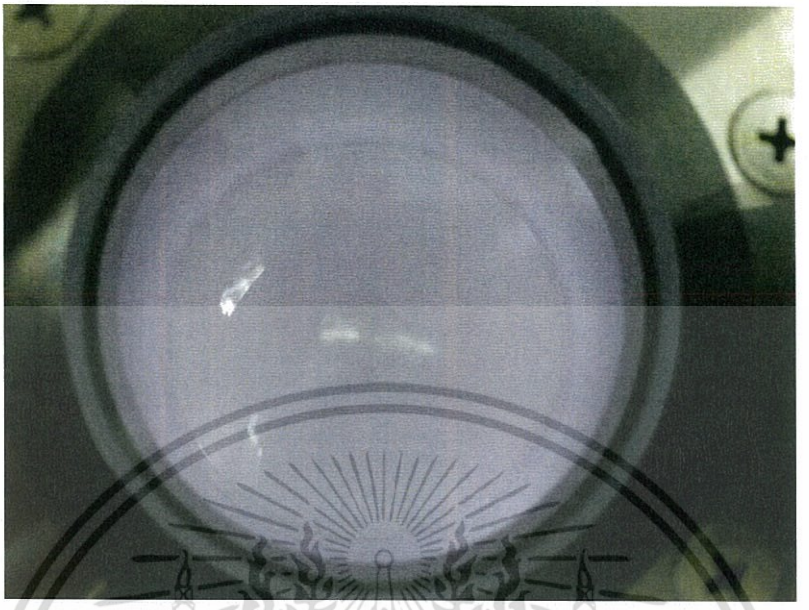
รูปที่ 4.16 ชิ้นงานภายในเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊ส 15 sccm

- อัตราการไหลของแก๊ส 20 sccm

รูปที่ 4.17 ชิ้นงานภายในเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊ส 20 sccm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำกระจกสไลด์เข้าเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมา โดยใช้แก๊สอาร์กอน โดยใช้กำลังไฟฟ้าที่ 20 วัตต์



รูปที่ 4.18 ชิ้นงานภายในเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊ส 10 sccm

จากการทำความสะอาดกระจกสไลด์ โดยใช้แก๊สไนโตรเจนและแก๊สอาร์กอนที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้า 20 วัตต์ และมีอัตราการไหลของแก๊ส ที่แตกต่างกัน คือ 5,10,15 และ 20 sccm พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดผิวด้วยเงื่อนไขต่างๆดังกล่าว ผลที่ได้คือ ความสะอาดของผิวชิ้นงานที่ได้นั้นที่ไม่มีความแตกต่างกัน เมื่อนำชิ้นงานไปทำการวัดมุมสัมผัส มุมสัมผัสของทุกชิ้นงานคือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือเท่ากับศูนย์ ทำให้ไม่สามารถวัดมุมสัมผัสได้ เนื่องจากผิวของชิ้นงานมีความสะอาดสูง แม้ว่าจะใช้อัตราการไหลของแก๊สเพียงไม่มากก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในส่วนแรกเป็นการศึกษาความแตกต่างของการเกิดพลาสมา โดยใช้แก๊สในการทดลอง 3 ชนิด คือแก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน และ แก๊สอาร์กอน โดยมีการใช้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบพลาสมาแตกต่างกัน โดยใช้แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ Radio frequency ที่ความดันบรรยากาศต่ำ ผลที่ได้พบว่าเมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น การแตกตัวเป็นพลาสมาของแก๊สต่างๆนั้น ก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน สังเกตได้จากค่าความเข้มแสงที่วัดได้ นั้นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบ อัตราการเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาของแก๊สทั้งสามชนิด เมื่อทำการจ่ายกำลังไฟฟ้า พบว่าแก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สที่ทำให้เกิดพลาสมาได้ยากที่สุด ซึ่งอาจต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สูงมาก แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ และช่วงของกำลังไฟฟ้าที่ศึกษา ทำให้ออกซิเจนเป็นแก๊สที่ยากแก่การเกิดพลาสมายากในช่วงนี้ จึงส่งผลให้ ในส่วนถัดไปของงานวิจัย เป็นการทำความสะอาดชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือที่ทำการปรับปรุงเองนั้น ใช้แก๊สไนโตรเจน และ แก๊สอาร์กอนในการศึกษาเท่านั้น

ในส่วนถัดมาเป็นการปรับปรุงเครื่องทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยพลาสมา โดยมีการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนของเครื่อง เพื่อประกอบเครื่องให้สมบูรณ์โดยใช้โครงสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว รวมถึงทำการออกแบบและสร้างกล่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเพื่อใช้ในการทดลองการทำความสะอาดชิ้นงาน เมื่อเครื่องทำความสะอาดผิวชิ้นงานเสร็จสมบูรณ์แล้ว จึงทำการทดสอบการทำความสะอาดผิวชิ้นงาน โดยใช้ชิ้นงานเป็นกระจกสไลด์ โดยมีตัวแปรต้นคืออัตราการไหลของแก๊สและชนิดของแก๊สที่จ่ายให้กับระบบ จากนั้นทำการวัดผลความสะอาดของพื้นผิวโดยการวัดมุมสัมผัส ซึ่งจากการทดสอบพบว่าเครื่องทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยพลาสมาที่ทำการปรับปรุงขึ้นนั้น สามารถใช้งานได้ดีโดยที่ระบบไม่มีการรั่วของแก๊ส และเมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดโดยมีเงื่อนไขต่างๆนั้นไปวัดมุมสัมผัส พบว่า ความแตกต่างของชนิดแก๊ส และ ความแตกต่างของอัตราการไหลของแก๊ส ไม่มีผลต่อการทำความสะอาด ทุกเงื่อนไขทำให้ชิ้นงานมีมุมสัมผัสที่น้อยมากจนเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งหมายความว่าชิ้นงานนั้นมีความสะอาดสูงมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1.การเก็บชิ้นงานภายหลังการทำอัลตราโซนิคก่อนเข้าระบบพลาสมา ควรมีการทำความสะอาดกล่องเก็บชิ้นงาน และควรเป็นกล่องที่สามารถเก็บได้อย่างมิดชิดเพื่อป้องกันฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกลงบนชิ้นงาน

2.ก่อนนำชิ้นงานเข้าเครื่องทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมา ควรระวังอย่าสัมผัสบนผิวชิ้นงาน แม้ว่าจะใส่ถุงมือก็ตาม

3.ในขั้นตอนการวัดมุมสัมผัส การหยดน้ำควรหยดในขนาดที่เท่าๆกันในทุกๆครั้ง และปริมาณที่พอดี เพื่อการวัดมุมสัมผัสที่มีประสิทธิภาพ

4. การวัดมุมสัมผัส ควรวัดมุมสัมผัสทันทีหลังจากการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] M. González Cuxart ,J. Reyes-Herrera ,I.˜Sics , A.R. Go˜ni , H. Moreno Fernandez ,V. Carlino and E. Pellegrin. 2016. “Remote plasma cleaning of optical surfaces: Cleaning rates of different carbon allotropes as a function of RF powers and distances.” *Applied Surface Science* 362 (2016) : 448-458

[2] Jiqiang Wu , Han Liu , c, Jingcai Li , Xingmei Yang and Jing Hu. 2016. “Comparative study of plasma oxynitriding and plasma nitriding for AISI 4140 steel.” *Journal of Alloys and Compounds* 680 (2016) : 642-645

[3] Linkun Xie , Zhenguan Tang , Lu Jiang , Victor Breedveld and Dennis W. Hess. 2015. “Creation of superhydrophobic wood surfaces by plasma etching and thin-_lm deposition.” *Surface & Coatings Technology* 281 (2015) : 125-132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง