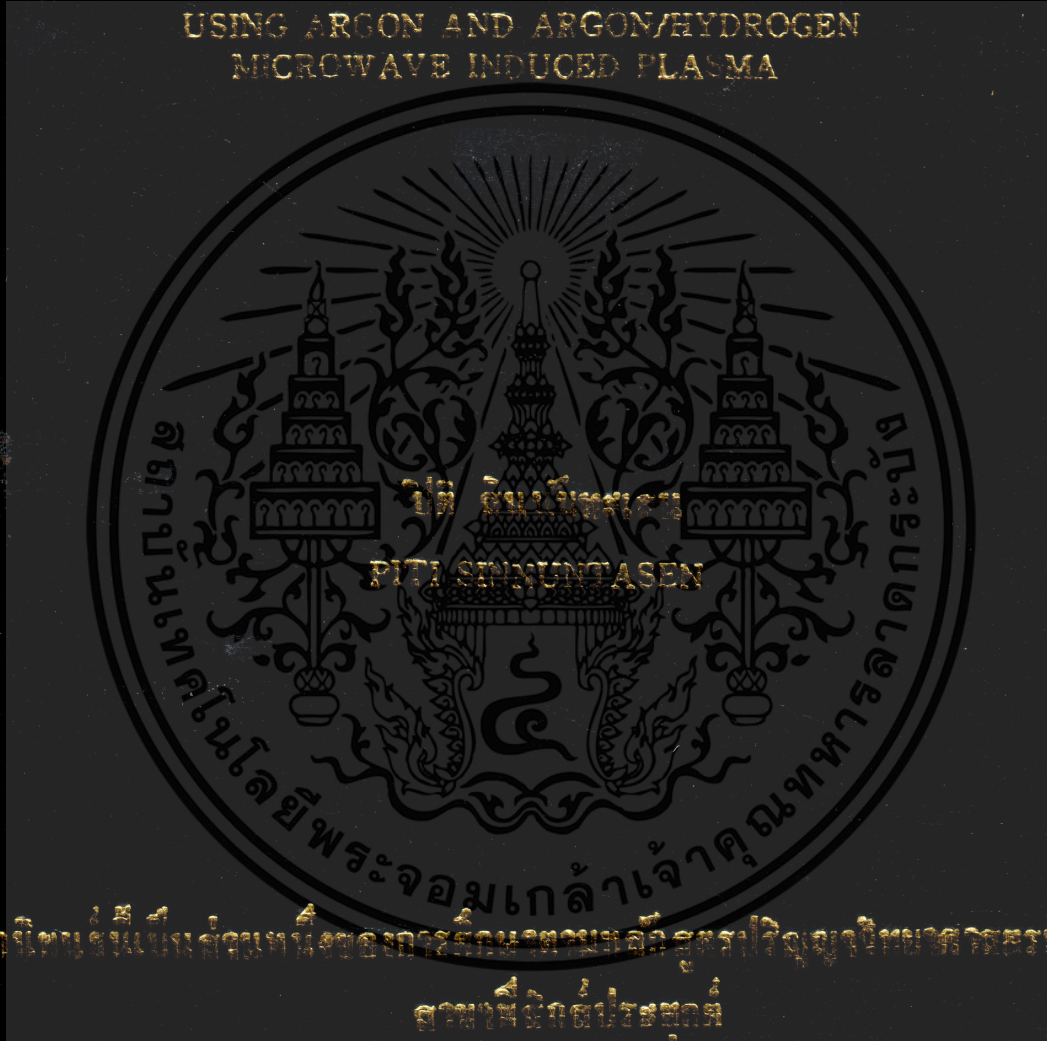


การศึกษาดูการทำลายสารพิษที่เป็นอันตรายถึงตัวน้ำที่ด้วยพลาสมาของอาร์กอนและ  
อาร์กอน/ไฮโดรเจนที่กัมมันตรังสีไมโครเวฟ

A STUDY OF PLASMA CLEANING OF SEMICONDUCTOR SURFACE  
USING ARGON AND ARGON/HYDROGEN  
MICROWAVE INDUCED PLASMA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นต้นฉบับของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-SC-M-030-001

การศึกษาการทำความสะอาดพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำด้วยพลาสมาของอาร์กอนและ  
อาร์กอน/ไฮโดรเจนที่กำเนิดโดยคลื่นไมโครเวฟ

**A STUDY OF PLASMA CLEANING OF SEMICONDUCTOR SURFACE  
USING ARGON AND ARGON/HYDROGEN  
MICROWAVE INDUCED PLASMA**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

**KMITL-2013-SC-M-030-001**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF PLASMA CLEANING OF SEMICONDUCTOR SURFACE  
USING ARGON AND ARGON/HYDROGEN  
MICROWAVE INDUCED PLASMA**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2013**

**KMITL-2013-SC-M-030-001**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2013**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิทยาศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

**หัวข้อวิทยานิพนธ์**

การศึกษาการทำความสะอาดพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำด้วยพลาสมาของอาร์กอนและอาร์กอน/ไฮโดรเจนที่กำเนิดโดยคลื่นไมโครเวฟ  
 A Study of Plasma Cleaning of Semiconductor Surface Using Argon and Argon/Hydrogen Microwave Induced Plasma

**นักศึกษา**

นายปิติ สิ้นนั้นทะเล

**รหัสประจำตัว**

51067305

**ปริญญา**



วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา**

ฟิสิกส์ประยุกต์

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์**

รศ.ดร.วราวุฒิ เถลัดดา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.วรการ	นิยากร	
รศ.วิชาญ	เดชธีระ	
ผศ.ดร.รัชภาคย์	จิตต์อารี	
รศ.ดร.วราวุฒิ	เถลัดดา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 25 มกราคม พ.ศ. 2556 เวลา 13.00 – 16.00 น.  
 สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 ชั้น 3 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุษณี ธนะบริพัตน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่..... 7 ..เดือน..... พ.ศ..... 56 ..

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการทำความสะอาดพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำด้วยพลาสมาของอาร์กอนและพลาสมาผสมอาร์กอน/ไฮโดรเจนที่กำเนิดโดยคลื่นไมโครเวฟ

## นักศึกษา

นายปิติ สิ้นนันทะเสน

## รหัสประจำตัว

51067305

## ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

## สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

## พ.ศ.

2556

## อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ เถาคัดดา

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาของอาร์กอนและพลาสมาผสมของอาร์กอนและไฮโดรเจนที่กำเนิดด้วยคลื่นไมโครเวฟและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารปนเปื้อนบนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอน สารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดได้แก่คาร์บอนและออกซิเจน พลาสมาถูกกระตุ้นให้เกิดในท่อแก้วควอตซ์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ท่อแก้วควอตซ์นี้จะถูกสอดตั้งฉากกับด้านกว้างของท่อ นำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด WR340 ผ่านเข้าสู่ห้องสุญญากาศแก้วทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm ท่อนำคลื่นนี้ถูกออกแบบให้มีการกำทอนที่โหมด  $TE_{106}$  สำหรับคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ที่กำเนิดจากแมกนีตรอนขนาด 800 W ปริมาณของก๊าซและอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนและไฮโดรเจนที่เข้าสู่ห้องสุญญากาศจะถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหล เงื่อนไขของก๊าซในการทำความสะอาดคืออัตราส่วนของก๊าซผสม เงื่อนไขอื่น ๆ ได้แก่ เวลา ระยะห่างจากปลายหลอดพลาสมา หลังกระบวนการทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ความสะอาดของพื้นผิวจะถูกวัดด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัส และเทคนิคออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของแต่ละเงื่อนไขจะถูกประเมินด้วยค่าของมุมสัมผัส และการเปรียบเทียบกันด้วยสัญญาณออเจิเล็กตรอนของซิลิกอน (92 eV), คาร์บอน (272 eV) ออกซิเจน (508 eV) ก่อนและหลังการทำความสะอาด

**คำสำคัญ :** พลาสมา, สารกึ่งตัวนำ, ซิลิกอน, การทำความสะอาดด้วยพลาสมา, การทำความสะอาดซิลิกอน, ออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี, มุมสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	A Study of Plasma Cleaning of Semiconductor Surface using Argon and Argon/Hydrogen Microwave Induced Plasma
<b>Student</b>	Piti Sinnuntasen
<b>Student ID</b>	51067305
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2013
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Warawoot Thowladda

### ABSTRACT

This thesis proposes a development of Ar and Ar/H<sub>2</sub> microwave induced plasma for surface cleaning system and to find the optimum plasma parameters that result on the removal of contaminants existing on a silicon wafer surfaces. The main interesting contaminations on the surface that must be removed are carbon and oxygen. The plasma used in this study is argon and argon/hydrogen mixing plasma. The microwave induced plasma is produced in a cylindrical quartz tube of 10 mm diameter. This quartz tube is inserted through the WR340 rectangular cavity, perpendicular to its wide wall, into the cylindrical-glass process chamber of 150 mm diameter. The rectangular resonant cavity is operated in TE<sub>106</sub> mode at 2.45 GHz using 800 W magnetron. The amount of argon gas and argon/hydrogen mixing ratio flow into the chamber are controlled by the mass flow controllers from the other end of the plasma tube. The cleaning conditions of plasma gases are flow rate and argon/hydrogen mixing ratio. In addition to these conditions, time, distance between substrate and plasma tube are varied. After cleaning processes, copper leadframes are characterized by contact angle measurement and Auger electron spectroscopy. The contaminant removal efficiency is evaluated by comparing the initial and final contact angle and Auger electron signals of silicon (92 eV), carbon (272 eV) and oxygen (508 eV).

**Keyword: plasma, semiconductor, silicon, plasma cleaning, silicon cleaning, Auger Electron Spectroscopy, contact angle**

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วราวุฒิ เถาถักคา อาจารย์ประจำสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้หลายรอบมาก ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี นักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำให้คำปรึกษา และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณพี่ อมร เทศสกุลวงศ์ นักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำให้คำปรึกษา และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) หรือ Thailand Research Fund (TRF) ที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับงานวิจัย และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้ความร่วมมือจนสามารถทำงานวิจัยชิ้นนี้จนสำเร็จลุล่วงออกมาได้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกๆด้าน รวมทั้งเพื่อนๆ ที่ได้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์

นายปิติ สิ้นนันทะเสน

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 ฟิสิกส์ของพลาสมา.....	5
2.1.1 กระบวนการกำเนิดอนุภาคที่มีประจุ.....	5
2.1.2 การกำเนิดพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	8
2.1.3 สมบัติของพลาสมา.....	15
2.2 เคมีของพลาสมา.....	21
2.2.1 คำจำกัดความ.....	21
2.2.2 ปฏิกริยาเคมี.....	22
2.2.2.1 ปฏิกริยาระหว่างสารเนื้อเดียวกัน.....	22
2.2.2.2 ปฏิกริยาระหว่างสารต่างชนิดกัน.....	31
2.2.3 ปฏิกริยาเคมีลูกโซ่.....	33
2.2.4 ปฏิกริยาระหว่างพลาสมากับพื้นผิว.....	35
2.3 ออเจ็ลเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี.....	36
2.4 กระบวนการเกิดออเจ็ลเล็กตรอน.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ผลของค่าอิเล็กทรอนิกส์ต่อพื้นผิว.....	38
2.6 ปริมาตรในการวิเคราะห์ห่ออิเล็กทรอนิกส์.....	39
2.7 พลังงานของออลอิเล็กทรอนิกส์.....	40
2.8 ประโยชน์ของออลอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี.....	41
2.9 ข้อจำกัดของออลอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี.....	42
2.10 เครื่องมือในการวิเคราะห์ห่ออิเล็กทรอนิกส์.....	42
2.10.1 ความเป็นมา.....	42
2.10.2 เครื่องมือวิเคราะห์พลังงานของออลอิเล็กทรอนิกส์.....	42
2.10.3 แหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ปฐมภูมิ.....	44
2.10.4 ตัวตรวจวัดของออลอิเล็กทรอนิกส์.....	44
2.11 อัลกอริทึมการแสดงผลข้อมูลของออลอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี.....	45
2.12 แรงตึงผิว.....	46
2.13 มุมสัมผัส.....	46
2.14 ประเภทของการวัดมุมสัมผัส.....	48
2.15 สเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง.....	49
<b>บทที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....</b>	<b>52</b>
3.1 ระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	52
3.1.1 ระบบกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	53
3.1.2 ระบบควบคุมการจ่ายแก๊ส.....	54
3.1.3 ระบบสุญญากาศ.....	55
3.1.3.1 ปัมสุญญากาศ.....	56
3.1.3.2 ห้องสุญญากาศ.....	57
3.1.3.3 เกจวัดระดับความดันสุญญากาศ.....	57
3.1.4 ระบบตรวจวัด OES.....	58
3.1.4.1 สเปกโตรมิเตอร์.....	58
3.1.4.2 ไฟเบอร์ออฟติกและเลนส์รวมแสง.....	58
3.2 ระบบวิเคราะห์ด้วยเทคนิคออลอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 ออเจ็ล็กตรอนสเปกโทรมิเตอร์.....	59
3.2.1.1 Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์.....	60
3.2.1.2 แหล่งจ่ายไฟ รุ่น LPS 300.....	61
3.2.1.3 ส่วนควบคุมการวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน.....	62
3.2.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์.....	62
3.2.3 การใช้งานระบบวิเคราะห์ออเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี.....	63
3.3 แหล่งกำเนิดไอออนพลังงานสูง.....	66
3.4 ระบบตรวจวัดมุมสัมพัทธ์.....	67
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง.....</b>	<b>72</b>
4.1 แผ่นซิลิกอนที่ใช้ในการทดลอง.....	72
4.2 มุมสัมพัทธ์ของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาด.....	72
4.3 ประสิทธิภาพของพลาสมา.....	73
4.4 ความสามารถในการทำซ้ำและผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาด.....	83
1) ความสามารถในการทำซ้ำของระบบทำความสะอาด.....	83
2) ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาด.....	89
4.5 OES ของพลาสมา.....	91
4.6 ความสามารถในการทำความสะอาดของระบบทำความสะอาด.....	92
4.6.1 การเก็บข้อมูลของการทดลอง.....	93
4.6.2 สารปนเปื้อนบนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ได้ทำความสะอาด.....	93
4.6.3 การทำความสะอาดด้วยอาร์กอนพลาสมา.....	95
4.6.3.1 พารามิเตอร์ของอาร์กอนพลาสมา.....	95
4.6.3.2 ความสามารถในการกำจัดออกไซด์และการเกิดออกไซด์.....	100
4.6.4 การทำความสะอาดด้วยอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมา.....	106
4.6.4.1 พารามิเตอร์ของอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมา.....	106
4.6.4.2 ความสามารถในการกำจัดออกไซด์และการเกิดออกไซด์.....	112

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	118
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	118
5.2 แผนงานในอนาคตและข้อเสนอแนะ.....	121
บรรณานุกรม.....	122
ประวัติผู้เขียน.....	125



# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าภาคตัดขวางสำหรับการเกิด Dissociative Capture.....	24
ตารางที่ 2.2 พลังงานไอออไนเซชันของอะตอมและโมเลกุล.....	25
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลมุมสัมพัทธ์ของแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาด.....	73
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของพลาสมาที่ใช้ในการทดลองในหัวข้อ 4.3.....	74
ตารางที่ 4.3 ลีที่ใช้ในการแทนค่ามุมสัมพัทธ์ช่วงต่างๆ.....	76
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลมุมสัมพัทธ์ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 5 s.....	77
ตารางที่ 4.5 มุมสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 5 s.....	77
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลมุมสัมพัทธ์ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 10 s.....	78
ตารางที่ 4.7 มุมสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 10 s.....	78
ตารางที่ 4.8 ข้อมูลมุมสัมพัทธ์ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 15 s.....	79
ตารางที่ 4.9 มุมสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 15 s.....	79
ตารางที่ 4.10 ข้อมูลมุมสัมพัทธ์ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 20 s.....	80
ตารางที่ 4.11 มุมสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 20 s.....	80
ตารางที่ 4.12 ข้อมูลมุมสัมพัทธ์ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 25 s.....	81
ตารางที่ 4.13 มุมสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 25 s.....	81
ตารางที่ 4.14 ข้อมูลมุมสัมพัทธ์ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 30 s.....	82
ตารางที่ 4.15 มุมสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 30 s.....	82
ตารางที่ 4.16 ข้อมูลการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนตำแหน่งที่ 7.....	84
ตารางที่ 4.17 ข้อมูลการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนตำแหน่งที่ 8.....	85
ตารางที่ 4.18 ข้อมูลการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนตำแหน่งที่ 9.....	86
ตารางที่ 4.19 ข้อมูลการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนตำแหน่งที่ 12.....	87
ตารางที่ 4.20 ข้อมูลการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนตำแหน่งที่ 13.....	88

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.21 ข้อมูลการทำความสะอาดแผ่นซีลิกอนตำแหน่งที่ 14.....	89
ตารางที่ 4.22 เปรียบเทียบค่ามัมสัมผัสของตำแหน่งที่ 8 และ 13.....	90
ตารางที่ 4.23 ข้อมูลมัมสัมผัสของแผ่นซีลิกอนที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด ด้วยพลาสติก.....	94
ตารางที่ 4.24 ข้อมูลของชนิดและปริมาณขององค์ประกอบบนพื้นผิวของแผ่นซีลิกอน ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด.....	94
ตารางที่ 4.25 เงื่อนไขพารามิเตอร์ของอาร์กอนพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง.....	95
ตารางที่ 4.26 พารามิเตอร์ของอาร์กอนพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง.....	98
ตารางที่ 4.27 มุมสัมผัสเฉลี่ยบนแผ่นซีลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยพลาสติก ที่เวลาต่างๆ.....	98
ตารางที่ 4.28 มุมสัมผัสของแผ่นซีลิกอนหลังผ่านการสปีดเตอริงและนำไปทำความสะอาด ซ้ำด้วยพลาสติก.....	100
ตารางที่ 4.29 ข้อมูลมัมสัมผัสของแผ่นซีลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยกระบวนการ เคมีและนำไปทำความสะอาดซ้ำด้วยพลาสติก.....	103
ตารางที่ 4.30 เงื่อนไขพารามิเตอร์ของอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง.....	108
ตารางที่ 4.31 พารามิเตอร์ของพลาสติกผสมของอาร์กอน/ไฮโดรเจนที่ใช้ในการทดลอง.....	110
ตารางที่ 4.32 เปรียบเทียบข้อมูลมัมสัมผัสที่วัดได้บนแผ่นซีลิกอนระหว่างพลาสติกของ อาร์กอนกับพลาสติกผสมของอาร์กอน/ไฮโดรเจน.....	110
ตารางที่ 4.33 เปรียบเทียบข้อมูลมัมสัมผัสของการทำความสะอาดแผ่นซีลิกอนที่ผ่านการ สปีดเตอริงมาแล้วด้วยพลาสติก.....	112
ตารางที่ 4.34 เปรียบเทียบข้อมูลมัมสัมผัสของการทำความสะอาดแผ่นซีลิกอนที่ผ่านการ ทำความสะอาดด้วยกรดกัดแก้วมาแล้วด้วยพลาสติก.....	115

# สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การชนของอิเล็กตรอนและอะตอม.....	7
รูปที่ 2.2 การเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าความถี่สูงเนื่องจากการชนแบบยืดหยุ่นกับอนุภาคหนัก และเกิดการถ่ายเทพลังงานอย่างรวดเร็วขณะเกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเมื่อมีพลังงานถึงค่าพลังงานขีดเริ่ม $eV_1$ .....	14
รูปที่ 2.3 โคออร์เนตของลำอนุภาครัศมี $r_2$ ตกกระทบกับโมเลกุลแก๊สรัศมี $r_1$ .....	16
รูปที่ 2.4 บริเวณส่วนที่เป็นพลาสมาซีท.....	20
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางกับพลังงานกระตุ้นในสถานะกึ่งเสถียรและพลังงานไอออไนเซชันของไนโตรเจน.....	30
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาถูกโซ่ที่เกิดขึ้นขณะที่มีการปลูกฟิล์มซิลิกอนจาก $Ar+H_2+SiCl_4$ .....	34
รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาต่างๆ ในห้องพลาสมา (Plasma reactor).....	35
รูปที่ 2.8 อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคต่างๆ ในพลาสมา กับพื้นผิว.....	35
รูปที่ 2.9 อันตรกิริยาของพลาสมา กับพื้นผิวเมื่ออนุภาคมีความหนาแน่นและพลังงานจลน์ต่างๆ.....	36
รูปที่ 2.10 สเปกตรัมของอิเล็กตรอน ที่หลุดออกจากพื้นผิวของของแข็งเมื่อถูกยิงด้วยอิเล็กตรอนพลังงาน 2 keV.....	37
รูปที่ 2.11 กระบวนการเกิดออเจิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดรังสีเอ็กซ์.....	38
รูปที่ 2.12 ปริมาตรในการวิเคราะห์ออเจิเล็กตรอน.....	40
รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนระดับพลังงานหลักของออเจิเล็กตรอน.....	41
รูปที่ 2.14 เครื่องวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน.....	43
รูปที่ 2.15 เครื่องวิเคราะห์พลังงานอิเล็กตรอนแบบ retarding-field analyzer (RFA).....	44
รูปที่ 2.16 สัญญาณของออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี พล็อตเป็นฟังก์ชันของสัญญาณอิเล็กตรอนทั้งหมด กับพลังงานของอิเล็กตรอน.....	45
รูปที่ 2.17 สเปกตรัมของออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี พล็อตเป็นฟังก์ชันของ $(dN(E)/dE)$ กับพลังงานของอิเล็กตรอน.....	45
รูปที่ 2.18 มุมสัมผัส $\theta$ ที่เกิดขึ้น และสมการของยังที่ใช้ในการอธิบายแรงดึงผิว.....	47
รูปที่ 2.19 คุณสมบัติของหยดน้ำกับมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว.....	47
รูปที่ 2.20 วิธีการวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวที่มีการปนเปื้อนและการทำความสะอาด.....	48
รูปที่ 2.21 วิธีการวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็งที่มีลักษณะเอียง.....	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.22 กระบวนการเปล่งแสงของอะตอม.....	51
รูปที่ 3.1 ระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่น ไมโครเวฟ.....	52
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบกำเนิดพลาสมา ประกอบไปด้วย แมกนีตรอน สดับปรับจูน หลอดแก้วควอทซ์ และปลิงเกอร์.....	54
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงระบบจ่ายแก๊ส.....	55
รูปที่ 3.4 ระบบสุญญากาศ.....	56
รูปที่ 3.5 ปัมป์โรตารีที่ใช้ในโครงการวิจัย.....	56
รูปที่ 3.6 ชุดเกจวัดความดันที่ใช้ในโครงการวิจัย.....	57
รูปที่ 3.7 สเปกโทรมิเตอร์รุ่น HR4000.....	58
รูปที่ 3.8 ไฟเบอร์ออปติกและเลนส์รวมแสง.....	58
รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงโคอะแกรมของระบบการทำงานออเจอเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี.....	59
รูปที่ 3.10 Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ รุ่น BLD 800.....	60
รูปที่ 3.11 แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน (electron gun) รุ่น G10.....	61
รูปที่ 3.12 Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ ที่ติดตั้งกับระบบสุญญากาศ.....	61
รูปที่ 3.13 หน้าจอโปรแกรมในส่วนของ Phase Scan.....	65
รูปที่ 3.14 โคอะสติกบ็อก การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับสแกนเฟส.....	65
รูปที่ 3.15 หน้าจอโปรแกรมในส่วนของ Spectrum Scan.....	65
รูปที่ 3.16 แหล่งกำเนิดลำไอออน รุ่น NGI 3000 ของ LK Technologies.....	66
รูปที่ 3.17 แผนภาพแสดงโคอะแกรมของระบบวัดมุมสัมพัทธ์.....	68
รูปที่ 3.18 ระบบวัดมุมสัมพัทธ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	68
รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลซึ่งจะนำไปวิเคราะห์หามุมสัมพัทธ์.....	69
รูปที่ 3.20 หน้าจอการแสดงผลของโปรแกรม.....	70
รูปที่ 3.21 แสดงภาพถ่ายที่นำไปตัดเพื่อที่จะให้เห็นบริเวณรอยต่อที่ชัดเจน.....	70
รูปที่ 3.22 แสดงการหาค่ามุมสัมพัทธ์ด้วยโปรแกรมวัดมุมสัมพัทธ์.....	71
รูปที่ 4.1 แผ่นซิลิกอนที่ใช้ในการทดลอง.....	72
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการวัดมุมสัมพัทธ์.....	73
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างลักษณะของพลาสมาที่ใช้ในการทดลอง.....	74
รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการวัดมุมสัมพัทธ์บนแผ่นซิลิกอน.....	75

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่ามุมสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งที่ 7 .....	84
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่ามุมสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งที่ 8 .....	85
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่ามุมสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งที่ 9 .....	86
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่ามุมสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งที่ 12 .....	87
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่ามุมสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งที่ 13 .....	88
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่ามุมสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งที่ 14 .....	89
รูปที่ 4.11 ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาดสำหรับตำแหน่งที่ 8 และ 13 .....	90
รูปที่ 4.12 ตัวอย่าง OES ของพลาสมาของแก๊สอาร์กอน .....	91
รูปที่ 4.13 ตัวอย่าง OES ของพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอน/ไฮโดรเจน .....	92
รูปที่ 4.14 ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดมุมสัมพัทธ์ และวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค AES .....	93
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างกราฟ AES ของแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด .....	94
รูปที่ 4.16 ตัวอย่างสเปกตรัมของ AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาด .....	96
รูปที่ 4.17 ข้อมูล AES แสดงส่วนประกอบและปริมาณเฉลี่ยของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของ แผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยอาร์กอนพลาสมา เงื่อนไขต่างๆ .....	96
รูปที่ 4.18 ข้อมูล AES แสดงส่วนประกอบและปริมาณเฉลี่ยของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของ แผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมาที่เวลาต่างๆ .....	99
รูปที่ 4.19 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการสัปดาห์เตอริง 5 hrs. ....	101
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการสัปดาห์เตอริงและ ทำความสะอาดด้วยพลาสมา .....	101
รูปที่ 4.21 ข้อมูล AES แสดงส่วนประกอบและปริมาณของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของ แผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการสัปดาห์เตอริงและทำความสะอาดซ้ำด้วยพลาสมา ที่เงื่อนไขต่างๆ .....	102
รูปที่ 4.22 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วย กระบวนการทางเคมี .....	104
รูปที่ 4.23 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วย กระบวนการทางเคมีและนำไปทำความสะอาดซ้ำด้วยพลาสมา .....	104

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.24 ข้อมูล AES แสดงส่วนประกอบและปริมาณของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของแผ่น ซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยกระบวนการเคมีและทำความสะอาด ซ้ำด้วยพลาสติก.....	105
รูปที่ 4.25 ข้อมูล AES เปรียบเทียบส่วนประกอบและปริมาณของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของ แผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการต่างๆ.....	106
รูปที่ 4.26 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วย อาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสติก.....	108
รูปที่ 4.27 ข้อมูล AES แสดงส่วนประกอบและปริมาณเฉลี่ยของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของแผ่น ซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสติก เงื่อนไขต่างๆ.....	109
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบข้อมูล AES บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาด ด้วยพลาสติกของแก๊สอาร์กอนกับพลาสติกผสมของอาร์กอน/ไฮโดรเจน.....	111
รูปที่ 4.29 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการสปีดเตอริงและทำ ความสะอาดด้วยอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสติก.....	113
รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบข้อมูล AES การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการสปีดเตอริง มาแล้วด้วยพลาสติกของอาร์กอนกับพลาสติกผสมของอาร์กอน/ไฮโดรเจน.....	113
รูปที่ 4.31 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทางเคมีและ ทำความสะอาดด้วยอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสติก.....	115
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบข้อมูล AES การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการทำความสะอาด ด้วยกรดกัดแก้วมาแล้วด้วยพลาสติกของอาร์กอนกับพลาสติกผสมของ อาร์กอน/ไฮโดรเจน.....	116

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านสารกึ่งตัวนำมีการพัฒนาและเจริญไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสารกึ่งตัวนำได้เข้ามามีอิทธิพลต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ในยุคปัจจุบันแทบทุกด้าน เครื่องมือเครื่องใช้ที่ประกอบขึ้นจากวัสดุอิเล็กทรอนิกส์เกือบทุกชนิด จะสังเกตเห็นว่าวัสดุอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้แทบทั้งหมดผลิตจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ แม้แต่ในด้านการตลาด การแข่งขันด้านการค้าก็ได้มีแนวคิดใหม่ๆรวมทั้งการออกแบบเพื่อลดขนาดของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดอย่างต่อเนื่อง แรงผลักดันที่ทำให้เทคโนโลยีด้านสารกึ่งตัวนำมีการพัฒนาอย่างไม่หยุดนิ่งนั้นมีจุดประสงค์หลักเพื่อยกระดับประสิทธิภาพของการใช้งานให้สูงขึ้น ขณะที่ขนาดเล็กลงรวมทั้งมีราคาถูกด้วย โดยวัสดุสารกึ่งตัวนำที่พบเห็นในชีวิตประจำวันและคนทั่วไปรู้จักกันดีชนิดหนึ่งก็คือแผงวงจรรวมหรือที่เรียกสั้นๆว่าไอซี (integrated circuit : IC) ซึ่งการออกแบบไอซีในปัจจุบันเป็นไปในแนวทางเพื่อลดขนาดของไอซี ดังนั้นผลที่ตามมาคือ จุดบกพร่อง (defect) ที่เกิดขึ้นในไอซีจึงมีขนาดเล็กตามไปด้วย จุดบกพร่องเหล่านี้สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากสิ่งปนเปื้อนหรือสิ่งตกค้างบนพื้นผิว การบอขนิกและหาสาเหตุของสิ่งปนเปื้อนเป็นเรื่องที่สำคัญ จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการตรวจวัดความสะอาดของพื้นผิวทั้งก่อนและหลังทำความสะอาดของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการผลิต ไอซีรวมทั้งศึกษากระบวนการทำความสะอาดวัสดุสารกึ่งตัวนำด้วยพลาสมา (plasma)

ไอซีประกอบไปด้วยสิ่งที่เรียกว่า ได (die) ซึ่งเป็นแผงวงจรมินิเจอร์ที่ทำมาจากแผ่นซิลิกอน (silicon wafer) ในกระบวนการการผลิตและประกอบไอซี ความสะอาดของแผ่นซิลิกอนมีความสำคัญมากที่สุด การผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำนั้นมีขั้นตอนการผลิตมากมายหลายขั้นตอน แต่ละขั้นตอนของการการผลิตมีโอกาสที่จะเกิดการปนเปื้อน (contamination) ได้ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความบกพร่องและความเสียหายของอุปกรณ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ควรจะเป็นหรือทำให้เกิดปัญหาขึ้นในกระบวนการผลิตจนไม่สามารถผลิตสินค้าได้ทันตามกำหนดการ สิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนมีหลายชนิด ได้แก่ อนุภาคของฝุ่นผง (particles) สารอินทรีย์ตกค้าง (organic residues) สารอนินทรีย์ตกค้าง (inorganic residues) ซึ่งสารปนเปื้อนส่วนมากเป็นโลหะและออกไซด์ตามธรรมชาติรวมทั้งสารประกอบออกไซด์ที่อยู่บนพื้นผิว จุดมุ่งหมายของกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนคือ กำจัดสิ่งปนเปื้อนดังกล่าวรวมถึงการควบคุมการเกิดออกไซด์บนพื้นผิว[1-16]

การทำมาความสะอาดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ การทำมาความสะอาดแบบเปียก (wet cleaning) และการทำมาความสะอาดแบบแห้ง (dry cleaning) ในกระบวนการผลิตไอซีปัจจุบันยังคงใช้การทำมาความสะอาดแบบเปียกเป็นหลัก ซึ่งการทำมาความสะอาดแบบเปียกหมายถึงการทำมาความสะอาดโดยใช้ ตัวทำละลาย (solvents) กรด (acids) และน้ำ ในการละลาย (dissolve) การออกซิไดซ์ (oxidize) การกัด (etch) และการชำระล้างเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนและสารเคมีตกค้างออกจากพื้นผิว กระบวนการทำมาความสะอาดแบบเปียกนี้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากเนื่องจากมีของเสียที่เป็นสารเคมีและมีการใช้น้ำในปริมาณมาก รวมทั้งยังต้องใช้ค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ เพื่อบริหารจัดการตรงส่วนนี้จึงได้มีการคิดค้นกระบวนการทำมาความสะอาดโดยการใช้พลาสมาซึ่งเป็นกระบวนการทำมาความสะอาดแบบแห้งอย่างหนึ่งขึ้นมา การทำมาความสะอาดแบบแห้งนี้จะใช้ปฏิกิริยาเคมีในสถานะที่เป็นแก๊ส (gas phase chemistry) โดยใช้พลังงานกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่จำเป็นในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว พลังงานที่ใช้อาจอยู่ในรูปของความร้อน พลาสมาหรือรังสี เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้การทำมาความสะอาดโดยใช้หลักการถ่ายเท โมเมนตัมเพื่ให้เกิดอันตรกิริยาทางฟิสิกส์ได้อีกด้วย แต่ข้อเสียของการทำมาความสะอาดแบบแห้งคือ มีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมาก และจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบมากพอสมควร แต่กลับมีพื้นที่ที่ใช้ในกระบวนการทำมาความสะอาดน้อย ซึ่งถ้าอยากได้พื้นที่ในการทำมาความสะอาดมากขึ้นระบบก็จะต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้ต้นทุนสูงขึ้นด้วยเหตุผลที่กล่าวมาทำให้ในปัจจุบันการทำมาความสะอาดแบบแห้งยังไม่สามารถเข้ามาทดแทนการทำมาความสะอาดแบบเปียกได้ทั้งหมด แต่ก็ได้มีการนำกระบวนการทำมาความสะอาดทั้งสองแบบมาใช้ร่วมกัน โดยใช้การทำมาความสะอาดแบบเปียกกับวัตถุคิที่มีขนาดใหญ่ มีปริมาณมาก และไม่ต้องการความละเอียดมาก จากนั้นจึงใช้การทำมาความสะอาดแบบแห้งด้วยพลาสมา กับแผ่นซิลิกอนหรือวงจรรวมขนาดใหญ่ ที่มีสภาพพื้นผิวที่ยากต่อการทำมาความสะอาดด้วยกระบวนการทำมาความสะอาดแบบเปียก คือมีอัตราส่วนระหว่างความลึกกับความกว้างสูง เพราะเป็นการยากที่จะควบคุมจัดการให้ของเหลวไหลผ่านเข้าไปในช่องที่มีขนาดเล็ก ซึ่งการทำมาความสะอาดแบบแห้งด้วยพลาสมาสามารถแก้ปัญหาดตรงจุดนี้ได้เพราะ สิ่งปนเปื้อนจะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรืออันตรกิริยาทางฟิสิกส์กับอนุภาคในพลาสมาแล้วหลุดออกมาในรูปของแก๊ส และถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศได้โดยไม่ทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพัฒนาต่อยอดจากระบบพลาสมาที่มีอยู่เดิม [17-18] โดยได้มีการเพิ่มระบบที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส พัฒนาให้สามารถใช้แก๊สได้พร้อมกัน 2 ชนิดและติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้สามารถควบคุมความเร็วในการปั้มของปั้มสุญญากาศเพื่อปรับความดันภายในห้องสุญญากาศ (vacuum chamber) ได้ตามที่ต้องการ จากนั้นจึงทดลองให้กำเนิดพลาสมาและใช้พลาสมาที่เกิดจากแก๊ส 1 หรือ 2 ชนิด ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้พลาสมาผสมที่เกิด

จากการแตกตัวแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไฮโดรเจน มาใช้ทดลองทำมาความสะอาดแผ่นซิลิกอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับพลาสมาที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สอาร์กอนเพียงชนิดเดียว เพื่อศึกษาความสามารถในการทำความสะอาดของพลาสมาทั้งสองแบบ โดยความสะอาดจะถูกวัดและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัส (contact angle)[19-22] และเทคนิคอเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (Auger electron spectroscopy: AES)[23-24]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาและปรับปรุงระบบทำความสะอาดด้วยพลาสมาโดยการเพิ่มระบบที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส พัฒนาให้สามารถใช้แก๊สได้พร้อมกัน 2 ชนิดและติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้สามารถควบคุมความเร็วในการปั๊มของปั๊มสุญญากาศเพื่อควบคุมความดันภายในห้องสุญญากาศ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและความสามารถในการทำซ้ำ (repeatability) ของระบบทำความสะอาดพลาสมาด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัส
- 1.2.3 เพื่อศึกษาวิธีการประเมินความสะอาดพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัสและเทคนิคอเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี
- 1.2.4 เพื่อศึกษาและประเมินความสะอาดของแผ่นซิลิกอนที่หลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมาของพลาสมาของแก๊สอาร์กอน เปรียบเทียบกับพลาสมาผสมที่เกิดจากแก๊สอาร์กอนและไฮโดรเจน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ปรับปรุงระบบพลาสมาเดิมให้สามารถควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส, สามารถใช้แก๊สได้พร้อมกัน 2 ชนิดและติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้สามารถควบคุมความเร็วในการปั๊มของปั๊มสุญญากาศเพื่อควบคุมความดันภายในห้องสุญญากาศ
- 1.3.2 ศึกษาและทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพและความสามารถในการทำซ้ำ ของพลาสมาด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัส
- 1.3.3 ศึกษาและประเมินความสะอาดของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมาของอาร์กอนและพลาสมาผสมของอาร์กอนและไฮโดรเจนด้วยเทคนิคอเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีและการวัดมุมสัมผัส
- 1.3.4 ศึกษาและประเมินความสะอาดของแผ่นซิลิกอนที่หลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมาของพลาสมาของแก๊สอาร์กอน เปรียบเทียบกับพลาสมาผสมที่เกิดจากแก๊สอาร์กอนและไฮโดรเจนด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัส และเทคนิคอเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงานวิจัย

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการทั่วไปของแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ท่อกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ และ โหมมการกำทอนที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่น รวมทั้งทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับระบบสุญญากาศ
- ขั้นตอนที่ 2 ปรับปรุงระบบพลาสมาเดิมให้สามารถควบคุมอัตราการไหลของแก๊สสามารถใช้แก๊สได้พร้อมกัน 2 ชนิดและติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้สามารถควบคุมความเร็วในการปั๊มของปั๊มสุญญากาศได้
- ขั้นตอนที่ 3 ทดสอบระบบทำความสะอาดพื้นผิวของด้วยพลาสมา โดยทดลองทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน พร้อมทั้งปรับปรุงแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมา
- ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาและประเมินความสะอาดของพื้นผิวด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัส และเทคนิคออเจอเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี
- ขั้นตอนที่ 5 สรุปและเสนอแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 พัฒนาระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น
- 1.5.2 มีทักษะความรู้และความเข้าใจในระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ
- 1.5.3 มีทักษะความรู้และความเข้าใจในระบบการวัดมุมสัมผัส
- 1.5.4 มีทักษะความรู้และความเข้าใจในงานวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคออเจอเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี
- 1.5.5 สามารถสรุปความแตกต่าง ข้อดีและข้อเสียของพลาสมาที่ใช้ในการทำทำความสะอาดได้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ฟิสิกส์ของพลาสมา

พลาสมาเป็นสถานะที่สี่ของสสาร เมื่ออุณหภูมิของสสารเพิ่มขึ้นสสารจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว จากสถานะของเหลวเป็นแก๊สและในที่สุดจากสถานะแก๊สเป็นสถานะพลาสมา ที่สถานะพลาสมาอิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอม อะตอมจะมีสภาพเป็นไอออน ทั้งไอออนและอิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคอิสระในพลาสมา ในขณะที่อนุภาคอิสระสำหรับสถานะแก๊สคือ โมเลกุลของแก๊ส หรือเป็นอะตอมในกรณีของแก๊สเฉื่อย โดยทั่วไปอนุภาคอิสระในพลาสมา นอกจากจะเป็นอนุภาคที่มีประจุได้แก่ไอออนและอิเล็กตรอนแล้วยังมีอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลางรวมอยู่ด้วย อนุภาคในพลาสมาเหล่านี้มีสภาพต่างจากอนุภาคในสถานะแก๊ส โดยปกติ ดังนั้นอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคภายในพลาสมาโดยรวมและอันตรกิริยาที่มีต่อสนามภายนอกจึงต่างไปจากสถานะแก๊สโดยปกติทั่วไป

#### 2.1.1 กระบวนการกำเนิดอนุภาคที่มีประจุ (Production of charged particles)

พลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมที่เป็นกลางเกิดการแตกตัวซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง (photo ionization) และการชนด้วยอิเล็กตรอน (electron impact) เป็นต้น เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สได้รับพลังงานเพียงพอ อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอม ขบวนการนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ถ้าอัตราการเกิดของอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับหรือมากกว่าอัตราการสูญเสีย แสดงว่ามีพลาสมาเกิดขึ้น พลังงานน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกจากอะตอม เรียกว่า พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (ionization energy) ในกรณีที่ของแข็งได้รับพลังงานแล้วอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของของแข็ง จะเรียกขบวนการนี้ว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน (electron emission) และพลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดได้ เรียกว่า ฟังก์ชันงาน (work function) การแตกตัวเป็นไอออนและการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในการสร้างพลาสมา ปรากฏการณ์ทั้งสองสามารถแบ่งตามขบวนการเกิดได้หลายแบบ แต่จะเกี่ยวข้องกับการสร้างพลาสมาในงานวิจัยนี้มีดังนี้

#### 1) การแตกตัวเป็นไอออนโดยการชน (Ionization by collision)

เมื่ออิเล็กตรอน ไอออน หรือ อะตอมที่เป็นกลางวิ่งด้วยความเร็วค่าหนึ่งเข้าชนอะตอมใดๆ จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานซึ่งกันและกัน ถ้าหลังการชนอะตอมที่ถูกชนไม่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (excitation) หรือไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน การชนในลักษณะนี้จะเป็นการ

ชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ในทางกลับกัน ถ้าอะตอมของแก๊สที่ถูกชนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น หรือทำให้แตกตัวเป็นไอออน การชนในลักษณะนี้ก็จะเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision)

ในกรณีที่อนุภาคที่เข้าชนเป็นอิเล็กตรอน ถ้าการชนเป็นผลให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนแบบการชนด้วยอิเล็กตรอน ซึ่งในกรณีนี้อิเล็กตรอนต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม นั่นคือ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (1)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของอิเล็กตรอน

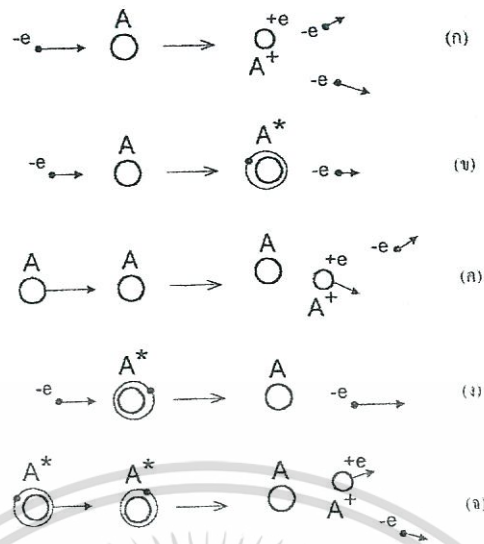
$v$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

$W_i$  คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

หลังการชนอิเล็กตรอนที่เข้าชนจะมีพลังงานจลน์ลดลง อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมจะมีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.1(ก) ในกรณีการชนแบบนี้พลังงานจลน์ของอะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนจะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอะตอมมีมวลมากเมื่อเทียบกับมวลของอิเล็กตรอน ในบางกรณีอะตอมที่ถูกชนจะไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนเพียงแต่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเท่านั้น ดังในรูปที่ 2.1(ข) ถ้าก่อนที่อะตอมนี้จะกลับเข้าสู่สถานะพื้น (ground state) มีอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งเข้าชนอาจเป็นผลให้อะตอมนั้นถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนได้ การแตกตัวเป็นไอออนแบบนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนแบบขั้น (step ionization) กรณีนี้เป็นไปได้ถ้าอิเล็กตรอนที่เข้าชนมีความหนาแน่นสูงและสถานะถูกกระตุ้นของอะตอมเป็นสถานะกึ่งเสถียร (metastable excited state) ซึ่งมีช่วงชีวิต (life time) ยาวกว่าสถานะถูกกระตุ้นปกติ

การแตกตัวเป็นไอออนอาจเกิดจากการชนด้วยอะตอมที่เป็นกลางก็ได้ ถ้าอะตอมที่เข้าชนมีพลังงานจลน์มากพอ หลังการชนจะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานและโมเมนตัม ทำให้อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ในขณะที่อะตอมที่เข้าชนจะมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ ดังในรูปที่ 2.1(ค)

ถ้าอะตอมที่ถูกชนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นอยู่ก่อนแล้ว (กรณีอะตอมหลังถูกชนในรูปที่ 2.1(ข)) หลังจากการชนอะตอมที่ถูกชนจะเป็นกลางและอิเล็กตรอนเข้าชนจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้น ดังในรูปที่ 2.1(ง) แต่ถ้าอะตอมที่ถูกชนอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้นอยู่ก่อนแล้วนั้น ถูกชนด้วยอะตอมที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเช่นกัน หลังจากการชนอะตอมที่เข้าชนจะถ่ายเทพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ให้แก่อะตอมที่ถูกชนทำให้อะตอมที่เข้าชนเป็นกลาง ในขณะที่อะตอมที่ถูกชนจะถูกทำให้แตกตัว ดังในรูปที่ 2.4(จ)



รูปที่ 2.1 การชนของอิเล็กตรอนและอะตอม

$A$  คือ อะตอมที่เป็นกลาง

$A^+$  คือ อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนบวก

$A^*$  คือ อะตอมที่สถานะถูกกระตุ้น

## 2) การแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง (Photo-ionization)

เมื่ออะตอมดูดกลืนโฟตอนจะส่งผลให้อิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากระดับต่ำกว่าไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่าและอะตอมนี้จะอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้นในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนในอะตอมที่ถูกกระตุ้นเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับที่สูงกว่ามายังระดับพลังงานที่ต่ำกว่าจะปลดปล่อยโฟตอนออกมา กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



เมื่อ  $A$  คือ อะตอมที่เป็นกลาง

$A^*$  คือ อะตอมที่ถูกกระตุ้น

$h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ มีค่าเท่ากับ  $6.63 \times 10^{-34}$  จูล

$\nu$  คือ ความถี่ของแสง

ถ้าโฟตอนมีพลังงานมากพอ และถูกดูดกลืน โดยอะตอมที่เป็นกลาง อะตอมนั้นก็ จะอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น หรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ ถ้า

$$h\nu \geq W \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $W$  คือ ระดับพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้นหรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออนซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$\lambda \leq \frac{ch}{W_e} \quad \text{สำหรับการกระตุ้น} \quad (4)$$

$$\text{และ } \lambda \leq \frac{ch}{W_i} \quad \text{สำหรับการแตกตัวเป็นไอออน} \quad (5)$$

เมื่อ  $W_e$  คือ พลังงานการกระตุ้นของอะตอม

$W_i$  คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์

$c$  คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ  $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ

ในกรณีที่พลังงานของโฟตอนมีค่ามากกว่าพลังงานที่ใช้ในการแตกตัวเป็นไอออนพลังงานส่วนเกินของโฟตอนนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมด้วยวิธีการนี้เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)

### 2.1.2 การกำเนิดพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave induced plasma)

พลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการให้พลังงานที่เหมาะสมกับอะตอมของแก๊สแล้วทำให้อะตอมของแก๊สนั้นเกิดการแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอน วิธีการให้พลังงานกับอะตอมแก๊สมียุหลายวิธี เช่น การให้พลังงานความร้อน การใช้ลำอนุภาคที่มีพลังงานพอเหมาะเข้าไปในระบบของแก๊ส การใช้สนามไฟฟ้าแรงอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุพาหะอิสระ แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการกระตุ้นให้เกิดพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave excited plasma) ซึ่งมีข้อดีในส่วนที่ทำให้พลาสมาที่มีความหนาแน่นสูง พลาสมามีอุณหภูมิต่ำ และไม่จำเป็นต้องใช้ขั้วไฟฟ้า (electrodeless) เหมือนกันกับกรณีการป้อนด้วยสนามไฟฟ้า หรือไส้ร้อน (filament) สำหรับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเพื่อก่อให้เกิดพลาสมา ซึ่งสะดวกสำหรับการติดตั้งและมีอายุการใช้งานยืนนาน

แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถออกแบบสร้างได้หลากหลายรูปแบบ แต่จะอาศัยหลักการสำคัญเดียว คือ พลาสมาที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการคิซาร์จของแก๊ส โดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการที่จะรักษาระดับการเกิดพลาสมาให้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องต่อไปนั้นจะต้องพิจารณาถึงอนุภาคที่มีประจุ และกลไกการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นภายในพลาสมานั้นด้วย ดังนั้นการอธิบายและศึกษาสมบัติของแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงกระบวนการที่เกี่ยวข้องดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1) อันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับอนุภาคที่มีประจุ

พิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในรูปฟังก์ชันไซน์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในรูปฟังก์ชันไซน์ โดยกรณีนี้จะเขียนในรูปของเวกเตอร์เชิงซ้อนหรือที่เรียกว่าเฟสเซอร์ (Phasors)

$$\mathbf{E} \exp j\omega t \quad \text{และ} \quad \mathbf{H} \exp j\omega t$$

เมื่อ  $\mathbf{E}$  คือแอมพลิจูดเชิงซ้อนของสนามไฟฟ้า  
 $\mathbf{H}$  คือแอมพลิจูดเชิงซ้อนของสนามแม่เหล็ก  
 $\omega$  คือความถี่เชิงมุมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า  
 $j = \sqrt{-1}$

โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แท้จริงจะหาได้จากส่วนค่าจริงของเฟสเซอร์ นั่นคือ

$$E(t) = \text{Re}(\mathbf{E} \exp j\omega t) \quad (6)$$

$$H(t) = \text{Re}(\mathbf{H} \exp j\omega t) \quad (7)$$

พิจารณาบริเวณของพลาสมาที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าปรากฏอยู่ ซึ่งไม่มีสนามแม่เหล็กสถิตจากภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งในกรณีนี้พลาสมาจะกลายเป็นตัวกลางไอโซทรอปิก (isotropic medium) และสมบัติของพลาสมาจะอยู่ในรูปของสเกลาร์เพอร์มิตติวิตี (scalar permittivity) ซึ่งเรียกว่าตัวกลางไดอิเล็กตริก (dielectric) แอมพลิจูดเชิงซ้อน  $\mathbf{E}$  และ  $\mathbf{H}$  จะเป็นไปตามสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu_0 \mathbf{H} \quad (8)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\varepsilon_p \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad (9)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon_p \varepsilon_0 \mathbf{E}) = 0 \quad (10)$$

$$\nabla \cdot (\mu_0 \mathbf{H}) = 0 \quad (11)$$

ค่าเพอร์เมียบิลิตี (permeability) ของพลาสมาจะถือว่าเท่ากับ  $\mu_0$  ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับในสุญญากาศ และค่าของพลาสมาเพอร์มิตติวิตี (plasma permittivity) ซึ่งโดยทั่วไปจะแสดงเป็นค่าสัมพันธ์กับ  $\varepsilon_0$  ซึ่งเป็นค่าเพอร์มิตติวิตีในสุญญากาศ เพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์นี้จะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน  $\varepsilon_p = \varepsilon_r + j\varepsilon_i$  เมื่อส่วนจริงและส่วนจินตภาพอธิบายถึงสมบัติการสะสมพลังงาน (reactive) และการสูญเสียพลังงาน (resistive) ของพลาสมาตามลำดับ

สำหรับการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสมา สามารถอธิบายบนพื้นฐานของอนุภาคที่มีประจุในที่ว่าง (free space) ซึ่งมีพฤติกรรมขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้าเชิงซ้อน (complex electric conductivity,  $\sigma$ ) หรือเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ดังสมการ

$$\sigma \equiv \sigma_r + j\sigma_i = [-\varepsilon_i + j(\varepsilon_r - 1)]\omega\varepsilon_0 \quad (12)$$

อนุภาคที่มีประจุที่อยู่ในบริเวณการเกิดแก๊สดิสซาร์จะถูกรบกวนด้วยของค์ประกอบของสนามไฟฟ้า โดยจะไม่คำนึงถึงแรงอันเนื่องมาจากองค์ประกอบของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากแรงดังกล่าวมีขนาดอยู่ในระดับ  $eEv/c$  ซึ่งมีค่าน้อยมาก เมื่อ  $v$  ซึ่งเป็นความเร็วของอนุภาคแต่ละตัวมีค่าน้อยกว่าความเร็วแสง  $c$  มากๆ และ  $e$  คือประจุของอิเล็กตรอน เมื่ออนุภาคที่มีประจุในพลาสมาได้รับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ ในทางปฏิบัติจะถือว่าไอออนมีการเคลื่อนที่น้อยมากเนื่องจากมีมวลที่มากนั่นเอง ดังนั้นคำอธิบายเชิงไฮโดรไดนามิกส์ (hydrodynamic description) ของการตอบสนองของพลาสมาต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะถูกจำกัดการไหลของอิเล็กตรอนด้วยความเร็วเฉลี่ย  $V$

พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุเดี่ยว เมื่อไม่คิดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอันเนื่องจากความร้อน (thermal motion) จะได้สมการการเคลื่อนที่ที่เป็น

$$m_e \frac{dV}{dt} = -eE(t) - m_e v V \quad (13)$$

เมื่อ  $m_e$  คือ มวลของอิเล็กตรอน

สำหรับสมการดังกล่าวมีทั้งแรงกระทำจากภายนอกคือเทอม  $-eE$  และเทอมของแรงเสียดทานคือ  $-m_e v V$  เมื่อ  $v$  คือความถี่ของการชนเฉลี่ยระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคที่เป็นกลาง สำหรับการส่งผ่านโมเมนตัม แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนั้น โดยปกติจะเป็นแรงแลงเจวิน (Langevin force) ซึ่งเกิดเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนกับอนุภาคนักที่อยู่โดยรอบบริเวณนั้น ผลเฉลยของสมการ (13) ที่สภาวะคงตัวเป็นฟังก์ชันไซน์ที่ขึ้นกับเวลา เขียนได้เป็น

$$V = \text{Re} (V \exp j\omega t)$$

เมื่อ  $V$  คือ แอมพลิจูดเชิงซ้อนของความเร็ว

แทนค่าผลเฉลยดังกล่าวลงในสมการ (13) จะได้ว่า

$$j\omega m_e V = eE - m_e v V \quad (14)$$

ซึ่งจะได้ 
$$V = -\frac{eE}{m_e v + j\omega} \quad (15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการกระจัดของอิเล็กตรอน (electron displacement) ซึ่งกำหนดโดย

$$R(t) = r \exp j\omega t$$

จะได้ว่า  $\frac{d}{dt}(r \exp j\omega t) = j\omega r \exp j\omega t = V \exp j\omega t$

ดังนั้น  $j\omega r = V$  แทนค่าลงในสมการ (15) จะได้การกระจัดของอิเล็กตรอนเป็น

$$r = \frac{eE}{m_e \omega(\omega - j\nu)} \quad (16)$$

และจะได้การกระจัดของอิเล็กตรอนในรูปของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (root mean square, rms) เป็น

$$r_{rms} = \frac{eE_{rms}}{m_e \omega(\nu^2 + \omega^2)^{1/2}} \quad (17)$$

เมื่อ  $E_{rms} = (E \cdot E^* / 2)^{1/2}$  คือ ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้า

ในกรณีของคลื่นไมโครเวฟค่า  $r_{rms}$  ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่าขนาดของห้องพลาสมา (plasma chamber) ดังนั้นสามารถตัดผลกระทบอันเนื่องมาจากการชนห้องพลาสมาของอิเล็กตรอนระหว่างการสั้น

จากสมการ (17) สามารถคำนวณหา ความหนาแน่นของกระแส (conduction current density) ได้เป็น

$$J = -enV \quad (18)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

นอกจากนี้ยังสามารถเขียนความหนาแน่นของกระแสในรูปแบบอื่นได้เป็น

$$J = \sigma E \quad (19)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้า โดยที่มีค่าดังสมการ

$$\sigma = \frac{ne^2}{m_e} \frac{1}{\nu + j\omega} \quad (20)$$

จากสมการที่ (12) จะได้ว่า  $\epsilon_p = 1 - j\sigma/\omega\epsilon_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสามารถหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของพลาสมาได้เป็น

$$\epsilon_p = 1 - \left( \frac{\omega_{pe}}{\omega} \right)^2 \frac{1}{1 - j \frac{\nu}{\omega}} \quad (21)$$

เมื่อ  $\omega_{pe} \equiv (ne^2 / m_e \epsilon_0)^{1/2}$  คือ ความถี่เชิงมุมของอิเล็กตรอนในพลาสมา  
(Electron plasma angular frequency)

พิจารณากรณีที่ไม่มีเกิดการชน ( $\nu = 0$ ) จะได้  $\sigma = j\sigma_i$  ซึ่งเป็นจำนวนจินตภาพ และ  $\epsilon = \epsilon_r$  เป็นจำนวนจริง พลาสมาจะแสดงสมบัติเป็นตัวกลางที่มีการสูญเสียน้อย (lossless medium) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะอยู่ในรูปของการสั่น ซึ่งถูกเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดยเฉลี่ยแล้วจะไม่มีถ่ายเทพลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้กับอิเล็กตรอนและแก๊สที่อยู่โดยรอบ ดังนั้นกรณีนี้พลาสมาจะเป็นตัวกลางพาสซีฟ (passive) เมื่อเกิดการชนขึ้นจะก่อให้เกิดความไม่เป็นระเบียบในการเคลื่อนที่ ก่อให้เกิดกลไกที่สามารถถ่ายเทพลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสู่อิเล็กตรอนและถ่ายทอดไปยังแก๊สที่อยู่โดยรอบ ซึ่งในการอธิบายให้เกิดความเข้าใจในเรื่องนี้นั้นจะต้องพิจารณาการได้รับพลังงานและการถ่ายเทกำลังในการเกิดดิซซาร์จอย่างละเอียด

## 2) การรับพลังงานและการถ่ายเทกำลังในการเกิดดิซซาร์จ

จากสมการที่ (15) สามารถเขียนสมการแสดงความเร็วของอิเล็กตรอนที่ขึ้นกับเวลาได้ดังสมการ

$$V(t) = -\frac{e}{m_e} \operatorname{Re} \left( \frac{E}{\nu + j\omega} \exp j\omega t \right) \quad (22)$$

องค์ประกอบของความเร็วตามแนวแกน  $x$  จะเขียนได้เป็น

$$V_x(t) = \frac{e}{m_e} \frac{E_x}{(\nu^2 + \omega^2)^{1/2}} \cos(\omega t + \psi_x) \quad (23)$$

เมื่อ  $E_x$  คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนวแกน  $x$

$\psi_x$  คือ มุมเฟส

ดังนั้นพลังงานจลน์ที่ได้จากองค์ประกอบของความเร็วตามแนวแกน  $x$  คือ  $u_x(t) = \frac{1}{2} m_e V_x^2(t)$

นั่นคือ

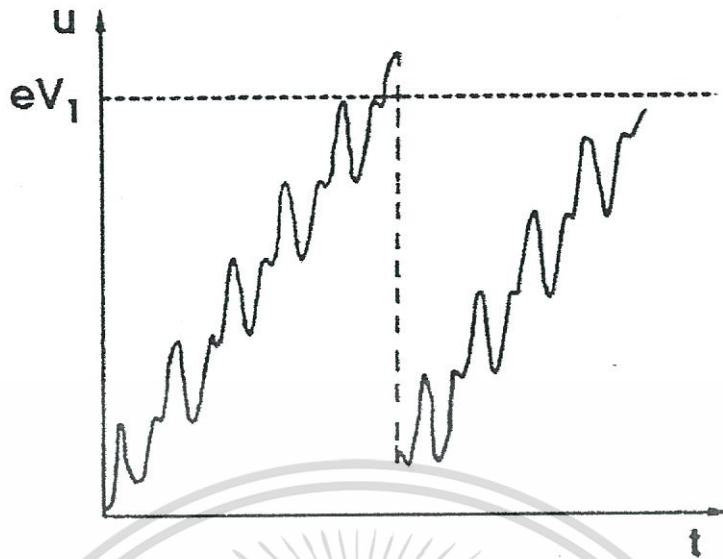
$$\begin{aligned} u_x(t) &= \frac{1}{2} \frac{e^2}{m_e} \frac{E_x^2}{v^2 + \omega^2} \cos^2(\omega t + \psi_x) \\ &= \frac{1}{4} \frac{e^2}{m_e} \frac{E_x^2}{v^2 + \omega^2} [1 + \cos(2\omega t + 2\psi_x)] \end{aligned} \quad (24)$$

ซึ่งค่าเฉลี่ยตลอดทั้งคาบเวลาคือ  $\bar{u}_x = e^2 E_x^2 / 4m_e (v^2 + \omega^2)$  ดังนั้นพลังงานจลน์เฉลี่ยทั้งหมดในสามมิติ คือ  $\bar{u} = e^2 E_p^2 / 4m_e (v^2 + \omega^2)$  เมื่อ  $E_p^2 = 2E_{rms}^2$  คือผลรวมของความเข้มสนามกำลังสองตลอดทั้งสามแกน (ตัวอย่างเช่น  $E_p^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2$  สำหรับพิกัดคาร์ทีเซียน)

โดยทั่วไปแล้วอิเล็กตรอนมีค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของการสั่นตลอดช่วงหนึ่งคาบเวลาน้อยกว่าพลังงานที่ใช้สำหรับการทำให้เกิดการกระตุ้นและการเกิดแตกตัวของโมเลกุลโดยการชนเพื่อให้เกิดการคายประจุ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลรอบข้าง ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเพิ่มพลังงานขึ้นอย่างต่อเนื่อง

แรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้าคือ  $-eE(t)$  ซึ่งจะได้อำนาจจากแรงดังกล่าวต่อหนึ่งหน่วยเวลาเป็น  $-eE(t) \cdot V(t)$  โดยที่ค่าเฉลี่ยของงานที่เกิดขึ้นนี้ตลอดการสั่นในหนึ่งคาบเวลาคือ ค่าการถ่ายเทกำลังงานเฉลี่ยต่ออิเล็กตรอน (mean power transfer per electron,  $\theta_A$ ) ซึ่งมีค่าคงสมการ

$$\begin{aligned} \theta_A &\equiv -e \overline{E(t) \cdot V(t)} = -e \operatorname{Re} \left( \frac{V \cdot E^*}{2} \right) \\ &= \frac{e^2}{m_e} \frac{v}{v^2 + \omega^2} E_{rms}^2 \\ &= 2v\bar{u} \end{aligned} \quad (25)$$



รูปที่ 2.2 การเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าความถี่สูงเนื่องจากการชนแบบยืดหยุ่นกับอนุภาคหนัก และเกิดการถ่ายเทพลังงานอย่างรวดเร็วขณะเกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเมื่อมีพลังงานถึงค่าพลังงานขีดเริ่ม  $eV_1$

พิจารณากรณีไม่มีการชน ( $\nu = 0$ ) ความเร็วของอิเล็กตรอนมีมุมเฟสต่างกัน  $90^\circ$  องศา กับสนามไฟฟ้า และไม่มีการถ่ายเทกำลังงานเฉลี่ยจากสนามไฟฟ้าให้กับเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังนั้นจะได้ว่า  $\theta_A = 0$  ส่วนในกรณีที่มีการชนเกิดขึ้น ค่า  $\theta_A \neq 0$  และพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีค่ามากพอที่จะกระตุ้นหรือการแตกตัวของโมเลกุลได้ ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วพลังงานของอิเล็กตรอนจะคงเหลือเพียงเล็กน้อยและจะเกิดกระบวนการเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นอีกครั้ง สำหรับพลังงานของอิเล็กตรอนโดยเฉลี่ยจะเป็นฟังก์ชันของเวลาโดยจะเพิ่มขึ้นเป็นระลอกเล็กๆซึ่งได้จากการรวมกันของพลังงานของการสั่นที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ และเมื่อเกิดการกระตุ้นหรือการแตกตัวของโมเลกุล อิเล็กตรอนก็จะสูญเสียพลังงานเกือบทั้งหมดดังแสดงได้ในรูปที่ 2.2

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พิจารณาเพียงการเคลื่อนที่และสมบัติของอิเล็กตรอนเดี่ยวในสนามไฟฟ้าความถี่สูง แต่สำหรับการอธิบายอิเล็กตรอนในพลาสมาที่สมบูรณ์มากขึ้นจะต้องพิจารณาอิเล็กตรอนในโมเดลเชิงไฮโดรไดนามิก (hydrodynamic model) ที่มีความเร็วเฉลี่ย  $v$  ส่วนการอธิบายที่ละเอียดมากขึ้นจะต้องพิจารณาโมเดลเชิงสถิติ (kinetic model) ซึ่งพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ในระดับไมโครของอนุภาคโดยเน้นที่พลังงานที่ได้รับจากสนามและการชนทุกชนิดที่เกิดขึ้น ซึ่งจะได้ฟังก์ชันการกระจายความเร็วของอิเล็กตรอนอันเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มของอิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ได้จากการชนกันก่อให้เกิดการกระจาย โดยจะแสดงในรูปของพลังงานเฉลี่ย

ซึ่งมีค่ามากกว่าพลังงานที่ได้จากการชนแต่ละครั้ง สำหรับการกระจายโดยปกติแล้วจะมีอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงพอ เพียงเล็กน้อย ซึ่งมีค่าพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นและการแตกตัวของโมเลกุลของแก๊ส เรียกว่าส่วนปลายของการกระจาย (tail of distribution) ซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยก่อให้เกิดกลไกการคิซาร์จขึ้น

### 2.1.3 สมบัติของพลาสมา

#### 1) ความหนาแน่นของพลาสมา (Plasma Density)

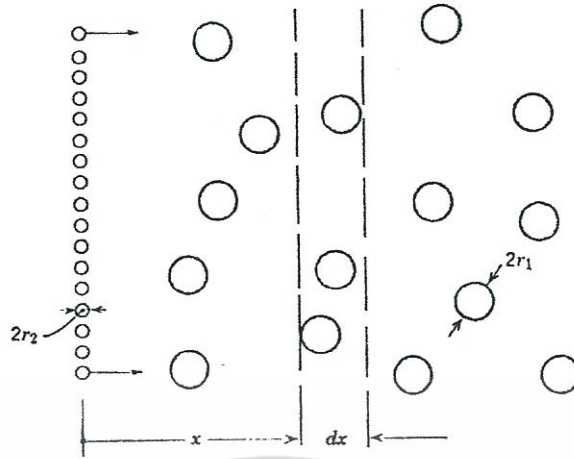
พลาสมามีส่วนประกอบที่เป็นไอออน อิเล็กตรอน และอะตอมที่ยังไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน (อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า) รวมกันอยู่ โดยที่พลาสมาจะมีความหนาแน่นขององค์ประกอบต่างๆ แตกต่างกัน ถ้าพลาสมามีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (plasma electron density)  $n_e$  ความหนาแน่นของไอออน (plasma ion density)  $n_i$  และความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นกลาง (neutral particle density)  $n_n$  ความหนาแน่นของอนุภาคทั้งสามนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออน โดย

$$\text{เปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออน เท่ากับ } \frac{n_i}{(n_i + n_n)} \times 100\% \quad (26)$$

ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออนมีค่ามากกว่า 10 % ถือว่าแก๊สนั้นถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนในปริมาณที่มาก ดังนั้นในการพิจารณาพฤติกรรมของตัวกลางต้องพิจารณาผลของพลาสมาเป็นหลัก แต่ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออนมีค่าน้อยกว่า 1 % จะต้องพิจารณาถึงผลของแรงปฏิกิริยาอันเนื่องจากอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าด้วย

#### 2) ระยะปลอดการชน (Free Path)

ระยะปลอดการชน คือ ระยะทางที่อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่มีการชนกับอนุภาคใดๆ ภายในระบบ ระยะปลอดการชนของอนุภาคในพลาสมาเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่เป็นตัวกำหนดว่าพลาสมาที่สร้างขึ้นนั้น จะสามารถดำรงสถานะพลาสมาอย่างต่อเนื่องได้หรือไม่ ซึ่งเวลานำมาใช้จะใช้เป็นค่าเฉลี่ยหรือเรียกว่าระยะปลอดการชนเฉลี่ย (mean free path,  $\bar{\lambda}$ )



รูปที่ 2.3 โคจรแตรมของลำอนุภาครัศมี  $r_2$  ตกกระทบกับโมเลกุลแก๊สรัศมี  $r_1$

ระยะปลอดการชนของอนุภาคขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอนุภาคหรือจำนวนโมเลกุลและอุณหภูมิของระบบ ระยะปลอดการชนเป็นค่าสมมุติให้เป็นระยะระหว่างรัศมีของโมเลกุลที่ไม่เคลื่อนที่  $r_1$  กับรัศมีของอนุภาคที่เล็กกว่าที่เคลื่อนที่เข้าชน  $r_2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ถ้าสมมุติให้รูปร่างของอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนและโมเลกุลที่อยู่กับที่มีลักษณะเป็นทรงกลมคล้ายลูกบิลเลียด ดังนั้นการชนจะเกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของทั้งสองอนุภาคมีระยะเป็น  $r_1 + r_2$  ดังนั้นพื้นที่ที่เกิดการชนกันของแก๊สหนึ่งโมเลกุล จะมีค่าเป็น  $\pi(r_1 + r_2)^2$  และสำหรับแก๊สที่มีจำนวน  $N$  โมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร จะมีพื้นที่ในการชนทั้งหมด  $N\pi(r_1 + r_2)^2$  ซึ่งเรียกพื้นที่การชนนี้ว่า ภาคตัดขวางยังผล (effective cross section)

ถ้าลำอนุภาคที่เข้าชนที่ระยะทาง  $x$  ใดๆ มีจำนวน  $n$  ดังนั้นจำนวนอนุภาคในลำอนุภาคที่สูญเสียไปเนื่องจากการกระเจิงเมื่อเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง  $dx$  สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$dn = -nN\pi(r_1 + r_2)^2 dx \quad (27)$$

ถ้ากำหนดให้จำนวนอนุภาคที่ระยะ  $x = 0$  มีจำนวน  $n_0$  จะได้ว่า

$$n = n_0 \exp[-N\pi(r_1 + r_2)^2 x] \quad (28)$$

ความน่าจะเป็นที่จะพบว่าระยะปลอดการชนมีค่า  $x$  มีค่าเท่ากับความน่าจะเป็น  $p(x)$  ที่จะเกิดการชนที่ระยะทางระหว่าง  $x$  ถึง  $x + dx$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{dn}{n_0}$

$$p(x) = \frac{dn}{n_0} = N\pi(r_1 + r_2)^2 \exp[-N\pi(r_1 + r_2)^2 x] dx \quad (29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นระยะปลอดการชนเฉลี่ย  $\bar{\lambda}$  จะมีค่า

$$\begin{aligned}\bar{\lambda} = \bar{x} &= \int_{x=0}^{\infty} x p(x) dx \\ &= \frac{1}{N\pi(r_1 + r_2)^2}\end{aligned}\quad (30)$$

ถ้าอนุภาคที่เข้าชนไอออนของแก๊สชนิดเดียวกัน นั่นคือ  $r_1 = r_2 = r$  จากสมการ (30) จะได้ระยะปลอดการชนเฉลี่ยของไอออนกับอนุภาคที่เป็นกลางมีค่าเป็น

$$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{4\pi r^2 N} \quad (31)$$

และถ้าอนุภาคที่เข้าชนเป็นอิเล็กตรอน จะได้ว่า  $r_1 \gg r_2$  ดังนั้นจากสมการ (31) จะได้ว่า

$$\bar{\lambda}_e = \frac{1}{4\pi r_1^2 N} \quad (32)$$

สำหรับกรณีของอนุภาคที่เป็นกลาง (โมเลกุลของแก๊ส) ระยะปลอดการชนเฉลี่ย ( $\bar{\lambda}$ ) จะมีค่าเป็น

$$\bar{\lambda}_g = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{\lambda}_i = \frac{kT}{4\sqrt{2} \pi r^2 p} \quad (33)$$

เมื่อ  $r$  คือ รัศมีโมเลกุลของแก๊ส  
 $p$  คือ ความดันของระบบ  
 $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์

การชนกันระหว่างอนุภาคกับ โมเลกุลของแก๊ส อาจทำให้เกิดแก๊สแตกตัวเป็นไอออน หรือทำให้โมเลกุลแก๊สอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (excitation) หรืออื่นๆ ได้

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในสนามไฟฟ้าจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้านั้น ซึ่งถ้าเคลื่อนที่ไปโดยไม่มีการชนกับอนุภาคใดๆ อิเล็กตรอนจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อถึงระยะทางค่าหนึ่งอิเล็กตรอนจะมีพลังงานจลน์มากกว่าพลังงานการแตกตัวเป็นไอออน ( $eV_i$ ) และถ้าเกิดชนกับอะตอมของแก๊สแล้วจะทำให้แก๊สเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ ระยะทางนี้คือระยะปลอดการชนที่ทำให้แก๊สเกิดการแตกตัว ถ้าให้  $\lambda_i$  คือระยะปลอดการชนที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ  $E$  จะได้ว่า

$$eE\lambda_i \geq eV_i \quad (34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $E$  คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ  
 $e$  คือ ประจุอิเล็กตรอน  
 $eV_i$  คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

หรือเขียนได้ว่า  $E\lambda_i \geq V_i$  (35)

เมื่อ  $V_i$  คือ ศักย์ของการแตกตัวเป็นไอออน (ionization potential) มีค่าเท่ากับ 15.8 โวลต์สำหรับแก๊สอาร์กอน มีค่าเท่ากับ 13.6 โวลต์สำหรับแก๊สออกซิเจน

จากสมการ (35) พบว่าสนามไฟฟ้าที่จะเร่งให้อนุภาคมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สได้ คือ

$$E = \frac{V_i}{\lambda_i} \quad (36)$$

หรืออาจกล่าวได้ว่า เมื่อป้อนค่าสนามไฟฟ้า  $E$  ระยะปลดการชนเฉลี่ยสั้นที่สุดที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน มีค่า  $\lambda_i = V_i/E$  ซึ่งระยะปลดการชนที่ต้องการนี้สามารถกำหนดได้โดยการควบคุมความดันของแก๊สให้เหมาะสม

### 3) อุณหภูมิของพลาสมา (Plasma Temperature)

ในงานด้านฟิสิกส์ของพลาสมานิยมกำหนดหน่วยของพลังงานเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) และสำหรับพลาสมาแล้วนิยามที่จะอธิบายอุณหภูมิพลาสมาในรูปของพลังงานพลาสมาแทน ดังนั้นอุณหภูมิของพลาสมาจึงถูกใช้เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการอธิบายพลังงานของอนุภาคในพลาสมาโดยพลังงานเฉลี่ยของอนุภาคจะแปรผันกับอุณหภูมิตามสมการ

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT \quad (37)$$

โดยทั่วไปจะกำหนดอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ และอุณหภูมิของพลาสมาสามารถคำนวณได้จากพลังงานเฉลี่ยของพลาสมา ตัวอย่างเช่นอุณหภูมิของพลาสมา 1 อิเล็กตรอนโวลต์ จะมีค่าเท่ากับ 11600 K

ภายในพลาสมาอุณหภูมิของไอออนและอิเล็กตรอนไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน และถ้ามีการป้อนสนามแม่เหล็ก อุณหภูมิของอนุภาคในพลาสมาในแนวขนานและตั้งฉากกับสนามจะมีค่าแตกต่างกันและอุณหภูมิของอนุภาคที่เป็นกลางก็จะแตกต่างกันด้วย

### 4) สภาพความต้านทานของพลาสมา (Plasma resistivity)

ความต้านทานของพลาสมาเกิดขึ้นเนื่องจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับ

ไอออนหรืออนุภาคที่เป็นกลาง ความต้านทานของพลาสมาจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบเสมือนว่าอิเล็กตรอนในพลาสมามีพลังงานเพิ่มขึ้น) ทั้งนี้เนื่องจากโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนหรือกับอนุภาคที่เป็นกลางจะลดลงเมื่อความเร็วของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะตรงกันข้ามกับความต้านทานของโลหะ

### 5) การไหลของพลาสมา (Plasma flow)

เนื่องจากพลาสมาเป็นอนุภาคที่ถูกทำให้มีประจุ ดังนั้นการไหลของพลาสมา จึงมีลักษณะคล้ายกับการไหลของอิเล็กตรอน ในโลหะกระแสไฟฟ้าเกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนเพียงอย่างเดียว ไอออนหรือโครงสร้างจะไม่มีเคลื่อนที่ แต่ในพลาสมาจะมีทั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน ดังนั้น กระแสที่เกิดขึ้นจึงเป็นผลรวมของทั้งกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนและไอออน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวมหาได้จากสมการ

$$J = J_i - J_e \quad (38)$$

เมื่อ  $J$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวม

$J_i$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าไอออน

$J_e$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอน

ในพลาสมา อิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่สวนทางกับไอออนบวก ดังนั้นถ้าให้กระแสไอออนมีค่าเป็นบวกกระแสอิเล็กตรอนจะมีค่าเป็นลบ โดยจะต้องคำนึงถึงเครื่องหมายของกระแสด้วย

### 6) พลาสมาชีท (Plasma sheath)

อนุภาคภายในพลาสมาจะมีอันตรกิริยาต่อกันผ่านทางสนามไฟฟ้าและอิทธิพลของสนามไฟฟ้าของอนุภาคที่มีในพลาสมาจะมีเพียงระยะจำกัดเรียกว่า ระยะทางการสกรีน (screening distance) ที่ระยะทางมากกว่านี้สนามของอนุภาคจะถูกหักล้างโดยอนุภาคตัวอื่นในพลาสมา ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำต่อพลาสมา สนามไฟฟ้าจากภายนอกจะถูกหักล้างโดยสนามไฟฟ้าภายในพลาสมา ทำให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกไม่สามารถผ่านพลาสมาได้ ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับที่โลหะไม่ยอมให้สนามไฟฟ้าภายนอกผ่าน เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกทำให้อนุภาคบริเวณผิวของพลาสมา มีการจัดเรียงตัวใหม่และเป็นผลให้สนามภายนอกมีค่าลดลงอย่างเอกซ์โปเนนเชียลตามระยะทางลึกเข้าไปในพลาสมา ระยะทางที่สนามภายนอกสามารถผ่านเข้าไปได้จะขึ้นกับความหนาแน่นและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา เมื่อพลาสมาสัมผัสกับผนัง (material wall) บริเวณที่สัมผัสกันระหว่างพลาสมา กับผนังจะไม่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ความหนาของบริเวณนี้เรียกว่า “พลาสมาชีท” ซึ่งเกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออน จึงทำให้ผนังมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับพลาสมา เป็นผลให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงผลักอิเล็กตรอนตัวต่อไป ในขณะที่เดียวกันจะเร่งให้อิออนบวกเคลื่อนมายังผนังด้วยอัตราที่สูงขึ้น ที่สภาวะสมดุลจึงเกิดเป็นชั้นของประจุบวกสุทธิลึกลงไปในพลาสมาซึ่งเรียกว่า พลาสมาชีทนั่นเอง ความหนาของพลาสมาชีทขึ้นกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมา โดยสเกลของความหนาของพลาสมาชีทนี้เรียกว่าความยาวเดบาย (Debye Length,  $\lambda_D$ )

$$\lambda_D^2 = \frac{\epsilon_0 k T_e}{e^2 n_e} \quad (39)$$

หรือ

$$\lambda_D = 743 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \quad (40)$$

เมื่อ  $T_e$  คือ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (eV)  
 $n_e$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ( $\text{cm}^{-3}$ )  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์  
 $e$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.4 บริเวณส่วนที่เป็นพลาสมาชีท

เมื่อพิจารณาอนุภาคที่มีประจุ  $q$  ตัวหนึ่ง (isolated charge particle) ค่าศักย์ไฟฟ้า  $V$  ของอนุภาคนี้จะมีค่าลดลงตามระยะทาง  $r$  โดย

$$V = \frac{q}{r} \quad (41)$$

ในทำนองเดียวกันศักย์ไฟฟ้าของพลาสมาชีทก็มีค่าลดลงตามระยะทางที่ลึกลงไป

ในพลาสมาเช่นกัน ด้วยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = \frac{q}{r} e^{-r/\lambda_D} \quad (42)$$

จากสมการจะพบว่าที่ระยะทางเท่ากับ  $\lambda_D$  ลึกเข้าไปในพลาสมา พลาสมาจะมี ศักย์ไฟฟ้าลดลงเหลือเพียง  $1/e$  เท่าของศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของพลาสมา (plasma-electrode potential)

สรุปได้ว่า พลาสมาชิตเป็นสนามไฟฟ้าเฉพาะที่ (localized electric field) ซึ่งจะ แยกส่วนที่เป็นพลาสมาออกจากผนังของวัสดุซึ่งจะทำหน้าที่กักกันอนุภาคที่มีสภาพความคล่องตัว (mobility) มากกว่าไว้ภายในพลาสมาแต่จะเร่งหรือคูดอนุภาคที่มีสภาพความคล่องตัวน้อยกว่า ออกจากพลาสมา ซึ่งความหนาของพลาสมาชิตจะขึ้นอยู่กับความยาวเดอบาย

ในบริเวณที่เป็นพลาสมาชิตเป็นบริเวณที่สมมุติว่าไม่มีการชนกันของอนุภาคและ ไม่มีการแตกตัว ในขณะที่บริเวณที่เป็นเนื้อพลาสมา (bulk plasma) เป็นบริเวณที่สมมุติว่าเป็น กลางทางไฟฟ้างั้นการอธิบายพฤติกรรมของบริเวณทั้งสองจึงจำเป็นต้องอธิบายด้วยรูปแบบที่ ต่างกัน โดยที่จะต้องเชื่อมโยงรอยต่อระหว่างเนื้อพลาสมา กับส่วนที่เป็นชิตได้อย่างต่อเนื่อง แต่จาก กฎของ Child-Langmuir กำหนดว่าที่รอยต่อของชิตกับพลาสมา มีศักย์ไฟฟ้าของพลาสมา (Plasma potential) สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของประจุเป็นศูนย์ ซึ่งเมื่อนำค่าดังกล่าวมาพิจารณาทำให้ เกิดความไม่ต่อเนื่องที่รอยต่อของพลาสมา กับขอบของชิตขึ้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว Godyak และ Sternberg ได้สมมุติว่า ระหว่างรอยต่อมีค่าสนามไฟฟ้าเป็น  $kT_e/e\lambda_{DS}$  แทนที่จะเป็นศูนย์ เมื่อ  $\lambda_{DS}$  คือ ความยาวเดอบายที่ขอบชิต

## 2.2 เคมีของพลาสมา (Plasma Chemistry)

### 2.2.1 คำจำกัดความ (Definitions of terms)

ความน่าจะเป็นของอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคชนิดต่าง ๆ ในสถานะแก๊สนั้น หา ได้จากผลรวมภาคตัดขวางยังผล (effective total cross section) ของอันตรกิริยา ขณะที่อันตรกิริยา ในพลาสมามีหลากหลายรูปแบบ เช่น การชนแบบยืดหยุ่น การไอออนไนซ์ การถ่ายเทพะจุ การ แยกตัว และอื่นๆ อันตรกิริยาแต่ละแบบถูกกำหนดโดยภาคตัดขวางของแต่ละอันตรกิริยา

สำหรับอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคชนิด a และอนุภาคชนิด b ระยะปลอดการชน ระหว่างอันตรกิริยา  $\lambda_{ab}$  ถูกนิยามว่าเป็นระยะทางเฉลี่ยที่อนุภาคชนิด a สามารถเคลื่อนที่ผ่านกลุ่ม ของอนุภาคชนิด b ก่อนที่จะชนกับอนุภาคชนิด b

$$\lambda_{ab} = \frac{1}{\sigma_{ab} n_b} \quad (43)$$

เมื่อ  $\sigma_{ab}$  = ภาคตัดขวางของปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$n_b$  = ความหนาแน่นของอนุภาค b

อนุภาคชนิด a เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_a$  ผ่านกลุ่มของอนุภาคชนิด b ที่อยู่นิ่ง จะเกิดการชนกับกลุ่มของอนุภาค b ด้วยความถี่ของการชน  $\nu$

$$\nu_{ab} = v_a / \lambda_{ab} = v_a \sigma_{ab} n_b \quad (44)$$

ถ้าความหนาแน่นของอนุภาค a คือ  $n_a$  อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็น

$$R = n_a \nu_{ab} = n_a n_b \sigma_{ab} v_a \quad (\text{cm}^3 \cdot \text{sec})^{-1} \quad (45)$$

ส่วนของโมเลกุลที่ไม่เสถียรเชิงเคมีและเป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งแยกออกมาจากโมเลกุล เรียกว่า อนุมูลอิสระ (Free radical) อะตอมเดี่ยวที่เป็นกลางทางไฟฟ้าและส่วนของโมเลกุลที่มีหลายอะตอมซึ่งไม่เสถียรและไวต่อการทำปฏิกิริยาก็สามารถพิจารณาว่าเป็นอนุมูลอิสระด้วยเช่นกัน ในหัวข้อต่อไปนี้จะแทนอะตอมด้วย A, B แทนโมเลกุลด้วย M และแทนอนุมูลอิสระด้วย R ในขณะที่แทนอนุภาคที่ถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานสูงกว่าระดับพื้นด้วย \* ตัวอย่างเช่น  $A^*$  ส่วนไอออนบวกของอะตอม โมเลกุลหรืออนุมูลอิสระจะถูกแทนด้วย  $A^+$ ,  $M^+$ , และ  $R^+$  ตามลำดับ

### 2.2.2 ปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction)

ปฏิกิริยาเคมีในพลาสมาสามารถแบ่งออกได้เป็น ปฏิกิริยาระหว่างสารเนื้อเดียวกัน (homogeneous reaction) และ ปฏิกิริยาระหว่างสารต่างชนิดกัน (heterogeneous reaction) สำหรับปฏิกิริยาระหว่างสารเนื้อเดียวกัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคในสถานะแก๊สที่เป็นผลเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนและอนุภาคต่างๆ หรือการชนระหว่างอนุภาคหนัก ส่วนปฏิกิริยาระหว่างสารต่างชนิดกัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคในพลาสมากับผิวหน้าของของแข็งที่ถูกสอดเข้าไปหรือสัมผัสกับพลาสมา ในส่วนของปฏิกิริยาระหว่างสารเนื้อเดียวกันนั้น จะกล่าวแยกเป็น 2 ส่วนคือปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับอนุภาคหนัก (reaction of electron with heavy species) และปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคหนักด้วยกันเอง (reaction between heavy species)

#### 2.2.2.1 ปฏิกิริยาระหว่างสารเนื้อเดียวกัน (Homogeneous reaction)

##### 1) ปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคหนัก

##### (Reaction of Electron with Heavy Species)

อิเล็กตรอนในพลาสมาได้รับพลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกและถ่ายทอดให้แก่สเพื่อกระตุ้นให้เกิดพลาสมา พลังงานส่วนใหญ่ที่ถ่ายทอดจากอิเล็กตรอนไปยัง

อนุภาคหนัก (heavy species) เกิดจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้หลากหลาย โดยมีปฏิกิริยาหลักๆ ได้ดังนี้

- **Excitation** การชนของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงพอกับอนุภาคหนักจะทำให้อะตอมและโมเลกุลอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น ซึ่งอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้



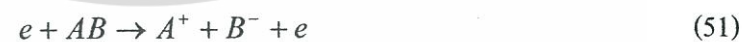
การกระตุ้นอนุภาคหนักสามารถทำให้เกิด การสั่น การหมุน หรือการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน เมื่ออะตอมถูกกระตุ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนได้เพียงอย่างเดียว ในขณะที่เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นจะทำให้เกิดการสั่นและการหมุนได้ด้วย

อนุภาคที่ถูกกระตุ้นให้มีการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน จะกลับสู่สถานะพื้นโดยการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีนี้รวมถึงแสงในช่วงอินฟราเรดถึงช่วงที่ตามองเห็นของพลาสมาด้วย

- **Dissociative Attachment** เมื่อแก๊สที่ใช้เป็นแก๊สชนิดที่มีความไวต่อการจับอิเล็กตรอน (electronegative gases) อิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ( $< 1$  eV) สามารถถูกจับรวมตัวเข้ากับโมเลกุลของแก๊ส ถ้าการจับอิเล็กตรอนนั้นเป็นผลให้เกิดแรงผลักรังสีไฟฟ้า โมเลกุลจะเกิดการแยกตัวอย่างรวดเร็ว ( $\sim 10^{-13}$  s) ซึ่งจะก่อให้เกิดไอออนลบ ดังสมการ



นอกจากนี้ไอออนลบสามารถเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยา *dissociative ionization* ดังสมการ



ปฏิกิริยาที่อธิบายด้วยสมการ (49) เรียกว่า *dissociative capture* ขณะที่ปฏิกิริยาที่อธิบายด้วยสมการ (50) และ (51) เรียกว่าปฏิกิริยา *ion-pair formation*

ค่าขีดเริ่มของปฏิกิริยาที่อธิบายด้วยสมการที่ (51) โดยปกติจะสูงกว่าเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่อธิบายด้วยสมการที่ (49) เพราะว่าการเกิดไอออนบวกต้องใช้พลังงานมากกว่า

ภาคตัดขวางของปฏิกิริยา *dissociative attachment* ขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและสมบัติของโมเลกุลที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างค่าของภาคตัดขวางสำหรับการเกิดไอออนลบ

โดย *dissociative capture* พร้อมด้วยพลังงานของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชน  $W_{max}$  แสดงอยู่ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าภาคตัดขวางสำหรับการเกิด Dissociative Capture

Molecule	Ion	$W_{max}$ (eV)	$\sigma (W_{max})$ ( $10^{-17} \text{ cm}^2$ )
HI	I <sup>-</sup>	~0.00	2300
I <sub>2</sub>	I <sup>-</sup>	0.03	300
HBr	Br <sup>-</sup>	0.28	27
HCl	Cl <sup>-</sup>	0.81	1.99
O <sub>2</sub>	O <sup>-</sup>	6.70	0.143
CO <sub>2</sub>	O <sup>-</sup>	8.03	0.0482
H <sub>2</sub> O	H <sup>-</sup>	8.60	0.13
H <sub>2</sub>	H <sup>-</sup>	3.75	0.000016

- **Dissociation** การชนแบบไม่ยึดหยุ่นของอิเล็กตรอนกับ โมเลกุลสามารถทำให้เกิดการแยกออกจากกัน โดยไม่ทำให้เกิด ไอออน ดังสมการ



การแยกตัวออกจากกันของ โมเลกุลจะเกิดขึ้นได้เมื่อ โมเลกุลอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นในรูปของการสั่นหรือการเปลี่ยนระดับพลังงานเท่านั้น โมเลกุลที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจนถึงจุดขีดเริ่มค่าหนึ่งอยู่แล้วสามารถถูกกระตุ้นต่อไปจะเกิดการแยกตัวโดยการชนกับอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ

ปฏิกิริยา *dissociative attachment*, *dissociative ionization* และ *dissociation* เป็นแหล่งกำเนิดสำคัญของการเกิด อะตอม อนุภาคมูลอิสระและ ไอออนลบในพลาสมาเย็น (cold plasma)

- **Ionization** การแตกตัวเป็น ไอออนของแก๊สในพลาสมา ส่วนใหญ่เกิดจากการชนด้วยอิเล็กตรอน ทำให้เกิด ไอออนบวกหรือ ไอออนลบของอะตอมหรือ โมเลกุล ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค่าพลังงานที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization potential) ของอะตอมและโมเลกุลบางตัวแสดงในตารางที่ 2.2 จากตารางจะเห็นว่า ค่าพลังงานที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนมีค่าอยู่ระหว่าง 8 ถึง 25 eV ซึ่งสูงกว่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในพลาสมาเย็น ดังนั้นจึงมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่ปลายด้านพลังงานสูงของการแจกแจงพลังงานที่สามารถทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ บางครั้งพบว่า การแตกตัวเป็นไอออนเกิดจากการชนสองชั้นตอนด้วยอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ การชนครั้งแรกทำให้โมเลกุลอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น ตามด้วยการชนครั้งที่สองจึงทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน

ตารางที่ 2.2 พลังงานไอออนไนเซชันของอะตอมและโมเลกุล

Neutral	Ion	Ionization Potential
Ar	Ar <sup>+</sup>	15.8
Ar <sup>+</sup>	Ar <sup>++</sup>	27.6
F	F <sup>+</sup>	17.4
H	H <sup>+</sup>	13.6
He	He <sup>+</sup>	24.6
N	N <sup>+</sup>	14.5
O	O <sup>+</sup>	13.6
Si	Si <sup>+</sup>	8.1
CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	13.0
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	11.4
H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	15.4
HF	HF <sup>+</sup>	17.0
H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	12.6
N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	15.6
O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	12.2
SiH <sub>4</sub>	SiH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	12.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นไอออนที่อธิบายด้วยสมการ (58) เรียกว่า *resonance capture* หรือ *nondissociative capture* และสามารถทำให้เกิดการแยกตัวออกจากกันตามมา ดังในสมการ (58) ตัวอย่างเช่น



- **Recombination** อนุภาคที่มีประจุ (ไอออนและอิเล็กตรอน) จะสูญเสียไปจากพลาสมาเนื่องจากการรวมตัวกันกับอนุภาคที่มีประจุตรงข้ามกัน การรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนและไอออนของอะตอม จะเกิดการเปล่งแสงขึ้น เรียกว่า *radiation recombination* ดังสมการ



เมื่อ  $h =$  ค่าคงที่ของพลังค์  
 $\nu =$  ความถี่ของรังสีที่แผ่ออกมา

ในทางกลับกัน พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับไอออนของโมเลกุล สามารถทำให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลได้โดยปฏิกิริยา *Dissociative recombination* ดังสมการ



อัตราการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับไอออนของอะตอม ดังสมการ (59) จะมีค่าต่ำมากอยู่ในช่วง  $10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$  ในขณะที่อัตราการรวมตัวกับไอออนของโมเลกุล ดังสมการ (60) และ (61) จะมีค่ามากกว่า อยู่ในช่วง  $10^{-9} - 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$

## 2) ปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคหนักด้วยตนเอง

### (Reaction between Heavy Species)

ปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคหนักเกิดขึ้นขณะที่เกิดการชนระหว่างโมเลกุล อะตอม อนุภาคมูลอิสระ และไอออน ปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคหนักสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ปฏิกิริยาระหว่างไอออนกับโมเลกุล (ion-molecule reaction) และปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคมูลอิสระกับโมเลกุล (radical-molecule reaction) ปฏิกิริยาระหว่างไอออนกับโมเลกุลจะต้องเกี่ยวข้องกับไอออนอย่างน้อย 1 ตัว ส่วนปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคมูลอิสระกับโมเลกุลเป็นปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างอนุภาคที่เป็นกลางเท่านั้น

พลาสมาเย็นที่ความดัน 1 Torr จะมีความหนาแน่นของโมเลกุลที่เป็นกลาง

ประมาณ  $3.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ในพลาสมาอิเล็กตรอนจะมีพลังงานเฉลี่ย 1 eV อยู่ในแก๊สที่มีพลังงานของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแยกตัวของโมเลกุลประมาณ 5 eV และพลังงานของการแตกตัวเป็นไอออนประมาณ 10 eV ความหนาแน่นของโมเลกุลที่ถูกแยกออกจากกัน (อนุมูลอิสระ) มีประมาณ  $10^{14}$  cm<sup>-3</sup> ความหนาแน่นของไอออนและอิเล็กตรอนในพลาสมาเย็นโดยทั่วไปมีประมาณ  $10^9$ - $10^{11}$  cm<sup>-3</sup> ดังนั้นในพลาสมาเย็นความหนาแน่นทั้งสาม มีความสัมพันธ์กัน ดังสมการ (62)

$$n_i \ll n_r \ll n_n \quad (62)$$

เมื่อ  $n_r$  คือ ความหนาแน่นของอนุมูลอิสระ  
 $n_i$  คือ ความหนาแน่นของของไอออน  
 $n_n$  คือ ความหนาแน่นของโมเลกุลที่เป็นกลาง

เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคทั้ง 3 กล่าวข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่า สำหรับเคมีของพลาสมา ปฏิกริยาระหว่างอนุมูลอิสระกับโมเลกุลจะมีความสำคัญมากกว่าปฏิกริยาระหว่างไอออนกับโมเลกุล ซึ่งเป็นจริงในหลาย ๆ กระบวนการ แต่อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยาระหว่างไอออนกับโมเลกุลก็มีความสำคัญกับเคมีของพลาสมาและสามารถเสริมอัตราของปฏิกริยาเคมีโดยรวมที่เกิดขึ้นในพลาสมา ชนิดของปฏิกริยาเคมีของพลาสมาที่สำคัญมีดังนี้

### 2.1) ปฏิกริยาระหว่างไอออนกับโมเลกุล

#### (Ion-Molecule Reaction)

- **Recombination of ions** การชนกันของไอออน 2 ตัว จะเกิดการรวมตัวกันเป็นโมเลกุลที่มีพลังงานที่สถานะพื้นและจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของการแผ่รังสี ดังสมการ (63)



การชนระหว่างไอออน 2 ตัว สามารถทำให้ไอออนทั้งสองกลายเป็นกลางได้ด้วย อะตอมที่เป็นกลางทั้งสองนี้จะอยู่ที่สถานะถูกกระตุ้น ดังสมการ (64)



เนื่องจากโดยทั่วไปพลังงานรวมของไอออนที่เข้าชนกันจะมากกว่าพลังงานรวมของอะตอมที่เป็นกลางที่เกิดขึ้น พลังงานส่วนเกินจะถูกปล่อยออกมาในรูปของการแผ่รังสี

การรวมตัวของไอออนกับไอออนด้วยกัน สามารถเกิดขึ้นได้โดยการชนกันของ 3 อนุภาค ดังสมการ (65)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาระหว่าง 2 อนุภาคที่อธิบายในสมการ (64) มีความสำคัญมากสำหรับ พลาสมาที่ความดันต่ำมาก ในขณะที่การชนกันของ 3 อนุภาคจะเกิดขึ้นที่ความดันสูงกว่า 0.1 mTorr

- **Charge transfer** การถ่ายเทประจุไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นระหว่างการชนกันระหว่าง ไอออนกับอนุภาคที่เป็นกลาง การถ่ายเทประจุสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างคู่ที่เหมือนกันตัวอย่างเช่น



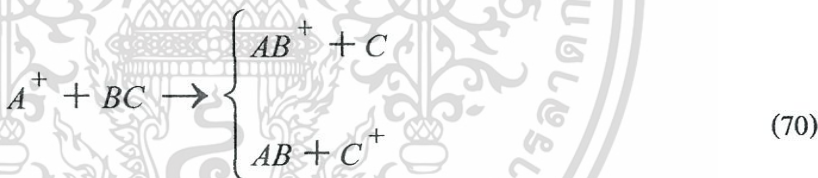
หรือคู่ที่แตกต่างกันเช่น



เมื่อการถ่ายเทประจุเกิดขึ้นพร้อมกับการแยกตัวออกจากกัน ดังสมการ (69) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า *charge transfer with dissociation*



- **Transfer of heavy reactant** ปฏิกิริยาระหว่างไอออนกับโมเลกุลชนิดนี้ เป็นผลให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ขึ้นมา ดังสมการ (70)



ปฏิกิริยานี้บางทีเรียกว่า *Ionization by interchange*

- **Associative detachment** ในการชนระหว่างไอออนลบกับอนุมูลอิสระ ไอออนสามารถรวมตัวกับอนุมูลอิสระหรืออะตอมและกลายเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ทำให้ได้สารประกอบใหม่ซึ่งอธิบายได้ดังสมการ (71)



## 2.2) ปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระกับโมเลกุล

### (Radical-molecule reaction)

ปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระกับโมเลกุลเกิดขึ้นกับอนุภาคที่เป็นกลางเท่านั้น อนุมูลอิสระอาจประกอบด้วยหลายอะตอมหรืออะตอมเดี่ยวหรือเป็นส่วนที่แตกมาจากโมเลกุลที่มี

หลายอะตอมก็ได้ อนุมูลอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรและไวต่อปฏิกิริยาเคมีมาก ปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระกับ โมเลกุลมีดังต่อไปนี้

- **Electron transfer** เป็นปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคที่เป็นกลาง 2 ตัว เมื่ออนุภาคทั้งสองชนกันจะเกิดการถ่ายเทพะจุระหว่างกัน เป็นผลให้เกิด ไอออน 2 ตัว ดังสมการ (72)



ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้จำเป็นต้องมีโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์สูงมาก ๆ 1 โมเลกุล ซึ่งจะพบได้ยากในพลาสมาเย็น

- **Ionization** การชนระหว่างอนุภาคที่เป็นกลางที่มีพลังงานสูง 2 อนุภาค จะทำให้อนุภาคหนึ่งแตกตัวเป็น ไอออน ดังสมการ (73)



- **Penning ionization / dissociation** เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการชนของอนุภาคที่สถานะกึ่งเสถียร ในการชนของอนุภาคที่สถานะกึ่งเสถียร ( $B^*$ ) กับอนุภาคที่เป็นกลาง อนุภาคที่สถานะกึ่งเสถียรจะถ่ายเทพลังงานส่วนเกินไปสู่เป้าหมายที่ชนทำให้เกิดการแตกตัวเป็น ไอออนหรือการแยกตัวออกจากกัน ดังสมการ (74) และ (75)

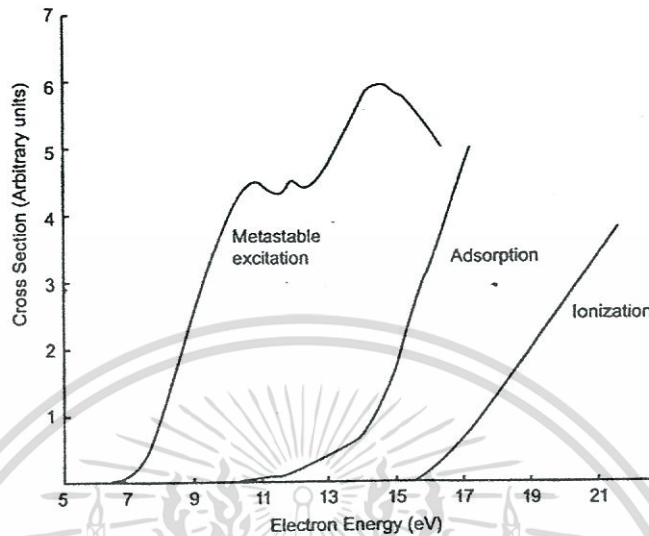


กระบวนการนี้มีความสำคัญเป็นพิเศษในการเกิดพลาสมาของแก๊สผสม เช่น อาร์กอนและฮีเลียม ซึ่งมีสถานะกึ่งเสถียรที่มีช่วงชีวิตยาว (long-lifetime metastable states) นอกจากนี้ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีภาคตัดขวางสูง (large cross section) ทำให้มีความน่าจะเป็นในการเกิดปฏิกิริยานี้สูง

สำหรับปฏิกิริยานี้ พลังงานที่สถานะกึ่งเสถียรของอนุภาคต้องมากกว่าพลังงานในการแตกตัวเป็นไอออนหรือพลังงานในการแยกตัวออกจากกันของอนุภาคอื่นในปฏิกิริยา พลังงานกึ่งเสถียรมีค่าอยู่ในช่วง 0-20 eV (11.5 eV สำหรับ Ar และ 16.6 eV สำหรับ Ne) รูปที่ 2.5 แสดงภาคตัดขวางของอะตอมไนโตรเจน จากรูปจะเห็นว่า เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำ ภาคตัดขวางของการถูกกระตุ้นให้อะตอมไนโตรเจนมีสถานะกึ่งเสถียรมีค่ามากกว่าภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็นไอออน ที่สภาวะนี้ เมื่ออะตอมไนโตรเจนถูกชนด้วยอิเล็กตรอน จะทำให้เกิดอนุภาคที่สถานะกึ่งเสถียรมากกว่าการเกิดไอออน อนุภาคกึ่งเสถียรสามารถถูกชนซ้ำจนมีพลังงานสะสมมากถึงระดับที่สูงกว่าพลังงานการแตกตัวเป็นไอออน จนเกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาโดยการแตกตัวเป็น

ไอออนด้วยกระบวนการ *Penning ionization* กระบวนการ *Penning dissociation* เป็นกระบวนการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เหมือนกัน แต่ให้ผลในรูปของการแยกตัวออกของโมเลกุลเป้าหมาย กลายเป็นอนุมูลอิสระที่เป็นกลางแทนที่จะได้ไอออน



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางกับพลังงานกระตุ้นในสถานะกึ่งเสถียรและพลังงานไอออไนเซชันของไนโตรเจน

ระหว่างการชนของอะตอมที่สถานะกึ่งเสถียรกับโมเลกุล (เช่น  $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $SF_6$ ) อะตอมที่สถานะกึ่งเสถียรสามารถปลดปล่อยพลังงาน โดยการทำให้ตัวมันเองแตกตัวเป็นไอออน ดังเช่นปฏิกิริยาในสมการ (76)



- **Attachment of atom** ปฏิกิริยานี้จะเหมือนกับปฏิกิริยา *associative detachment* ของปฏิกิริยาไอออนกับโมเลกุลที่อธิบายในสมการ (71) แต่เกิดขึ้นกับอนุภาคที่เป็นกลาง ดังสมการ (77)

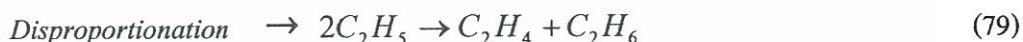


- **Disproportionation** ปฏิกิริยานี้คล้ายกับปฏิกิริยา *transfer of heavy reactant* ของปฏิกิริยาไอออนกับโมเลกุล แต่เกิดขึ้นกับอนุภาคที่เป็นกลาง ดังสมการ (78)



- **Recombination of radical** การชนระหว่างอนุมูลอิสระที่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี สามารถทำให้เกิดการรวมตัวที่นำไปสู่โมเลกุลที่เสถียร โดยหลักการอนุรักษ์ทั้งพลังงานและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเมนต์ ทำให้อนุมูลอิสระของอะตอมเดี่ยวไม่สามารถเกิดการรวมตัวกันได้โดยตรง การรวมตัวของอนุมูลอิสระอะตอมเดี่ยวจะเกิดขึ้นได้โดยการชนของอนุภาคหลายตัว อนุภาคตัวที่ 3 อาจจะเป็นอนุภาคใด ๆ ในพลาสมาหรือพื้นผิวของของแข็งที่สัมผัสกับพลาสมา อนุมูลอิสระที่ประกอบด้วยหลายอะตอมจะมีค่าองศาอิสระ (degree of freedom) สูง การรวมตัวของอนุมูลอิสระ 2 อนุภาค จึงเกิดขึ้นได้โดยมีการปรับพลังงานภายในจนนำไปสู่การอนุรักษ์พลังงานและโมเมนต์ได้ ดังนั้นประสิทธิภาพของการรวมตัวของอนุมูลอิสระที่ประกอบด้วยหลายอะตอม จึงมีค่าเกือบเป็นหนึ่ง โดยทั่วไปปฏิกิริยาการรวมตัวของอนุมูลอิสระแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ



- **Chemiluminescence** อะตอมหรือโมเลกุลในพลาสมาจะถูกกระตุ้นโดยการชนกับอะตอมอื่น การกระตุ้นสามารถเกิดขึ้นขณะที่เกิดปฏิกิริยาเคมี (ตัวอย่างเช่น *disproportionation* หรือ *recombination*) แต่ก็สามารถเกิดโดยไม่ต้องมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้เช่นกัน ความเป็นไปได้ 2 แบบแสดงดังสมการ (81) และ (82)



สมการ (82) อธิบายปฏิกิริยาชนิด Penning โดยทั่วไปอนุมูลอิสระที่สถานะถูกกระตุ้น  $BC^*$  จะกลับสู่สถานะพื้นโดยการแผ่รังสี ดังสมการ (83)



สมการ (81) ถึง (83) เป็นการอธิบายปฏิกิริยา *chemiluminescence* ซึ่งเกิดขึ้นในพลาสมาและเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเรืองแสงของพลาสมา

### 2.2.2.2 ปฏิกิริยาระหว่างสารต่างชนิดกัน (Heterogeneous reaction)

ปฏิกิริยาระหว่างสารต่างชนิดกัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างผิวหน้าของวัสดุที่สัมผัสกับพลาสมาและอนุภาคในพลาสมา อนุภาคต่างๆในพลาสมาแบ่งออกได้เป็น อะตอมเดี่ยว (A, B) โมเลกุลมอนอเมอร์ (monomer molecule) อนุมูลอิสระ (R) หรือพอลิเมอร์ (P) ที่เกิดขึ้นในพลาสมา ชนิดของปฏิกิริยาระหว่างสารต่างชนิดกัน มีดังนี้

- **Adsorption** เมื่อโมเลกุลมอนอเมอร์หรืออนุมูลอิสระจากพลาสมาสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุในพลาสมา อนุภาคเหล่านี้จะถูกดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุ ปฏิกิริยาการดูดซับสามารถอธิบายได้โดยสมการ (84) และ (85)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวห้อย g และ s แสดงสถานะของอนุภาคเป็นสถานะแก๊สและของแข็งตามลำดับ อนุพลอิสรที่เกิิดอันตรกิริยากับพื้นผิวจะก่อตัวเป็นฟิล์มขึ้นบนพื้นผิว โดยมีอนุภาคของอนุพลอิสรนั้นเป็นองค์ประกอบของฟิล์ม

- **Recombination** หรือ compound formation อะตอมหรืออนุพลอิสรจากพลาสมาสามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคที่ถูกดูดซับอยู่กับพื้นผิวอยู่ก่อนแล้ว ทำให้เกิดการรวมตัวกันและก่อเกิดเป็นสารประกอบ ดังนี้สมการ (86) และ (87)



$S - A$  หมายถึงอะตอม  $A$  ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว  $S$

ขณะที่เกิดการรวมตัวกัน พลังงานของอนุภาคในปฏิกิริยาโดยปกติจะถูกปล่อยออกมาในรูปของความร้อนที่พื้นผิว อัตราการรวมตัวที่พื้นผิวขึ้นอยู่กับสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาของพื้นผิว

- **Metastable deexcitation** โมเลกุลที่อยู่ในสถานะกึ่งเสถียร  $M^*$  ในพลาสมาสามารถปลดปล่อยพลังงานและกลับสู่สถานะพื้นได้โดยการชนกับพื้นผิว ดังปฏิกิริยาในสมการ (88)



- **Sputtering** พื้นผิวที่สัมผัสกับพลาสมาจะมีศักย์เป็นลบเสมอเมื่อเทียบกับศักย์ของพลาสมาทำให้ไอออนบวกจากพลาสมาถูกเร่งเข้าสู่พื้นผิว ถ้าไอออน  $A^+$  เข้าชนพื้นผิวด้วยพลังงานที่เพียงพอจะสามารถทำให้อะตอมของพื้นผิวหลุดออกได้ดังสมการ



กระบวนการนี้เรียกว่าการสปัตเตอร์ (Sputtering) อะตอม  $B$  ในสมการ (89) ในกรณีนี้อาจเป็นอะตอมจากผิวหน้าหรืออะตอมที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวก็ได้ อะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ซึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า จะเคลื่อนเข้าสู่พลาสมาด้วยพลังงานจลน์หลายอิเล็กตรอน โวลต์

- **Polymerization** อนุพลอิสรในพลาสมาสามารถทำปฏิกิริยากับอนุพลอิสรที่ถูกดูดซับบนพื้นผิว ก่อให้เกิดพอลิเมอร์ได้ ดังสมการ (90) และ (91)



การเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) หรือการเกิดอนุมูลอิสระ สามารถเกิดขึ้นระหว่างอนุภาค 2 ชนิดที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวดังสมการ

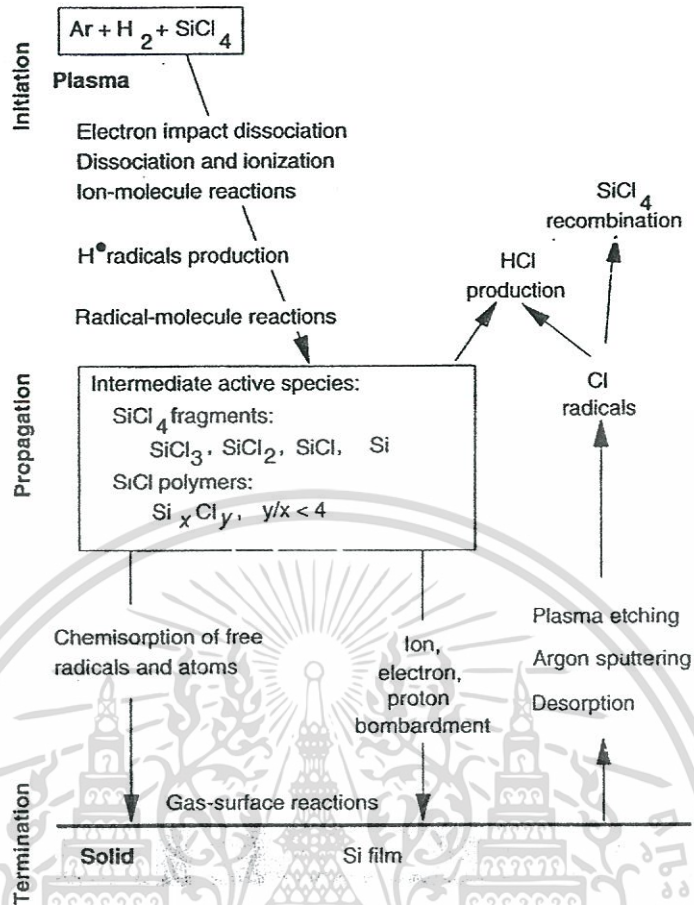


### 2.2.3 ปฏิกิริยาเคมีลูกโซ่ (Chemical Reaction Chain)

กระบวนการทางเคมีในพลาสมาจะมีขั้นตอนหลายขั้นตอนดังนี้ การเริ่มต้น (initiation) การดำเนินปฏิกิริยา (propagation) การสิ้นสุด (termination) และการเริ่มต้นใหม่ (reinitiation)

ในระยะเริ่มต้น (initiation) อะตอมหรืออนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากการชนของอิเล็กตรอนหรือไอออนพลังงานสูงกับ โมเลกุล อนุมูลอิสระจะเกิดจากการแยกตัวออกจาก โมเลกุล ในสถานะแก๊สหรือจาก โมเลกุลที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของฐานรองหรือ โมเลกุลบนฟิล์มที่ปลูกบนพื้นผิว ทั้ง โมเลกุลและอนุมูลอิสระจะถูกดูดซับบนพื้นผิวที่สัมผัสกับพลาสมา

ขั้นตอนการดำเนินปฏิกิริยา (propagation) สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสถานะแก๊สและบนพื้นผิว ทั้งพื้นผิวที่ฟิล์มถูกปลูกขึ้น (deposited film) หรือพื้นผิวที่ถูกกัด (etched surface) ในสถานะแก๊ส การดำเนินปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาระหว่าง อนุมูลอิสระ ไอออนและโมเลกุล ในปฏิกิริยาระหว่างไอออนกับ โมเลกุล (ion-molecule reaction) และปฏิกิริยาระหว่าง อนุมูลอิสระกับ โมเลกุล (radical-molecule reaction) การดำเนินปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว ผ่านทางอันตรกิริยาของอนุมูลอิสระบนพื้นผิวกับอนุภาคในสถานะแก๊สหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับหรืออนุมูลอิสระที่ถูกดูดซับหรือไอออน อย่างใดอย่างหนึ่ง



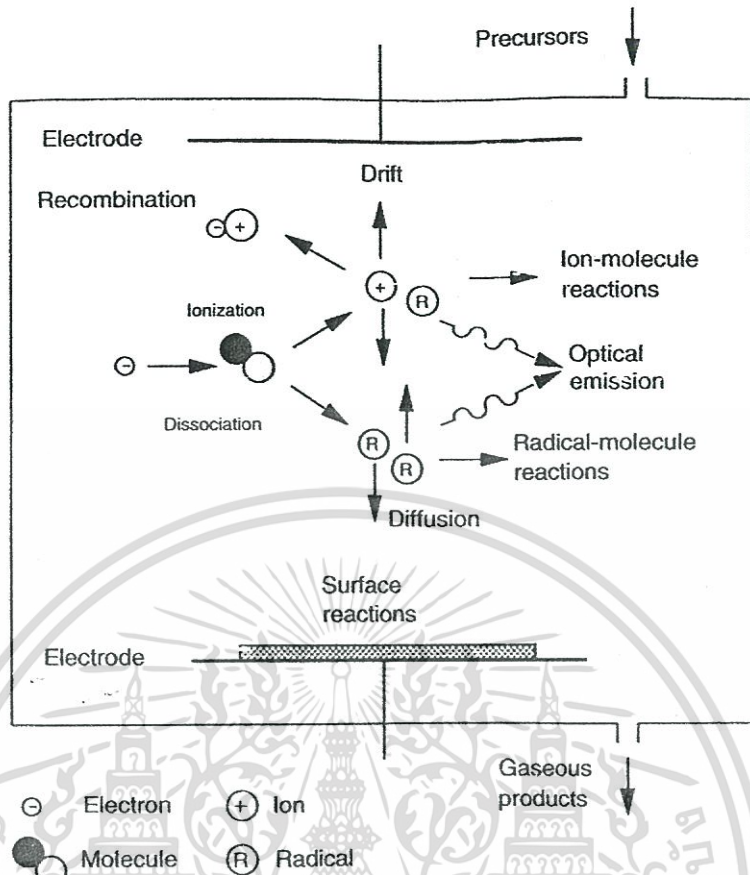
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาถูกโซ่ที่เกิดขึ้นขณะที่มีการปลูกฟิล์มซิลิกอนจาก  $Ar+H_2+SiCl_4$

ในขั้นตอนการสิ้นสุด (termination) ปฏิกิริยาจะเหมือนกับที่อธิบายในขั้นตอนการดำเนินปฏิกิริยา และได้เกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาเคมีขั้นสุดท้ายขึ้น

ขั้นตอนการเริ่มต้นใหม่ (reinitiation) เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคลิเธียมซึ่งเกิดขึ้นจากฟิล์มหรือการแยกตัวของพอลิเมอร์ เมื่อฟิล์มหรือพอลิเมอร์ถูกชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูงหรือการดูดกลืนโฟตอน กลับเข้าสู่ปฏิกิริยาเคมีถูกโซ่ตามลำดับขั้นอีกครั้งหนึ่ง

ความซับซ้อนของปฏิกิริยาเคมีถูกโซ่ของการปลูกฟิล์มซิลิกอนจากพลาสมาของ  $Ar+H_2+SiCl_4$  ในระบบ PECVD แสดงดังรูป 2.6 ขั้นตอนการเริ่มต้น การดำเนินปฏิกิริยา การสิ้นสุด และการเริ่มต้นใหม่ แสดงให้เห็นปฏิกิริยาเคมีชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอน

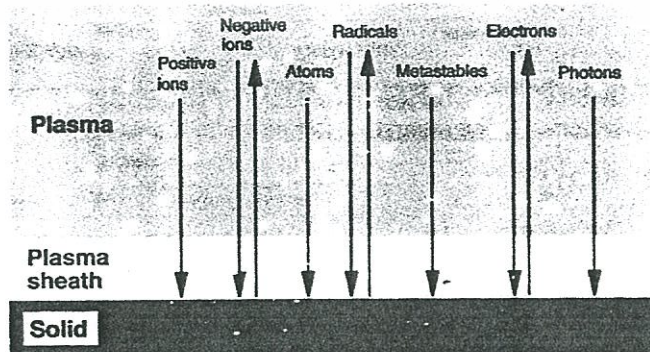
รูปที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยาเคมีชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในพลาสมาเย็น ปฏิกิริยาภายใต้เงื่อนไขของพลาสมา สามารถทำให้เกิดอนุภาคนิวเคลียสต่าง ๆ ในพลาสมาและผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีในพลาสมาที่ไม่สามารถได้รับจากปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยทั่วไปได้



รูปที่ 2.7 ปฏิกริยาต่างๆ ในห้องพลาสมา (Plasma reactor)

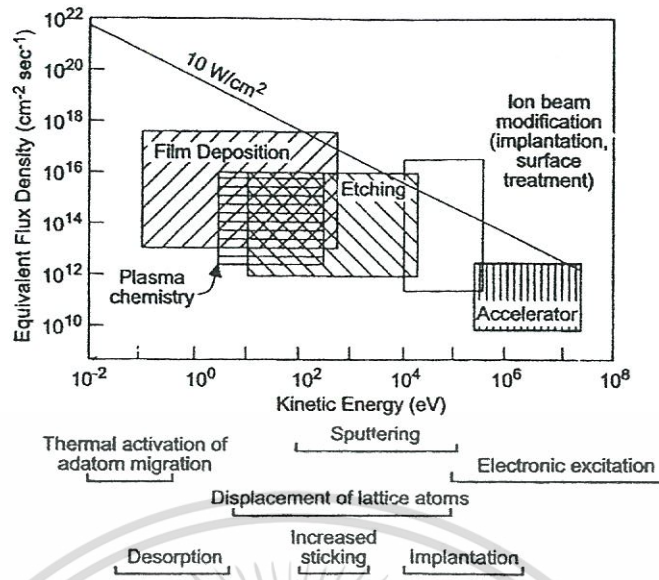
2.2.4 ปฏิกริยาระหว่างพลาสมากับพื้นผิว (Plasma Surface Interactions)

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงปฏิกริยาเคมีระหว่างสารเนื้อเดียวกันของพลาสมา และปฏิกริยาระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งเป็นปฏิกริยาระหว่างพลาสมากับพื้นผิวที่สัมผัสกับพลาสมา ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอันตรกริยาเชิงกายภาพระหว่างอนุภาคพลังงานสูงและโฟตอนในพลาสมากับพื้นผิวที่สัมผัสกับพลาสมา ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว อนุภาคชนิดต่างๆ ในพลาสมาที่สามารถเกิดอันตรกริยากับพื้นผิวที่สัมผัสกับพลาสมา แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 อันตรกริยาระหว่างอนุภาคต่างๆ ในพลาสมากับพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

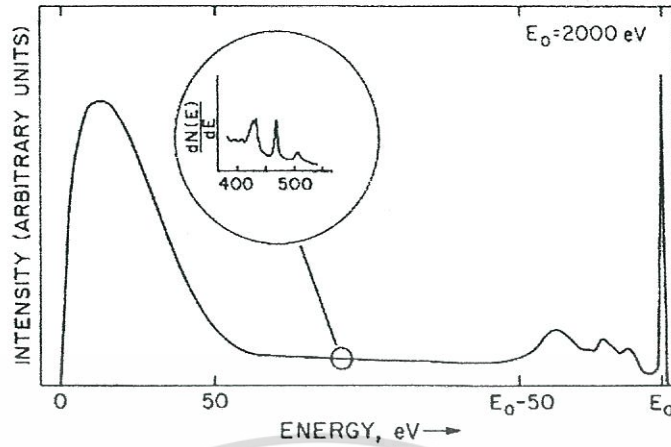


รูปที่ 2.9 อันตรกิริยาของพลาสมา กับพื้นผิวเมื่ออนุภาคมีความหนาแน่น และพลังงานจลน์ต่าง ๆ

กระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนฐานรองหรือการปลูกฟิล์ม จะได้รับผลกระทบจากการเข้าชน (Bombardment) ของอนุภาคพลังงานสูงในพลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 2.9

### 2.3 ออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (Auger Electron Spectroscopy: AES)

ออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่สามารถบอกชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวได้โดยการวัดพลังงานของออเจิเล็กตรอน สเปกตรัมที่วัดได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกับพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน ตัวอย่างสเปกตรัมของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของของแข็งเมื่อถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนพลังงาน 2 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ แสดงดังรูปที่ 2.10 สัญญาณที่เป็นยอดแหลมทางด้านขวามือมาจากอิเล็กตรอนที่กระเจิงแบบยืดหยุ่น (ไม่สูญเสียพลังงาน) ส่วนรูปร่างของสเปกตรัมทางด้านพลังงานต่ำเป็นผลรวมของอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่สูญเสียพลังงานไปบางส่วนเนื่องจากการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิรวมถึงออเจิเล็กตรอนด้วย โดยทั่วไปสเปกตรัมของออเจิเล็กตรอนจะมีขนาดเล็ก ซ่อนอยู่บนแบล็กกราวด์ขนาดใหญ่ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ



**รูปที่ 2.10** สเปกตรัมของอิเล็กตรอน ที่หลุดออกจากพื้นผิวของของแข็ง  
เมื่อถูกยิงด้วยอิเล็กตรอนพลังงาน 2 keV

โดยทั่วไปสัญญาณออเจีอิเล็กตรอนจะเล็กมากเมื่อเทียบกับแบล็กกราวด์ แต่เนื่องจากสัญญาณของแบล็กกราวด์ซึ่งเป็นสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นเทคนิคที่นิยมใช้เพื่อให้สามารถสังเกตสัญญาณออเจีอิเล็กตรอน ได้ง่ายขึ้น คือการหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ จะได้ฟังก์ชัน  $dN(E)/dE$  ซึ่งจะทำให้เพิ่มส่วนของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งได้แก่ สัญญาณออเจีอิเล็กตรอนได้ชัดเจนขึ้น ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.10

ปัจจุบันออเจีอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของพื้นผิวฟิล์มบางและรอยต่อมากที่สุด เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความไวต่อการวิเคราะห์พื้นผิวสูง (Surface sensitive) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโอเจสเปกโทรสโกปีจะได้ข้อมูลที่ความลึกระหว่าง 0.5 ถึง 15 nm สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ทุกชนิดยกเว้นเพียงไฮโดรเจนและฮีเลียมเท่านั้น มีความไว (sensitivity) ระดับ 100 ppm (0.01%)

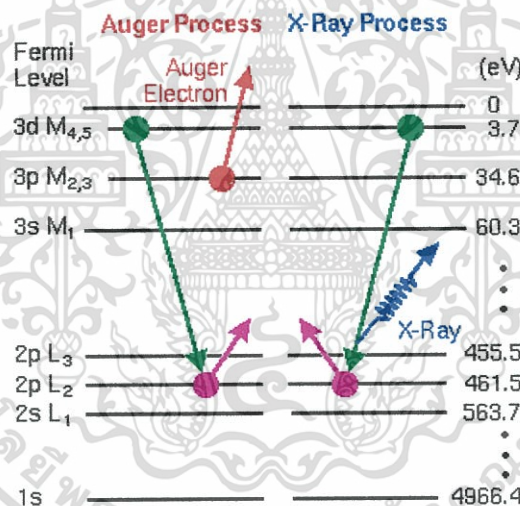
## 2.4 กระบวนการเกิดออเจีอิเล็กตรอน

กระบวนการพื้นฐานโดยทั่วไป เริ่มจากการกระตุ้นอะตอมด้วยแสงหรือลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเพียงพอที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) อิเล็กตรอนชั้นในจะหลุดออกไปทำให้เกิดเป็นสถานะที่ว่าง อะตอมจะปรับตัวโดยอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานที่สูงกว่า (อิเล็กตรอนวงนอก) เข้ามาแทนสถานะที่ว่างนั้น และทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เป็นไปได้ 2 ประการ คือ (1) เกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีพลังงานอยู่ในย่านรังสีเอ็กซ์ (x-ray fluorescence) ปรากฏการณ์แผ่รังสีเอ็กซ์นี้มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

มากกว่า และ (2) พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในรูปของโฟตอนถูกดูดกลืนโดยอิเล็กตรอนตัวที่สาม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอิเล็กตรอนตัวที่สามจะรับพลังงานนี้แล้วหลุดออกไป เรียกอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกจากอะตอมในครั้งนี้เรียกว่า ออเจิเล็กตรอน โดยปรากฏการณ์ปลดปล่อยออเจิเล็กตรอนมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดกับธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำมากกว่า ( $Z < 15$  จะเกิดกระบวนการปลดปล่อยออเจิเล็กตรอนเกือบทั้งหมด) นอกจากเลขอะตอมแล้ว พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหรือโฟตอนก็มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ปลดปล่อยออเจิเล็กตรอนเช่นกัน โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิหรือโฟตอนที่มีความพลังงานน้อยกว่า 2 keV จะมีโอกาสทำให้เกิดการปลดปล่อยออเจิเล็กตรอนมากกว่า 95%

สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำๆ โอกาสของการเปลี่ยนระดับพลังงาน (transitions) เมื่อถูกยิงด้วยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ จะเกิดขึ้นเริ่มแรกที่อิเล็กตรอนในระดับชั้นเค (K-level) อิเล็กตรอนในระดับชั้นแอล (L-level) จะลงมาแทนสถานะที่ว่างนั้น แล้วอิเล็กตรอนในชั้นแอล อีกตัวหนึ่งจะหลุดออกไป ใช้สัญลักษณ์เป็น KLL สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมสูงๆ จะมีโอกาสเปลี่ยนระดับพลังงานเป็น LMM และ MNN มากกว่า KLL



รูปที่ 2.11 กระบวนการเกิดออเจิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์

กระบวนการเกิดออเจิเล็กตรอนดังแสดงในรูปที่ 2.11 เป็นการเปลี่ยนระดับพลังงานตามเส้นทาง LMM เปรียบเทียบกับการเกิดรังสีเอกซ์ ในสารตัวอย่างที่เป็นไทเทเนียม ซึ่งพลังงานของออเจิเล็กตรอน คือ 423.2 อิเล็กตรอน โวลต์ ( $E_{\text{Auger}} = E_{L_2} - E_{M_4} - E_{M_2}$ ) และพลังงานของรังสีเอกซ์ คือ 457.8 อิเล็กตรอน โวลต์ ( $E_{\text{hv}} = E_{L_2} - E_{M_4}$ )

## 2.5 ผลของลำอิเล็กตรอนต่อพื้นผิว

เมื่อลำอิเล็กตรอนพุ่งชนพื้นผิวของสารตัวอย่าง จะทำให้เกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่นและแบบไม่ยืดหยุ่น การกระเจิงแบบยืดหยุ่นจะเกิดขึ้นเมื่อลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (1 ถึง 30 กิโลเอกซารันเป็นเอกซารันที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น) อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนโวลต์) ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง อิเล็กตรอนเหล่านี้จะสูญเสียพลังงานเพียงเล็กน้อยให้กับอะตอมของสารตัวอย่างที่ตกกระทบ อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะกระเจิงกลับ (back scattering) จากผิวของสารตัวอย่าง

การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นมีกลไกการเกิดหลายแบบ ลักษณะการกระเจิงชนิดนี้อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจนให้กับอะตอมของสารตัวอย่าง ทำให้เกิดอันตรกิริยากับอะตอมของสารตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เช่น

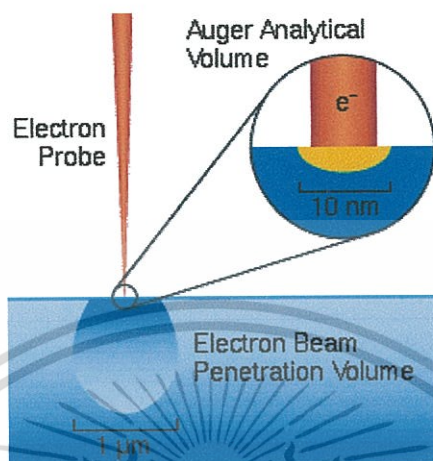
- 1.) การกระตุ้นให้เกิดพลาสมอน (plasmon excitation) มีโอกาสเกิดขึ้นสูง เมื่ออิเล็กตรอนอิสระระหว่างไอออนิกคอร์ ดูดกลืนพลังงานเอาไว้ การกระตุ้นให้เกิดพลาสมอนจะมีการถ่ายโอนพลังงาน ประมาณ 15 อิเล็กตรอนโวลต์สู่สารตัวอย่าง
- 2.) อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของสารตัวอย่างเมื่ออิเล็กตรอนในสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ โอกาสการเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมียังขึ้นอยู่กับ ความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิสามารถเคลื่อนที่ผ่านลงไปใ้เนื้อสารตัวอย่าง ถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิมาก โอกาสในการเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิก็มีน้อยลง
- 3.) รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (continuous x-ray) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคลออมป์ใกล้นิวเคลียส เกิดการเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็ว จึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ก่อนทำอันตรกิริยาค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยา
- 4.) โฟนอน (phonon) เกิดขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นให้เกิดการสั่นของแลตทิซ ซึ่งมีการถ่ายโอนพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิส่วนหนึ่งให้กับสารตัวอย่าง เกิดเป็นความร้อน
- 5.) ออเจิเล็กตรอน และ รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ (Auger electron and characteristic x-ray) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนในอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวก็จะหลุดออกจากวงโคจร ทำให้มีที่ว่างเกิดขึ้น อิเล็กตรอนในชั้นถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่แต่ เนื่องจากอิเล็กตรอนในชั้นนอกมีพลังงานมากกว่าจึงต้องลดระดับพลังงาน โดยการคายพลังงานให้กับอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งซึ่งก็คือออเจิเล็กตรอน หรือคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (รังสีเอกซ์)

## 2.6 ปริมาตรในการวิเคราะห์ออเจิเล็กตรอน (Auger analytical Volumes)

เมื่อลำอิเล็กตรอนตกกระทบพื้นผิวด้วยปริมาตรขนาดเล็ก ประมาณ 1 ลูกบาศก์ไมโครเมตร ( $1 \times 10^{-12}$  cc) ด้วยปริมาตรขนาดนี้จะมีโอกาสเกิดการแผ่รังสีเอ็กซ์มากที่สุด ออเจิเล็กตรอนจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นจากปริมาตรที่เล็กกว่านี้มาก ซึ่งมีค่าประมาณ  $3 \times 10^{-19}$  ซีซี ปริมาตรในการวิเคราะห์สัญญาณจากรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นตามพลังงานของลำอิเล็กตรอน และลดลงตามชนิดของสารตัวอย่าง (เมื่อชนิดของธาตุในสารตัวอย่างมีเลขอะตอมสูงขึ้น)

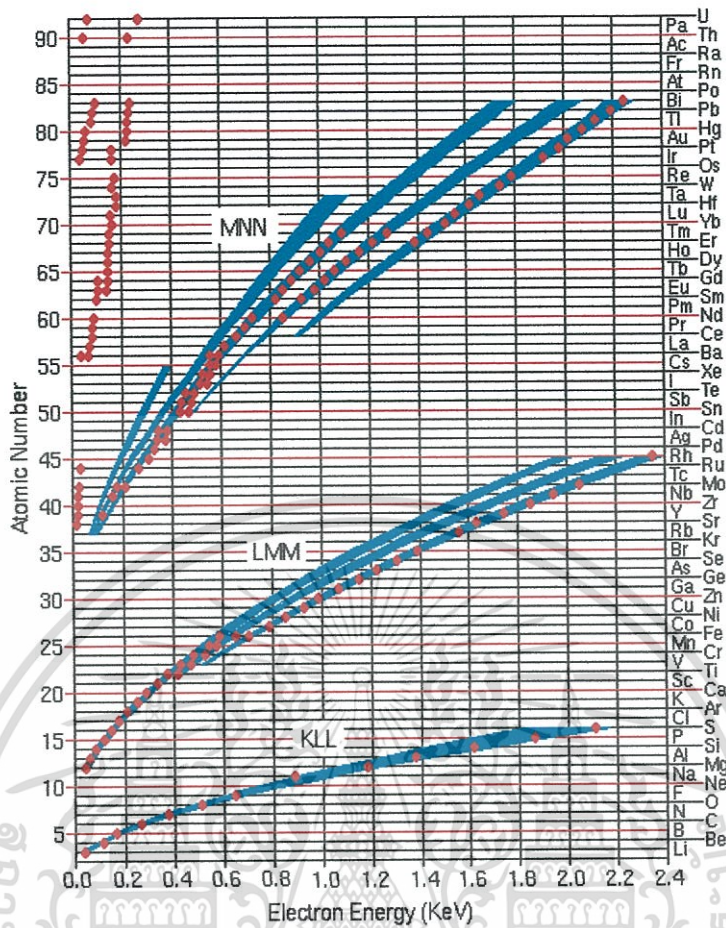


รูปที่ 2.12 ปริมาตรในการวิเคราะห์อ็อกเจ็อิเล็กตรอน

ส่วนปริมาตรในการวิเคราะห์อ็อกเจ็อิเล็กตรอนขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอน ปฐมภูมิ และการหลบหนีเชิงลึก (escape depth) ของอ็อกเจ็อิเล็กตรอน ระยะอิสระก่อนชนเฉลี่ย (mean free paths) ของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอนและ ชนิดของสารตัวอย่าง ระยะก่อนชนเฉลี่ยต่ำที่สุดมีค่าประมาณ 0.5 นาโนเมตร เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานประมาณ 80 อิเล็กตรอน โวลต์

## 2.7 พลังงานของอ็อกเจ็อิเล็กตรอน

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยอ็อกเจ็อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี เป็นการบอกชนิดของธาตุที่สอดคล้องกับตำแหน่งของพีคสัญญาณในสเปกตรัม รูปที่ 2.13 แสดงการเปลี่ยนระดับพลังงานของอ็อกเจ็อิเล็กตรอน พลังงานของอ็อกเจ็อิเล็กตรอนแบ่งเป็นชั้นในตารางอย่างกว้างๆสำหรับธาตุในตารางธาตุเริ่มจาก Li ซึ่งแสดงพลังงานในการเปลี่ยนระดับพลังงานแบบ KLL LMM และ MNN รวมถึงการเปลี่ยนระดับพลังงานในระดับสูง สำหรับธาตุที่อยู่เหนือซีเซียมขึ้นไป จุดสีแดงแสดงพีคที่มีลักษณะเฉพาะและเด่นชัดที่สุด ส่วนแถบสีเขียวแสดงโครงสร้างแบบหยาบๆของพีคสัญญาณที่มีความเข้มน้อย



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนระดับพลังงานหลักของออเจิเล็กตรอน

## 2.8 ประโยชน์ของออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

ออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลเป็นธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของวัสดุ เช่น พิล์มบาง และ ชั้นรอยต่อ ชนิดของสารตัวอย่างเป็นได้ทั้ง วัสดุสารกึ่งตัวนำดิบ (raw semiconductor) และ วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว วัสดุทั้งหลายเหล่านี้ประกอบด้วยชั้นบางๆ ตัวอย่างเช่น ออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี สามารถแยกแยะระหว่าง Si และ SiO<sub>2</sub> บนแผ่นซิลิกอนที่หนา 10 นาโนเมตรได้ เนื่องจากปริมาณในการวิเคราะห์ออเจิเล็กตรอนมีค่าต่ำประมาณ  $3 \times 10^{-19}$  ซีซี จึงสามารถวิเคราะห์เฉพาะส่วนเล็กๆ ของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วหรือสมบูรณ์เป็นบางส่วนได้ และการวิเคราะห์ปริมาณขนาดเล็กระดับไมโครเมตรเพื่อแยกแยะ และบอกชนิดของธาตุบนพื้นผิววัสดุที่เป็นเนื้อเดียว (โฮโมจีเนียส) ก็สามารถวัดได้ เช่น การตรวจสอบพื้นผิวที่แตกร้าวและมีปัญหา ซึ่งอาจจะพบธาตุแปลกปลอมอยู่บนขอบของเกรน (grain boundaries) เป็นต้น

## 2.9 ข้อจำกัดของออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

ถึงแม้ออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี จะมีประโยชน์และใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่ออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีก็มีข้อจำกัด นั่นคือ ไม่สามารถตรวจวัดไฮโดรเจน และ ฮีเลียม ไม่สามารถวิเคราะห์เชิงลึกโดยที่ไม่ทำลายพื้นผิวได้ ต้องการสารตัวอย่างที่มีขนาดเล็กซึ่งต้องเข้าสภาวะที่เป็นสุญญากาศสูงได้ดี สารตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าอาจทำให้เกิดการสะสมประจุ ในระหว่างการยิงด้วยลำออเจิเล็กตรอนทำให้วิเคราะห์ได้ยาก การวิเคราะห์เชิงปริมาณของออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี ขึ้นอยู่กับ เครื่องมือ สถานะทางเคมีและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสารตัวอย่าง

## 2.10 เครื่องมือในการวิเคราะห์ออเจิเล็กตรอน

### 2.10.1 ความเป็นมา

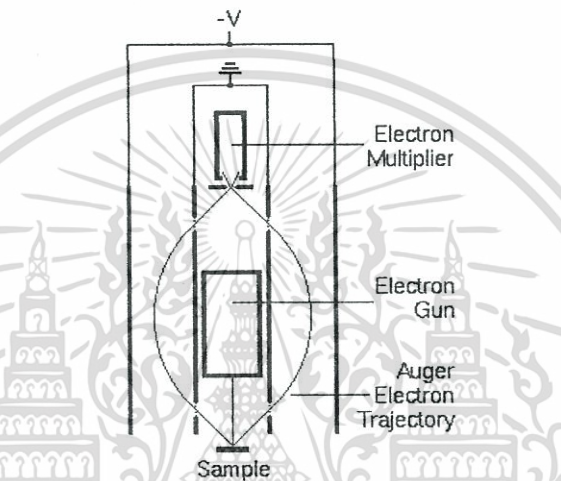
ในปี ค.ศ. 1923 Pierre Auger ได้ค้นพบ กระบวนการโอเจ (auger process) และออเจิเล็กตรอน ขณะที่ฉายรังสีเอกซ์ไปยังสารตัวอย่าง แนวความคิดในการใช้อิเล็กตรอนกระตุ้นสารตัวอย่างให้ได้สัญญาณโอเจเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวเริ่มขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1953 โดย J.J. Lander อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้ยังไม่ดีนักจนกระทั่ง ปี ค.ศ.1967 Larry Harris ได้ทำการทดลองโดยใช้ การดิฟเฟอเรนเชียลเพื่อยกระดับสัญญาณโอเจ การพัฒนานี้มีความสำคัญต่อความไวและเป็นประโยชน์ต่อการทดลองเป็นอย่างมาก ในช่วงแรกๆ เครื่องมือในการดิฟเฟอเรนเชียล จะใช้วงจรรอานาล็อก และถือคอินแอมพลิไฟเออร์ เพื่อให้ได้สเปกตรัมที่ผ่านกระบวนการดิฟเฟอเรนเชียล และมีการพัฒนาเรื่อยมาเพื่อให้ได้ดิฟสเปกตรัมโดยตรง ด้วยอัลกอริทึมของการแสดงผลข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ ทุกวันนี้ออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี เป็นวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ครอบคลุมธาตุทั่วทั้งตารางธาตุยกเว้น ไฮโดรเจนและ ฮีเลียม

### 2.10.2 เครื่องวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน (Electron energy analyzer)

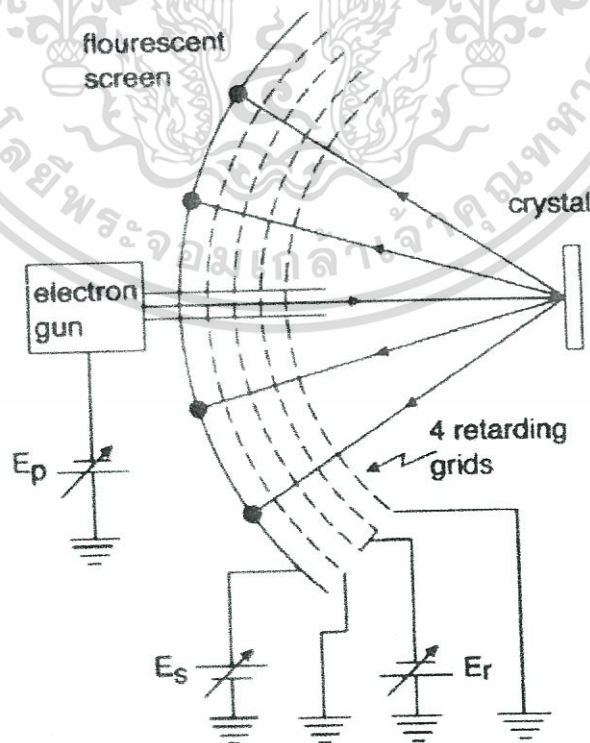
เครื่องวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน จะวัดจำนวนของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเป็นฟังก์ชันของพลังงานอิเล็กตรอน ตัวเครื่องวิเคราะห์พลังงาน จะติดตั้งอยู่ในภาชนะสุญญากาศ ที่เป็นอิสระจากสนามแม่เหล็ก ได้แก่ สนามแม่เหล็กโลก ซึ่งมีผลทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผิดทิศทาง รูปที่ 2.14 เป็นแผนภาพแสดง ภาคตัดขวางของ ไชเลนคิเคิล มิเรอร์ แอนนาไลเซอร์ (Cylindrical mirror analyzer) ในส่วนสีแดง เมื่อลำออเจิเล็กตรอนปฐมภูมิพุ่งชนผิวหน้าสารตัวอย่าง ออเจิเล็กตรอนจะหลุดออกมาในทุกทิศทาง และบางส่วนจะผ่านไปยัง กริด ที่คลุมช่องที่กระบอกตัวใน ศักย์ไฟฟ้าลบที่แปรค่าในกระบอกตัวนอก ทำให้ออเจิเล็กตรอนโค้งกลับเข้าสู่ ช่องที่กระบอกตัวใน หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่านไปที่ช่องทางออกตรงแกนกลางของเครื่องวิเคราะห์พลังงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านเข้ามา จะเป็นสัดส่วนกับศักย์ไฟฟ้าลบ (-V) ที่กระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนอก สำหรับรูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบ retarding-field analyzer (RFA) ซึ่งใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เครื่องมือประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ชั้นของกริดที่ทำหน้าที่คัดกรองพลังงานของอิเล็กตรอน และชั้นของฉากเรืองแสง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัดปริมาณอิเล็กตรอน เมื่อลำอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดวิ่งชนพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์ ก็จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาสู่บริเวณปลอดสนามไฟฟ้า (field-free region) แล้วผ่านเข้าสู่ตัวตรวจวัดโดยผ่านตัวคัดกรองพลังงาน ซึ่งในรูปคือกริด 2 และกริด 3 เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบ RFA สามารถใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของพื้นผิวด้วยเทคนิค low energy electron diffraction (LEED) โดยการเปลี่ยนแปลงวงจรไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.14 เครื่องวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.15 เครื่องวิเคราะห์พลังงานอิเล็กตรอนแบบ retarding-field analyzer analyzer (RFA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับโครงการวิจัยนี้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น และอนุญาตให้เผยแพร่เพื่อประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.3 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนปฐมภูมิ

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่ใช้ในออเจอิเล็กตรอนเปกโทรสโกปี โดยทั่วไป มี 3 ชนิดได้แก่

1) แหล่งกำเนิดทังสเตนแคโทด (tungsten cathode source) ประกอบด้วย เส้นลวดทังสเตน มีรูปร่างโค้งงอ ทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 2700 เคลวิน โดยการให้กระแสไฟฟ้าแก่ลวดต้านทาน (resistive heating) ทังสเตนแคโทดนิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจาก ใช้งานได้ดีและราคาถูก แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากทังสเตนแคโทดมีความหนาแน่นกระแสเพียง 1.75 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

2) แลนทานัมเฮกซะโบไรด์แคโทด (lanthanum hexaboride ( $\text{LaB}_6$ ) cathodes) มีความหนาแน่นกระแสสูง เนื่องจาก  $\text{LaB}_6$  มีเวิร์คฟังก์ชันต่ำ และมีค่าการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (electron emissivity) ที่ดีกว่าทังสเตน ที่อุณหภูมิ 2000 เคลวิน ความหนาแน่นกระแสมีค่าประมาณ 100 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งความหนาแน่นกระแสที่สูงกว่านี้ สามารถทำให้ได้ขนาดของลำอิเล็กตรอนที่เล็กกว่า เป็นข้อได้เปรียบเมื่อนำไปใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก

3) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิชชัน (field emission electron source) ทำจากทังสเตนเช่นกัน แต่ไม่ได้ใช้หลักการแบบเทอร์มิออนิกอิมิชชัน แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิชชัน ใช้หลักการ การทะลุผ่านกำแพงศักย์แบบควอนตัม (quantum tunneling) ให้ความเข้มของอิเล็กตรอนสูงมาก และสามารถให้ลำอิเล็กตรอนที่มีขนาดเล็กถึง 10 นาโนเมตรได้ ใช้ในการวิเคราะห์ไอเจ็ทสารตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบนี้มีราคาสูงและต้องการ การดูแลรักษาเป็นพิเศษ

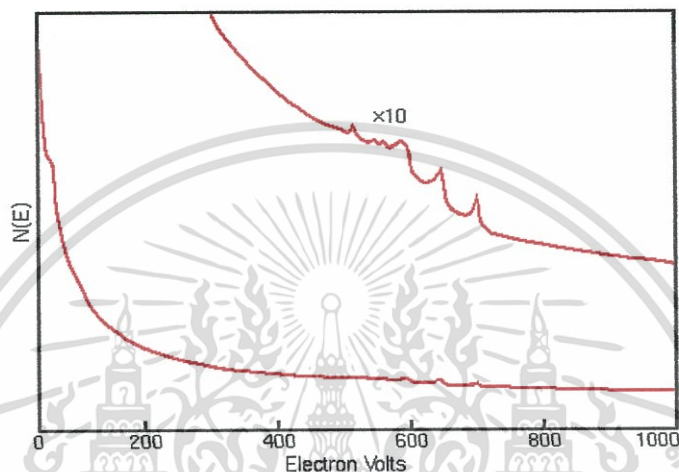
แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นคอลัมน์ของอิเล็กตรอน ปฐมภูมิ คล้ายกับอิเล็กตรอนไมโครสโคปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ในคอลัมน์ประกอบด้วย เลนส์ไฟฟ้า (electrostatic lenses) และเลนส์แม่เหล็ก (magnetic lenses) สำหรับโฟกัสลำอิเล็กตรอน รวมทั้งมีควอดรูโพล ดีฟเลคเตอร์ (quadruple deflectors) เพื่อควบคุมทิศทางของลำอิเล็กตรอน ออกทิวโพลเลนส์ (Octopole lenses) เพื่อทำให้ลำอิเล็กตรอนมีความคม

### 2.10.4 ตัวตรวจวัดของออเจอิเล็กตรอน (AES Detectors)

ออเจอิเล็กตรอนเปกโทรสโกปี ใช้อิเล็กตรอนมัลติโฟเออร์ คล้ายกับที่มีใน SIMS อิเล็กตรอนมัลติโฟเออร์ โดยทั่วไปจะทำงาน ในโหมดการนับพัลส์ ซึ่งนับอิเล็กตรอนทั้งหมดที่มาถึงตัวตรวจวัด

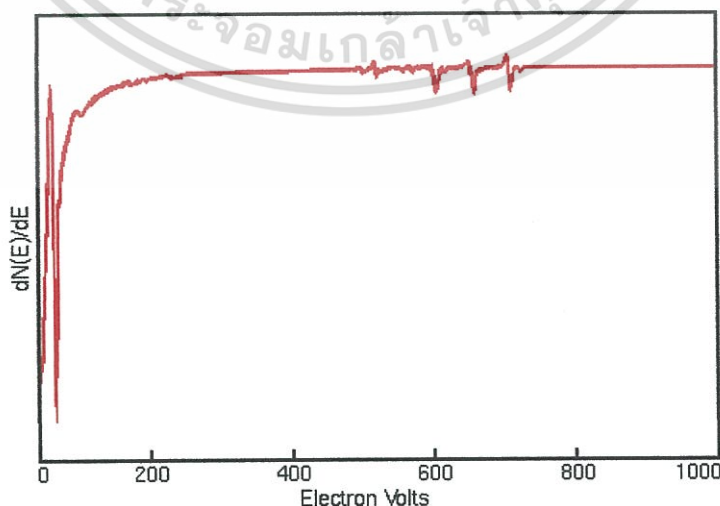
## 2.11 อัลกอริทึมการแสดงผลข้อมูลของออเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี

การแสดงผลสเปกตรัมของโอเจในแบบคิฟเฟอร์เรเนียนเซียล ช่วยเพิ่มความชัดเจนของสัญญาณโอเจ และลดความเข้มของแบล็กกราวด์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสัญญาณแบล็กกราวด์เหล่านี้เป็นสัญญาณส่วนมากที่เข้ามาพร้อมกับสัญญาณของออเจอิเล็กทรอนิกส์ในทุกระดับของโอเจสเปกตรัม สัญญาณรบกวนนี้ได้แก่ สัญญาณจากอิเล็กทรอนิกส์ทุกขุมิ สัญญาณจากอิเล็กทรอนิกส์กระเจิงกลับ และจากออเจอิเล็กทรอนิกส์ที่สูญเสียพลังงานเมื่อหลุดออกมาจากภายใต้พื้นผิวของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.16 สัญญาณของออเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี พล็อตเป็นฟังก์ชันของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด กับพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์

รูปที่ 2.16 แสดงสเปกตรัมของออเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี (จากสารตัวอย่างที่เป็นเหล็ก) พล็อตเป็นฟังก์ชันของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด กับพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ ในรูปจะเห็นฟิสิกของสัญญาณโอเจไม่ชัดเจน ถึงแม้จะมีการขยายสเกลในแนวตั้งแล้วก็ตาม



รูปที่ 2.17 สเปกตรัมของออเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี พล็อตเป็นฟังก์ชันของ  $(dN(E)/dE)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารกับพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพล็อตสเปกตรัมในแบบคิฟเฟอร์เรเนียนของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ ( $dN(E)/dE$ ) ทำให้เห็นรายละเอียดของสเปกตรัมได้ชัดเจนแสดงดังรูปที่ 2.17

## 2.12 แรงตึงผิว (Surface tension)

แรงตึงผิวเป็นปรากฏการณ์ที่พื้นผิวของของเหลว (liquid) มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับแผ่นยางยืด (elastic sheet) ตัวอย่างที่เกิดจากปรากฏการณ์ของแรงตึงผิวก็เช่น แมลงที่สามารถเดินบนผิวน้ำได้ ซึ่งแรงตึงผิวนี้อาจเกิดขึ้นเมื่อผิวหน้าของของเหลวเชื่อมต่อกับผิวหน้าของแข็ง (solid) แต่หากเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากผิวหน้าของของเหลวกับของเหลว จะเรียกว่า แรงระหว่างผิว (interfacial tension) ในทางวิทยาศาสตร์แรงตึงผิวทั้งสองชนิดจะอยู่ในหน่วยของ มิลลินิวตันต่อเมตร (mN/m) หรือ ไดน์ต่อเซนติเมตร (dyne/cm) โดย  $1 \text{ mN/m} = 1 \text{ dyne/cm} = 0.001 \text{ N/m}$  และมีบ่อยครั้งแรงตึงผิวที่ถูกแทนด้วย  $\sigma$  หรือ  $\gamma$

แรงตึงผิวเป็นผลมาจากความไม่สมดุลของแรงระหว่างโมเลกุลในของเหลว ที่บริเวณพื้นผิวของของเหลว โมเลกุลของของเหลวจะมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอยู่ ซึ่งแรงนี้หากมีค่าสูงแสดงว่าโมเลกุลยึดเกาะกันแน่น แต่หากมีค่าน้อยนั้นแสดงว่าแรงที่โมเลกุลใช้ในการยึดเกาะกันมีค่าต่ำ ซึ่งสาเหตุที่แมลงบางชนิดสามารถเดินบนผิวน้ำได้ก็เพราะน้ำหนักของแมลงมีค่าต่ำกว่าแรงตึงผิวของผิวน้ำ แมลงจึงไม่จมลงไปใต้น้ำ

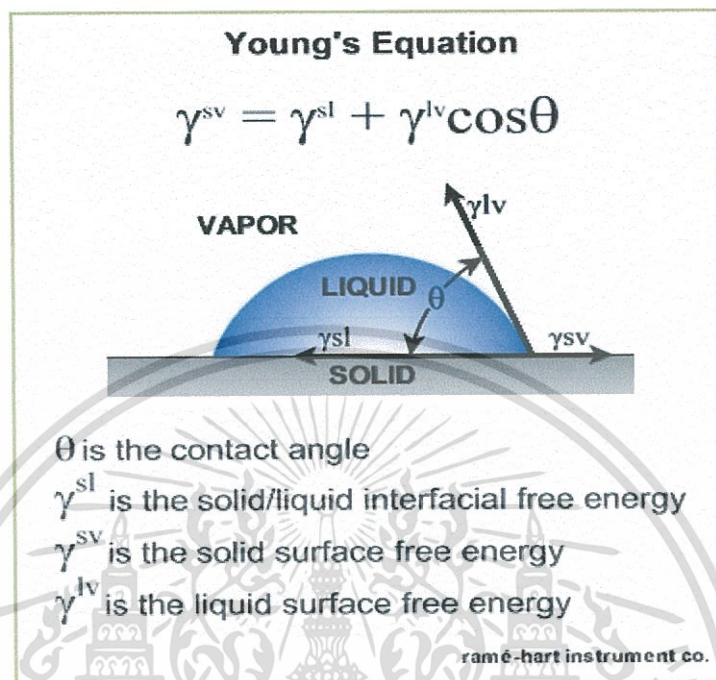
## 2.13 มุมสัมผัส (Contact Angle)

มุมสัมผัสคือมุมที่เกิดจากการที่ของเหลว ไปก่อตัวขึ้นเป็นหยดอยู่บนพื้นผิวของของแข็ง การวัดมุมสัมผัสสามารถทำได้โดยการหยดของเหลวลงไปบนพื้นผิวของของแข็ง ของเหลวจะก่อตัวขึ้นเป็นหยดอยู่บนพื้นผิวและเกิดมุมขึ้น จะเกิดมุมขึ้นที่ระหว่างรอยต่อของพื้นผิวของของแข็งกับของเหลว (solid/liquid) และรอยต่อของของเหลวกับอากาศ (liquid/vapor) เรียกมุมที่เกิดขึ้นว่ามุมสัมผัส โดยทั่วไปทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวัดมุมที่เกิดขึ้นและใช้ในการศึกษารายละเอียดของหยดของเหลวคือสมการของยัง (Young's equation) ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งสมการของยังจะใช้อธิบายเกี่ยวกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสสารชนิดเดียวกัน (cohesion force) และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสสารต่างชนิดกัน (adhesion force) โดยจะอธิบายออกมาในรูปของพลังงานพื้นผิว (surface energy)

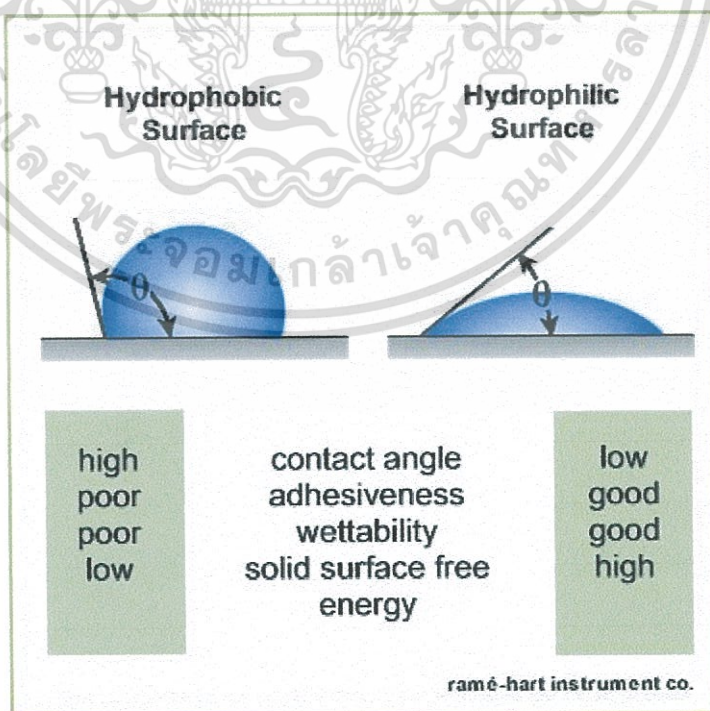
พื้นผิวที่หยดของเหลวที่เกิดขึ้นมีมุมสัมผัสมากกว่า  $90^\circ$  จะเรียกว่าพื้นผิวไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งมีคุณสมบัติในการเปียกที่ไม่ดี แรงยึดเหนี่ยวต่ำ (poor adhesiveness) และมีพลังงานพื้นผิวต่ำ ในขณะที่หากมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่า  $90^\circ$  จะเรียกว่าพื้นผิวชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งมีคุณสมบัติในการเปียกที่ดีกว่า มีแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่า (better adhesiveness) และมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานพื้นผิวสูง ดังรูปที่ 2.19 นอกจากนี้มุมสัมผัสยังสามารถใช้ในการอธิบายความขรุขระและความสะอาดของพื้นผิวได้ในระดับหนึ่งอีกด้วย



รูปที่ 2.18 มุมสัมผัส  $\theta$  ที่เกิดขึ้น และสมการของยังที่ใช้ในการอธิบายแรงดึงผิว



รูปที่ 2.19 คุณสมบัติของหยดน้ำกับมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.14 ประเภทของการวัดมุมสัมผัส

### 1) การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำไม่เคลื่อนที่

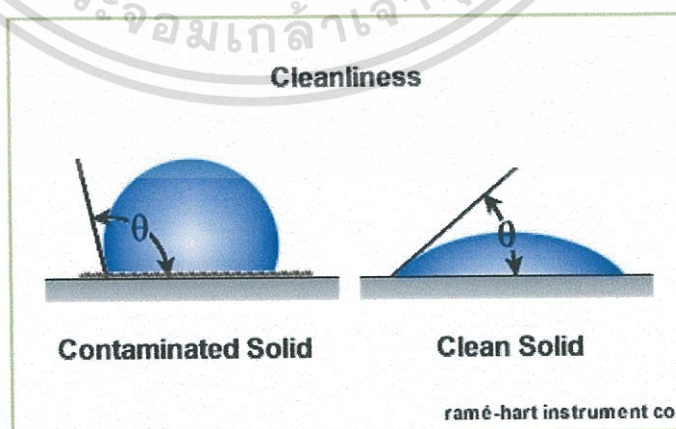
#### (Static Contact Angle)

การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำที่ไม่เคลื่อนที่ เป็นประเภทของการวัดที่นิยมนำมาใช้เป็นส่วนใหญ่ ใช้สำหรับการอ่านค่าในส่วนของหยดน้ำหรือของเหลวที่ไม่มีการเคลื่อนที่ด้วยระยะเวลาเพียงสั้นๆ ก็คือทำการวัดมุมสัมผัสทันทีเมื่อหยดหยดน้ำลงไปบนพื้นผิวของแข็ง ข้อมูลที่ได้จากการวัดมุมสัมผัสชนิดนี้จะถูกนำไปใช้ในการหาคุณสมบัติต่างๆของพื้นผิว

มุมสัมผัสมักถูกใช้ในการประเมินความสะอาดของพื้นผิว โดยสารปนเปื้อนประเภทอินทรีย์ที่ปกคลุมผิวอยู่ขัดขวางพื้นผิวไม่ให้เปียก ทำให้เกิดมุมสัมผัสที่มีค่าสูงบนพื้นผิวประเภทชอบน้ำ เมื่อพื้นผิวถูกทำความสะอาดหรือสารปนเปื้อนถูกทำให้หลุดออกไปจากพื้นผิว มุมสัมผัสที่วัดได้ก็จะมีค่าลดลงและมีพลังงานพื้นผิวเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.20

ในกระบวนการผลิตวัสดุสารกึ่งตัวนำ นิยมใช้การวัดมุมสัมผัสในการวัดคุณสมบัติการเปียก (wettability) ของแผ่นซิลิกอน เพื่อเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต และกระบวนการปรับสภาพพื้นผิว เช่น กระบวนการเตรียมผิว หรือกระบวนการทำความสะอาดพื้นผิว เป็นต้น

ความขรุขระ (rough) ของพื้นผิวก็เป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดขนาดของมุมสัมผัสเช่นกัน โดยพื้นผิวที่เรียบ (roughness surface) จะให้ค่าของมุมสัมผัสที่ต่ำกว่าพื้นผิวแบบเดียวกันแต่มีความขรุขระของพื้นผิวสูงกว่า



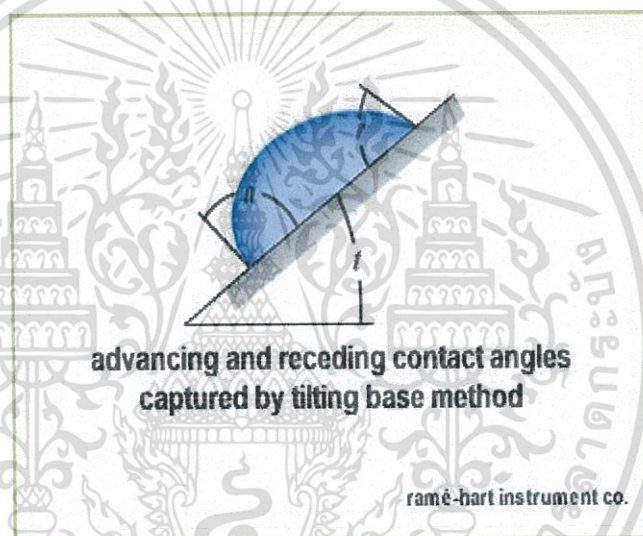
รูปที่ 2.20 วิธีการวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวที่มีการปนเปื้อนและการทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) การวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็งที่มีลักษณะเอียง

### (Tilting Plate Method)

การวัดมุมสัมผัสแบบนี้จะวัดจากทั้งทางซ้ายและขวาของหยดของเหลว ในขณะที่มุมของพื้นผิวของของแข็งจะมีความเอียงอยู่ในช่วง  $0^{\circ}$  ถึง  $90^{\circ}$  ดังรูปที่ 2.21 เนื่องจากพื้นผิวที่เอียง ผลจากแรงโน้มถ่วงทำให้ของเหลวค่อยๆ ไหลลงไปตามความลาดชันของพื้นผิว จึงทำให้มุมสัมผัสทางด้านซ้ายของหยดน้ำค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่มุมสัมผัสทางฝั่งขวาจะค่อยๆ มีค่าลดลง การวัดมุมสัมผัสด้วยวิธีนี้จึงเป็นการวัดที่ต้องใช้ความชำนาญสูงขึ้น ความแตกต่างจากการวัดแบบแรกคือ การวัดชนิดนี้ถูกใช้ในการประเมินความสามารถในการรักษามุมสัมผัสของของเหลว (contact angle hysteresis)



รูปที่ 2.21 วิธีการวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็งที่มีลักษณะเอียง

## 2.15 สเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง (Optical Emission Spectroscopy, OES)

พลาสมาไม่ว่าจะกำเนิดขึ้นโดยวิธีใดจะมีการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นบางช่วงที่เป็นค่าเฉพาะตัวเสมอ พลาสมาที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาดสารกึ่งตัวนำแบบแห้ง (dry processing of semiconductors) ก็มีการเปล่งแสงเช่นกัน ในกรณีนี้การเปล่งแสงสามารถเกิดขึ้นได้จากทั้งอะตอมที่ใช้ในการทำความสะอาด (etchants) และอะตอมที่เกิดจากผลของการทำสะอาด (etch products) ดังนั้นการตรวจวัดสมบัติของพลาสมาที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาดรวมทั้งอัตราการผลิตปฏิกิริยาพลาสมาเคมีระหว่างพลาสมาและพื้นผิวของสารตัวอย่างสามารถทำได้โดยการศึกษาสเปกตรัมของพลาสมา เทคนิคนี้เรียกว่า สเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสมบัติของพลาสมาโดยการวัดสเปกตรัมของพลาสมาเป็นเทคนิคที่ไม่มีการรบกวนพลาสมา (nonintrusive) และสามารถวัดได้ตลอดเวลาของกระบวนการทำความสะอาด (in situ) โดยการวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะตัวของพลาสมาทำให้สามารถตรวจวัดความหนาแน่นของอนุภาคที่จำเป็นต่อกระบวนการในพลาสมา ซึ่งในงานวิจัยนี้คืออะตอมของออกซิเจนที่อยู่ในรูปของอนุมูลอิสระ ในทำนองเดียวกัน โดยการวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะตัวของอนุภาคที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาพลาสมาเคมีจะทำให้ได้ข้อมูลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและจุดสิ้นสุดของปฏิกิริยาด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้คือ โมเลกุลของคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่อยู่ในรูปของอนุมูลอิสระ (ข้อมูลที่ได้จากการวัดการเปล่งแสงนี้เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพของพลาสมา ข้อมูลเชิงปริมาณจะหาได้โดยการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนของข้อมูลเหล่านี้)

เทคนิคการวัดสเปกตรัมของการเปล่งแสงทำงานโดยอาศัยหลักการเปล่งแสงของอะตอมหรือโมเลกุลเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนระดับพลังงานไปสู่สถานะถูกกระตุ้นเมื่อได้รับพลังงานซึ่งมีได้หลายวิธี แต่ในพลาสมาแล้วส่วนใหญ่อิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุลได้รับพลังงานจากการถูกชนด้วยอิเล็กตรอนอิสระ กระบวนการนี้เรียกว่าการปั๊ม (pumping process) จากนั้นอิเล็กตรอนจะตกกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่าโดยปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัว ดังไดอะแกรมในรูปที่ 2.22 ความเข้มแสง  $I_{21}$  ปลดปล่อยออกมาแปรผันโดยตรงกับจำนวนอะตอมที่ถูกกระตุ้น  $N_2$  โดย

$$I_{21} = (\eta\Omega/4\pi)A_{21}N_2A_d h\nu \quad (94)$$

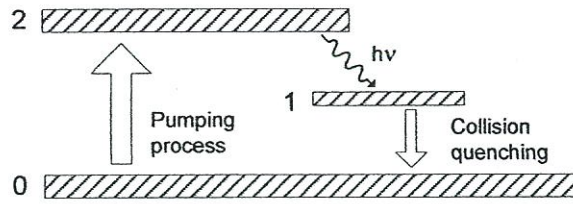
เมื่อ  $\eta$  คือ ประสิทธิภาพของระบบวัด

$A_d$  คือ พื้นที่ของตัวตรวจวัดแสง

$A_{21}$  คือ ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากสถานะ 2 ไปยังสถานะ 1

$\Omega$  คือ มุมตันที่รองรับช่องรับแสง

สำหรับพลาสมาของออกซิเจนเส้นสเปกตรัมที่สว่างที่สุดปรากฏที่ความยาวคลื่น 777.2 nm เกิดจากการเปลี่ยนสถานะจากระดับพลังงาน 3p ไปยังระดับพลังงาน 3s เมื่ออนุมูลอิสระของออกซิเจนนี้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับคาร์บอนบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะเกิดเป็นสารประกอบคาร์บอนมอนนอกไซด์ในรูปของอนุมูลอิสระและจะเปล่งแสงออกมาที่ความยาวคลื่น 519.8 nm ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนระบบพลังงาน  $B^1\Sigma \rightarrow A^1\Pi$



รูปที่ 2.22 กระบวนการเปล่งแสงของอะตอม



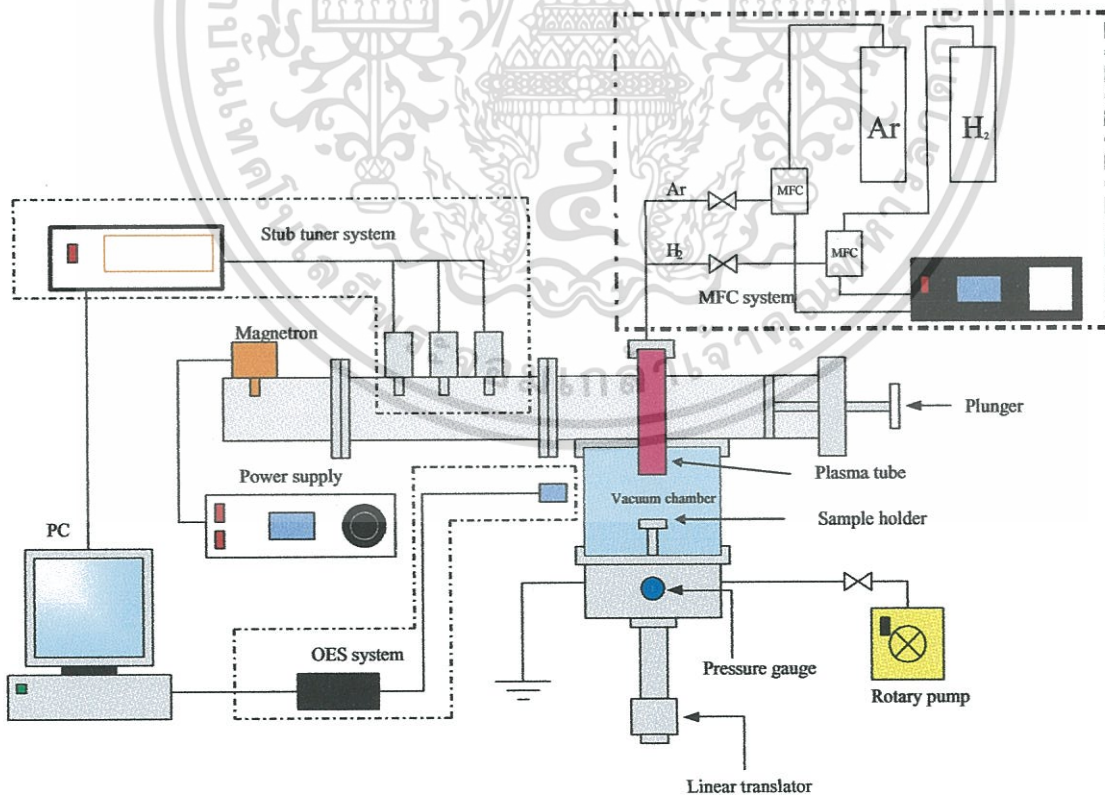
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การดำเนินงานโครงการวิจัยในการพัฒนากระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นการศึกษาโดยการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ของพลาสมา สัดส่วนของแก๊ส ความดัน กำลังของคลื่นไมโครเวฟและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำความสะอาด สำหรับความสะอาดของพื้นผิวแผ่นซิลิกอนทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาด วิเคราะห์ได้จากการใช้เทคนิคการวัดมุมสัมผัส ควบคู่ไปกับเทคนิคออลเจ็ทอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของกระบวนการทำความสะอาดที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งรายละเอียดของระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการวิเคราะห์ความสะอาดโดยการวัดมุมสัมผัสกับเทคนิคออลเจ็ทอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี จะได้กล่าวถึงโดยละเอียดต่อไป

### 3.1 ระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3.1 ระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

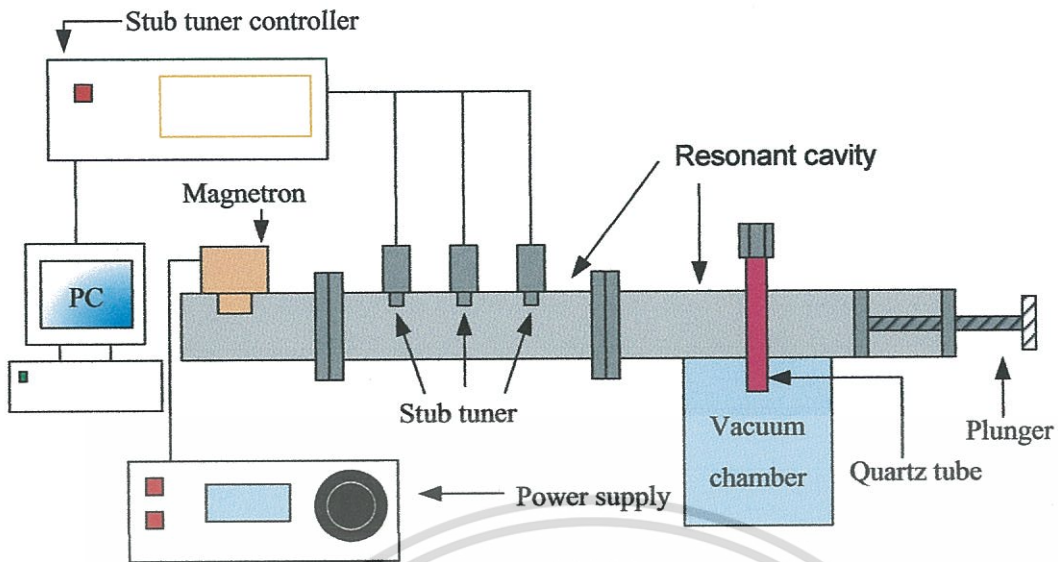
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แสดงระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ ระบบกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ ระบบควบคุมการจ่ายแก๊ส ระบบสุญญากาศ และระบบตรวจวัดสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง ซึ่งจะกล่าวถึงแต่ละส่วนโดยละเอียดดังนี้

### 3.1.1 ระบบกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

สำหรับงานวิจัยนี้ เลือกใช้แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยระบบประกอบไปด้วยแมกนีตรอนทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 GHz ที่สามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังงานได้สูงสุด 800 W ติดตั้งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของท่อนำคลื่น โดยจะส่งคลื่นไมโครเวฟเข้าสู่ท่อนำคลื่นปลายปิดทำหน้าที่เป็นโพรงกำทอน ซึ่งด้านหนึ่งมีปลั๊นเจอร์ (plunger) ที่สามารถปรับเลื่อนเพื่อเปลี่ยนขนาดความยาวของโพรงกำทอนได้ โดยที่คลื่นไมโครเวฟจะเกิดการกำทอนในโหมด  $TE_{107}$  สำหรับท่อนำคลื่นที่ใช้เป็นท่อนำคลื่นไมโครเวฟชนิด WR 340 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดขนาด  $86.0 \times 43.0$  mm นอกจากนี้ยังมีชุดสตัปปรับจูน (stub tuner system) ที่ประกอบด้วยสตัปปรับจูน 3 ตัว ติดตั้งอยู่ตรงกลางระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟกับท่อแก้วควอตซ์ ซึ่งสามารถปรับจูนการส่งผ่านกำลังของคลื่นไมโครเวฟไปยังโพลด์ที่เป็นแก๊สภายในท่อแก้วควอตซ์ ได้โดยการปรับเลื่อนตำแหน่งของตัวสตัปปรับจูนทั้งสามผ่านทางเครื่องคอมพิวเตอร์ สำหรับบริเวณที่เกิดพลาสมาจะอยู่ภายในท่อแก้วควอตซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ยาว 140 mm ติดตั้งโดยการสอดผ่านโพรงกำทอน ณ ตำแหน่งที่ได้รับพลังงานสูงสุดจากคลื่นไมโครเวฟ

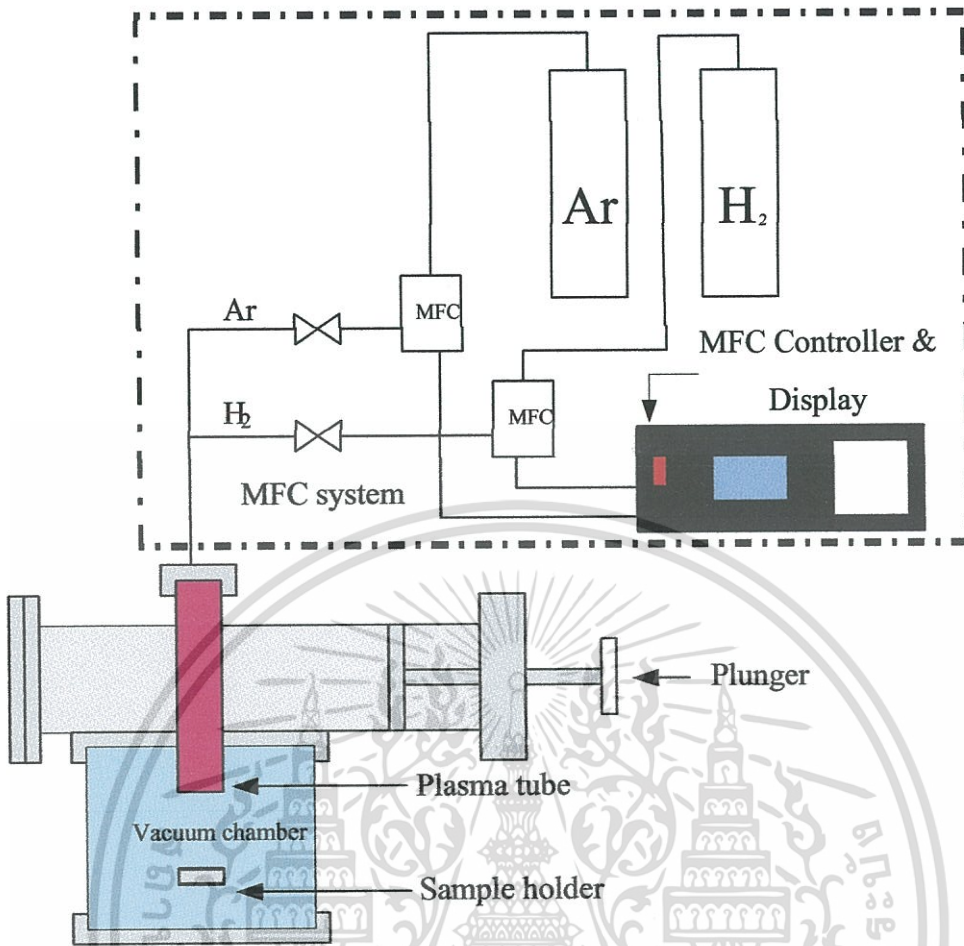
สมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้ กำลังของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งควบคุมผ่านแหล่งจ่ายไฟของแมกนีตรอน การปรับอิมพีแดนซ์ให้เหมาะสมด้วยสตัปปรับจูน การปรับระยะปลั๊นเจอร์ และปริมาณของแก๊สที่อยู่ภายในท่อแก้วควอตซ์ ซึ่งกำหนดจากอัตราการไหลและค่าความดันภายในห้องสุญญากาศ



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบกำเนิดพลาสมา ประกอบไปด้วย แมกนีตรอน สดับปรับจูน หลอดแก้วควอตซ์ และพลังเกอร์

### 3.1.2 ระบบควบคุมการจ่ายแก๊ส

ระบบจ่ายแก๊สแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งแก๊สเข้าสู่ระบบด้วยการไหลผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Mass Flow Controller: MFC) และวาล์ว เข้าสู่ปลายด้านหนึ่งของท่อแก้วควอตซ์ซึ่งเป็นห้องบริเวณที่เกิดการดีสชาร์จ ปริมาณแก๊สภายในท่อจะถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหล เพื่อช่วยให้การควบคุมปริมาณแก๊สให้คงที่ทำได้ง่ายมากขึ้น ส่วนอีกปลายด้านหนึ่งของท่อแก้วควอตซ์ซึ่งเป็นปลายเปิดจะต่อเข้ากับห้องสุญญากาศ สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้แก๊สสองชนิดคือแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจน เพื่อกำเนิดพลาสมาสำหรับใช้ในการทำความสะอาดแผ่นซีลิกอน



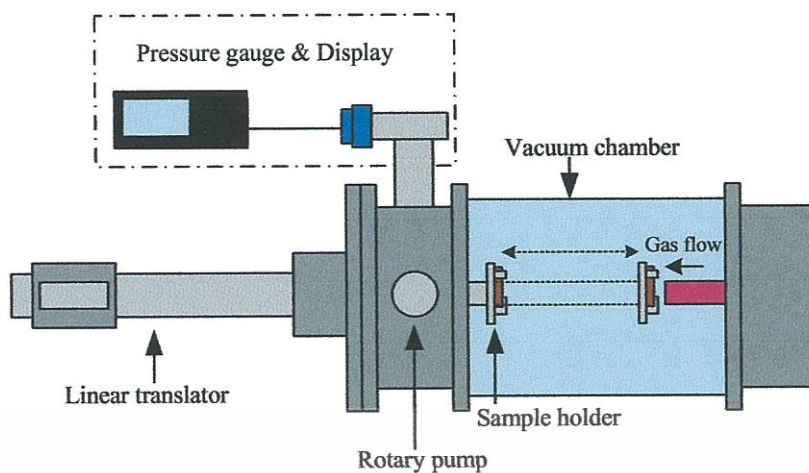
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงระบบจ่ายแก๊ส

### 3.1.3 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศมีความจำเป็นสำหรับการสร้างระบบทำความสะอาดด้วยพลาสมา เนื่องจาก แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น ไม่สามารถกระทำได้ที่สภาวะความดันบรรยากาศปกติทั่วไป จึงต้องสร้างระบบหรือสภาวะที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เพื่อใช้สำหรับการทำความสะอาด ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจน โดยความดันของแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการกำเนิดพลาสมาชนิดนี้ มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 10.0 Torr ดังนั้นการออกแบบระบบสุญญากาศจึงจำเป็นต้องพิจารณาด้วยว่า สามารถรักษาความดันของระบบสุญญากาศให้อยู่ในระดับที่ต้องการหรือเหมาะสมสอดคล้องกับความต้องการหรือไม่ โดยทั่วไประบบสุญญากาศจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ

- 1) ปัมสุญญากาศซึ่งทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากระบบ โดยระหว่างห้องสุญญากาศกับปั๊มจะถูกกั้นด้วยบอลควาล์ว ซึ่งบอลควาล์วสามารถควบคุมความกว้างของช่องกั้นระหว่างห้องสุญญากาศกับปั๊มได้ ส่งผลให้สามารถควบคุมความเร็วของปั๊มสุญญากาศได้
- 2) ห้องสุญญากาศซึ่งเป็นภาชนะปิดป้องกันอากาศจากภายนอกรั่วไหลเข้าสู่ระบบ
- 3) เกจวัดระดับความดันสุญญากาศ

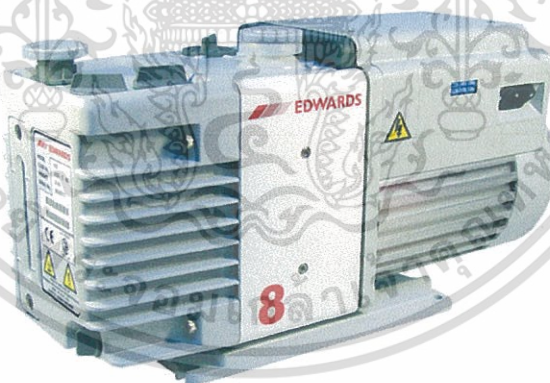
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ระบบสุญญากาศ

### 3.1.3.1 ปัมสุญญากาศ

ปั๊มโรตารีที่ใช้ในโครงการวิจัยเป็นของบริษัท EDWARDS รุ่น RV8 จากสเปคความดันสุดท้าย (ultimate pressure) ที่สามารถทำได้คือ  $1.5 \times 10^{-3}$  Torr และมีความเร็วในการปั๊มเป็น  $8.5-10 \text{ m}^3/\text{hr}$ . ซึ่งเพียงพอที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ โดยโรตารีปั๊มที่ใช้ในโครงการวิจัยมีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ปั๊มโรตารีที่ใช้ในโครงการวิจัย

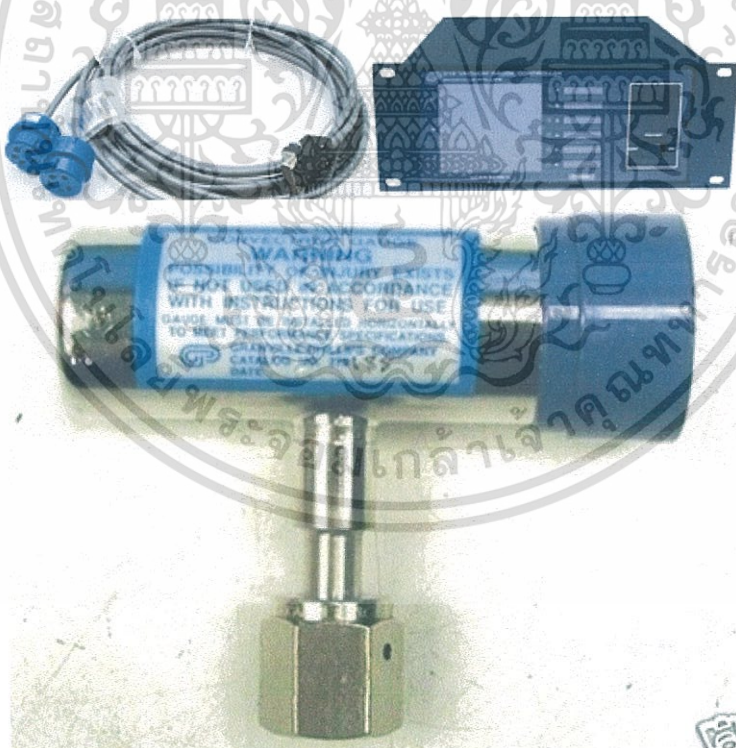
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3.2 ห้องสุญญากาศ

ห้องสุญญากาศที่ใช้จะเป็นห้องที่ทำมาจากแก้วไฟเร็กซ์ มีลักษณะเป็นทรงกระบอกปลายเปิดสองด้าน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ความยาว 90 mm ปลายทั้งสองด้านจะถูกยึดติดติดตั้งเข้ากับฐานรอง จากนั้นปลายด้านหนึ่งจะถูกนำไปติดตั้งอยู่กับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะถูกติดเข้ากับปั๊มสุญญากาศ และชุดขับเคลื่อนเชิงเส้น โดยชุดขับเคลื่อนเชิงเส้นถูกปรับให้สามารถเลื่อนแผ่นซิลิกอนเข้าหาและออกจากปลายหลอดแก้วควอตซ์ได้ โดยสามารถเลื่อนแผ่นซิลิกอนเข้าไปได้จนถึงปลายหลอดแก้วควอตซ์ที่ยื่นเข้ามาในห้อง และสามารถเลื่อนออกมาให้ห่างจากปลายหลอดแก้วควอตซ์ที่ยื่นเข้ามาในห้องได้มากที่สุด 108 mm.

### 3.1.3.3 เกจวัดระดับความดันสุญญากาศ

ชุดเกจวัดความดันที่ใช้เป็นของบริษัท Granville-Phillips โดยสามารถวัดความดันได้ในช่วง  $10^{-4}$  Torr ถึง 999 Torr ซึ่งประกอบด้วยเกจวัดความดัน สายสัญญาณ และหน้าจอแสดงผล เกจวัดความดันจะต่อเข้ากับห้องสุญญากาศผ่านทางพอร์ต NW25 ที่ทางด้านบนของห้อง และแสดงผลผ่านทางหน้าจอแสดงผล รูปที่ 3.6 แสดงชุดเกจวัดความดันที่ใช้ในโครงการวิจัย



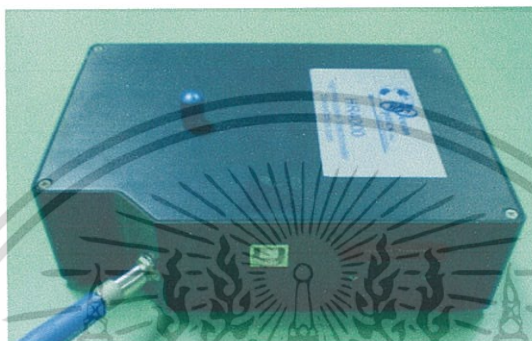
รูปที่ 3.6 ชุดเกจวัดความดันที่ใช้ในโครงการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 ระบบตรวจวัด OES

#### 3.1.4.1 สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) HR4000 Spectrometer

สำหรับงานวิจัยนี้ สเปกโตรมิเตอร์จะทำหน้าที่ในการวัดความยาวคลื่นในช่วง 300-1000 nm ที่แหล่งกำเนิดพลาสมาเปล่งแสงออกมา โดยความเข้มของแสงในแต่ละความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กับจำนวนและชนิดของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในพลาสมา สเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.7 รุ่น HR4000 ของบริษัท Ocean optics



รูปที่ 3.7 สเปกโตรมิเตอร์รุ่น HR4000

#### 3.1.4.2 ไฟเบอร์ออฟติกและเลนส์รวมแสง (Optical Fiber and Collimating Lens)

แสงที่เกิดจากการเปล่งของพลาสมาจะถูกนำเข้าสู่สเปกโตรมิเตอร์ได้โดย ไฟเบอร์ออฟติกและเลนส์รวมแสง ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.8 ไฟเบอร์ออฟติกและเลนส์รวมแสงจะถูกยึดเข้ากับสเปกโตรมิเตอร์ดังในรูปที่ 3.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.8 ไฟเบอร์ออฟติกและเลนส์รวมแสง ภายใต้งานวิจัยนี้ หากท่านใดต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 3.2.1.1 Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์

ออเจิเล็กตรอนสเปกโทรมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่รวมเอาเทคนิควิเคราะห์พื้นผิวสองเทคนิคเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งได้แก่ เทคนิค Low Energy Electron Diffraction (LEED) และเทคนิคออเจิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (AES) ซึ่ง LEED เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวของผลึกโดยอาศัยการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ และ AES เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการจำแนกชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวโดยการตรวจวัดระดับพลังงานของออเจิเล็กตรอนที่หลุดออกมา Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีลักษณะดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ รุ่น BLD 800

Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ ประกอบด้วย ส่วนวิเคราะห์พลังงานแบบ Retarding field (RFA) ชนิดครึ่งวงกลม (hemisphere) แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนขนาดเล็กและจอเรืองแสง (อยู่ด้านหลังของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน) สเปกโทรมิเตอร์รุ่น BOL 800 นี้ออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด ใช้ติดตั้งบนหน้าแปลนขนาด 8 นิ้วของห้องสุญญากาศ ในส่วนของวิเคราะห์พลังงาน ประกอบด้วย ชุดของกริด 4 ชั้น โดยมีแกนกลางร่วมกัน ระยะทำงานห่างจากสารตัวอย่าง 20 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นหลอดตาข่าย ทำจากวัสดุที่เป็นทั้งสแตนเลสเคลือบด้วยทอง

สำหรับแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่ใช้กับสเปกโทรมิเตอร์นี้เป็นรุ่น G10 มีลักษณะดังรูปที่ 3.11 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ยาว 80 mm ซึ่งใช้หลักการเทอร์มอลอิมิชชัน (thermal emission) โดยการจ่ายกระแสให้กับเส้นลวดทั้งสแตนเลส สามารถปรับค่าพลังงานได้ 0 keV ถึง 3 keV ขนาดของลำอิเล็กตรอนมีขนาด 1 mm ถึง 250  $\mu\text{m}$  ควบคุมได้โดยการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ wehnelt cylinder สามารถยึดคดในแนวตรงระหว่างสารตัวอย่างได้ 100 mm นอกจากนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้เชิงพาณิชย์ การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีฉากเรืองแสงเคลือบด้วยขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงและสารเรือง p31 phosphor (สีเขียว) ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัดออเจออิเล็กทรอนิกส์ (auger electron collector) และทำหน้าที่เป็นฉากเรืองแสงสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค LEED สามารถวัดอิเล็กทรอนิกส์ที่กระเจิงกลับจากสารตัวอย่างด้วยมุมกว้าง 100 องศา เมื่อติดตั้ง Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ รุ่น BDL 800 เข้ากับระบบสุญญากาศและมีลักษณะดังรูปที่ 3.12



### 3.2.1.2 แหล่งจ่ายไฟ รุ่น LPS 300

แหล่งจ่ายไฟ รุ่น LPS 300 เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับสเปกโทรมิเตอร์ทั้งเมื่อทำงานในโหมด AES และ LEED สามารถปรับช่วงพลังงานของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนได้ 0 ถึง 3 keV จ่ายกระแสให้กับเส้นลวดความร้อน (filament current) ระหว่าง 0 ถึง 3 A ศักย์ไฟฟ้า wehnelt 0 ถึง 17 V เทียบกับศักย์ไฟฟ้าของเส้นลวดความร้อน สร้างศักย์ไฟฟ้ารีตาร์ดิง (retarding voltage) ในช่วงระหว่าง 50% ถึง 100% ของศักย์ไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอน สร้างศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกสำหรับโฟกัสที่ฉากเรืองแสง 0 ถึง 5000 V ให้กระแสของลำอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง 200  $\mu$ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.3 ส่วนควบคุมการวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กทรอนิกส์

ส่วนนี้ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูงแบบลาดเอียง (high voltage ramp generator) รุ่น AUS 200 และ กล่องอุปกรณ์ช่วยลดสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก (low noise input coupler box) ซึ่งต่อกับโอเจสเปกโทรมิเตอร์โดยตรง

#### 1) เครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูงแบบลาดเอียง

##### (High voltage ramp generator)

เครื่องกำเนิด แรงดันสูงแบบลาดเอียง จะสร้างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (sweep voltage) ป้อนให้กับกริดของสเปกโทรมิเตอร์เพื่อทำหน้าที่คัดกรองพลังงานออกเจอิเล็กทรอนิกส์ ศักย์ไฟฟ้านี้สามารถควบคุมให้เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 2000 V ในช่วงเวลาดังแต่ 5 ถึง 15 min. มีวงจรรอสวิตเลเตอร์ภายใน กำเนิดสัญญาณรูปซายน์ที่มีความถี่ 1.475 kHz แอมพลิจูดระหว่าง 0.5 ถึง 20 Vpp ซึ่งสามารถควบคุมได้จากทั้งภายในและภายนอกด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการมอดูเลตเข้ากับศักย์ไฟฟ้าของกริด

#### 2) อุปกรณ์ช่วยลดสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก

##### (Low noise input coupler box)

อุปกรณ์ช่วยลดสัญญาณขนาดเล็ก เป็น low noise band pass filter ที่ทำงานที่ความถี่ 2.95 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่เป็น 2 เท่า ของสัญญาณจากวงจรรอสวิตเลเตอร์ที่ใช้ในการมอดูเลตสัญญาณ โอเจจากตัวตรวจวัดอิเล็กทรอนิกส์ของสเปกโทรมิเตอร์ เฉพาะที่ความถี่นี้เท่านั้นจึงจะผ่านไปยังเครื่องขยายล็อก-อิน เนื่องจากฮาร์โมนิกที่ 2 ของสัญญาณโอเจเป็นสัดส่วน โดยตรงกับอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของสัญญาณโอเจ

### 3.2.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ มีดังนี้

1. ต่อสายระหว่างขั้วต่อของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่สเปกโทรมิเตอร์เข้ากับขั้วต่อ AES mode ที่ด้านหลังของเครื่อง LPS 300
2. ต่อกริด 2 และ 3 ที่สเปกโทรมิเตอร์เข้ากับเอาต์พุทของ AUS 200 (ด้านหลัง)
3. ต่อเอาต์พุทอ้างอิงของ AUS 200 เข้ากับอินพุทอ้างอิงของเครื่องขยายล็อก-อิน (lock in Amplifier)
4. ต่อเอาต์พุทของอุปกรณ์ช่วยลดสัญญาณรบกวน (AUS 30) เข้ากับอินพุทของเครื่องขยายล็อก-อิน
5. ต่อสัญญาณจาก output (screen) ของสเปกโทรมิเตอร์เข้าที่ input ของอุปกรณ์ช่วยลดสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ต่อ External AUX ที่ด้านหลังของ AUS 200 เข้ากับ Analog out (Output 1) ที่ด้านหลังของเครื่องขยายลือก-อิน
7. เชื่อมต่อเครื่องขยายลือก-อินเข้ากับคอมพิวเตอร์ ผ่านทางพอร์ต IEEE 488

### 3.2.3 การใช้งานระบบวิเคราะห์ห่ออิเล็กทรอนิกส์ทรานสเปกโทรสโกปี

#### 1) วิธีการวัด

หลังจากที่ทำการถ่ายไอออนสารตัวอย่างเข้าสู่ห้องสุญญากาศหลักและความดันอยู่ในระดับที่พร้อมใช้งานแล้ว จากนั้นจัดตำแหน่งของสารตัวอย่างในแกน x, y, z และระยะห่างระหว่างสารตัวอย่างกับไอเจสเปกโทรมิเตอร์ให้เหมาะสม (ประมาณ 2 เซนติเมตร) เปิดชุดเตอร์ของไอเจสเปกโทรสโกปีสเปกโทรมิเตอร์ แล้วทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ก่อนเปิดสวิตช์หลักของ LPS 300 ตรวจสอบก่อนว่าปุ่มปรับทุกปุ่มได้ปรับหมุนทวนเข็มนาฬิกาจนสุด
2. ถอดสายอินพุทของเครื่องขยายลือก-อินออก
3. เปิดสวิตช์ของเครื่อง LPS 300
4. ปรับค่ากระแสของเส้นลวดความร้อน (filament current) อย่างช้า ๆ จนได้ประมาณ 2.50 A (ค่าสูงสุด ไม่เกิน 2.9 A) ในกรณีที่ไม่ได้ใช้งานนานหรือเปิดระบบสู่ความดันบรรยากาศ จะต้องทำการปลดปล่อยแก๊ส (degas) จากเส้นลวดความร้อน (filament) ของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนก่อนการใช้งาน โดยการปรับค่ากระแสของเส้นลวดความร้อนเป็น 2.50 A ทิ้งไว้ประมาณ 30 min.
5. ปรับค่าพลังงานของลำอิเล็กตรอน (beam energy) ให้ได้ประมาณ -1.7 keV
6. ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ Wehnelt (wehnelt voltage) ให้ได้ประมาณ - 5.55 V
7. ปรับค่าโฟกัสลำอิเล็กตรอน (focus-AES) เพื่อให้ได้กระแสของลำอิเล็กตรอนมีค่าสูงสุด (ค่าโฟกัสประมาณ -1.31 kV จะได้กระแสที่อ่านจากจอแสดงค่ากระแสของลำอิเล็กตรอนประมาณ 50-100  $\mu$ A)
8. ต่อสัญญาณ โอเจเข้าที่อินพุทของเครื่องขยายลือก-อินตามเดิม
9. เปิดสวิตช์หลักของเครื่อง AUS 200
10. เปิดสวิตช์หลักของเครื่องขยายลือก-อิน
11. ปรับค่าความถี่อ้างอิงจาก AUS 200 ให้ได้ความถี่ 1.475 kHz (อ่านค่าความถี่จาก เครื่องขยายลือก-อิน
12. ตั้งพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องขยายลือก-อิน ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Band pass	ON	Line	On
Line x 2	ON	Dyn resolution	NORM
Display	X	Expand	OFF
Del	-	Offset	-
Post	1 Sec	Sine-wave	ON
Phase	0 Deg	Sensitivity	500 $\mu$ V
Slope	24 dB	Time constant	1 s
Harmonic	2		

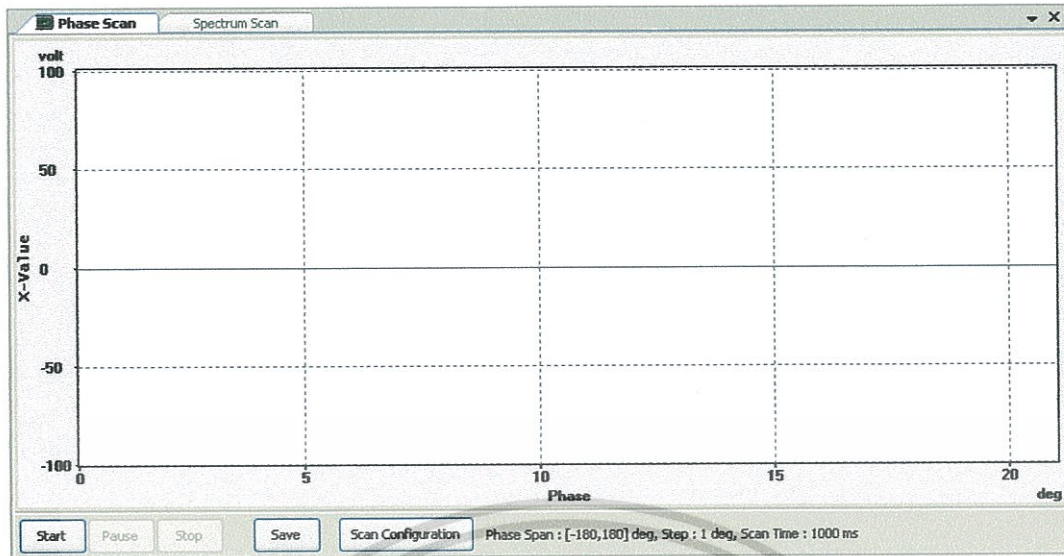
## 2) การใช้โปรแกรม AES Analysis

ระบบวิเคราะห์ด้วยโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปีที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม AES Analysis ที่พัฒนาขึ้นเอง เมื่อเปิดโปรแกรมจะปรากฏหน้าจอ ดังรูปที่

3.13

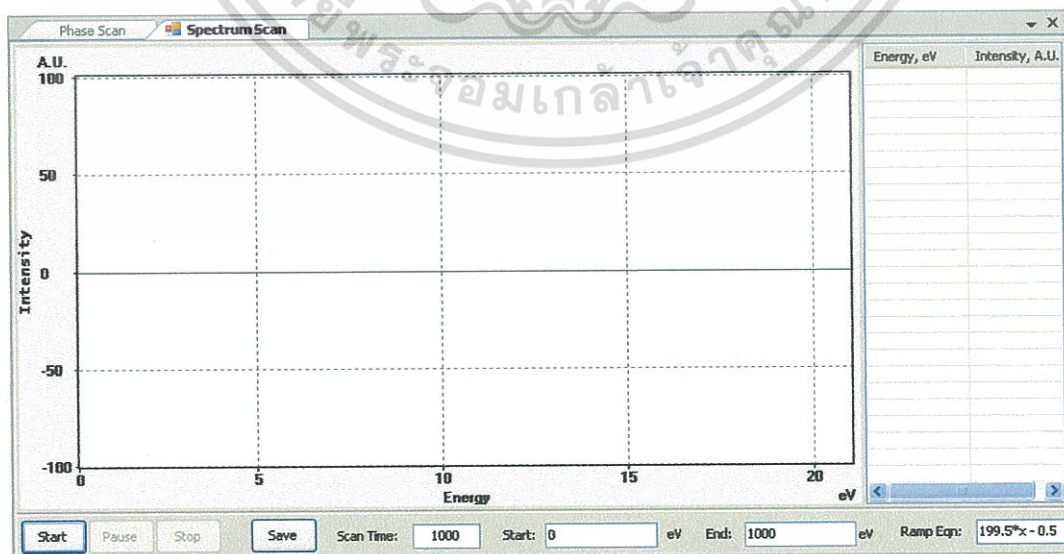
การใช้งาน โปรแกรมทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมาจะอยู่ในส่วนของ Phase Scan
- 2) เลือกไอคอน “Scan configuration” จะปรากฏไดอะล็อกบ็อกซ์ การตั้งค่าพารามิเตอร์ ดังรูปที่ 3.14
- 3) เลือกไอคอน Start เพื่อเริ่มการสแกนเฟสเปิดหาเฟสที่สัญญาณมีปริมาณติดลบสูงที่สุด
- 4) เมื่อสแกนเฟสเสร็จให้คลิกที่ไอคอน “Spectrum Scan” เพื่อเข้าสู่ส่วนของการสแกนสเปกตรัม โดยจะมีหน้าต่างดังรูปที่ 3.15
- 5) ตั้งค่า “Scan Time”, “Start” และ “End” ให้เรียบร้อย โดย Scan Time คือความเร็วในการเก็บข้อมูลค่ายิ่งน้อยข้อมูลที่ได้อะยิ่งละเอียด ส่วน Start และ End คือค่าของช่วงพลังงานของการสแกนจากค่าพลังงานเริ่มต้นถึงค่าพลังงานสุดท้ายตามค่าพลังงานจลน์ของโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของธาตุที่สนใจ
- 6) เมื่อตั้งค่าเสร็จแล้วให้คลิกที่ปุ่ม “Start” เพื่อเริ่มการสแกน
- 7) ในระหว่างการสแกนหากต้องการหยุดให้กดปุ่ม Stop
- 8) เมื่อสแกนเสร็จให้กดปุ่ม Save เพื่อเก็บข้อมูลเอาไว้ โดยไฟล์ที่ได้สามารถนำไปเปิดด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ได้ทันที



รูปที่ 3.13 หน้าจอโปรแกรมในส่วนของ Phase Scan

รูปที่ 3.14 โค้ดล็อกบ็อก การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับสแกนเฟส

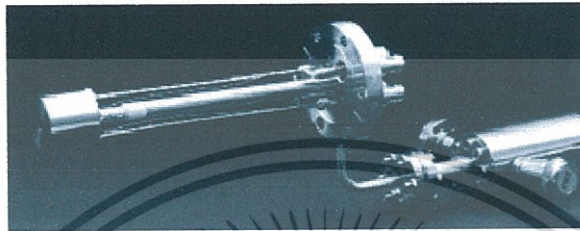


รูปที่ 3.15 หน้าจอโปรแกรมในส่วนของ Spectrum Scan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 แหล่งกำเนิดไอออนพลังงานสูง

แหล่งกำเนิดลำไอออนพลังงานสูงใช้ทำหน้าที่สำหรับการทำความสะอาดผิวหน้าด้วยกระบวนการสปัตเตอริง แหล่งกำเนิดไอออนพลังงานสูงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นของบริษัท LK Technologies รุ่น NGI 3000 ดังในรูปที่ 3.16 ซึ่งจะติดตั้งอยู่บนหน้าแปลนขนาด 2.75 นิ้ว ลำไอออนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไอออนของแก๊สอาร์กอนมีระดับพลังงาน 2 keV ระดับกระแสไอออน 15  $\mu\text{A}$  ที่ความดันระดับ  $10^{-6}$  Torr ลำไอออนมีขนาด 8 mm ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด 25 mm



รูปที่ 3.16 แหล่งกำเนิดลำไอออน รุ่น NGI 3000 ของ LK Technologies

#### - การทำความสะอาดโดยการสปัตเตอริง

ระบบทำความสะอาดโดยการสปัตเตอริงในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะเป็นการทำความสะอาดทางฝั่งซ้ายและฝั่งขวาของสารตัวอย่างสลับไปมา โดยจะใช้เวลาทำความสะอาดด้านละ 30 min. แล้วจึงเปลี่ยนไปเป็นอีกข้างหนึ่งแทน ทำแบบนี้ไปเรื่อยๆจนครบเวลา 5 hrs. ฉะนั้นถ้าหากแบ่งเวลาในการทำความสะอาดออกเป็นการทำงานทำความสะอาดทางฝั่งซ้ายและขวา ก็จะเป็นการทำงานทำความสะอาดฝั่งละ  $2\frac{1}{2}$  hrs. โดยการสปัตเตอริงมีขั้นตอนดังนี้

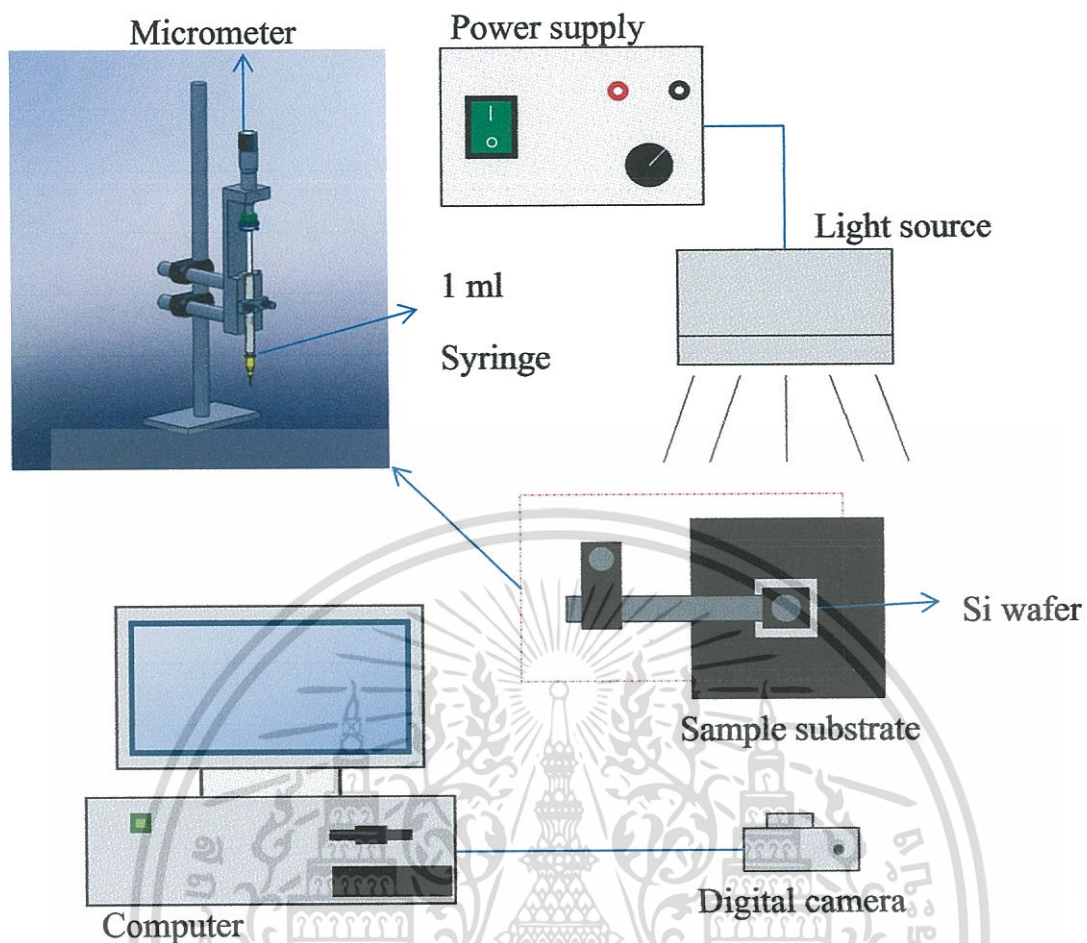
- 1) จัดตำแหน่งสารตัวอย่างให้ห่างจากแหล่งกำเนิดไอออนประมาณ 30 mm ให้ลำไอออนตกกระทบเป็นมุม  $45^\circ$  กับระนาบของสารตัวอย่าง
- 2) เปิดเครื่องควบคุมแหล่งกำเนิดลำไอออน ในกรณีที่ไม่ได้ใช้งานมานานหรือเปิดระบบเข้าสู่ความดันบรรยากาศ จะต้องทำการปลดปล่อยแก๊สออกจากเส้นลวดความร้อน โดยการปรับค่า Emission เป็น 20 mA ทิ้งไว้ประมาณ 20 min.
- 3) เปิดวาล์วให้แก๊สอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ จนอ่านความดันได้ประมาณ  $3.5 \times 10^{-6}$  mbar ( $4.65 \times 10^{-6}$  Torr)
- 4) ปรับค่า Emission อย่างช้าๆ ให้ได้ค่าประมาณ 10 mA
- 5) ปรับค่า Extractor เพื่อให้ได้ค่ากระแสที่วัด ที่สารตัวอย่างได้ค่าสูงสุด
- 6) ปรับค่า Beam Energy เป็น 2 keV
- 7) ทิ้งสารตัวอย่างไว้จนครบตามเวลาที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

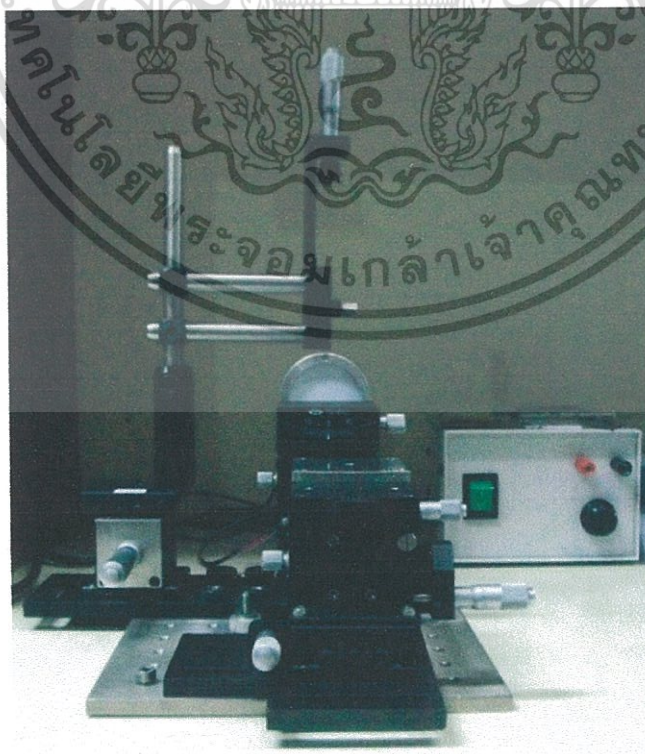
### 3.4 ระบบตรวจวัดมุมสัมผัส

ระบบตรวจวัดมุมสัมผัสมีลักษณะดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 มีส่วนประกอบหลักๆดังนี้

- กล้องถ่ายรูป ทำหน้าที่ในการบันทึกภาพระหว่างหยดของเหลวและพื้นผิว โดยที่แท่นวางกล้องถ่ายรูปสามารถปรับเลื่อนขึ้น-ลง ซ้าย-ขวาได้
- แหล่งกำเนิดแสงขาว ทำหน้าที่ในการปรับความเข้มแสงสำหรับแต่ละพื้นผิว เพื่อให้เห็นความแตกต่างระหว่างหยดของเหลวและพื้นผิวได้อย่างชัดเจน
- แหล่งจ่ายไฟ ทำหน้าที่จ่ายไฟให้กับ แหล่งกำเนิดแสง
- เข็มฉีดยาขนาด 1 ml ใช้สำหรับหยดของเหลว โดยสเกลบนเข็มถูกแบ่งออกเป็น 50 unit แต่ละ unit ห่างกัน 1 mm
- ไมโครมิเตอร์ ใช้เพื่อกำหนดขนาดของหยดของเหลวให้มีขนาดเท่ากันตลอดการทดลอง ในการทดลองจะใช้ขนาดของหยดของเหลว 0.4  $\mu\text{l}$  โดยการหมุนไมโครมิเตอร์ลงไป 20  $\mu\text{m}$
- แท่นวางสารตัวอย่าง สามารถปรับขึ้น-ลง ซ้าย-ขวาได้
- คอมพิวเตอร์ จะเป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับกล้องถ่ายรูปและวิเคราะห์การวัดมุมสัมผัสด้วยโปรแกรมการวัดมุมสัมผัส



รูปที่ 3.17 แผนภาพแสดง โคอะแกรมของระบบวัดมุมสัมพัทธ์

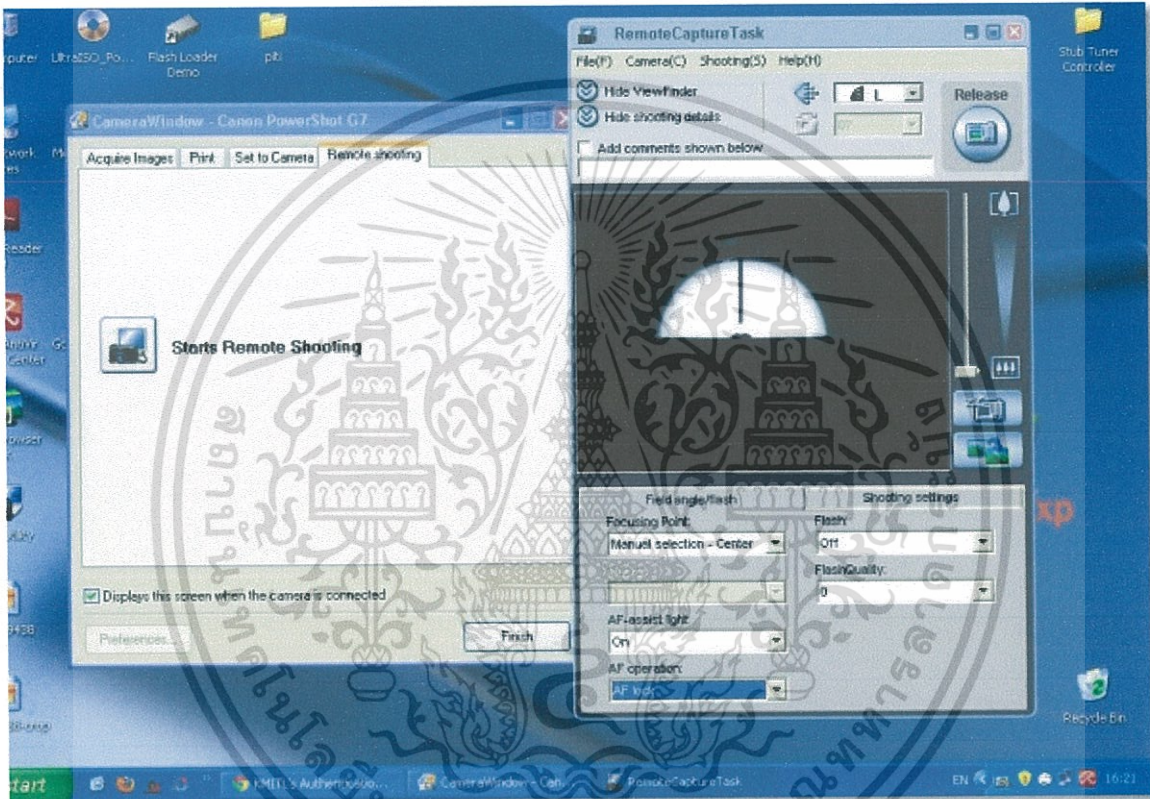


รูปที่ 3.18 ระบบวัดมุมสัมพัทธ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## - โปรแกรมการคำนวณวัดมุมสัมผัส

เป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นจากโปรแกรมวิชวลเบสิก (visual basic) ในการทดลองนี้ จึงได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หามุมสัมผัส โดยการทำงานของโปรแกรมจะใช้วิธีการวัดแบบโปรแกรมเลือกทรงของหยดน้ำอัตโนมัติจะได้วัดได้แม่นยำกับรูปที่มีความละเอียดสูง เนื่องจากโปรแกรมจะนำตำแหน่งของ Pixel มาใช้ในการคำนวณ จากรูปที่ 3.19 เป็นรูปที่ได้จากการทดลองแล้วจะนำไปวิเคราะห์หามุมสัมผัส

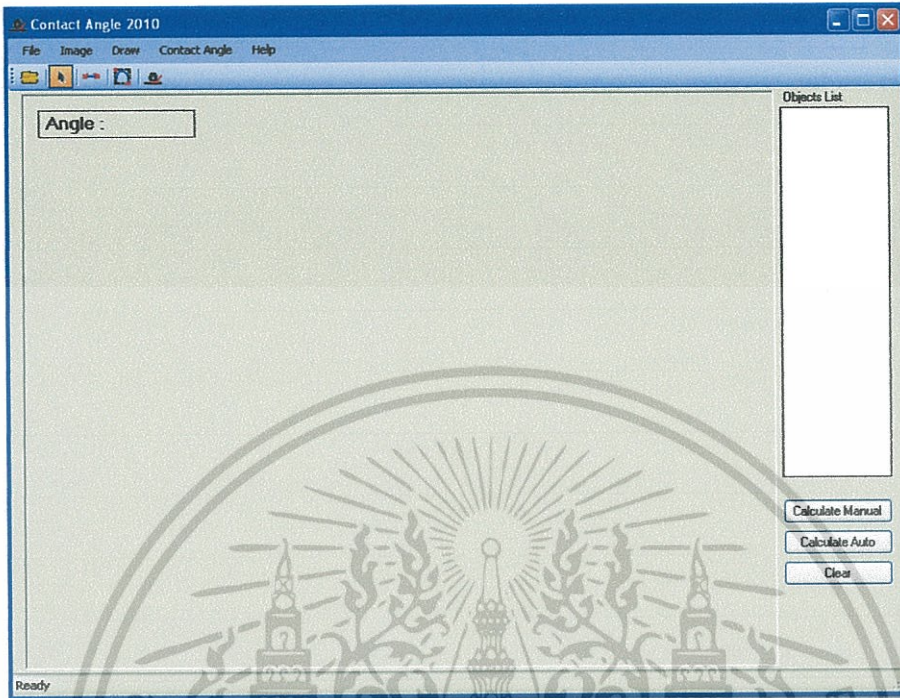


รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลซึ่งจะนำไปวิเคราะห์หามุมสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนการวัดมุมสัมผัสมีดังนี้

1. ทำการเปิดโปรแกรมซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.20







รูปที่ 3.20 หน้าจอการแสดงผลของ โปรแกรม

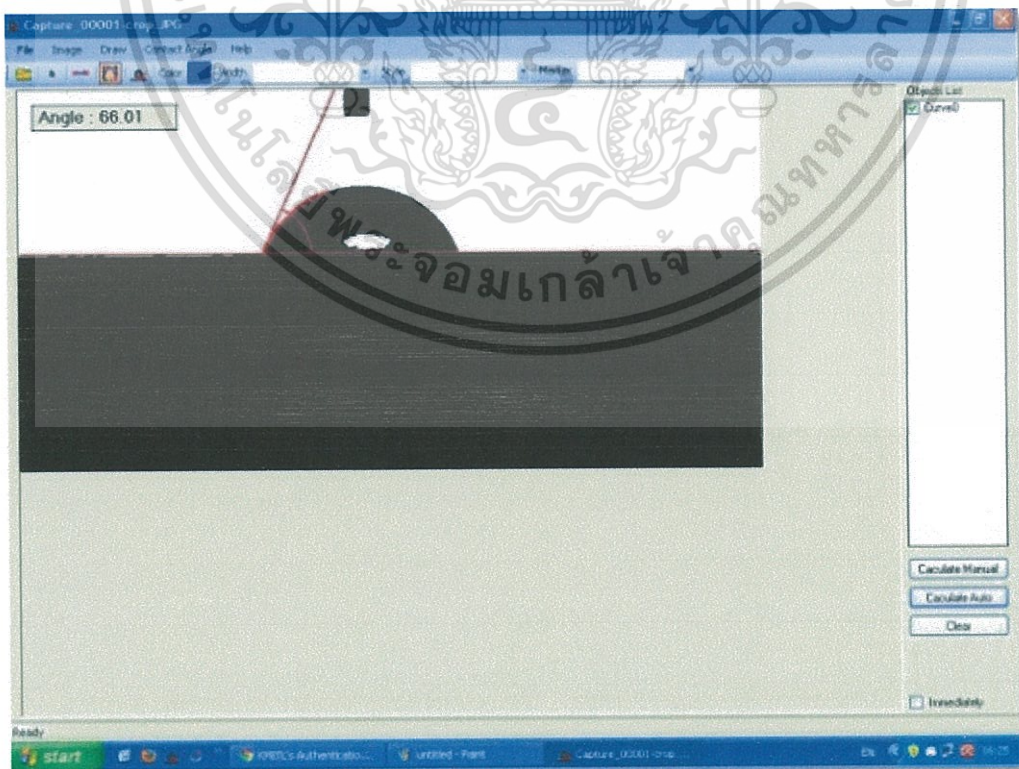
2. ทำการโหลดไฟล์รูปภาพที่ต้องการวัดมุมสัมผัสโดยกดที่เมนู Open > File Image หรือ กดที่ไอคอน  จะได้ภาพดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงภาพถ่ายที่นำไปตัดเพื่อที่จะให้เห็นบริเวณรอยต่อที่ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ก่อนการวัดมุมสัมผัสจะต้องทำการ Threshold ภาพก่อนทุกครั้ง และจะต้องป้อนค่า Threshold ให้เหมาะสมกับภาพ ซึ่งค่าที่ป้อนนั้นต้องอยู่ในช่วง 1 ถึง 256 โดยเลือกที่เมนู Image > Threshold แล้วป้อนค่า Threshold ลงไปใน Textbox
4. การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำสามารถทำได้ 2 วิธี คือ
  - เลือกที่จะวัดมุมสัมผัสโดยการระบุตำแหน่ง (Manual Measurement) โดยเลือกที่เมนู Draw > Manually 2 points line หรือกดที่ไอคอน  แล้วทำการลากเส้นฐานของหยดน้ำ และเส้นสัมผัสของหยดน้ำ แล้วกดปุ่ม Calculate Manual หรือปุ่ม 
  - เลือกที่จะวัดมุมสัมผัสโดยให้โปรแกรมหาขอบของหยดน้ำให้ (Auto Detect) โดยเลือกที่เมนู Draw > Auto Detect หรือกดที่ไอคอน  แล้วทำการลากกรอบให้ครอบคลุมด้านที่ต้องการวัด จากนั้นจะมีหน้าต่าง SideSelection ขึ้นมาให้เลือกว่าต้องการวัดขอบของหยดน้ำด้านไหน จากนั้นกดปุ่ม Calculate Auto
5. ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำจะแสดงค่าใน  ดังในรูปที่ 3.22
6. หากต้องการลบฟังก์ชันการทำงานที่กระทำบนภาพอยู่ ให้กดปุ่ม Clear
7. หากต้องการให้ภาพกลับไปเป็นภาพเริ่มต้น โดยเลือกเมนู Image > Original Image
8. ถ้าต้องการออกจากโปรแกรม เลือกเมนู File > Exit Program หรือกดปุ่ม 



รูปที่ 3.22 แสดงการหาค่ามุมสัมผัสด้วยโปรแกรมวัดมุมสัมผัส

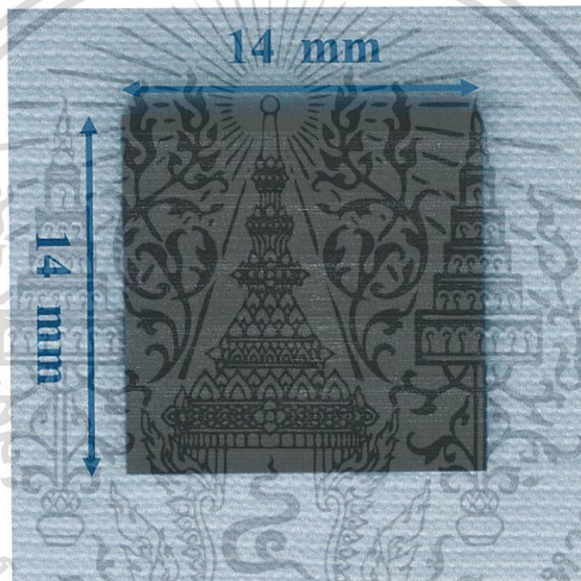
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 แผ่นซิลิกอนที่ใช้ในการทดลอง

สารตัวอย่าง (sample) ที่ใช้คือแผ่นซิลิกอน ซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 14 mm × 14 mm ดังรูปที่ 4.1 โดยข้อมูลทั้งก่อนและหลังการทำความสะอาดจะถูกรวบรวมด้วยวัดมุมสัมผัสและเทคนิค AES เพื่อยืนยันผลในการทำความสะอาดด้วยวิธีการวัด 2 วิธีเปรียบเทียบกัน



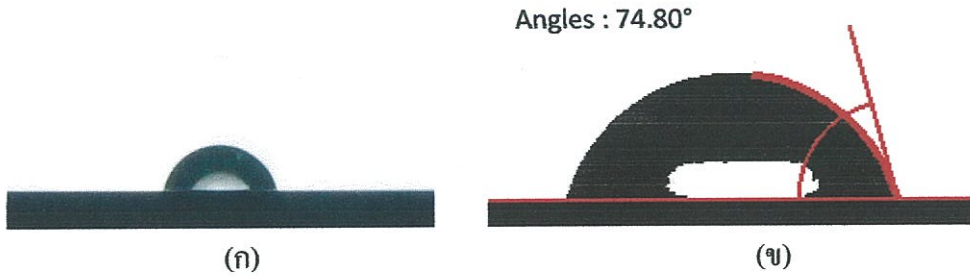
รูปที่ 4.1 แผ่นซิลิกอนที่ใช้ในการทดลอง

#### 4.2 มุมสัมผัสของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาด

มุมสัมผัสบนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนก่อนการทำความสะอาดด้วยพลาสมา (untreated Si) จะถูกวัดด้วยระบบวัดมุมสัมผัส โดยระบบวัดมุมสัมผัสนี้จะควบคุมขนาดของหยดน้ำหรือของเหลวที่ใช้ด้วยไมโครมิเตอร์ ปริมาตรของของเหลวที่ใช้คือ 0.4 ml ของเหลวที่ใช้ในการวัดมุมสัมผัสของการทดลองนี้คือน้ำปลอดประจุ (deionized water: DI water)

ตัวอย่างการวัดมุมสัมผัสแสดงไว้ดังรูปที่ 4.2 ส่วนข้อมูลขนาดของมุมสัมผัสของแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาด แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยวัดจากบริเวณกึ่งกลางของแผ่นซิลิกอนจำนวน 10 แผ่น มีค่าเฉลี่ยเป็น  $48.12^\circ$  สัญลักษณ์ L, R ในตารางคือมุมสัมผัสทางด้านซ้ายและขวาของหยดน้ำตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการวัดมุมสัมผัส

- (ก) ลักษณะของหยดน้ำเมื่อหยดลงบนพื้นผิว  
(ข) การวัดมุมสัมผัส

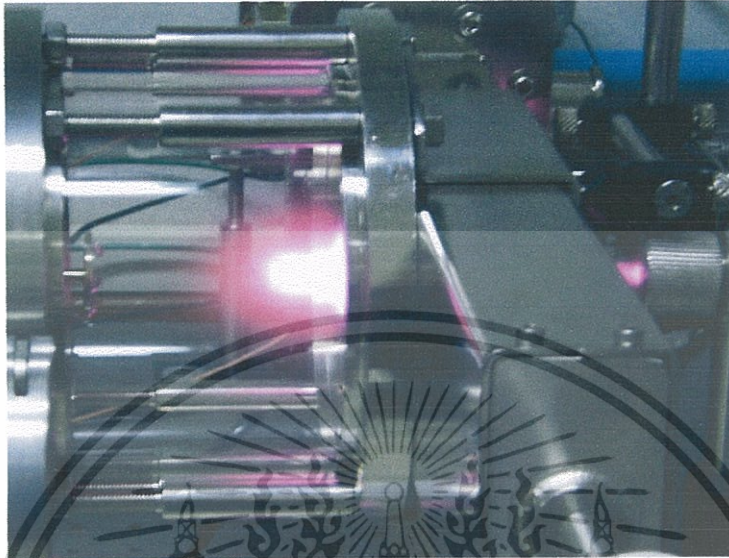
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลมุมสัมผัสของแผ่นซีลิกอนที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาด

Sample	Contact angle (degree)		
	L	R	Average
1	47.26	47.41	47.34
2	49.40	46.25	47.83
3	51.02	49.52	50.27
4	47.13	47.13	47.13
5	46.14	47.78	46.96
6	48.4	48.37	48.39
7	47.22	47.22	47.22
8	47.83	47.81	47.82
9	51.02	49.32	50.17
10	48.13	48.13	48.13
		<b>Total</b>	<b>48.12</b>

### 4.3 ประสิทธิภาพของพลาสติก

เนื่องจากพลาสติกที่เกิดจากระบบทำความสะอาดจะมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมหรือครึ่งทรงรีแผ่ออกมาจากบริเวณปลายท่อควอตซ์ที่ยื่นเข้ามาในห้องสุญญากาศ ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.3 ส่งผลให้เวลาทำความสะอาดความหนาแน่นของพลาสติกที่บริเวณต่างๆที่สัมผัสกับสารตัวอย่างมีค่าไม่เท่ากัน เพื่อข้อมูลที่ถูกต้องจึงจำเป็นต้องตรวจสอบเพื่อดูว่าหลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสติก บริเวณใดบนแผ่นซีลิกอนที่จะมีความสะอาดและมีความสม่ำเสมอที่สุด จึงได้ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาหาบริเวณที่หรือเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งที่สะอาดและสม่ำเสมอที่สุดบนแผ่นซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมา โดยใช้การวัดมุมสัมผัส

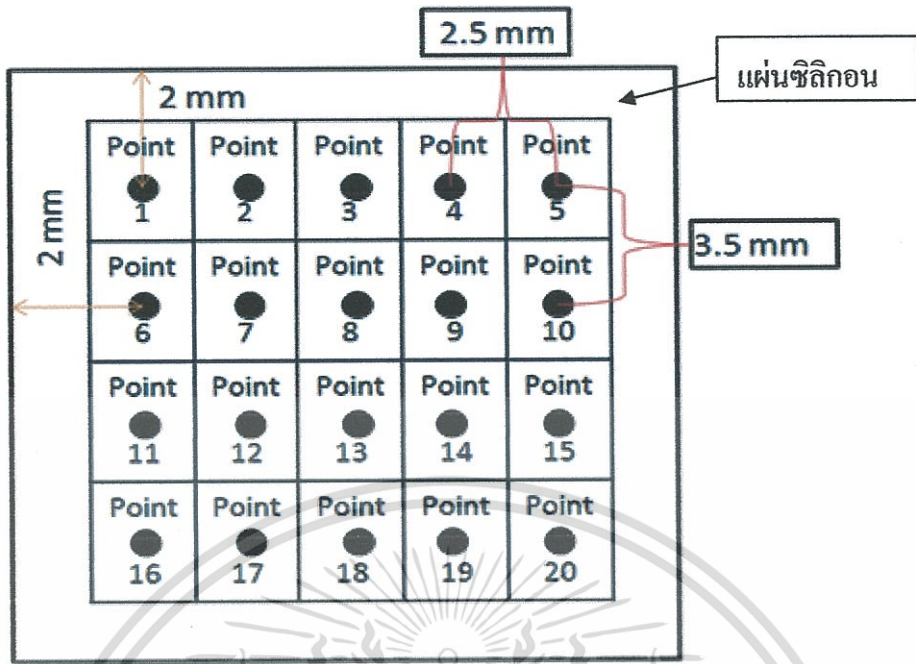


รูปที่ 4.3 ตัวอย่างลักษณะของพลาสมาที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของพลาสมาที่ใช้ในการทดลองในหัวข้อ 4.3

<b>Working gas</b>	Ar
<b>Flowrate</b>	15 sccm
<b>Base pressure</b>	0.006 Torr
<b>Plasma-Chamber pressure</b>	0.450 Torr
<b>Magnetron power</b>	580 W
<b>Distance from plasma tube</b>	5 mm
<b>Treatment time</b>	5 – 30 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการวัดมุมสัมผัสบนแผ่นซิลิกอน

พารามิเตอร์ของพลาสมาที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ได้มาจากนักวิจัยที่ทำการวิจัยมาก่อนหน้านี้ และเพื่อให้ง่ายต่อการระบุตำแหน่งแผ่นซิลิกอนที่ใช้ในการทดลองจะถูกแบ่งตำแหน่งออกเป็น 20 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.4 โดยเว้นระยะห่างจากขอบแผ่นเข้ามา 2 mm มีระยะห่างระหว่างตำแหน่งแต่ละตำแหน่งในแนวนอนเป็น 2.5 mm และมีระยะห่างเป็น 3.5 mm ในแนวตั้ง โดยในการทดลองหนึ่งครั้งจะทดลองกับแผ่นซิลิกอน 4 แผ่น จากนั้นจะนำค่ามุมสัมพัทธ์ทั้งหมดที่ได้ มาผ่านกระบวนการทางสถิติเพื่อหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) เพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูล จากนั้นจึงนำข้อมูลวิเคราะห์เพื่อดูว่าหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมาแล้วตำแหน่งใดบนแผ่นซิลิกอนมีความสะอาดและสม่ำเสมอที่สุด เพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ข้อมูลมุมสัมพัทธ์จะถูกแบ่งช่วงๆ และแทนค่าด้วยสีต่างๆ ดังตารางที่ 4.3

ข้อมูลของมุมสัมพัทธ์จะแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 4.6 4.8 4.10 4.12 และ 4.14 จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความไม่แน่นอนที่คำนวณได้มีค่าไม่มาก ข้อมูลที่วัดมาจึงเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้ จากนั้นนำข้อมูลมาแทนที่ลงบนตำแหน่งในรูปที่ 4.4 โดยใช้สีแทนขนาดของมุมสัมพัทธ์บนตำแหน่งต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.5 4.7 4.9 4.11 4.13 และ 4.15 พบว่าเมื่อดูค่าโดยเฉลี่ยจากทุกตาราง จะมีเพียงตำแหน่งที่ 7 8 9 12 13 14 17 18 และ 19 เท่านั้นที่มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงที่สุดเพราะมีค่ามุมสัมพัทธ์ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าความไม่แน่นอนที่น้อย เหตุการณ์นี้เกิดจากพลาสมาที่มีลักษณะเป็นทรงกลมพุ่งออกมาจากปลายท่อ ทำให้บริเวณกึ่งกลางของแผ่นซิลิกอนที่สัมผัสกับพลาสมามากกว่าจึงมีมุมสัมพัทธ์ต่ำกว่าและเพื่อความสะดวกและเพื่อความถูกต้องของการวัดและวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AES ในอนาคตจึงตัดตำแหน่งที่ 17

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18 และ 19 ที่เป็นบริเวณที่ใกล้กับขอบของแผ่นซิลิกอนออกไป เหลือเพียงตำแหน่งที่อยู่บริเวณกลางแผ่นซิลิกอนเท่านั้น เพราะเทคนิค AES เวลาวิเคราะห์ที่บริเวณขอบของสารตัวอย่าง จะมีโอกาสที่ลำอิเล็กตรอนจะไปกระทบกับฐานรอง (substrate) ทำให้การวัดเกิดความผิดพลาดขึ้น

ตารางที่ 4.3 สีที่ใช้ในการแทนค่ามุมสัมผัสช่วงต่างๆ

Contact angle (degree)	Color
$\geq 14.00$	
13.99 - 12.00	
11.99 - 10.00	
9.99 - 8.00	
7.99 - 6.00	
5.99 - 4.00	
$< 4$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลมุมสัมผัสของแผ่นซีลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 5 s

Position	Contact angle (degree)								Average	Standard deviation	Uncertainty
	Sample 01		Sample 02		Sample 03		Sample 04				
	L	R	L	R	L	R	L	R			
1	4.01	3.86	2.88	3.82	7.05	9.99	5.06	6.64	5.41	2.1964	0.78
2	5.69	5.66	4.11	3.06	7.21	4.59	2.27	2.32	4.36	1.6552	0.59
3	4.25	4.35	4.19	4.10	5.48	4.72	4.94	4.94	4.62	0.4499	0.16
4	3.95	5.01	2.78	4.61	6.68	8.80	3.13	4.12	4.89	1.8578	0.66
5	14.12	14.11	11.51	11.17	8.34	8.28	11.53	8.48	10.94	2.2576	0.80
6	6.47	6.68	5.66	3.19	8.23	9.20	5.09	4.19	6.09	1.8691	0.66
7	3.71	3.41	5.67	4.72	4.10	4.10	3.19	3.94	4.11	0.7358	0.26
8	3.02	2.55	3.99	3.82	3.91	3.91	4.18	4.79	3.77	0.6471	0.23
9	7.84	7.84	3.44	3.34	4.89	4.36	7.25	6.58	5.69	1.7841	0.63
10	5.12	5.14	4.95	3.72	11.39	9.69	8.83	7.52	7.05	2.5511	0.90
11	5.04	3.94	3.94	4.26	10.51	11.25	11.34	11.36	7.71	3.4338	1.21
12	4.79	3.89	3.68	3.78	5.27	5.76	4.68	4.68	4.57	0.6944	0.25
13	3.67	4.17	3.42	3.30	3.90	4.00	4.62	5.42	4.06	0.6465	0.23
14	5.58	5.50	6.95	3.63	3.65	2.72	6.04	5.83	4.99	1.3719	0.49
15	5.30	7.13	3.76	5.58	5.57	4.58	8.98	10.51	6.43	2.1485	0.76
16	4.55	4.05	5.76	4.22	14.16	14.69	10.66	10.31	8.55	4.1759	1.48
17	4.05	3.76	1.45	2.58	2.94	2.54	2.04	2.04	2.68	0.8271	0.29
18	3.23	4.72	6.76	6.76	6.26	5.59	4.42	3.71	5.18	1.2787	0.45
19	4.61	4.61	5.50	5.07	3.53	3.53	6.50	5.68	4.88	0.9667	0.34
20	7.36	6.23	6.59	7.72	5.63	8.09	7.49	6.96	7.01	0.7677	0.27

ตารางที่ 4.5 มุมสัมผัสเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นซีลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 5 s

5.41±0.78	4.36±0.59	4.62±0.16	4.89±0.66	10.94±0.80
6.09±0.66	4.11±0.26	3.77±0.23	5.69±0.63	7.05±0.90
7.71±1.21	4.57±0.25	4.06±0.23	4.99±0.49	6.43±0.76
8.55±1.48	2.68±0.29	5.18±0.45	4.88±0.34	7.01±0.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลมุมสัมผัสของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 10 s

Position	Contact angle (degree)								Average	Standard deviation	Uncertainty
	Sample 01		Sample 02		Sample 03		Sample 04				
	L	R	L	R	L	R	L	R			
1	4.00	4.19	4.62	3.36	8.92	9.49	7.65	8.12	6.29	2.3287	0.82
2	10.52	7.94	4.09	3.97	8.54	8.31	6.35	6.66	7.05	2.1074	0.75
3	5.09	5.54	4.80	4.20	3.77	3.08	3.71	3.71	4.24	0.7791	0.28
4	6.09	5.13	5.85	3.56	5.10	5.11	4.06	6.02	5.12	0.8545	0.30
5	10.14	10.96	12.84	10.18	10.26	8.38	12.63	12.71	11.01	1.4913	0.53
6	4.46	4.46	2.79	2.16	7.75	6.95	2.79	2.05	4.18	2.0327	0.72
7	4.18	2.81	4.29	2.42	3.91	4.76	5.15	3.90	3.93	0.8592	0.30
8	3.75	2.79	2.98	2.17	3.44	3.44	5.24	3.00	3.35	0.8451	0.30
9	2.96	2.96	4.21	4.00	5.15	5.94	4.13	4.13	4.19	0.9390	0.33
10	6.81	5.42	6.48	7.35	6.16	6.97	4.50	4.19	5.99	1.0918	0.39
11	4.57	3.71	3.15	4.32	4.31	5.13	7.22	8.63	5.13	1.7391	0.61
12	5.12	5.12	6.23	6.26	6.60	5.73	3.83	4.56	5.43	0.8872	0.31
13	5.37	3.03	5.04	5.68	3.87	3.63	3.58	3.58	4.22	0.9241	0.33
14	3.05	3.05	2.62	2.62	4.15	4.19	4.20	3.58	3.43	0.6435	0.23
15	4.75	5.49	8.94	10.19	8.58	11.56	11.07	9.50	8.76	2.3078	0.82
16	1.34	2.67	5.23	3.93	5.46	5.07	6.68	8.69	4.88	2.1380	0.76
17	6.16	4.86	6.51	4.89	9.83	9.83	8.81	6.26	7.14	1.9253	0.68
18	4.77	3.53	4.32	3.56	6.17	6.84	5.59	3.56	4.79	1.2032	0.43
19	4.55	4.77	1.38	1.38	4.47	4.47	4.67	4.40	3.76	1.3793	0.49
20	6.52	5.34	6.02	8.02	6.70	6.09	5.43	4.66	6.10	0.9572	0.34

ตารางที่ 4.7 มุมสัมผัสเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 10 s

6.29±0.82	7.05±0.75	4.24±0.28	5.12±0.30	11.01±0.53
4.18±0.72	3.93±0.30	3.35±0.30	4.19±0.33	5.99±0.39
5.13±0.61	5.43±0.31	4.22±0.33	3.43±0.23	8.76±0.82
4.88±0.76	7.14±0.68	4.79±0.43	3.76±0.49	6.10±0.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลมุมสัมผัสของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 15 s

Position	Contact angle (degree)								Average	Standard deviation	Uncertainty
	Sample 01		Sample 02		Sample 03		Sample 04				
	L	R	L	R	L	R	L	R			
1	9.93	11.35	7.02	6.55	4.45	4.28	8.81	7.33	7.47	2.3256	0.82
2	9.25	8.06	4.57	4.20	4.94	5.12	9.94	8.73	6.85	2.2127	0.78
3	9.65	11.33	5.54	4.70	7.12	8.62	8.19	8.05	7.90	1.9959	0.71
4	9.48	7.35	8.34	7.95	7.57	8.74	8.71	9.76	8.49	0.8034	0.28
5	10.23	11.09	12.26	10.58	13.72	14.21	12.73	11.40	12.03	1.3590	0.48
6	6.19	8.89	4.80	5.34	2.30	4.47	3.50	4.96	5.06	1.8201	0.64
7	6.23	6.27	3.47	2.44	4.37	4.22	6.00	4.29	4.66	1.3044	0.46
8	5.54	4.67	6.62	6.77	4.96	5.69	5.11	4.11	5.43	0.8613	0.30
9	8.32	5.86	3.69	3.35	4.94	5.66	3.02	2.10	4.62	1.8641	0.66
10	10.69	9.59	9.90	9.88	12.73	13.62	9.25	8.46	10.52	1.6598	0.59
11	5.63	4.88	5.10	5.32	6.73	5.01	6.18	6.44	5.66	0.6600	0.23
12	4.63	4.80	3.20	3.11	3.78	4.44	4.48	3.42	3.98	0.6399	0.23
13	1.99	2.71	3.59	3.15	3.42	3.09	5.59	5.58	3.64	1.2118	0.43
14	5.90	4.45	5.10	3.07	3.39	3.14	7.57	4.79	4.68	1.4452	0.51
15	8.55	7.23	4.45	3.55	9.65	11.46	4.16	2.28	6.42	3.0699	1.09
16	8.54	8.33	6.30	5.52	9.87	11.00	8.17	9.16	8.36	1.6684	0.59
17	5.38	3.64	2.76	2.83	2.78	2.98	3.61	2.74	3.34	0.8459	0.30
18	5.00	4.21	3.70	3.62	4.28	5.09	6.42	5.91	4.78	0.9485	0.34
19	6.69	6.69	3.14	2.51	4.15	5.27	3.80	3.70	4.49	1.4683	0.52
20	8.75	8.28	8.86	8.23	11.82	12.04	12.59	13.76	10.54	2.0895	0.74

ตารางที่ 4.9 มุมสัมผัสเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 15 s

7.47±0.82	6.85±0.78	7.90±0.71	8.49±0.28	12.03±0.48
5.06±0.64	4.66±0.46	5.43±0.30	4.62±0.66	10.52±0.59
5.66±0.23	3.98±0.23	3.64±0.43	4.68±0.51	6.42±1.09
8.36±0.59	3.34±0.30	4.78±0.34	4.49±0.52	10.54±0.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ข้อมูลมุมสัมผัสของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 20 s

Position	Contact angle (degree)								Average	Standard deviation	Uncertainty
	Sample 01		Sample 02		Sample 03		Sample 04				
	L	R	L	R	L	R	L	R			
1	4.76	5.72	6.69	7.25	6.17	5.49	12.03	13.00	7.64	2.9116	1.03
2	7.25	8.41	5.97	6.00	10.24	9.63	10.63	9.38	8.44	1.7251	0.61
3	6.17	3.97	6.83	5.29	2.90	4.57	4.89	7.73	5.29	1.4677	0.52
4	6.14	8.61	4.00	4.20	8.04	8.04	4.01	3.42	5.81	2.0222	0.72
5	12.07	11.08	13.65	12.77	10.85	11.63	12.15	14.43	12.33	1.1559	0.41
6	2.46	3.72	7.86	7.40	5.56	4.25	7.63	7.02	5.74	1.9220	0.68
7	11.58	11.00	9.23	7.16	8.72	8.00	9.23	8.78	9.21	1.3653	0.48
8	3.65	3.58	3.94	3.94	5.24	4.81	3.94	4.46	4.20	0.5490	0.19
9	6.30	6.00	7.00	6.50	8.14	8.02	5.76	5.22	6.62	0.9757	0.35
10	5.11	4.46	9.24	6.49	5.36	3.56	9.20	9.26	6.59	2.1907	0.77
11	1.98	2.54	10.02	11.45	5.27	4.55	4.56	5.69	5.76	3.1291	1.11
12	6.18	5.44	6.56	7.74	3.59	2.83	6.26	6.42	5.63	1.5280	0.54
13	3.94	2.01	3.83	3.71	4.99	4.18	5.44	5.00	4.14	1.0007	0.35
14	3.00	3.20	3.66	3.66	2.34	1.24	4.49	3.14	3.09	0.9095	0.32
15	9.62	9.75	8.34	9.17	9.79	7.92	9.97	9.24	9.23	0.6888	0.24
16	10.41	8.74	8.34	9.90	4.19	4.16	10.25	10.01	8.25	2.4481	0.87
17	6.55	5.84	8.41	8.11	9.48	7.96	7.19	7.72	7.66	1.0569	0.37
18	8.67	8.67	3.91	2.97	5.27	6.58	3.51	4.50	5.51	2.0978	0.74
19	5.02	3.70	6.44	3.94	5.03	3.90	4.76	5.24	4.75	0.8462	0.30
20	5.19	6.27	13.47	11.89	14.65	13.05	11.65	12.52	11.09	3.2253	1.14

ตารางที่ 4.11 มุมสัมผัสเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 20 s

7.64±1.03	8.44±0.61	5.29±0.52	5.81±0.72	12.33±0.41
5.74±0.68	9.21±0.48	4.20±0.19	6.62±0.35	6.59±0.77
5.76±1.11	5.63±0.54	4.14±0.35	3.09±0.32	9.23±0.24
8.25±0.87	7.66±0.37	5.51±0.74	4.75±0.30	11.09±1.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลมุมสัมผัสของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 25 s

Position	Contact angle (degree)								Average	Standard deviation	Uncertainty
	Sample 01		Sample 02		Sample 03		Sample 04				
	L	R	L	R	L	R	L	R			
1	6.67	6.24	2.16	4.99	5.54	6.69	5.11	7.85	5.66	1.5902	0.56
2	4.01	3.63	6.96	6.77	4.70	5.66	11.46	9.78	6.62	2.5959	0.92
3	8.34	6.74	4.05	4.05	9.87	8.90	3.87	3.50	6.17	2.4389	0.86
4	9.11	9.18	8.80	8.93	7.60	6.90	7.00	7.27	8.10	0.9324	0.33
5	17.02	17.02	14.22	14.64	14.12	14.74	13.22	13.62	14.83	1.3495	0.48
6	6.22	4.20	3.57	3.68	5.71	3.30	3.44	3.44	4.20	1.0602	0.37
7	3.12	2.44	4.56	4.28	2.05	2.89	4.68	4.64	3.58	1.0070	0.36
8	2.72	3.91	6.86	4.55	3.31	4.17	3.31	4.10	4.12	1.1732	0.41
9	2.02	2.50	3.00	3.70	2.80	2.80	2.60	2.26	2.71	0.4763	0.17
10	11.84	12.90	7.43	6.82	7.55	7.64	6.41	5.78	8.30	2.4382	0.86
11	5.14	5.69	4.13	5.70	3.86	2.32	7.43	8.53	5.35	1.8578	0.66
12	3.66	5.64	4.93	4.10	7.09	5.95	2.72	3.87	4.75	1.3344	0.47
13	5.68	5.67	3.71	4.04	2.94	2.73	5.01	3.18	4.12	1.1186	0.40
14	4.22	4.02	5.22	5.00	4.72	3.43	3.85	2.49	4.12	0.8344	0.30
15	9.48	8.26	9.41	10.63	7.18	7.21	8.55	6.80	8.44	1.2576	0.44
16	7.70	8.06	4.92	5.42	6.25	5.78	13.24	11.93	7.91	2.8954	1.02
17	3.12	4.83	9.13	7.75	6.22	4.99	5.50	5.35	5.86	1.7360	0.61
18	6.41	6.84	3.91	4.02	5.61	4.61	5.09	4.99	5.19	0.9862	0.35
19	3.83	2.71	3.70	3.80	2.31	2.68	3.17	4.00	3.28	0.6026	0.21
20	10.79	11.33	9.12	7.95	9.21	7.94	6.71	5.53	8.57	1.8283	0.65

ตารางที่ 4.13 มุมสัมผัสเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 25 s

5.66±0.56	6.62±0.92	6.17±0.86	8.10±0.33	14.83±0.48
4.20±0.37	3.58±0.36	4.12±0.41	2.71±0.17	8.30±0.86
5.35±0.66	4.75±0.47	4.12±0.40	4.12±0.30	8.44±0.44
7.91±1.02	5.86±0.61	5.19±0.35	3.28±0.21	8.57±0.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ข้อมูลมุมสัมผัสของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 30 s

Position	Contact angle (degree)								Average	Standard deviation	Uncertainty
	Sample 01		Sample 02		Sample 03		Sample 04				
	L	R	L	R	L	R	L	R			
1	6.82	5.89	15.82	13.19	10.09	9.31	12.52	12.23	10.73	3.1336	1.11
2	13.79	10.72	9.01	8.45	8.57	8.46	8.71	8.82	9.57	1.7404	0.62
3	6.80	7.30	8.84	7.96	6.50	5.15	6.67	5.03	6.78	1.2102	0.43
4	6.51	5.68	9.48	8.75	12.74	9.32	10.95	10.17	9.20	2.1347	0.75
5	8.96	10.95	10.99	10.84	15.95	12.00	13.18	12.27	11.89	1.9263	0.68
6	8.41	10.27	10.53	10.07	10.00	10.60	11.04	11.44	10.30	0.8445	0.30
7	7.43	5.61	6.48	4.22	7.29	7.35	6.47	5.41	6.28	1.0614	0.38
8	5.10	5.09	4.65	5.67	3.66	4.57	5.62	6.47	5.10	0.7929	0.28
9	6.69	6.04	3.57	1.50	5.79	6.45	7.58	6.40	5.50	1.8559	0.66
10	8.43	7.42	8.73	9.16	8.53	11.09	6.25	7.15	8.35	1.3721	0.49
11	9.99	8.02	7.41	8.80	6.92	4.85	5.95	6.48	7.30	1.5272	0.54
12	7.37	5.71	7.10	7.25	8.46	7.20	6.92	7.77	7.22	0.7287	0.26
13	5.20	4.83	4.31	4.83	5.32	4.55	6.67	4.72	5.05	0.6822	0.24
14	3.69	3.45	5.32	5.73	6.17	5.67	4.45	4.66	4.89	0.9285	0.33
15	8.46	6.71	6.53	7.16	8.52	8.32	6.47	5.29	7.18	1.0871	0.38
16	10.29	9.15	9.23	10.99	7.27	5.41	8.20	9.20	8.72	1.6440	0.58
17	7.50	8.36	4.47	5.27	7.29	8.12	6.51	5.72	6.66	1.3114	0.46
18	6.66	4.77	8.35	8.30	2.31	3.83	6.23	6.68	5.89	1.9845	0.70
19	5.43	6.45	4.65	6.08	4.25	3.21	5.00	7.60	5.33	1.2851	0.45
20	8.34	9.75	7.32	6.57	8.09	8.10	9.23	7.42	8.10	0.9662	0.34

ตารางที่ 4.15 มุมสัมผัสเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 30 s

10.73±1.11	9.55±0.62	6.78±0.43	9.20±0.75	11.89±0.68
10.30±0.30	6.28±0.38	5.10±0.28	5.50±0.66	8.35±0.49
7.30±0.54	7.22±0.26	5.05±0.24	4.89±0.33	7.18±0.38
8.72±0.58	6.66±0.46	5.89±0.70	5.33±0.45	8.10±0.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ความสามารถในการทำซ้ำและผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาด

จากข้อสรุปของการทดลองเรื่องความทั่วถึงในการทำความสะอาดของพลาสติกในหัวข้อที่ 4.3 ทำให้ทราบว่าระบบพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย มีประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูงที่สุดคือ บริเวณตรงกลางของตัวอย่างการทดลองกับบริเวณใกล้เคียงเท่านั้น ซึ่งในที่นี้คือตำแหน่งที่ 7 8 9 12 13 และ 14 การวิเคราะห์ข้อมูลในหัวข้อที่ 4.4 เป็นการนำข้อมูลจากตำแหน่งที่ 7 8 9 12 13 และ 14 ของการทดลองในหัวข้อ 4.3 มาวิเคราะห์ต่อ โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งส่วนแรกจะเป็นการวิเคราะห์ว่ากระบวนการทำความสะอาดด้วยระบบทำความสะอาดด้วยพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย เป็นกระบวนการที่สามารถทำซ้ำได้หรือไม่ และส่วนที่สองคือการศึกษาค่าผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาด

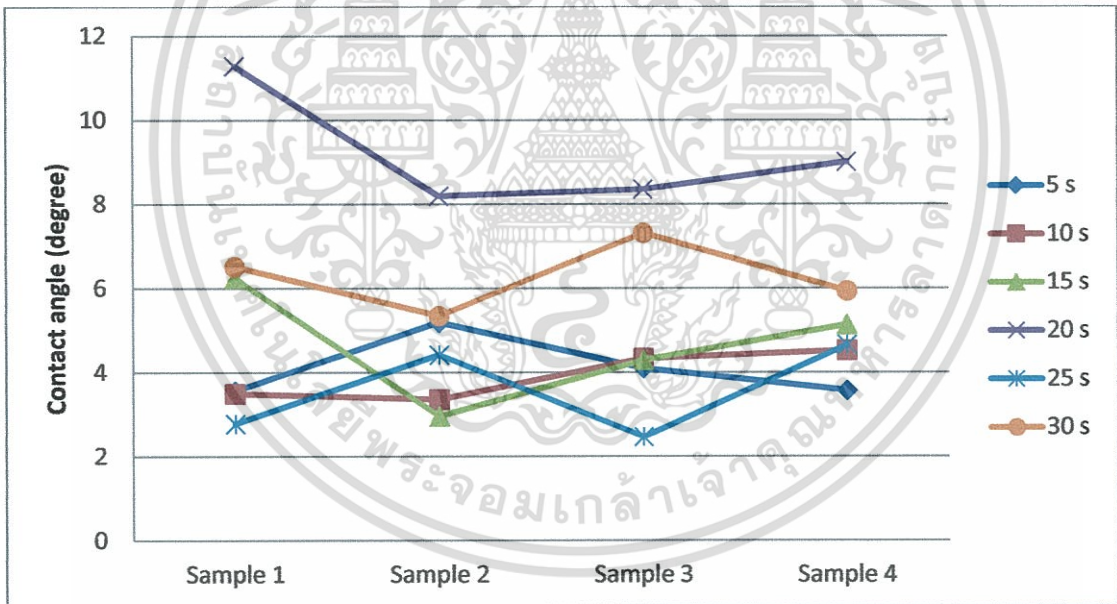
##### 1) ความสามารถในการทำซ้ำของระบบทำความสะอาด

การวิเคราะห์ทำโดยการนำข้อมูลมวมสัมพันธ์ของแต่ละตำแหน่งบนแผ่นซีลิกอน ทั้ง 4 แผ่นจากตารางที่ 4.4 ถึง 4.15 มาเขียนเป็นกราฟ เพื่อดูคุณสมบัติในการทำซ้ำของพลาสติก ข้อมูลของการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.16 ถึง 4.21 จากนั้นจึงนำข้อมูลมาเขียนเป็นกราฟก็จะ ได้กราฟดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.10

จากตารางที่ 4.16 ถึง 4.21 และรูปที่ 4.5 ถึง 4.10 เมื่อวิเคราะห์ความสามารถในการทำซ้ำของระบบทำความสะอาดพบว่าตำแหน่งที่ 7 9 12 และ 14 มีประสิทธิภาพในการทำซ้ำไม่ดัดนักเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่ 8 และ 13 เพราะจากการทดลองที่เวลาต่างๆกัน 6 ค่า ทำซ้ำค่าละ 4 ครั้ง ในการวัดแต่ละเงื่อนไขเกือบทุกครั้งที่ต้องมีการวัดหนึ่งถึงสองครั้ง ที่ค่าของมวมสัมพันธ์ของการวัดแต่ละครั้งมีค่าที่แตกต่างกันมากซึ่งในบางตำแหน่งค่ามวมสัมพันธ์มากที่สุดกับต่ำสุดมีค่าห่างกันถึง 4.5 องศา ต่างกับตำแหน่งที่ 8 และ 13 ที่ค่าของมวมสัมพันธ์ในเงื่อนไขเดียวกัน ทุกครั้งที่วัดจะมีค่าที่แตกต่างกัน ไม่มากโดยมีค่าต่ำกว่า 3 องศา แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่โคนพลาสติกอย่างสม่ำเสมอทุกครั้งมีเพียงตำแหน่งที่ 8 และ 13 ที่เป็นตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นซีลิกอน เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผ่นซีลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยเทคนิคต่างๆต่อจากนี้ไป จะวิเคราะห์ข้อมูลจากตำแหน่งกึ่งกลางและบริเวณรอบๆจุดกึ่งกลางเท่านั้น

ตารางที่ 4.16 ข้อมูลการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนตำแหน่งที่ 7

Position 7				
Treated time	Contact angle (degree)			
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
5 s	3.56	5.19	4.10	3.57
10 s	3.50	3.36	4.34	4.53
15 s	6.25	2.96	4.30	5.14
20 s	11.29	8.20	8.36	9.01
25 s	2.78	4.42	2.47	4.66
30 s	6.52	5.35	7.32	5.94

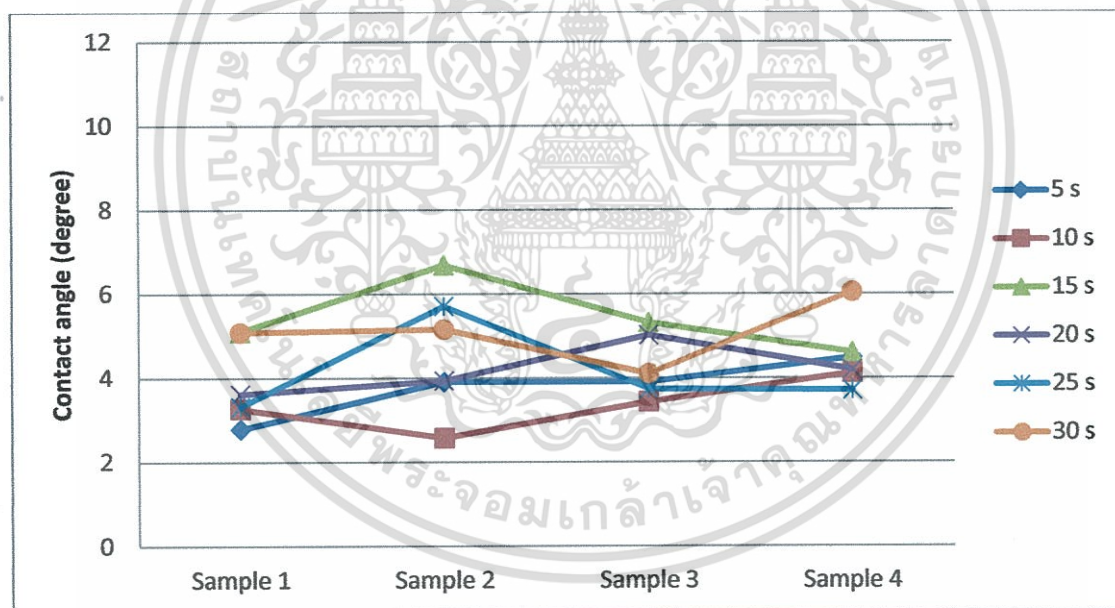


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ข้อมูลการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนตำแหน่งที่ 8

Position 8				
Treated time	Contact angle (degree)			
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
5 s	2.79	3.91	3.91	4.49
10 s	3.27	2.58	3.44	4.12
15 s	5.10	6.69	5.32	4.61
20 s	3.62	3.94	5.02	4.20
25 s	3.32	5.71	3.74	3.71
30 s	5.09	5.16	4.11	6.05

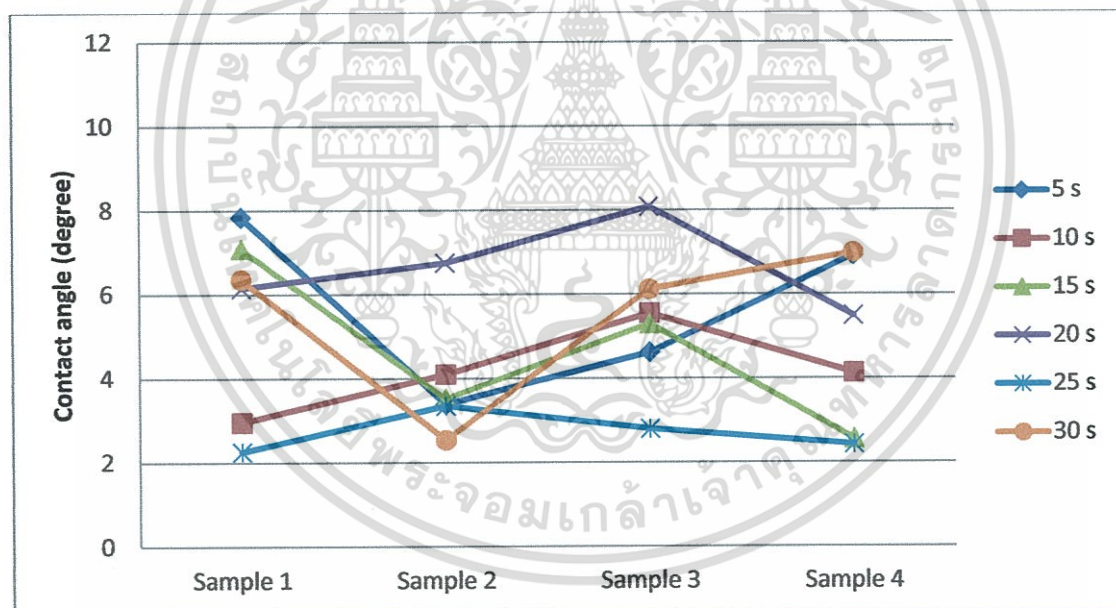


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ข้อมูลการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนตำแหน่งที่ 9

Position 9				
Treated time	Contact angle (degree)			
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
5 s	7.84	3.39	4.62	6.92
10 s	2.96	4.10	5.55	4.13
15 s	7.09	3.52	5.30	2.56
20 s	6.15	6.75	8.08	5.49
25 s	2.26	3.35	2.80	2.43
30 s	6.36	2.54	6.12	6.99

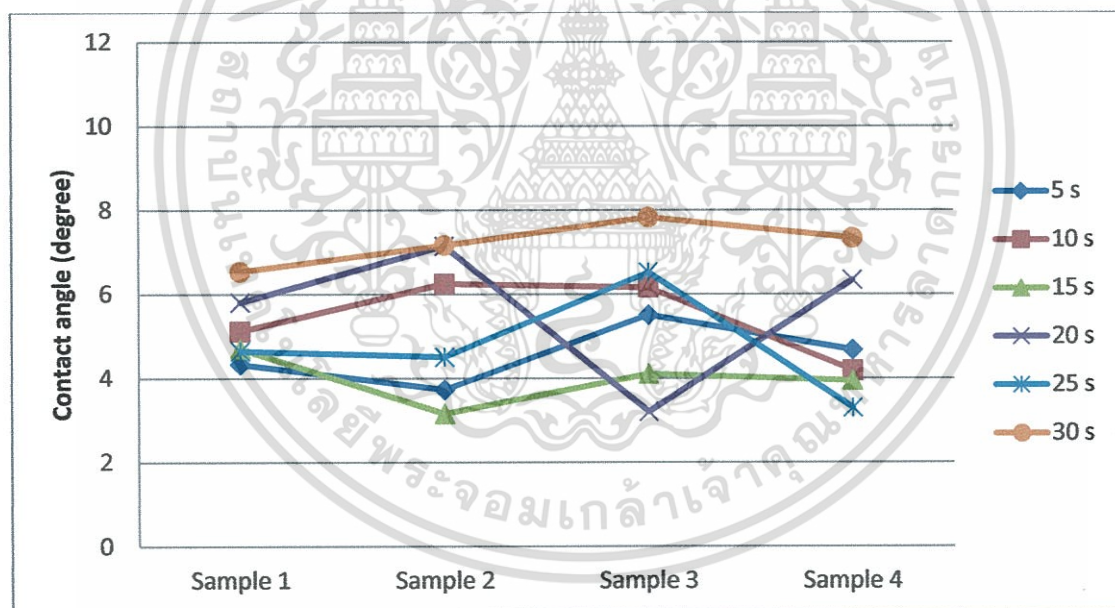


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 ข้อมูลการทำความสะอาดแผ่นซีลิกอนตำแหน่งที่ 12

Position 12				
Treated time	Contact angle (degree)			
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
5 s	4.34	3.73	5.51	4.68
10 s	5.12	6.25	6.16	4.19
15 s	4.71	3.16	4.11	3.95
20 s	5.81	7.15	3.21	6.34
25 s	4.65	4.51	6.52	3.30
30 s	6.54	7.17	7.83	7.34

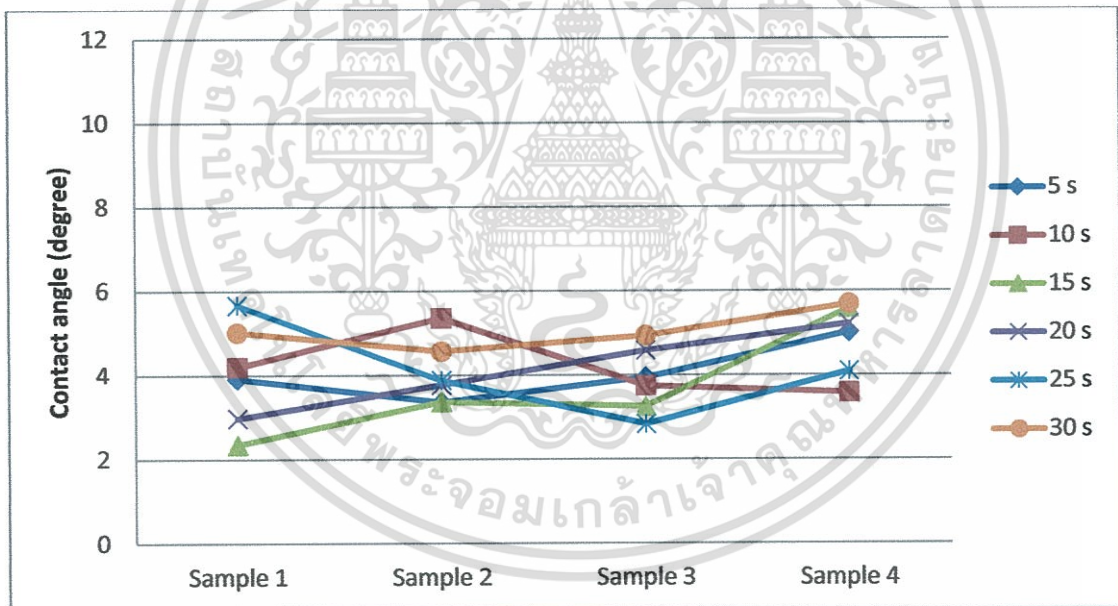


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 ข้อมูลการทำความสะอาดแผ่นซีลิกอนตำแหน่งที่ 13

Position 13				
Treated time	Contact angle (degree)			
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
5 s	3.92	3.36	3.95	5.02
10 s	4.20	5.36	3.75	3.58
15 s	2.35	3.37	3.26	5.59
20 s	2.98	3.77	4.59	5.22
25 s	5.67	3.88	2.84	4.09
30 s	5.02	4.57	4.94	5.69

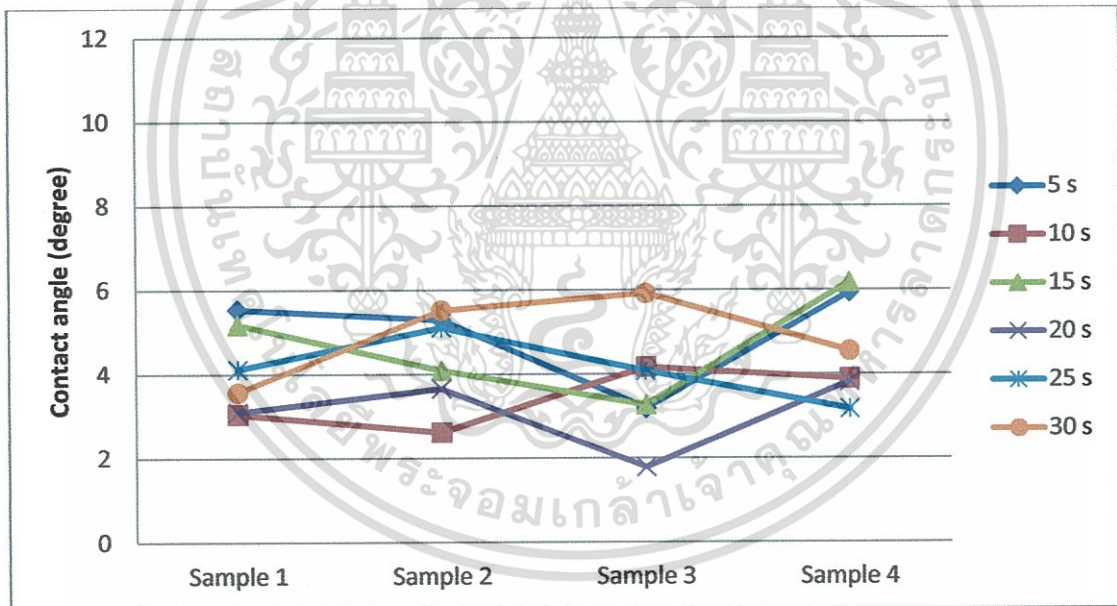


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 ข้อมูลการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนตำแหน่งที่ 14

Position 14				
Treated time	Contact angle (degree)			
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
5 s	5.54	5.29	3.19	5.94
10 s	3.05	2.62	4.17	3.89
15 s	5.18	4.09	3.27	6.18
20 s	3.10	3.66	1.79	3.82
25 s	4.12	5.11	4.08	3.17
30 s	3.57	5.52	5.92	4.55



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 14

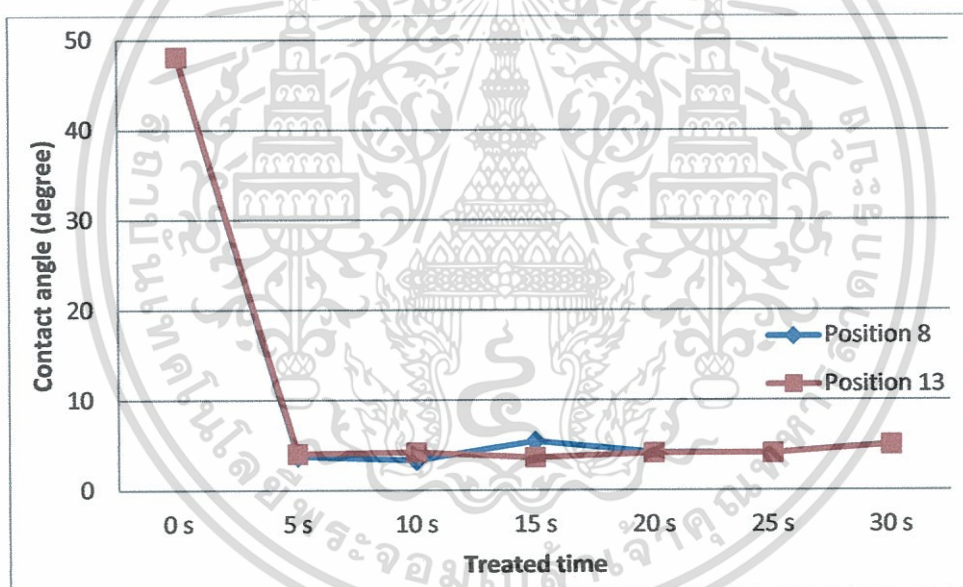
## 2) ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาด

ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลของเวลาที่ใช้ในการทำทำความสะอาด การวิเคราะห์ทำได้โดยการ นำค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3 ของตำแหน่งที่ 8 และ 13 ที่เวลาต่างๆ มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของมุมสัมผัสกับเวลาที่ใช้ในการทำทำความสะอาด โดยจะได้ข้อมูลดังตารางที่ 4.22 และเมื่อนำข้อมูลเขียนกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของตำแหน่งที่ 8 และ 13

Treated time	Contact angle (degree)	
	Position 8	Position 13
0 s	48.12	48.12
5 s	3.78	4.06
10 s	3.35	4.22
15 s	5.43	3.64
20 s	4.20	4.14
25 s	4.12	4.12
30 s	5.10	5.06



รูปที่ 4.11 ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาดสำหรับตำแหน่งที่ 8 และ 13

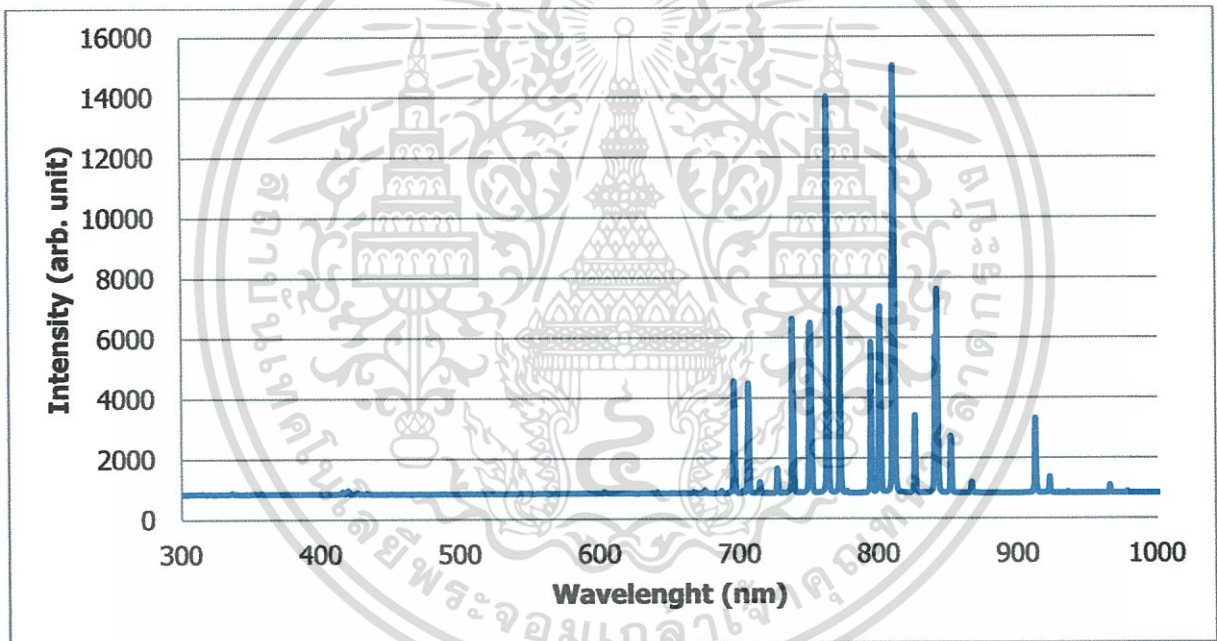
จากรูปที่ 4.11 มุมสัมผัสมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วใน 5 s แรกของการทำความสะอาด และเมื่อเพิ่มเวลาทำความสะอาดเป็น 10 s มุมสัมผัสที่วัดได้ก็มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จึงเพิ่มเวลาเป็น 15 s พบว่าที่ตำแหน่งที่ 8 มุมสัมผัสที่วัดได้มีค่าสูงขึ้นจาก 3.35° ไปเป็น 5.43° และลดลงเหลือ 4.20° เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 20 s ต่างจากตำแหน่งที่ 13 ที่มุมสัมผัสมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากตลอดการทดลองตั้งแต่เวลา 5 s ถึง 25 s จากนั้นแม้จะทดลองใช้เวลาในการทำความสะอาดมากขึ้นถึง 30 s มุมสัมผัสที่วัดได้ก็ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการทำความสะอาดด้วยระบบทำความสะอาดด้วยพลาสมาในปัจจุบันคือไม่เกิน 30 s เพราะแม้จะเพิ่มเวลาให้มากขึ้นก็ไม่ได้ช่วยให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดดีขึ้น ส่วนชนิดและปริมาณสารปนเปื้อนที่เหลือยู่บนพื้นผิวจะถูกวัดและวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AES เปรียบเทียบกับมุมสัมผัสในการทดลองต่อไป

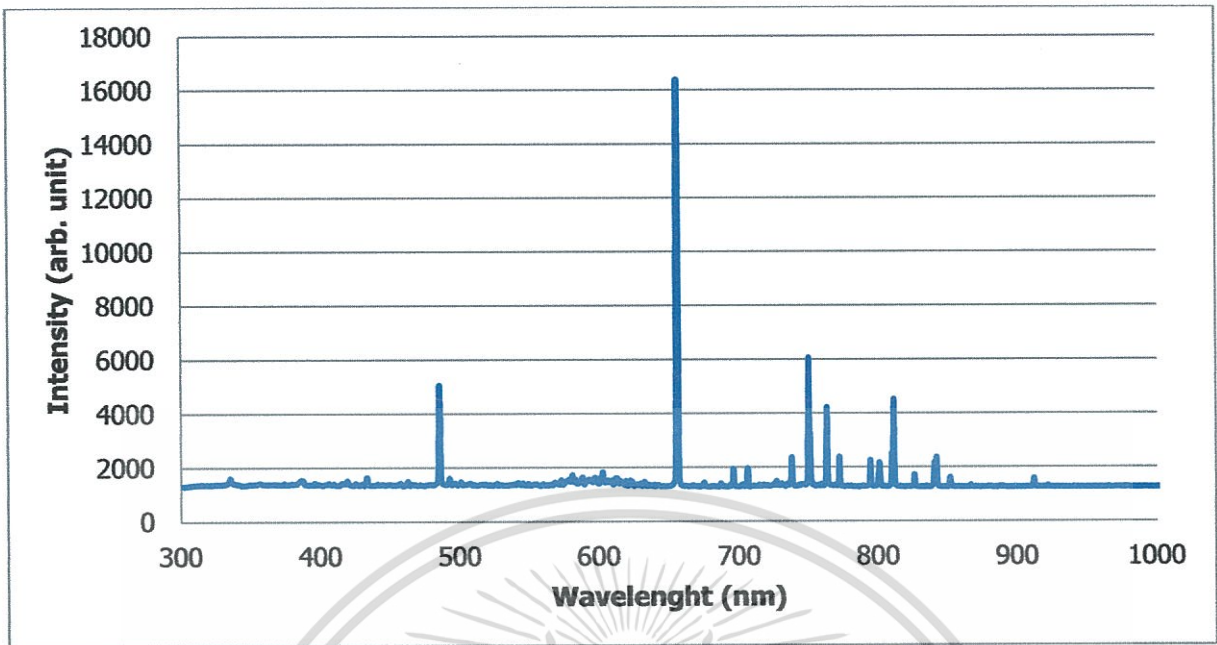
#### 4.5 OES ของพลาสมา

พลาสมาที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สชนิดต่างๆ จะเปล่งแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นเฉพาะตัวของแก๊สแต่ละชนิดออกมาก เพราะฉะนั้นเมื่อนำเทคนิคการวัด OES มาใช้ จึงสามารถรู้ได้ถึงชนิดของแก๊สที่แตกตัวจากสเปกตรัมที่วัดได้ และสามารถรู้ปริมาณของแก๊สที่แตกตัวเป็นพลาสมาได้จากความเข้มของแสงที่เปล่งออกมา



รูปที่ 4.12 ตัวอย่าง OES ของพลาสมาของแก๊สอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ตัวอย่าง OES ของพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอน/ไฮโดรเจน

รูปที่ 4.12 เป็นตัวอย่างสเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากแก๊สอาร์กอนที่อัตราการไหลเป็น 10 sccm จะเห็นว่าสเปกตรัมของแก๊สอาร์กอนนั้นอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 700 nm ถึง 900 nm

รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการผสมแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไฮโดรเจน โดยอัตราการไหลของอาร์กอนเป็น 10 sccm และไฮโดรเจนเป็น 20 sccm เทียบเป็นอัตราส่วนจะได้ว่าอัตราส่วนระหว่างอาร์กอนกับไฮโดรเจนเป็น 1 ต่อ 2 ซึ่งจากรูปจะเห็นสเปกตรัมของไฮโดรเจนที่ความยาวคลื่น 655.29 nm และ 485.32 nm เพิ่มขึ้นมา เรียกสเปกตรัมของไฮโดรเจนนี้ว่า ไฮโดรเจนอัลฟา ( $H_{\alpha}$ ) และไฮโดรเจนเบต้า ( $H_{\beta}$ )ตามลำดับ เมื่อดูสเปกตรัมของอาร์กอนจะเห็นว่าปริมาณความเข้มของอาร์กอนลดลงเนื่องจากพลาสมาผสมของอาร์กอน/ไฮโดรเจน จะเป็นการใช้อะตอมบางส่วนของอาร์กอนที่ถูกกระตุ้นเคลื่อนที่เข้าไปชนกับอะตอมของไฮโดรเจนและเกิดการถ่ายเทพลังงานขึ้น โดยกระบวนการนี้จะเกิดเข้าไปเข้ามา จนทำให้อะตอมของไฮโดรเจนเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา จึงเป็นเหตุให้อะตอมของอาร์กอนแตกตัวเป็นพลาสมาน้อยลง

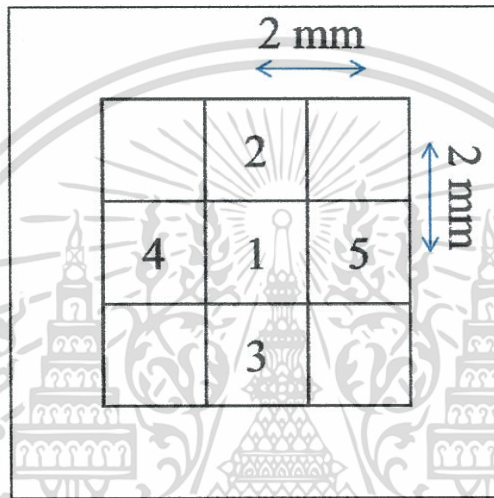
#### 4.6 ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของระบบทำความสะอาด

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองเพื่อดูประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของระบบทำความสะอาดด้วยพลาสมา โดยจะใช้เทคนิคการวัดมุมสัมผัสควบคู่ไปกับวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค AES เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบทำความสะอาด และประเมินความสะอาดของพื้นผิว ซึ่งผลจากการวัดและวิเคราะห์ของทั้ง 2 เทคนิคนี้ควรจะสอดคล้องกัน คือเมื่อวิเคราะห์ด้วย AES แล้วหากพบว่าแผ่นซิลิกอนสะอาด ข้อมูลของมุมสัมผัสที่วัดได้ก็ควรที่จะมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับข้อมูลของแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการเอทซิงนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำความสะอาด การทดลองแบ่งเป็น 2 หัวข้อคือ การทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนและการทำความสะอาดด้วยพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและไฮโดรเจน

#### 4.6.1 การเก็บข้อมูลของการทดลอง

ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดมุมสัมพัทธ์และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AES แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 โดยจะวัดทั้งหมด 5 ตำแหน่งคือจุดกึ่งกลางของแผ่นซิลิกอน และบริเวณรอบๆจุดกึ่งกลางโดยเว้นระยะห่างออกมาจากจุดกึ่งกลาง 2 mm ทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง และนำค่าที่วัดได้จากทั้ง 5 จุดมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4.14 ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดมุมสัมพัทธ์ และวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค AES

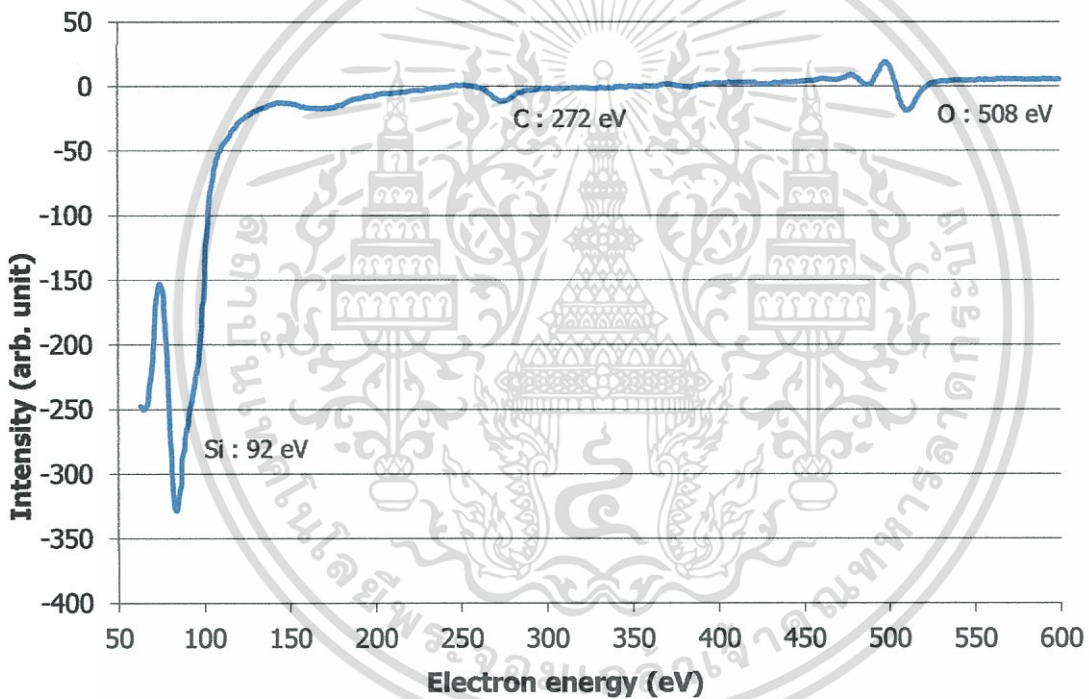
#### 4.6.2 สารปนเปื้อนบนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ได้ทำความสะอาด (Untreated Si)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การยืนยันประสิทธิภาพในการทำความสะอาดทำได้โดยการนำข้อมูลความสะอาดของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาดไปเปรียบเทียบกับความสะอาดของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้ว ด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมพัทธ์และการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค AES

ตารางที่ 4.23 แสดงมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้โดยมีค่าเฉลี่ย  $48.37^\circ$  ตัวอย่างข้อมูลของ AES ที่ได้มา จะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นพีคของสัญญาณอยู่ 3 พีคคือ ซิลิกอน (Si : 92 eV) คาร์บอน (C : 272 eV) และออกซิเจนที่ไปก่อตัวเป็นออกไซด์อยู่บนพื้นผิว (O : 508 eV) จากนั้นเพื่อความง่ายในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ ข้อมูลที่ผ่านการหาค่าเฉลี่ยแล้วจากเทคนิค AES จะถูกนำมาปรับเทียบข้อมูล (normalize) โดยการทำให้ปริมาณของซิลิกอน มีค่าเป็น 100 หน่วยก่อน จากนั้นจึงวิเคราะห์ปริมาณของสารปนเปื้อนแต่ละชนิดที่อยู่บนพื้นผิว ตารางที่ 4.24 เป็นข้อมูลองค์ประกอบบนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด โดยสารปนเปื้อนที่พบบนพื้นผิวมีอยู่สองชนิดคือคาร์บอน และออกซิเจน พบว่าปริมาณของคาร์บอนและออกไซด์เป็น 7.1 หน่วย และ 21.3 หน่วย ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 ข้อมูลมุมสัมผัสของแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมา

Position	Contact angle (degree)		
	L	R	Average
1	47.37	47.39	47.38
2	51.18	48.18	49.68
3	48.21	45.94	47.08
4	50.01	48.63	49.32
5	48.4	48.37	48.39
<b>Total</b>			48.37



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างกราฟ AES ของแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด

ตารางที่ 4.24 ข้อมูลของชนิดและปริมาณขององค์ประกอบบนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด

Condition	Intensity (arb. unit)		
	Si	C	O
Untreated Si	100.0	7.1	21.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.6.3 การทำความสะอาดด้วยอาร์กอนพลาสมา

#### 4.6.3.1 พารามิเตอร์ของอาร์กอนพลาสมา

การทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊ส อาร์กอนจะเป็นการทำความสะอาดด้วยอัตรกิริยาทางฟิสิกส์ โดยจะใช้อะตอมที่แตกตัวเป็น ไอออนของแก๊สอาร์กอนเคลื่อนเข้าชนพื้นผิวเพื่อเกาะเกาะเอาสารปนเปื้อนออกไปด้วยกระบวนการสปัตเตอริง พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอาร์กอนพลาสมามีดังนี้

- ความดัน (pressure)
- กำลังของแมกนีตรอน (magnetron power)
- เวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด (treatment time)

การทดลองในหัวข้อนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อปรับพารามิเตอร์ของความดันและกำลังของแมกนีตรอน เพื่อหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของความดันและกำลังของแมกนีตรอน จากนั้นจึงค่อยทดลองทำความสะอาดที่เวลาต่างๆด้วยเงื่อนไขของความดันและกำลังของแมกนีตรอนที่ดีที่สุด

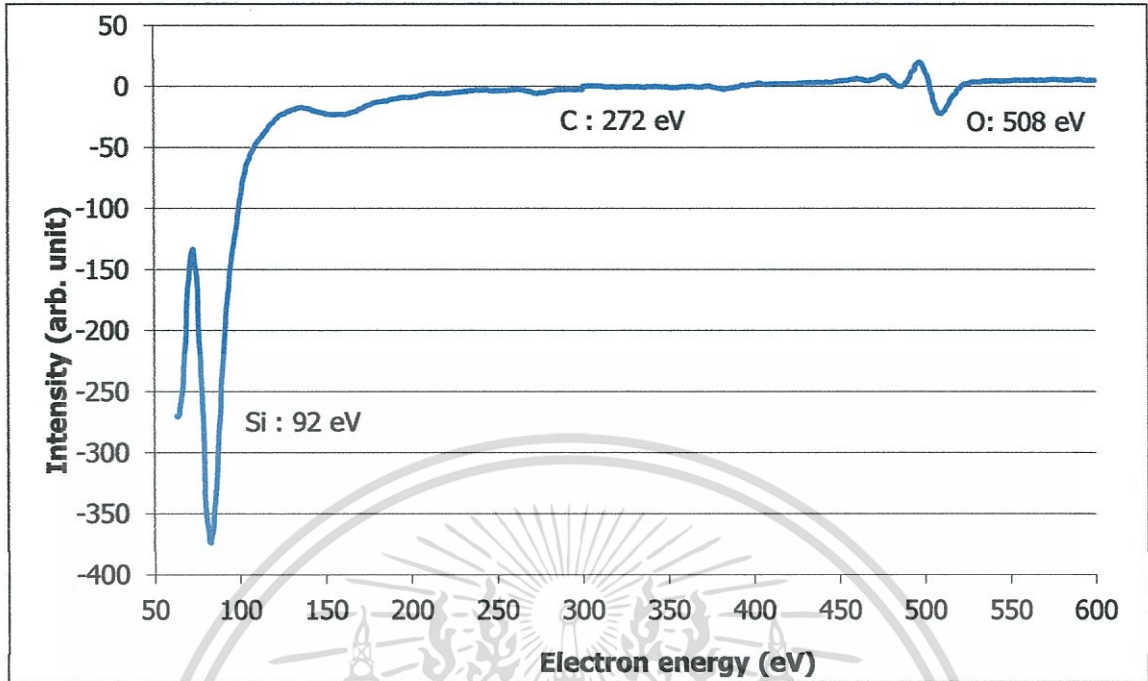
#### 1) ผลของความดันและกำลังของคลื่นไมโครเวฟ

เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 4.25 ซึ่งจะใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 s ตลอดทุกการทดลอง และระยะห่างระหว่างสารตัวอย่างกับปลายท่อพลาสมาคงที่อยู่ที่ 5 mm โดยใช้เงื่อนไขที่ 1 เป็นเงื่อนไขขั้นต่ำสุดในการให้กำเนิดพลาสมาของระบบ เพราะหากลดความดันหรือกำลังของแมกนีตรอนลงต่ำกว่านี้ พลาสมาที่กำเนิดออกมาจะไม่เสถียร เนื่องจากอะตอมของแก๊สจะแตกตัวได้ไม่ต่อเนื่องพอ ส่งผลให้อนุภาคต่างๆในพลาสมามีปริมาณไม่คงที่ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดไม่คงที่ เพราะประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของพลาสมาขึ้นกับอนุภาคภายในพลาสมาโดยตรง

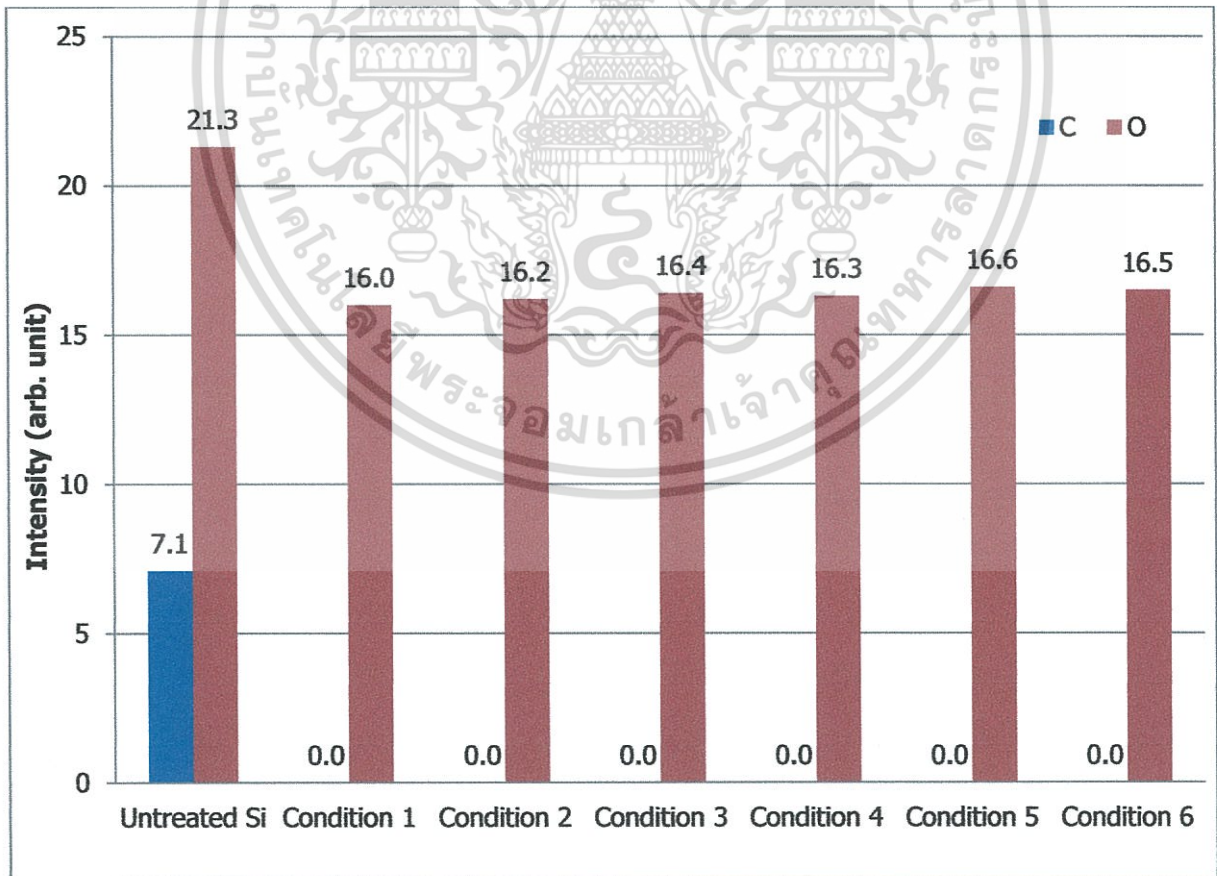
ตารางที่ 4.25 เงื่อนไขพารามิเตอร์ของอาร์กอนพลาสมาที่ใช้ในการทดลอง

Condition	Treatment time	Flow rate	Base pressure	Pressure	Magnetron power
1	30 s	15 sccm	0.006 Torr	0.450 Torr	580 W
2				0.450 Torr	690 W
3				0.600 Torr	580 W
4				0.600 Torr	690 W
5				1.000 Torr	580 W
6				1.000 Torr	690 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างสเปกตรัมของ AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาด



รูปที่ 4.17 ข้อมูล AES แสดงส่วนประกอบและปริมาณเฉลี่ยของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนหลัง

เอกสารนี้เป็นผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยอาร์กอนพลาสมาเงื่อนไขต่างๆ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.16 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของ AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยอาร์กอนพลาสมา จะเห็นว่าหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยอาร์กอนพลาสมาแล้ว สัญญาณของคาร์บอนจะหายไป เหลือเพียงซิลิกอนและออกซิเจนเท่านั้น

เมื่อนำข้อมูลของ AES ไปปรับเทียบให้ปริมาณของซิลิกอนเป็น 100 หน่วย จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ผ่านการปรับเทียบแล้ว ไปเขียนเป็นกราฟแท่งดังรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าทุกเงื่อนไขสามารถกำจัดสารปนเปื้อนประเภทคาร์บอนออกไปได้ทั้งหมด แต่สามารถกำจัดออกไซด์ที่อยู่บนพื้นผิวออกไปได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแม้จะทดลองปรับพารามิเตอร์โดยการเพิ่มความดันหรือกำลังของแมกนีตรอนเข้าไปก็ไม่อาจช่วยให้กำจัดสารปนเปื้อนประเภทออกไซด์ออกไปได้ดีขึ้น เพราะฉะนั้นเนื่องจากการเพิ่มความดันและกำลังของแมกนีตรอนเข้าไป ไม่ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนประเภทออกไซด์ให้ดีขึ้น เพราะฉะนั้นเงื่อนไขของพลาสมาที่ดีที่สุดของตอนนี้คือเงื่อนไขที่ 1 เนื่องจากเป็นเงื่อนไขที่มีความดันและกำลังของคลื่นไมโครเวฟต่ำที่สุด ซึ่งการเพิ่มความดันจะทำให้แก๊สเกิดการแตกตัวมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของพลาสมาสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิกายในห้องสุญญากาศสูงขึ้น ซึ่งหากระบบทำงานที่อุณหภูมิสูง ต่อเนื่องไปนานๆจะทำให้ยางที่ใช้ในการซีลระบบสุญญากาศเสียหาย ส่งผลให้ระบบไม่สามารถคงสภาพสุญญากาศเอาไว้ได้นอกจากนี้เพิ่มความดันมากเกินไปยังทำให้เกิดแตกตัวเป็นพลาสมาได้น้อยลง เพราะความดันที่สูงเกินไปจะทำให้ระยะการเคลื่อนที่เฉลี่ยของอิเล็กตรอนมีค่าลดลง ส่งผลให้พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนลดลงตาม ซึ่งหากเพิ่มความดันเข้าไป พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะลดลงไปเรื่อยๆจนไม่สามารถทำให้เกิดแตกตัวได้ ส่วนการเพิ่มกำลังของแมกนีตรอนนั้นส่งผลให้เกิดแตกตัวมากขึ้นเนื่องจากพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนสูงขึ้น เป็นเหตุให้อุณหภูมิของพลาสมาสูงขึ้น

## 2) ผลของเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน โดยใช้เวลาในการทำความสะอาดที่แตกต่างกัน เพื่อดูว่าควรใช้เวลาในการทำความสะอาดเท่าใดที่ให้ความสะอาดสูงสุดและใช้เวลาทำความสะอาดน้อยที่สุด พารามิเตอร์ของพลาสมาที่ใช้ในการทำความสะอาดแสดงไว้ดังตารางที่ 4.26 โดยจะเป็นการทดลองทำความสะอาดโดยใช้เวลา 5 s 30 s และ 1800 s (30 min.)

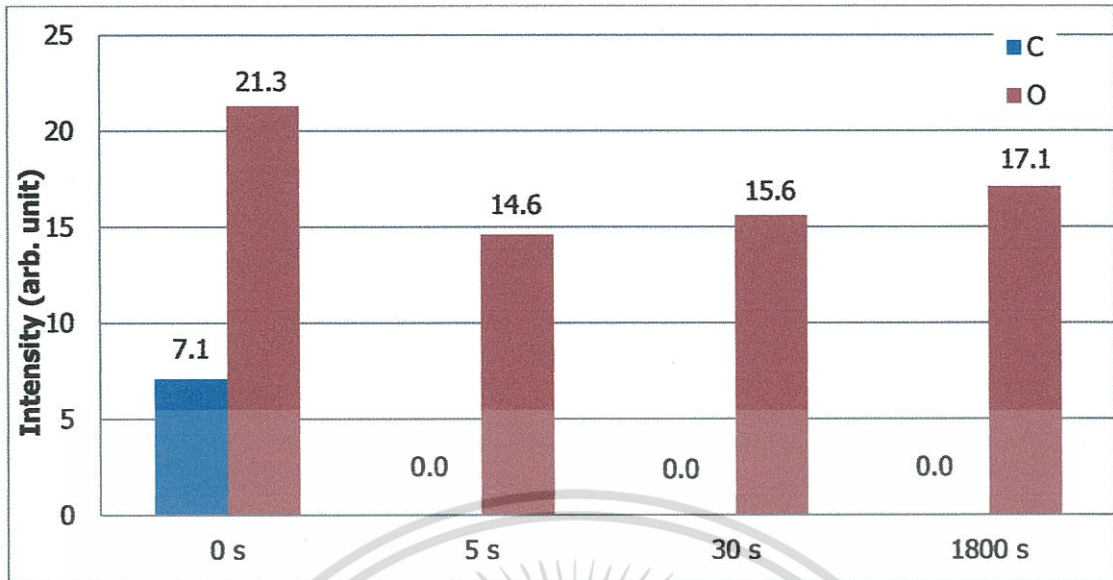
ตารางที่ 4.26 พารามิเตอร์ของอาร์กอนพลาสมาที่ใช้ในการทดลอง

<b>Working gas</b>	Ar
<b>Flow rate</b>	15 sccm
<b>Base pressure</b>	0.006 Torr
<b>Plasma-Chamber pressure</b>	0.450 Torr
<b>Magnetron power</b>	580 W
<b>Distance form plasma tube</b>	5 mm
<b>Treatment time</b>	5 s , 30 s , 1800 s

ผลการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนด้วยอาร์กอนพลาสมาจะถูกวัดและประเมินความสะอาดด้วยการวัดมุมสัมผัส และการวัดด้วยเทคนิค AES โดยตารางที่ 4.27 แสดงข้อมูลของมุมสัมผัสเฉลี่ยของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนที่เวลาต่างๆ ข้อมูลของ AES จะถูกนำมาเปรียบเทียบให้ปริมาณของซิลิกอนกลายเป็น 100 หน่วย จากนั้นจึงนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.27 มุมสัมผัสเฉลี่ยบนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยพลาสมาที่เวลาต่างๆ

<b>Treated time</b>	<b>Contact angle (degree)</b>
0 s	48.37
5 s	3.71
30 s	4.38
1800 s	4.30



รูปที่ 4.18 ข้อมูล AES แสดงส่วนประกอบและปริมาณเฉลี่ยของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมาที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.26 แสดงค่าของมุมสัมผัสเฉลี่ยของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมา ซึ่งจะเห็นว่ามุมสัมผัสมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วจาก  $48.37^\circ$  เป็น  $3.71^\circ$  ตั้งแต่ 5 s แรกของการทำความสะอาด และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น  $4.38^\circ$  และ  $4.30^\circ$  เมื่อเพิ่มเวลาทำความสะอาดเป็น 30 s และ 1800 s รูปที่ 4.18 แสดงข้อมูลของ AES ที่ผ่านการปรับเทียบให้ปริมาณของซิลิกอนเป็น 100 หน่วยแล้วของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนที่เวลา 5 s 30 s และ 1800 s จะเห็นว่าคาร์บอนได้ถูกกำจัดออกไปหมดตั้งแต่เวลา 5 s ส่วนออกไซด์บนพื้นผิวมีปริมาณลดลงจาก 21.3 หน่วย เป็น 14.6 หน่วย จึงได้เพิ่มเวลาในการทำความสะอาดเข้าไป พบว่าการเพิ่มเวลาเข้าไปมากถึง 1800 s ก็ยังไม่สามารถกำจัดออกไซด์ออกได้ และออกไซด์ยังมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆตามเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดอีกด้วย แสดงว่าการเพิ่มเวลาในการทำความสะอาดเข้าไปนั้นไม่ได้ช่วยในการกำจัดออกไซด์

จากการทดลองในข้อ 4.6.1.2 และ 4.6.1.3 สาเหตุที่พลาสมาของแก๊สอาร์กอนไม่สามารถกำจัดเอาออกไซด์ออกไปได้และการเพิ่มของออกไซด์นี้ในเบื้องต้นสันนิษฐานว่าระบบทำความสะอาดมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในห้องสุญญากาศ เนื่องจากปั๊มสุญญากาศที่ใช้เป็น โรตารีปั๊ม ที่ทำความสะอาดสุญญากาศได้ในระดับ  $10^{-3}$  Torr ซึ่งเป็นความดันที่ยังมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในระบบ และเนื่องจากเมื่อทำความสะอาดด้วยพลาสมา แผ่นซิลิกอนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องมาจากการถ่ายเทพลังงานของอนุภาคในพลาสมา ส่งผลให้ออกซิเจนไปก่อตัวเป็นออกไซด์อยู่บนพื้นผิวได้ง่าย โดยการพิสูจน์ข้อสันนิษฐานนี้จะกระทำในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

#### 4.6.3.2 ความสามารถในการกำจัดออกไซด์และการเกิดออกไซด์

จากหัวข้อ 4.6.1.3 ที่ได้สันนิษฐานไว้ว่าระบบทำความสะอาดที่ใช้ไม่สามารถกำจัดออกไซด์ออกไปได้หมดเพราะมีการก่อตัวของออกไซด์ขึ้น ในขณะที่ทำความสะอาดด้วยพลาสมาเสมอ ส่งผลให้ปริมาณออกไซด์ค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเมื่อใช้เวลาในการทำทำความสะอาดมากขึ้น ในหัวข้อนี้จึงเป็นการทดลองเพื่อพิสูจน์ข้อสันนิษฐานนี้ โดยจะนำเทคนิคการสปัตเตอริง (sputtering) และกระบวนการทำความสะอาดด้วยสารเคมีมาช่วยในการทดลอง การทดลองในหัวข้อนี้จะมีอยู่ 2 แบบ โดยวิธีแรกคือนำแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ได้ทำความสะอาดไปผ่านกระบวนการสปัตเตอริงด้วยลำไอออนเพื่อกำจัดคาร์บอนและออกไซด์บนพื้นผิวออกจนหมดก่อนที่จะนำไปเข้าระบบทำความสะอาดด้วยพลาสมา โดยใช้เวลาในการทำทำความสะอาดเป็น 5 s และ 30 s จากนั้นจึงนำไปวัดองค์ประกอบและปริมาณของธาตุด้วยเทคนิค AES และแบบที่สองคือนำแผ่นซิลิกอนดิบไปผ่านการทำความสะอาดด้วยกรดกัดแก้ว (hydrofluoric acid) เพื่อกำจัดออกไซด์บนพื้นผิวออกไปก่อน แล้วจึงนำไปเข้าระบบทำความสะอาดด้วยพลาสมา โดยใช้เวลาในการทำทำความสะอาดเป็น 5 s และ 30 s เช่นเดียวกัน จากนั้นจึงนำไปวัดวัดองค์ประกอบและปริมาณของธาตุด้วยเทคนิค AES แล้วจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อดูการก่อตัวของออกไซด์บนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนซึ่งถูกกำจัดออกไปก่อนหน้านี้แล้ว

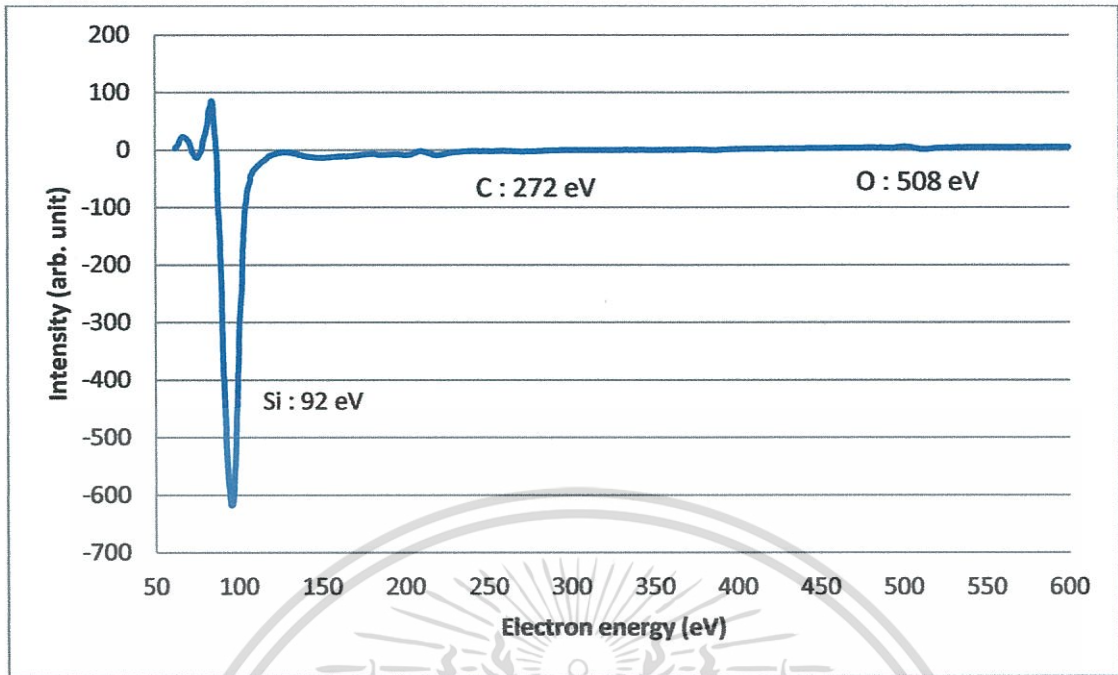
##### 1) การเตรียมพื้นผิวซิลิกอนโดยการสปัตเตอริง (sputtering)

การทำความสะอาดด้วยการสปัตเตอริงเป็นการทำความสะอาดด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยในการทดลองจะใช้ลำไอออนของแก๊สอาร์กอนพุ่งชนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนเพื่อกระแทกเอาสารปนเปื้อนบนพื้นผิวออกไป ในกระบวนการสปัตเตอริงนี้จะใช้เวลาทั้งสิ้น 5 hrs.

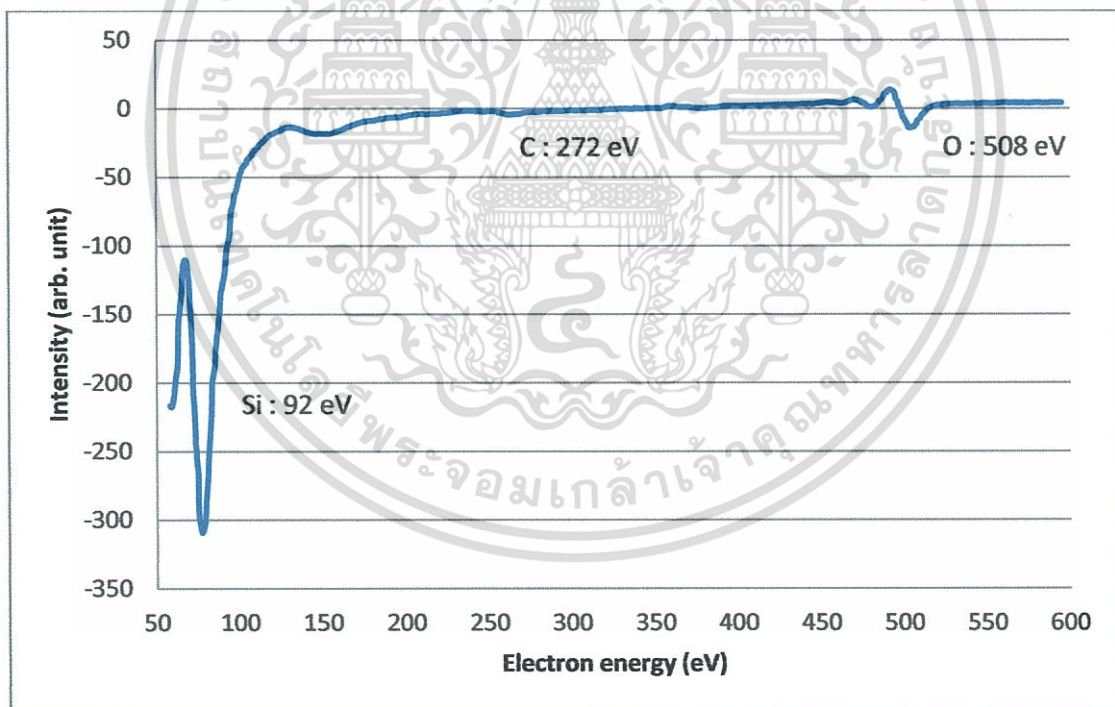
ตารางที่ 4.28 มุมสัมผัสของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการสปัตเตอริงและนำไปทำความสะอาดด้วยพลาสมา

Condition	Contact angle (degree)
Untreated Si	48.37
Si after sputtering	41.10
Si after sputtering + Ar plasma 5 s	33.20
Si after sputtering + Ar plasma 30 s	35.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

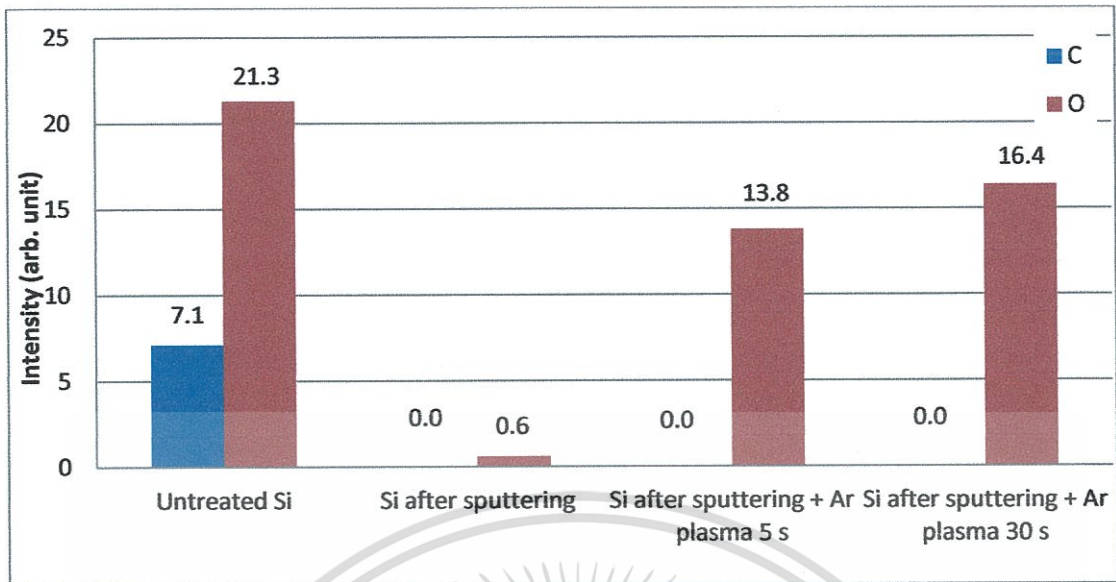


รูปที่ 4.19 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการสัปเดตเตอริง 5 hrs.



รูปที่ 4.20 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการสัปเดตเตอริงและทำความสะอาดด้วยพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ข้อมูล AES แสดงส่วนประกอบและปริมาณของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการสปีดเตอริงและทำความสะอาดด้วยพลาสมาที่เงื่อนไขต่างๆ

ข้อมูลที่ได้จากการวัดมุมสัมผัสที่แสดงในตารางที่ 4.28 พบว่าหลังผ่านการสปีดเตอริงแล้ว มุมสัมผัสมีค่าลดลงจาก  $48.37^\circ$  เป็น  $41.10^\circ$  ซึ่งสาเหตุที่เกิดมุมสัมผัสไม่ต่ำลงมากนัก เป็นเพราะการสปีดเตอริงทำให้พื้นผิวเกิดขรุขระในระดับนาโนเมตรขึ้น ส่งผลให้มุมสัมผัสมีค่ามากขึ้นทั้งที่จากข้อมูล AES ในรูปที่ 4.19 และ 4.21 แสดงให้เห็นว่าหลังกระบวนการสปีดเตอริง คาร์บอนได้ถูกกำจัดออกไปจนหมดเหลือแต่ ออกไซด์ปริมาณเล็กน้อยอยู่บนพื้นผิวเท่านั้น และหลังจากนำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยกระบวนการสปีดเตอริงไปผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมา 5 s และ 30 s ค่าของมุมสัมผัสจะลดลงจาก  $41.10^\circ$  เหลือ  $35.64^\circ$  และ  $33.20^\circ$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากการที่พลาสมาเข้าไปปรับสภาพพื้นผิวให้เรียบขึ้นด้วยกระบวนการทางความร้อน ทำให้มุมสัมผัสมีค่าลดลง ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการสปีดเตอริงและทำความสะอาดด้วยพลาสมาแสดงไว้ดังรูปที่ 4.20 โดยจากรูปจะเห็นว่าหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยพลาสมา จะมีออกไซด์เกิดขึ้นมาจำนวนหนึ่ง ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบให้ปริมาณซิลิกอนเป็น 100 ทำให้ได้กราฟแท่งดังรูปที่ 4.21 โดยจากการทำความสะอาดที่เวลา 30 s จะมีปริมาณออกไซด์ที่สูงกว่ากรณีที่ใช้เวลาในการทำความสะอาดเป็น 5 s และหากนำปริมาณออกไซด์จากรูปที่ 4.21 ไปเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าปริมาณออกไซด์ที่วัดได้ที่เวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดด้วยพลาสมาเท่ากัน มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก โดยที่เวลาในการทำความสะอาดเป็น 5 s ปริมาณออกไซด์บนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนที่ไม่ผ่านการสปีดเตอริงและแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการสปีดเตอริงจะมีค่าเป็น 14.6 และ 13.8 ส่วนปริมาณออกไซด์บนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนที่ใช้เวลาในการทำความสะอาดเป็น 30 s จะมีค่าเป็น 15.6 และ 16.4 ตามลำดับ

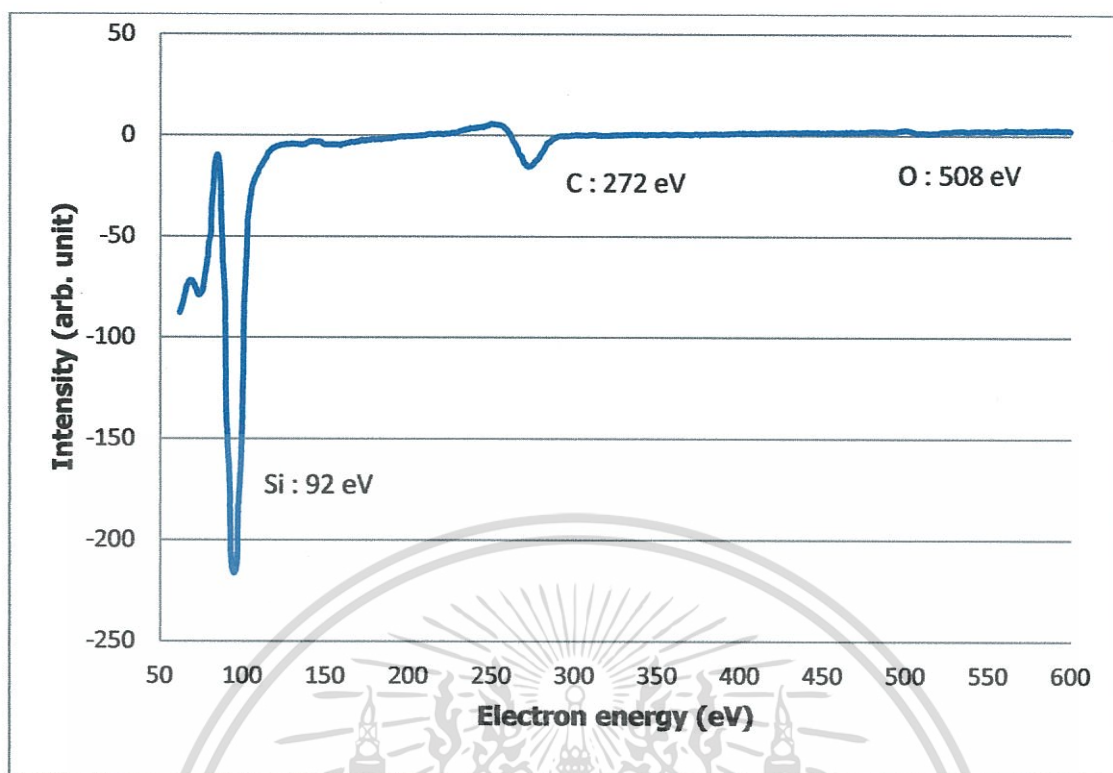
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) การเตรียมพื้นผิวแผ่นซิลิกอนด้วยกระบวนการทางเคมี

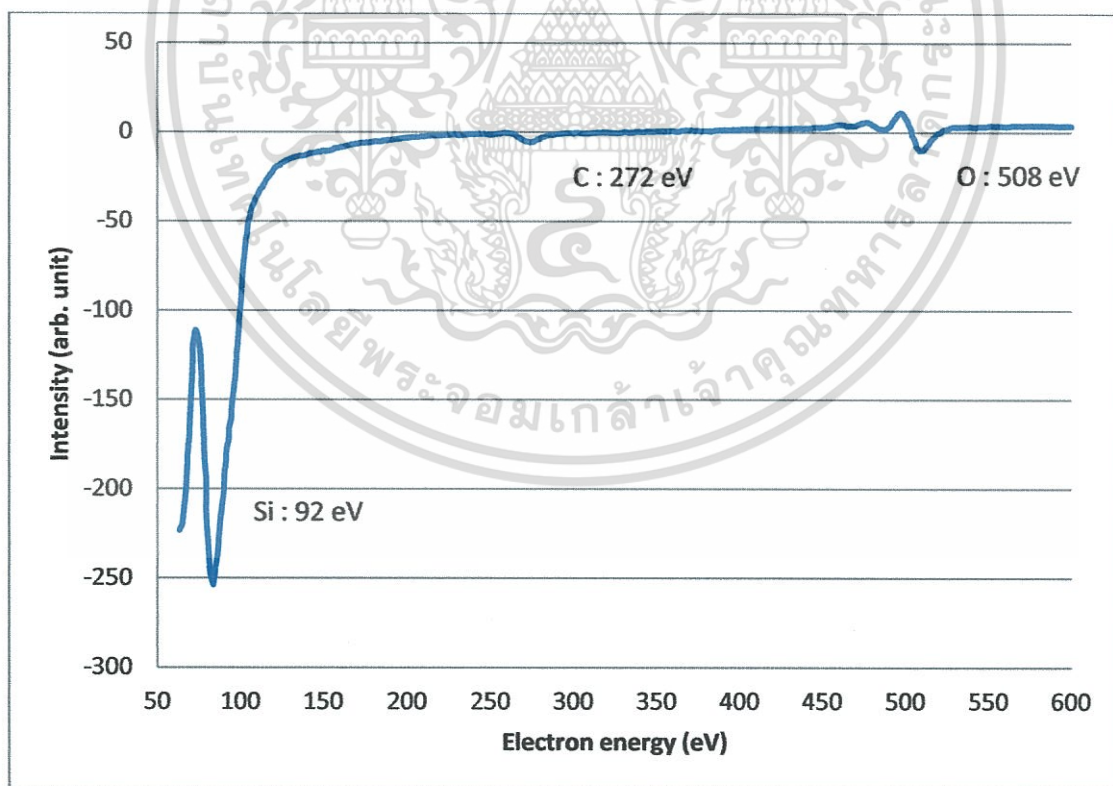
การทำความสะอาดด้วยกระบวนการทางเคมีนี้ จะนำแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ผ่านการทำความสะอาดไปทำความสะอาดด้วยด้วยกรดกัดแก้ว (hydrofluoric acid : HF) เพื่อกำจัดเอาออกไซด์บนพื้นผิวออกไปก่อนที่จะนำไปทำความสะอาดซ้ำด้วยพลาสมา ซึ่งก่อนที่จะนำแผ่นซิลิกอนมาทำความสะอาดด้วยกรดกัดแก้ว จะต้องมีการเตรียมแผ่นซิลิกอนก่อน โดยจะนำแผ่นซิลิกอนไปล้างด้วยอะซิโตน (acetone) ในอ่างอัลตราโซนิค (ultrasonic pool) เป็นเวลา 20 min. เพื่อล้างเอาคราบไขมันหรือรอยนิ้วมือออกไป จากนั้นก็นำไปล้างอะซิโตนที่ตกค้างอยู่ออกไปให้หมดด้วยเมทานอล (methanol) ในอ่างอัลตราโซนิคเป็นเวลา 20 min. และนำไปล้างด้วยน้ำปอดประจุเป็นเวลา 1 min. เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการเตรียมแผ่นซิลิกอน ซึ่งหลังจากเตรียมแผ่นซิลิกอนเสร็จแล้วก็จะนำแผ่นซิลิกอนไปทำความสะอาดด้วยกรดกัดแก้วที่ถูกเจือจางด้วยน้ำปอดประจุ ที่อัตราส่วนของกรดกัดแก้วกับน้ำปอดประจุ (HF : DI water) เป็น 1:20 โดยจะแช่แผ่นซิลิกอนทิ้งไว้เป็นเวลา 5 min. จากนั้นจึงนำแผ่นซิลิกอนไปแกว่งในน้ำปอดประจุเป็นเวลา 10 s เพื่อล้างกรดกัดแก้วออกไป แล้วนำไปเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) และนำแผ่นซิลิกอนไปทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนเป็นเวลา 30 s ข้อมูลมุมสัมผัสหลังการทำทำความสะอาดจะแสดงไว้ดังตารางที่ 4.29 ข้อมูลของ AES จะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.29 ข้อมูลมุมสัมผัสของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยกระบวนการเคมี และนำไปทำความสะอาดซ้ำด้วยพลาสมา

Condition	Contact angle (degree)
Untreated Si	48.37
Si after chemical cleaning	70.19
Si after chemical cleaning + Ar plasma 30 s	30.67

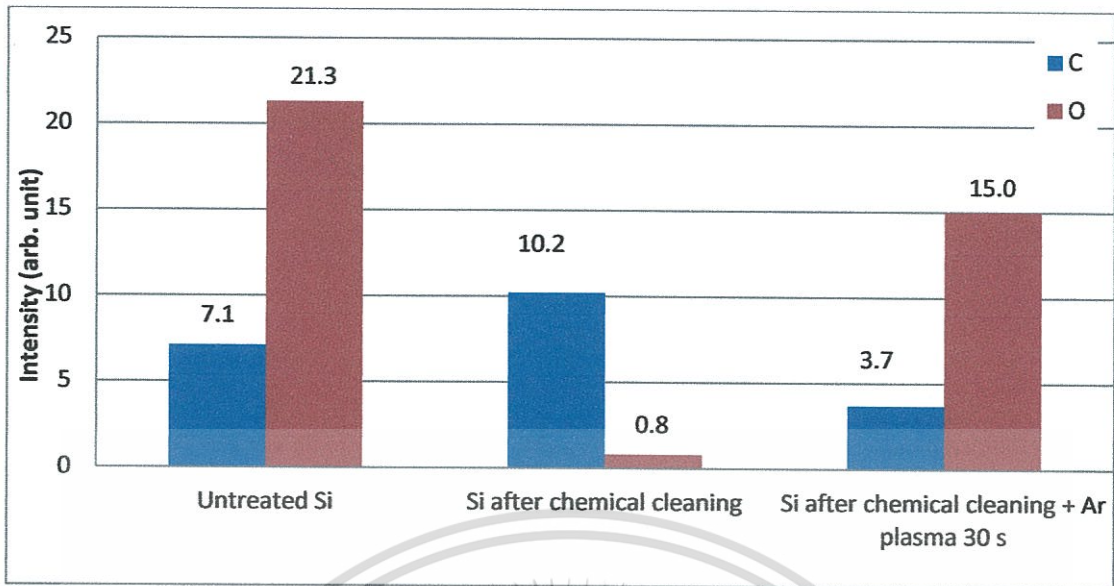


รูปที่ 4.22 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยกระบวนการทางเคมี



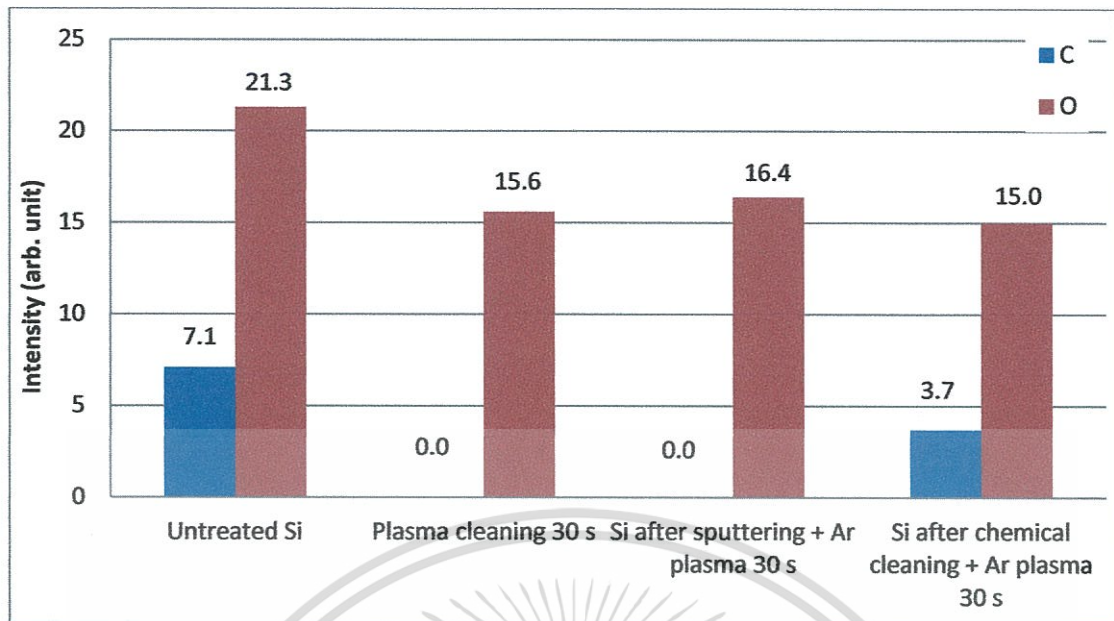
รูปที่ 4.23 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยกระบวนการทางเคมี และนำไปทำความสะอาดซ้ำด้วยพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ข้อมูล AES แสดงส่วนประกอบและปริมาณของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยกระบวนการเคมีและทำความสะอาดซ้ำด้วยพลาสมา

ผลการวัดมุมสัมผัสแสดงไว้ในตารางที่ 4.28 มุมสัมผัสของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยกระบวนการเคมีมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $48.37^\circ$  ถึง  $70.19^\circ$  เป็นผลมาจากกรดกัดแก้วมีฤทธิ์ในการกัดร่อนผิวของซิลิกอน ทำให้พื้นผิวเกิดการขรุขระ มุมสัมผัสจึงมีค่าสูงขึ้นอย่างมาก ต่อมาจึงได้ทดลองนำแผ่นซิลิกอนไปผ่านการทำความสะอาดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 30 s เพื่อกำจัดคาร์บอนออกไป พบว่ามุมสัมผัสลดลงเหลือ  $30.67^\circ$  ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการเตรียมผิวด้วยกระบวนการเคมี และหลังทำความสะอาดพลาสมาซ้ำ แสดงไว้ในรูปที่ 4.22 และ 4.23 โดยจะเห็นว่าหลังผ่านการเตรียมผิว สัญญาณของออกไซด์บนพื้นผิวหายไปทั้งหมด เหลือไว้เพียงคาร์บอนเท่านั้น และหลังจากผ่านการทำความสะอาดด้วยพลาสมา สัญญาณของคาร์บอนได้หายไป แต่ตรวจพบสัญญาณของออกไซด์ขึ้นมาแทน โดยผลการวัด AES หลังผ่านการปรับเทียบให้ปริมาณของซิลิกอนเป็น 100 หน่วย ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าคาร์บอนได้ถูกกำจัดออกไปจนเกือบหมดแต่กลับตรวจพบปริมาณออกไซด์เพิ่มมาจำนวนหนึ่ง ซึ่งเมื่อเอาไปเปรียบเทียบกับปริมาณออกไซด์ในรูปที่ 4.18 และ 4.21 จะมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในหัวข้อก่อนหน้านี้ ที่ตรวจพบออกไซด์จำนวนหนึ่งบนแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการสปีดเตอริงเอาคาร์บอนและออกไซด์ออกไปจนหมดก่อนที่จะนำไปผ่านการทำความสะอาดด้วยพลาสมา



รูปที่ 4.25 ข้อมูล AES เปรียบเทียบส่วนประกอบและปริมาณของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการต่างๆ

เพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบพลาสมาที่ใช้ ก่อให้เกิดออกไซด์ขึ้นบนพื้นผิวเสมอ จึงได้นำข้อมูลของแผ่นซิลิกอนที่กระบวนการต่างๆเปรียบเทียบกันดังในรูปที่ 4.25 ผลคือปริมาณออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมาในกรณีที่น่าแผ่นซิลิกอนไปทำความสะอาดด้วยพลาสมาอย่างเดียวนำไปเปรียบเทียบกับ แผ่นซิลิกอนไปผ่านกระบวนการสปัตเตอร์หรือกระบวนการทำความสะอาดทางเคมีก่อนแล้วจึงทำความสะอาดซ้ำด้วยพลาสมามีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าเป็น 15.6 16.4 และ 15.0 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ระบบทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนของทางผู้วิจัยมีความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนจำพวกคาร์บอน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่สามารถกำจัดออกไซด์ได้ไม่สิ้นก เนื่องจากเมื่อเปิดใช้ระบบทำในกระบวนการทำความสะอาด ตัวระบบก็จะก่อให้เกิดออกไซด์ขึ้นบนพื้นผิวอันเป็นผลพวงมาจากการที่ในระบบยังมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ และการที่หลังทำความสะอาดด้วยพลาสมาเสร็จ ตัวแผ่นซิลิกอนยังคงร้อนอยู่ซึ่งง่ายต่อการที่ออกซิเจนจะมาก่อตัวเป็นออกไซด์ขึ้นบนพื้นผิวใหม่ โดยออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้มีแนวโน้มว่าจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างต่อเนื่องตามเวลาที่ใช้ในการทำทำความสะอาด

#### 4.6.4 การทำความสะอาดด้วยอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมา

##### 4.6.4.1 พารามิเตอร์ของอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมา

จากการทดลองในหัวข้อ 4.6.3 พบว่าระบบทำความสะอาดจะก่อให้เกิดออกไซด์ขึ้นบนพื้นผิวเสมอเมื่อมีการเปิดใช้งาน เป็นเหตุให้ไม่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนประเภทออกไซด์ให้หมดไปจากพื้นผิวได้ ในหัวข้อ 4.6.4 จึงทดลองใช้พลาสมาที่เกิดจากการผสมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจนซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ดูให้เห็นไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สไฮโดรเจนที่ผสมเพิ่มเข้าไปจะมีส่วนช่วยในการใช้ปฏิกิริยาเคมีในการทำความสะอาด โดยอะตอมที่แตกตัวของแก๊สไฮโดรเจนจะไปทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนแล้วหลุดออกมาในรูปของแก๊ส ซึ่งในที่นี้ก็คือสารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอน ( $C_xH_y$ ) และไอน้ำ ( $H_2O$ ) พารามิเตอร์ของพลาสมาที่ใช้ในการทำความสะอาดแสดงไว้ดังตารางที่ 4.29 โดยจะเป็นการทดลองทำความสะอาดโดยใช้เวลา 5 s 30 s และ 1800 s เปรียบเทียบกันการทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊ส พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมา มีดังนี้

- อัตราส่วนระหว่างอาร์กอนกับไฮโดรเจน ( $Ar/H_2$  ratio)
- ความดัน (pressure)
- กำลังของแมกนีตรอน (magnetron power)
- เวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด

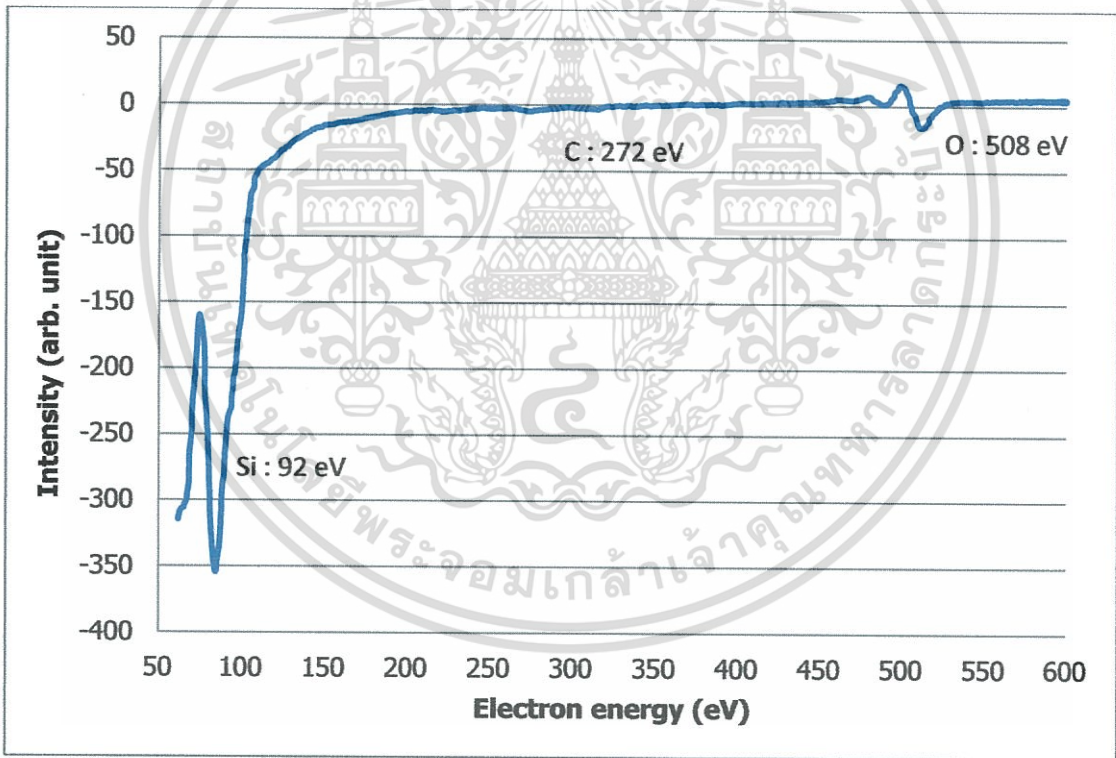
เช่นเดียวกับอาร์กอนพลาสมาการทดลองในหัวข้อนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อปรับพารามิเตอร์ของอัตราส่วนของแก๊ส ความดันและกำลังของแมกนีตรอน เพื่อหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของอัตราส่วนของแก๊ส ความดันและกำลังของแมกนีตรอน จากนั้นจึงค่อยทดลองทำความสะอาดที่เวลาต่างๆด้วยเงื่อนไขของอัตราส่วนของแก๊ส ความดันและกำลังของแมกนีตรอนที่ดีที่สุด

#### 1) ผลของอัตราส่วน ความดันและกำลังของคลื่นไมโครเวฟ

เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองส่วนแรกแสดงไว้ดังตารางที่ 4.30 ซึ่งจะใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 s ตลอดทุกการทดลอง และระยะห่างระหว่างสารตัวอย่างกับปลายท่อพลาสมาเป็น 5 mm โดยใช้เงื่อนไขที่ 1 เป็นเงื่อนไขขั้นต่ำสุดในการให้กำเนิดพลาสมาของระบบที่ใช้ในการวิจัย เพราะหากลดความดันหรือกำลังของแมกนีตรอนลงต่ำกว่านี้ พลาสมาที่กำเนิดออกมาจะไม่เสถียร เนื่องจากอะตอมของแก๊สจะแตกตัวได้ไม่ต่อเนื่องพอ ส่งผลให้อนุภาคต่างๆในพลาสมาปริมาณไม่คงที่ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดไม่คงที่ เพราะประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของพลาสมาขึ้นอยู่กับอนุภาคภายในพลาสมาโดยตรง ส่วนพารามิเตอร์อัตราส่วนระหว่างอาร์กอนกับไฮโดรเจน เนื่องจากต้องการใช้การทำความสะอาดด้วยปฏิกิริยาเคมีจากพลาสมาของของไฮโดรเจนเป็นหลัก อัตราส่วนขั้นต่ำที่สุดของอาร์กอน/ไฮโดรเจนจึงกำหนดให้เป็น 1 ต่อ 2 และจากการทดลองให้กำเนิดพลาสมาพบว่าเมื่ออัตราส่วนเกิน 1 ต่อ 4 พลาสมาที่ได้จะไม่เสถียร จึงไม่สามารถทำการทดลองที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนสูงกว่านี้ได้ และการที่ไม่ใช้อัตราส่วนของไฮโดรเจนน้อยกว่านี้เป็นเพราะว่าจากการวัด OES ผู้วิจัยพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนตั้งแต่ 1 ต่อ 2 ขึ้นไป อาร์กอนจะแตกตัวเป็นพลาสมาน้อยมาก ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกือบทั้งหมดที่ใช้ในการทำความสะอาดจะเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดจากพลาสมาของไฮโดรเจน

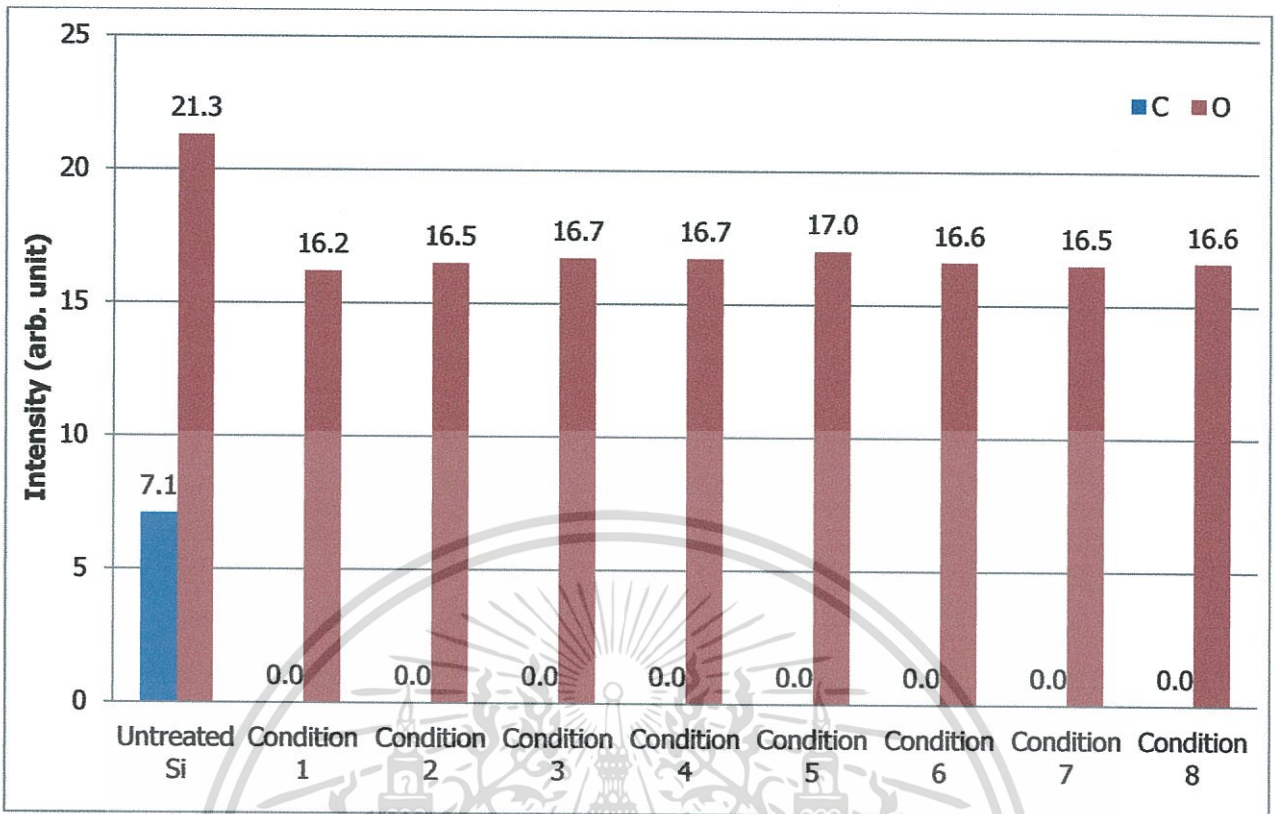
ตารางที่ 4.30 เงื่อนไขพารามิเตอร์ของอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมาที่ใช้ในการทดลอง

condition	Treatment times	Flow rate (sccm)	Ratio	Base pressure	Pressure	Magnetron power
1	30 s	10/20	1/2	0.006 Torr	0.600 Torr	620 W
2		10/20	1/2		0.600 Torr	690 W
3		10/40	1/4		0.600 Torr	620 W
4		10/40	1/4		0.600 Torr	690 W
5		10/40	1/4		1.000 Torr	620 W
6		10/40	1/4		1.000 Torr	690 W
7		10/40	1/4		1.400 Torr	620 W
8		10/40	1/4		1.400 Torr	690 W



รูปที่ 4.26 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังการทำความสะอาดด้วยอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ข้อมูล AES แสดงส่วนประกอบและปริมาณเฉลี่ยของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมาเงื่อนไขต่างๆ

รูปที่ 4.26 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของ AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมา จะเห็นว่าหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยพลาสมาแล้ว สัญญาณของคาร์บอนจะหายไป เหลือเพียงซิลิกอนและออกซิเจน เช่นเดียวกับกรณีของอาร์กอนพลาสมา

เมื่อนำข้อมูลของ AES ไปปรับเทียบให้ปริมาณของซิลิกอนเป็น 100 หน่วย จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ผ่านการปรับเทียบแล้วไปเขียนเป็นกราฟแท่งดังรูปที่ 4.27 จะเห็นว่าผลการทดลองออกมาเหมือนกับการใช้อาร์กอนพลาสมา โดยทุกเงื่อนไขสามารถกำจัดสารปนเปื้อนประเภทคาร์บอนออกไปได้ทั้งหมด แต่สามารถกำจัดออกไซด์ที่อยู่บนพื้นผิวออกไปได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแม้จะทดลองปรับพารามิเตอร์โดยการเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาเคมีในการกำจัดออกไซด์ การเพิ่มความดันหรือกำลังของแมกนีตรอน ล้วนไม่ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนประเภทออกไซด์ดีขึ้น เพราะฉะนั้นเงื่อนไขของพลาสมาที่ดีที่สุดของตอนนี้คือเงื่อนไขที่ 1 เพราะเนื่องจากการทำให้แก๊สไฮโดรเจนแตกตัวเป็นพลาสมา จำเป็นต้องใช้พลังงานที่สูง การเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปจึงทำให้พลาสมาของไฮโดรเจนมีอุณหภูมิสูงกว่าพลาสมาของแก๊สอาร์กอนอย่างมาก และเช่นเดียวกับกรณีของอาร์กอนพลาสมา เงื่อนไขที่ 1 เป็นเงื่อนไขที่มีความดันและกำลังของคลื่นไมโครเวฟต่ำที่สุด ซึ่งการเพิ่มความดันจะทำให้แก๊สเกิดการแตกตัวมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของพลาสมาสูงขึ้น จะทำให้ระบบทำความสะอาดเกิดความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียหายได้ เนื่องจากยงที่ใช้ในการซีลระบบสุญญากาศจะละลาย ทำให้ระบบไม่สามารถคงสภาพสุญญากาศเอาไว้ได้ นอกจากนี้เพิ่มความดันมากจนเกินไปยังทำให้เกิดแตกตัวเป็นพลาสมาได้น้อยลง เพราะความดันที่สูงเกินไปจะทำให้ระยะเวลาเคลื่อนที่เฉลี่ยของอิเล็กตรอนมีค่าลดลง ส่งผลให้พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนลดลงตาม ซึ่งหากเพิ่มความดันเข้าไป พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะลดลงไปเรื่อยๆจนไม่สามารถทำให้เกิดแตกตัวได้ ส่วนการเพิ่มกำลังของแมกนีตรอนนั้นส่งผลให้เกิดแตกตัวมากขึ้นเนื่องจากพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิของพลาสมาสูงขึ้น

## 2) ผลของเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำความสะอาดแสดงไว้ในตารางที่ 4.31 โดยในหัวข้อนี้เป็นการทดลองทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนที่เวลาแตกต่างกันเพื่อดูความสามารถในการทำความสะอาดของอาร์กอนพลาสมาเปรียบเทียบกับพลาสมาผสมของอาร์กอน/ไฮโดรเจน หลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนจะถูกวัดและวิเคราะห์ความสะอาดด้วยการวัดมุมสัมผัสและ AES ดังตารางที่ 4.32 และรูปที่ 4.16

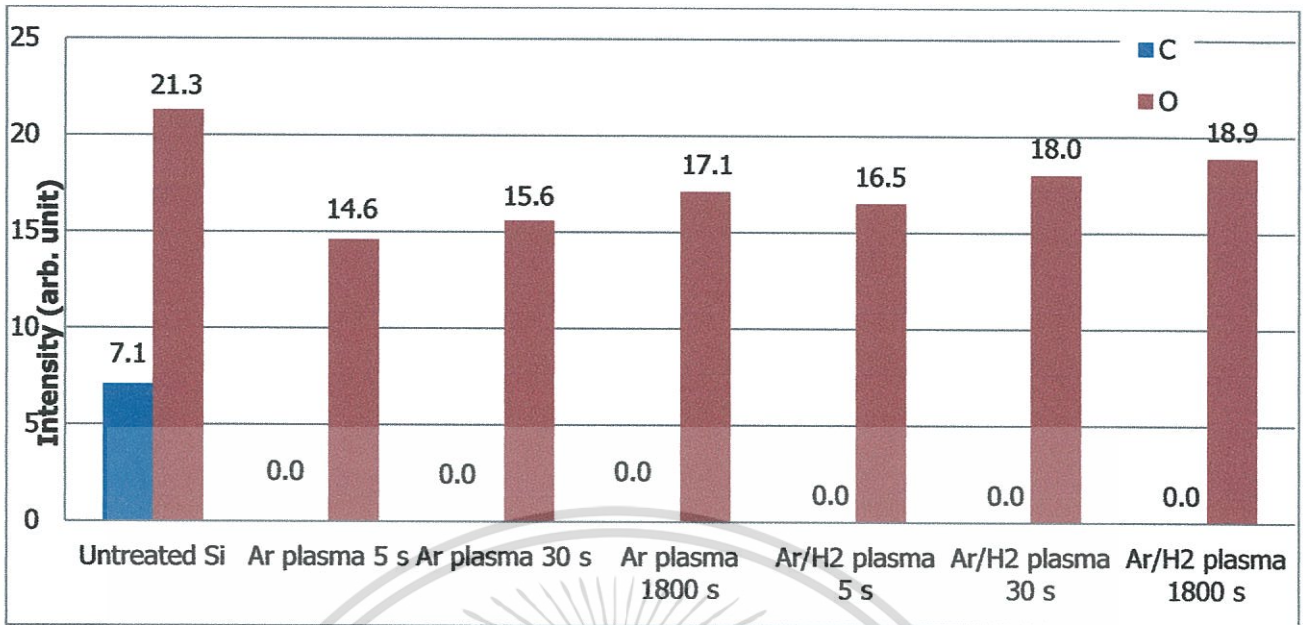
ตารางที่ 4.31 พารามิเตอร์ของพลาสมาผสมของอาร์กอน/ไฮโดรเจนที่ใช้ในการทดลอง

Working gas	Ar/H <sub>2</sub>
Flow rates	Ar : 10 sccm H <sub>2</sub> : 20 sccm
Base pressure	0.006 Torr
Plasma-Chamber pressure	0.600 Torr
Magnetron power	620 W
Distances from plasma tube	5 mm
Treatment times	5 s , 30 s , 1800 s

ตารางที่ 4.32 เปรียบเทียบข้อมูลมุมสัมผัสที่วัดได้บนแผ่นซิลิกอนระหว่างพลาสมาของอาร์กอนกับพลาสมาผสมของอาร์กอน/ไฮโดรเจน

Treated time	Contact angle (degree)	
	Ar plasma	Ar/H <sub>2</sub> plasma
0 s	48.37	48.37
5 s	3.71	3.87
30 s	4.38	6.17
1800 s	4.30	5.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบข้อมูล AES บนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดพลาสมาด้วยของแก๊สอาร์กอนกับพลาสมาผสมของอาร์กอน/ไฮโดรเจน

ตารางที่ 4.31 แสดงข้อมูลมุมสัมผัสของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนเปรียบเทียบกับพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจน ที่เวลา 5 s 30 s และ 1800 s ค่ามุมสัมผัสบนแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจนจะมีค่าใกล้เคียงกับกรณีพลาสมาของอาร์กอน ผลการวิเคราะห์ด้วย AES หลังผ่านการปรับเทียบให้ปริมาณของซิลิกอนเป็น 100 หน่วย แสดงไว้ในรูปที่ 4.28 ผลการทำความสะอาดด้วยพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจนที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AES ที่ได้ออกมานั้นใกล้เคียงกับผล AES ของการทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนมาก โดยคาร์บอนจะถูกกำจัดจนหมดไปตั้งแต่ 5 s แรกของการทำความสะอาด แต่ก็ยังไม่สามารถกำจัดออกไซด์ออกไปให้หมดได้ และหากเปรียบเทียบกับกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอน ที่เวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดเท่ากัน ปริมาณออกไซด์ที่วัดได้ของการทำความสะอาดทั้งสองแบบยังมีค่าต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มแก๊สไฮโดรเจนเข้าไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาดให้กับพลาสมาเลย และแม้จะทดลองเพิ่มเวลาในการทำความสะอาดให้มากขึ้น นอกจากไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดออกไซด์ดีขึ้นแล้วยังตรวจพบออกไซด์ในปริมาณที่สูงขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามการใช้พลาสมาที่เพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปมีข้อดีคือพื้นผิวของซิลิกอนที่ถูกทำความสะอาดจะเสียหายน้อยลงหรืออาจไม่เกิดความเสียหายเลยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของไฮโดรเจนที่เพิ่มเข้าไปมากขนาดไหน เพราะยังใช้แก๊สไฮโดรเจนมาก การทำความสะอาดด้วยพลาสมาที่ยังใช้ปฏิกิริยาเคมีในการทำความสะอาดมากขึ้นตามอัตราส่วนหรือปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่เพิ่มเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.4.2 ความสามารถในการกำจัดออกไซด์และการเกิดออกไซด์

เพื่อยืนยันความสามารถในการทำความสะอาดของพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจนว่าการเพิ่มไฮโดรเจนเข้าไปไม่ได้มีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถของการกำจัดออกไซด์หรือลดปริมาณการเกิดออกไซด์ของตัวระบบทำความสะอาดด้วยพลาสมาของสาขาวิชาฟิสิกส์ ในหัวข้อนี้จึงเป็นการทดลองซ้ำกระบวนการในหัวข้อ 4.6.3.2 แต่เปลี่ยนจากพลาสมาของแก๊สอาร์กอนเป็นพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจน

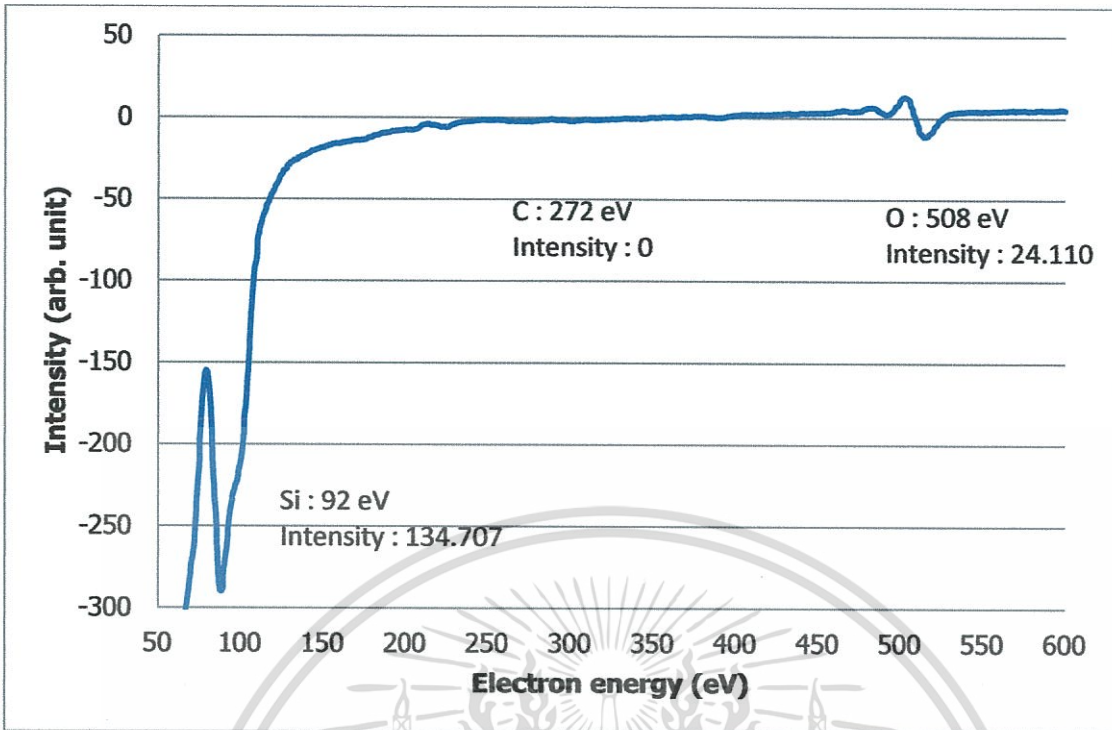
##### 1) การเตรียมพื้นผิวด้วยการสปัตเตอริง (sputtering)

การทำความสะอาดด้วยการสปัตเตอริงเป็นการทำความสะอาดด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยในการทดลองนี้จะใช้ลำไอออนของแก๊สอาร์กอนในการเคลื่อนเข้าชนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนเพื่อกระแทกเอาสารปนเปื้อนบนพื้นผิวออกไป ซึ่งในกระบวนการนี้จะใช้เวลารวมทั้งสิ้น 5 hrs.

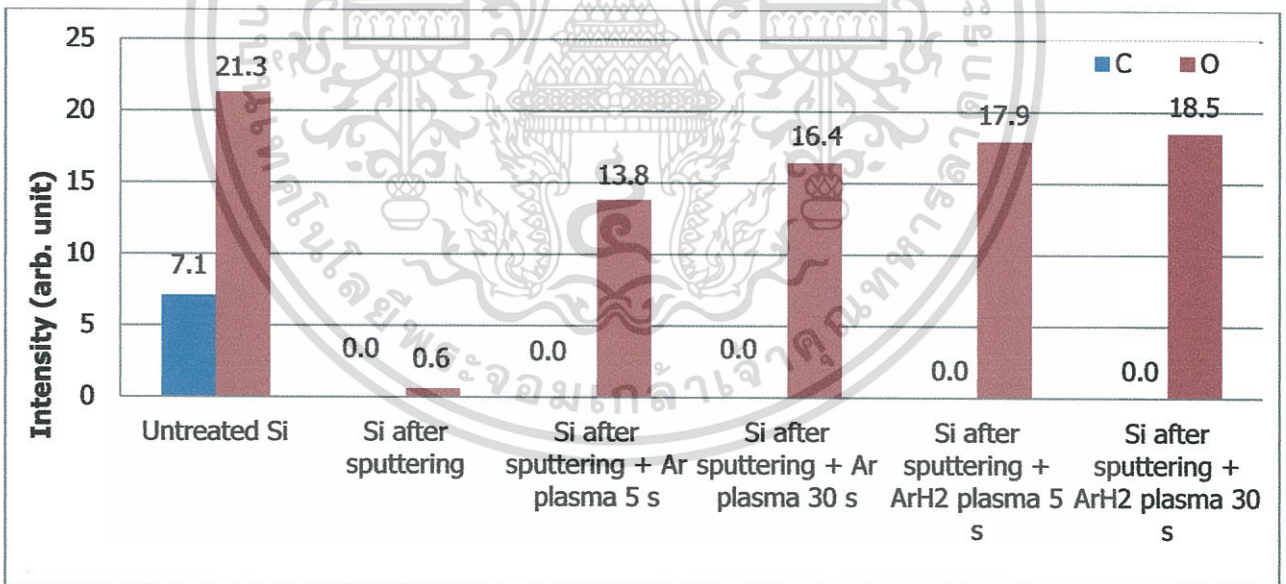
**ตารางที่ 4.33** เปรียบเทียบข้อมูลมุมสัมผัสของการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการสปัตเตอริงมาแล้วด้วยพลาสมา

Condition	Contact angle (degree)	
	Ar plasma	Ar/H <sub>2</sub> plasma
Untreated Si	48.37	48.37
Si after sputtering	41.10	41.00
Si after sputtering + plasma 5 s	35.64	34.62
Si after sputtering + plasma 30 s	33.20	32.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการสปัตเตอร์ริงและทำความสะอาดด้วย อาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมา



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบข้อมูล AES การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการสปัตเตอร์ริงมาแล้วด้วย พลาสมาของอาร์กอนกับพลาสมาผสมของอาร์กอน/ไฮโดรเจน

ขอมูลมัมสัมพันธ์ในตารางที่ 4.33 แสดงให้เห็นว่าแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการสปัตเตอร์ริง เมื่อนำไปทำความสะอาดเปรียบเทียบกันชำระระหว่างพลาสมาของแก๊สอาร์กอนกับพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจนมีค่าของมัมสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกันมากจนอาจบอกได้ว่ามีค่าเท่ากัน โดยมีค่าเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

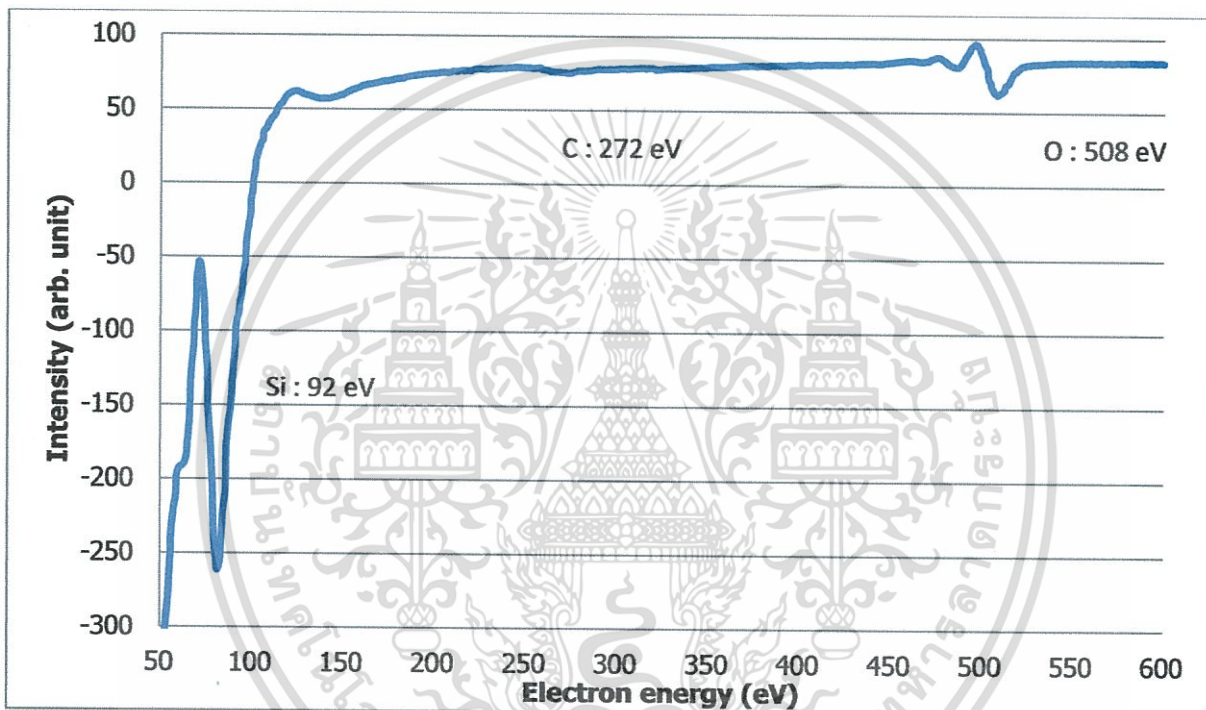
35.66° และ 34.62° ตามลำดับ ต่อมาเมื่อดูข้อมูลจากการเพิ่มเวลาในการทำความสะอาดจาก 5 s เป็น 30 s พบว่ามุมสัมพัทธ์มีค่าลดลงเล็กน้อยเป็น 33.20° กับ 32.79° ตัวอย่างสเปกตรัมของ AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านการเตรียมผิวด้วยการสปัตเตอร์และทำความสะอาดด้วยพลาสมาแสดงไว้ในรูปที่ 4.29 ข้อมูล AES ที่ผ่านการปรับเทียบให้ปริมาณของซิลิกอนเป็น 100 หน่วย เมื่อนำไปเขียนเป็นกราฟแท่งแสดงไว้ดังรูปที่ 4.30 จากข้อมูลเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าแม้จะเพิ่มไฮโดรเจนเข้าไป ก็ยังไม่เพิ่มความสามารถในการกำจัดเอาออกไซด์หรือชะลอการเพิ่มขึ้นของออกไซด์บนพื้นผิวได้ และแนวโน้มการเพิ่มของออกไซด์ก็เหมือนกับการทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนคือเมื่อใช้เวลาในการทำความสะอาดนานขึ้น ออกไซด์ก็จะมีปริมาณมากขึ้นและยังเพิ่มขึ้นมาในปริมาณที่ใกล้เคียงกันอีกด้วย โดยที่เวลาในการทำความสะอาดด้วยพลาสมาเป็น 30 s พบว่าปริมาณออกไซด์ในกรณีทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนมีค่าเพิ่มจาก 14.0 เป็น 16.4 และมีค่าเพิ่มจาก 17.9 เป็น 18.5 เมื่อทำความสะอาดด้วยพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจน

## 2) การเตรียมพื้นผิวด้วยกระบวนการทางเคมี

เช่นเดียวกับการเตรียมผิวด้วยกระบวนการทางเคมี ในหัวข้อของการทำความสะอาดด้วยอาร์กอนพลาสมา การเตรียมผิวด้วยกระบวนการทางเคมีนี้จะนำแผ่นซิลิกอนที่ยังไม่ผ่านการทำความสะอาดไปทำความสะอาดด้วยกรดกัดแก้ว เพื่อกำจัดเอาออกไซด์บนพื้นผิวออกไปก่อนที่จะนำไปทำความสะอาดซ้ำด้วยพลาสมา ซึ่งก่อนที่จะนำแผ่นซิลิกอนมาทำความสะอาดด้วยกรดกัดแก้ว จะต้องมีการเตรียมแผ่นซิลิกอนก่อน โดยจะนำแผ่นซิลิกอนไปล้างด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 min. เพื่อล้างเอาคราบไขมันหรือรอยนิ้วมือออกไป จากนั้นก็นำไปล้างอะซิโตนที่ตกค้างอยู่ออกไปให้หมดด้วยเมทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 min. และนำไปล้างด้วยน้ำปอดประจุเป็นเวลา 1 min. เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการเตรียมแผ่นซิลิกอน ซึ่งหลังจากเตรียมแผ่นซิลิกอนเสร็จแล้วก็จะนำแผ่นซิลิกอนไปทำความสะอาดด้วยกรดกัดแก้วที่ถูกเจือจางด้วยน้ำปอดประจุ ที่อัตราส่วนของกรดกัดแก้วกับน้ำปอดประจุเป็น 1:20 โดยจะแช่แผ่นซิลิกอนทิ้งไว้เป็นเวลา 5 min. จากนั้นจึงนำแผ่นซิลิกอนไปแกว่งในน้ำปอดประจุเป็นเวลา 10 s เพื่อล้างกรดกัดแก้วออกไป แล้วนำไปเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) และนำแผ่นซิลิกอนไปทำความสะอาดด้วยอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมาเป็นเวลา 30 s ข้อมูลมุมสัมพัทธ์หลังการทำความสะอาดจะแสดงไว้ดังตารางที่ 4.34 ข้อมูลของ AES จะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.30 ถึงรูปที่ 4.31

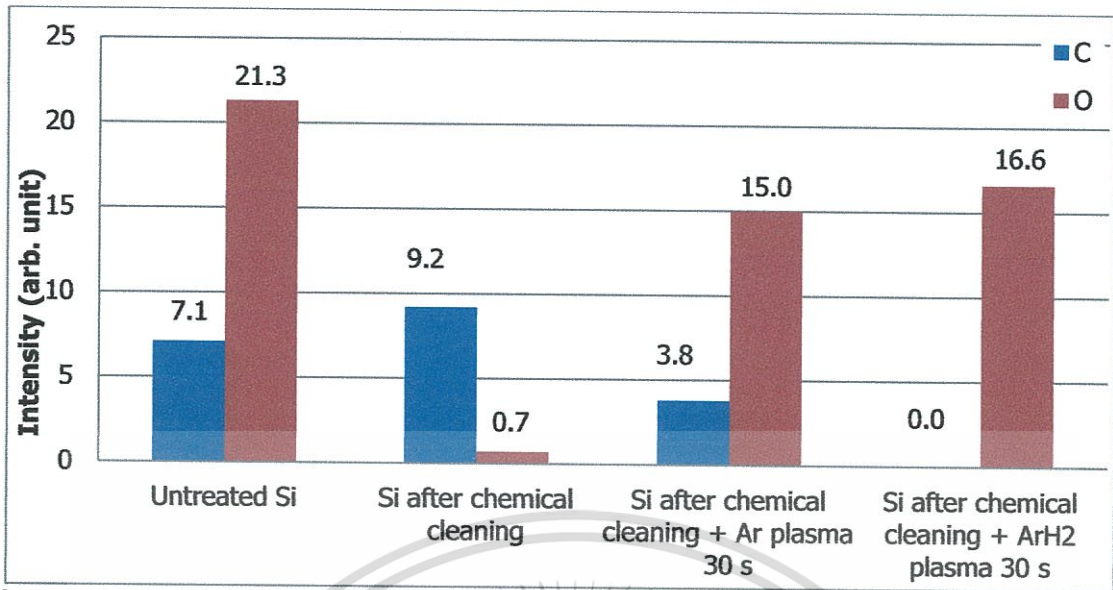
ตารางที่ 4.34 เปรียบเทียบข้อมูลมุมสัมผัสของการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยกรดกัดแก้วมาแล้วด้วยพลาสมา

Condition	Contact angle (degree)	
	Ar plasma	Ar/H2 plasma
Untreated Si	48.37	48.37
Si after chemical cleaning	70.19	71.20
Si after chemical cleaning + plasma 30 s	30.67	38.60



รูปที่ 4.31 ตัวอย่างสเปกตรัม AES ของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทางเคมีและทำความสะอาดด้วยอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบข้อมูล AES การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยกรดกัดแก้วมาแล้วด้วยพลาสมาของอาร์กอนกับพลาสมาผสมของอาร์กอน/ไฮโดรเจน

ตารางที่ 4.33 แสดงให้เห็นถึงมุมสัมพัทธ์ที่เพิ่มของแผ่นซิลิกอนเมื่อนำไปทำความสะอาดด้วยกรดกัดแก้ว มุมสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากกรดกัดแก้วได้ไปทำลายพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนทำให้พื้นผิวของแผ่นซิลิกอนมีค่ามุมสัมพัทธ์สูงขึ้น และมุมสัมพัทธ์มีค่าลดลงอีกครั้งเมื่อนำแผ่นซิลิกอนไปทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนกับพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจน โดยมีค่าเป็น  $30.67^\circ$  และ  $38.60^\circ$  ตามลำดับ เหตุผลที่แผ่นซิลิกอนหลังผ่านการทำความสะอาดด้วยพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจนมีค่ามุมสัมพัทธ์สูงกว่าเพราะกระบวนการที่ใช้ในการทำความสะอาดของพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจนจะใช้ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นหลักซึ่งส่งกระทบกับลักษณะรูปร่างของพื้นผิวน้อยมาก ทำให้มุมสัมพัทธ์ที่วัดได้มีค่าสูงกว่าการทำความสะอาดด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอน รูปที่ 4.31 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของแผ่นซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการทางเคมีและทำความสะอาดด้วยอาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมา AES ของ รูปที่ 4.32 แสดงกราฟเปรียบเทียบข้อมูล AES ที่ผ่านการปรับเทียบให้ปริมาณของซิลิกอนเป็น 100 หน่วยแล้ว ระหว่างการทำความสะอาดด้วยอาร์กอนพลาสมา กับ อาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมา โดยผลการทำความสะอาดด้วยพลาสมาทั้งสองแบบนี้เป็นไปในทางเดียวกันคือสามารถกำจัดเอาคาร์บอนออกไปได้ทั้งหมด แต่ก็ยังไม่สามารถกำจัดเอาออกไซด์ออกไปได้ทั้งหมด โดยจะมีออกไซด์จำนวนหนึ่งเกิดขึ้นมาเสมอ และจากการเปรียบเทียบปริมาณของออกไซด์ที่เหลืออยู่บนพื้นผิวพบว่าพลาสมาทั้งสองชนิดมีความสามารถหรือประสิทธิภาพในการกำจัดออกไซด์ใกล้เคียงกัน สังเกตได้จากปริมาณออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวมีปริมาณใกล้เคียงกัน คือพลาสมาของแก๊สอาร์กอนจะมีปริมาณออกไซด์เป็น 15.0 ส่วนกรณีของพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไฮโดรเจนจะมีปริมาณออกไซด์เป็น 16.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าถ้าพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนมีความขรุขระมาก เช่นแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการสปัตเตอริงหรือการเตรียมผิวด้วยกรดกัดแก้ว การวัดความสะอาดด้วยมุมสัมผัสจะไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากผลของความขรุขระของพื้นผิวทำให้มุมสัมผัสที่วัดได้มีค่าสูงมากแม้ว่าพื้นผิวจะสะอาดแล้วก็ตาม และหากดูในเรื่องของประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพบว่าระบบทำความสะอาดสามารถกำจัดสารปนเปื้อนประเภทคาร์บอนได้เป็นอย่างดี โดยสามารถกำจัดสารปนเปื้อนประเภทคาร์บอนออกไปได้ทั้งหมดภายในเวลา 5 s แต่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนประเภทออกไซด์ที่อยู่บนพื้นผิวออกไปได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องมาจากระบบทำความสะอาดสามารถทำความสะอาดได้ต่ำที่สุดคือ  $10^{-3}$  Torr ซึ่งเป็นความดันที่ยังมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในห้องสุญญากาศอยู่เป็นจำนวนมาก และหลังเสร็จสิ้นการทำความสะอาดด้วยพลาสมาแผ่นซิลิกอนจะมีอุณหภูมิสูง ซึ่งง่ายต่อการที่ออกซิเจนจะลงมาเกาะอยู่บนพื้นผิวและเกิดเป็นออกไซด์ขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

#### 5.1.1 ประสิทธิภาพการทำความสะอาดและความสามารถในการทำซ้ำของระบบ

ระบบทำความสะอาดด้วยพลาสมาที่นำมาใช้ใน โครงการวิจัย จากการทดลองพบว่า มีเพียงบริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่างเท่านั้นที่พลาสมาสามารถทำความสะอาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ สังเกตได้จากมุมสัมผัสจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันและคงที่เฉพาะบริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่างที่นำไปทำความสะอาดเท่านั้น เป็นเพราะพลาสมาที่ออกมาจากปลายท่อพลาสมาจะมีลักษณะเป็นทรงกลม ทำให้บริเวณอื่นนอกจากตรงกลางของตัวอย่างการทดลองจะสัมผัส โคนพลาสมาไม่สม่ำเสมอ ทำให้มีเพียงบริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่างเท่านั้น ที่มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดที่ตลอดทุกครั้งของการทดลอง

#### 5.1.2 สารปนเปื้อนบนพื้นผิว

จากผลการวัด AES พบว่าสารปนเปื้อนบนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนจะมีอยู่ 2 ชนิดคือ สารปนเปื้อนประเภทคาร์บอน และสารปนเปื้อนประเภทออกไซด์

#### 5.1.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด

จากผลการวัดและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดมุมสัมผัสและ AES พบว่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนด้วยระบบทำความสะอาดด้วยพลาสมาพัฒนาขึ้นมา คือ 5-30 s เพราะจากผลการวัดมุมสัมผัสและ AES จะเห็นว่ามุมสัมผัสบริเวณตรงกลางของแผ่นซิลิกอน ลดลงจาก  $48.37^\circ$  เหลือ  $3^\circ - 4^\circ$  ส่วนจากข้อมูลการวัด AES ทำให้ทราบว่าสารปนเปื้อนประเภทคาร์บอน ถูกกำจัดไปจนหมดตั้งแต่ 5 วินาทีแรกของการทำความสะอาด เหลือเพียงออกไซด์จำนวนหนึ่งอยู่บนพื้นผิวเท่านั้น และแม้จะเพิ่มเวลาในการทำความสะอาดให้นานขึ้นก็ไม่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนประเภทออกซิเจนหรือออกไซด์ที่เหลืออยู่ออกไปได้ อย่างไรก็ตาม หากไม่จำเป็นก็ไม่ควรใช้เวลาในการทำความสะอาดนานเกินไป จากผลการวัด AES แสดงให้เห็นว่ายิ่งใช้เวลาในการทำความสะอาดนาน สารปนเปื้อนประเภทออกซิเจนหรือออกไซด์ก็มีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด

### 5.1.4 พารามิเตอร์ของพลาสมา

#### 1) อาร์กอนพลาสมา

- ผลของความดันและกำลังของคลื่น ไมโครเวฟ

จากการทดลองปรับพารามิเตอร์โดยการเพิ่มความดันหรือกำลังของแมกนีตรอนเข้าไปก็  
ไม่อาจช่วยให้กำจัดสารปนเปื้อนประเภทออกไซด์ออกไปได้ดีขึ้น เพราะฉะนั้นเนื่องจากการเพิ่มความ  
ดันและกำลังของแมกนีตรอนเข้าไป ไม่ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนประเภท  
ออกไซด์ให้ดีขึ้น เพราะฉะนั้นเงื่อนไขของพลาสมาที่ดีที่สุดของตอนนี้คือเงื่อนไขที่มีความดันและกำลัง  
ของคลื่น ไมโครเวฟต่ำที่สุด ซึ่งการเพิ่มความดันจะทำให้แก๊สเกิดการแตกตัวมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิจน  
พลาสมาสูงขึ้น ส่งผลเสียระบบทำความสะอาด เนื่องจากหากระบวนการทำงานที่อุณหภูมิสูงๆติดต่อกันไป  
นานๆ อย่างไม่ใช้ในการซีลระบบจะเกิดละลายส่งผลให้ระบบไม่สามารถคงสถานะสุญญากาศเอาไว้ได้  
นอกจากนี้เพิ่มความดันมากเกินไปยังทำให้เกิดแก๊สแตกตัวเป็นพลาสมาได้น้อยลง เพราะความดันที่สูง  
เกินไปจะทำให้ระยะเวลาเคลื่อนที่เฉลี่ยของอิเล็กตรอนมีค่าลดลง ส่งผลให้พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน  
ลดลงตาม ซึ่งหากเพิ่มความดันเข้าไป พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะลดลงไปเรื่อยๆจนไม่สามารถทำ  
ให้แก๊สแตกตัวได้ ส่วนการเพิ่มกำลังของแมกนีตรอนนั้นส่งผลให้แก๊สแตกตัวมากขึ้นเนื่องจากพลังงาน  
จลน์ของอิเล็กตรอนสูงขึ้น เป็นเหตุให้อุณหภูมิของพลาสมาสูงขึ้น

#### 2) อาร์กอน/ไฮโดรเจนพลาสมา

- ผลของความดัน อัตราส่วนและกำลังของคลื่น ไมโครเวฟ

ผลการทดลองออกมาเหมือนกับการใช้อาร์กอนพลาสมา โดยทุกเงื่อนไขสามารถกำจัด  
สารปนเปื้อนประเภทคาร์บอนออกไปได้ทั้งหมด แต่สามารถกำจัดออกไซด์ที่อยู่บนพื้นผิวออกไปได้  
เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแม้จะทดลองปรับพารามิเตอร์โดยการเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน เพื่อ  
เพิ่มปฏิกิริยาเคมีในการกำจัดออกไซด์ การเพิ่มความดันหรือกำลังของแมกนีตรอน ล้วนไม่ส่งผลให้  
ความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนประเภทออกไซด์ดีขึ้น เพราะฉะนั้นเงื่อนไขของพลาสมาที่ดี  
ที่สุดของตอนนี้คือเงื่อนไขที่มีความดัน อัตราส่วนของไฮโดรเจนและกำลังของคลื่น ไมโครเวฟต่ำที่สุด  
เพราะเนื่องจากการทำให้แก๊สไฮโดรเจนแตกตัวเป็นพลาสมาจำเป็นต้องใช้พลังงานที่สูง การเพิ่ม  
อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปจึงทำให้พลาสมาของไฮโดรเจนมีอุณหภูมิสูงกว่าพลาสมาของแก๊ส  
อาร์กอนอย่างมาก และเช่นเดียวกับกรณีของอาร์กอนพลาสมา การเพิ่มความดันจะทำให้แก๊สเกิด  
การแตกตัวมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของพลาสมาสูงขึ้น ส่งผลเสียระบบทำความสะอาด เนื่องจากหา  
กระบวนการทำงานที่อุณหภูมิสูงๆติดต่อกันไปนานๆ อย่างไม่ใช้ในการซีลระบบจะเกิดละลายส่งผลให้ระบบไม่  
สามารถคงสถานะสุญญากาศเอาไว้ได้ นอกจากนี้เพิ่มความดันมากเกินไปยังทำให้เกิดแก๊สแตกตัวเป็น

พลาสมาได้น้อยลง เพราะความดันที่สูงเกินไปจะทำให้ระยะเวลาเคลื่อนที่เฉลี่ยของอิเล็กตรอนมีค่าลดลง ส่งผลให้พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนลดลงตาม ซึ่งหากเพิ่มความดันเข้าไป พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะลดลงไปเรื่อยๆจนไม่สามารถทำให้เกิดแตกตัวได้ ส่วนการเพิ่มกำลังของแมกนีตรอนนั้น ส่งผลให้เกิดแตกตัวมากขึ้นเนื่องจาก พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิของพลาสมาสูงขึ้น

#### 5.1.4 ความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนประเภทต่างๆ

##### 1) ความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนประเภทคาร์บอน

ระบบทำความสะอาดที่พัฒนาขึ้นมาสามารถกำจัดสารปนเปื้อนประเภทคาร์บอนออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยืนยันได้จากผลการวัด AES ที่แสดงให้เห็นว่าระบบทำความสะอาดสามารถกำจัดสารปนเปื้อนประเภทคาร์บอนออกไปได้ทั้งหมดภายในเวลาเพียง 5-30 s

##### 2) ความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อนประเภทออกไซด์ออกจากพื้นผิว

จากการทดลองเพื่อพิสูจน์ความสามารถในการกำจัดออกไซด์ออกจากพื้นผิว พบว่าระบบทำความสะอาดสามารถทำความสะอาดเอาสารปนเปื้อนประเภทคาร์บอนออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนประเภทออกซิเจนหรือออกไซด์ได้ไม่มากนัก โดยจะมีออกไซด์จำนวนหนึ่งเหลืออยู่บนพื้นผิวเสมอ ซึ่งภายหลังพบว่าออกไซด์ที่ตรวจพบนั้นเกิดมาจากตัวของระบบเอง และมีแนวโน้มว่าจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทำทำความสะอาด

##### 3) การเพิ่มขึ้นของสารปนเปื้อนประเภทออกไซด์

เนื่องมาจากระบบทำความสะอาดที่ใช้สามารถทำความสะอาดได้ต่ำที่สุดคือ  $10^{-3}$  Torr ซึ่งเป็นความดันที่ยังมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในห้องสุญญากาศอยู่เป็นจำนวนมาก และหลังเสร็จสิ้นการทำทำความสะอาดด้วยพลาสมา พื้นผิวของสารตัวอย่างจะมีอุณหภูมิสูง ซึ่งง่ายต่อการที่ออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่ในระบบจะลงมาเกาะอยู่บนพื้นผิวและเกิดเป็นออกไซด์ขึ้น

#### 5.1.5 เปรียบเทียบพลาสมาของแก๊สอาร์กอนกับพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและไฮโดรเจน

จากผลการทดลองพบว่าพลาสมาทั้ง 2 แบบมีประสิทธิภาพในการทำทำความสะอาดที่ใกล้เคียงกัน โดยพลาสมาทั้งสองชนิดสามารถกำจัดสารปนเปื้อนประเภทคาร์บอนออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ จุดที่แตกต่างกันของพลาสมาทั้ง 2 แบบคือ กระบวนการที่ใช้ในการทดลอง โดยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนจะเป็นการทำทำความสะอาดด้วยกระบวนการสปัดเตอริงซึ่งจะเป็นการใช้อะตอมที่ถูก

กระตุ้นฟุ้งเข้าชนพื้นผิวเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนออกไป และมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนหรือปรับสภาพพื้นผิว กล่าวคือหากพื้นผิวเรียบอยู่ก็จะถูกปรับให้กลายเป็นพื้นผิวที่ขรุขระ หรือปรับให้พื้นผิวที่ขรุขระกลายเป็นพื้นผิวที่เรียบขึ้น ตรงจุดนี้จะต่างกับการทำความสะอาดด้วยพลาสมาผสมของแก๊สอาร์กอนและไฮโดรเจนที่ใช้อัตราส่วนของไฮโดรเจนที่สูงกว่าอาร์กอน เพราะกระบวนการที่ใช้ในการทำความสะอาดจะเป็นปฏิกิริยาเคมีเป็นหลัก ซึ่งจะไม่ทำให้สภาพพื้นผิวเปลี่ยนไปจากเดิม ฉะนั้นหากต้องการทำความสะอาดโดยไม่สนใจสภาพพื้นผิว ก็สามารถนำพลาสมาจากแก๊สอาร์กอนหรือไฮโดรเจนก็ได้ในการทำความสะอาด แต่หากสนใจสภาพของพื้นผิวด้วย ก็จำเป็นต้องเลือกชนิดของแก๊สให้เหมาะสมกับความต้องการ

#### 5.1.6 การวัดความสะอาดของพื้นผิวด้วยการวัดมุมสัมผัส

การวัดมุมสัมผัสสามารถใช้ตรวจสอบความสะอาดของพื้นผิวได้ แต่สามารถเชื่อถือได้เพียงระดับหนึ่ง และต้องใช้กับพื้นผิวที่ไม่ขรุขระมากเท่านั้น เพราะถ้าพื้นผิวของสารตัวอย่าง(ซึ่งในที่นี้คือแผ่นซิลิกอน) มีความขรุขระมาก เช่นแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการสเปดเตอริงหรือการเตรียมผิวด้วยกรดกัดแก้ว การวัดความสะอาดด้วยมุมสัมผัสจะไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากผลของความขรุขระของพื้นผิวทำให้มุมสัมผัสที่วัดได้มีค่าสูงมากแม้ว่าพื้นผิวจะสะอาดแล้วก็ตาม โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ความสะอาดของพื้นผิวสามารถยืนยันได้จากผลการวัด AES

#### 5.2 แผนงานในอนาคตและข้อเสนอแนะ

ปรับปรุงให้ระบบทำความสะอาดสามารถทำงานได้ที่ระดับความดัน  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-6}$  Torr เพื่อให้ป้องกันการเกิดการก่อตัวใหม่ของออกไซด์บนพื้นผิวสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มปั๊มสุญญากาศระดับ high vacuum เข้าไปในระบบทำความสะอาด

## บรรณานุกรม

- [1] Amorn THEDSAKHULWONG and Warawoot THOWLADDA. "Removal of Carbon Contamination on Silicon Wafer Surfaces by Microwave Oxygen Plasma" **Journal of Metals, Materials and Minerals**. Vol.18 No. 2 pp. 137-141, 2008.
- [2] Alfred Grill. **Cold Plasma Materials Fabrication: From Fundamentals to Applications**. John Wiley & Sons, 1994.
- [3] M. R. Baklanov, D. G. Shamiryan, Zs. Tökei, G. P. Beyer, T. Conard, S. Vanhaelemeersch, and K. Maex. "Characterization of Cu surface cleaning by hydrogen plasma" **J. Vac. Sci. Technol. B** 19(4), Jul/Aug 2001. pp.1201-1211.
- [4] WUHU LI. "A Study of plasma-Cleaned Ag-Plated Cu Leadframe Surface" **Journal of ELECTRONIC MATERIALS**, Vol. 39, NO. 3, 2010. pp. 295-302.
- [5] Wu-Hu LI, Klaus Reingruber, Norbert Mais, Albert Acuesta and Christian Alde Yape. "Plasma Cleaning on Bond Pad Surfaces for Gold Wire Bonding" **Electronics Packaging Technology Conference 2009 11<sup>th</sup>** ©2009 IEEE
- [6] C.V. Budtz-Jørgensen, P. Kringhøj, J.F. Nielsen, J. Böttiger. "Chemical and physical sputtering of aluminum and gold samples using Ar-H<sub>2</sub> DC-glow discharges" **Surface and Coating Technology** 135 (2001) 299-306.
- [7] Miran Mozetic. "Discharge cleaning with hydrogen plasma" **Vacuum** 61 (2001) 367-371.
- [8] Miran Mozetic, Anton Zalar. "Discharge cleaning of aluminum components" **Vacuum** 71 (2003) 233-236
- [9] J.H. Hsieh, C. Li. "Effects of hollow cathode and Ar/H<sub>2</sub> ratio on plasma cleaning of Cu leadframe" **Thin Solid Films** 504 (2006) 101-103.
- [10] J.H. Hsieh, L.H. Fong, S. Yi and G. Metha "Plasma cleaning of copper leadframe with with Ar and Ar/H<sub>2</sub> gases" **Surface and Coatings Tectnology** 112 (1999) 245-249.
- [11] H H Chen, C C Weng, J D Liao, K M Chen and B W Hsu. "Photo-resist stripping process using atmospheric micro-plasma system" **Journal of Physics D: Applied Physics** 42 (2009) 135201 (8pp).

- [12] Annemie Bogaerts, Erik Neyts, Renaat Gijbels and Joost van der Mullen. "Gas discharge plasmas and their applications" **SpectrochimicaActa Part B** 57 (2002) 609-658.
- [13] N. Korner, E. Beck, A. dommann, N. Onda and J. Ramm. "Hydrogen plasma chemical cleaning of metallic substrates and silicon wafers" **Surface and Coatings Technology** 76-77 (1995) 731-737.
- [14] Reinhard Windermuth, Masaru Nomomura and Gene Dunn. "New Plasma Cleaning Technology" **Microelectronics and Packaging Conference, 2009. EMPC 2009. European** (5pp.)
- [15] Toshiaki Yamamoto and Masaaki Okubo. "Nonthermal Plasma Technology" **Advanced Physicochemical Treatment Technologies, Handbook of Environmental Engineering, 2007, Volume 5**, 135-293.
- [16] T.A.R. Hansen and R. Engeln. "Detection of hydrocarbon radicals during plasma etching" [Online]. Available: <http://www.spectroscopyonline.com/spectroscopy/data/articlestandard/spectroscopy/072010/655850/article.pdf> 2012.
- [17] เต๋ยว อภยราช. "การพัฒนาาระบบทำความสะอาดสารกึ่งตัวนำด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2551
- [18] ปฐมพงษ์ ฤกษ์สมมุสและ ปัทมาวดี ศิริประทุม. "การพัฒนาไมโครเวฟพลาสมาสำหรับระบบทำความสะอาดพื้นผิวสารกึ่งตัวนำ" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ - เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2551
- [19] อณิชนุสร สามารถและ อธิฐาน ประยงค์ขำ. "การวัดพลังงานพื้นผิวโดยวิธีการวัดมุมสัมผัส" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ - เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังปีการศึกษา 2554
- [20] C.N.C. Lam, R. Wu, D. Li, M.L. Hair and A.W. Neumann. "Study of the advancing and receding contact angles: liquid sorption as a cause of contact angle hysteresis" **Advances in Colloid and Interface Science** 96 (2002) 169-191
- [21] Roger P. Woodward, Ph.D.. "Contact angle Measurements Using the Drop Shape Method" [Online]. Available: <http://www.firsttenangstroms.com/papers/papers.html> 2012.
- [22] "Contact angle." [Online]. Available : <http://www.remehart.com/contactangle.htm>

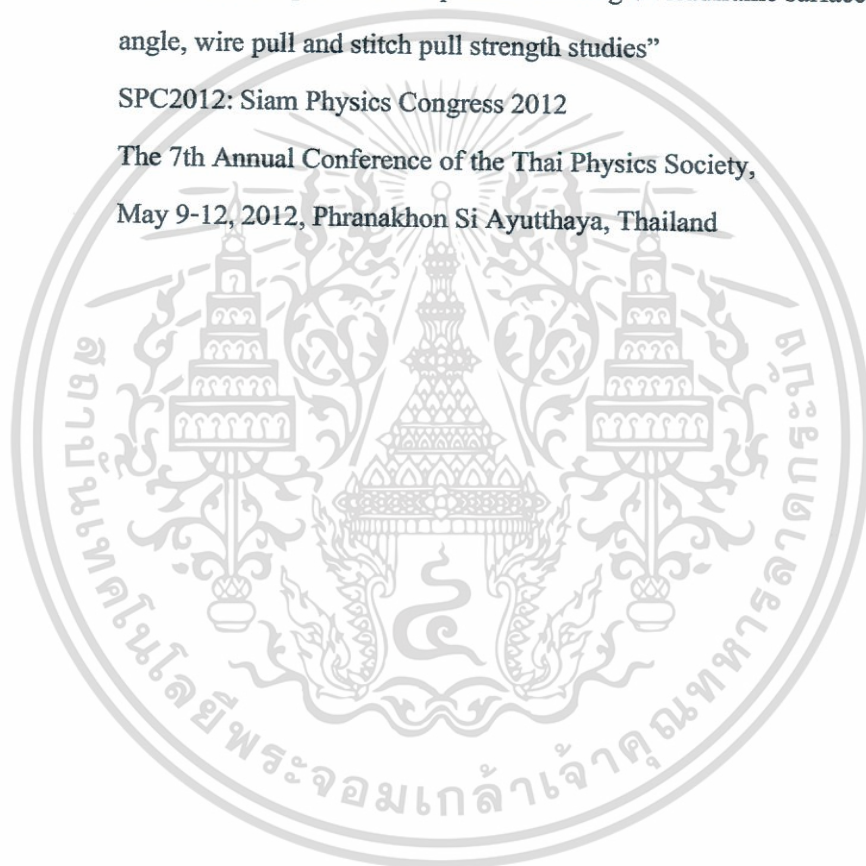
- [23] ณัฐรดา โยธาคำ. “การศึกษาความสะอาดของพื้นผิวซิลิกอนด้วยเทคนิคไอเจืออิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2549
- [24] Davis, L.E., MacDonald, N.C., Palmberg, P.W., Ricach, G.E. & Weber, R.E., **Handbook of Auger Electron Spectroscopy**. Minesota: Physical Electronic division of Perkins Elmer Corp., 1976.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายปิติ สิ้นนันทะเสน
วัน เดือน ปีเกิด	31 มกราคม พ.ศ. 2529
ที่อยู่	342 หมู่บ้านควีนเพลส 1 ซ.อ่อนนุช 44 แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง อ.อ่อนนุช กรุงเทพมหานคร 10250
ประวัติการศึกษา	2550 จบการศึกษาปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือฯ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ
ผลงานวิชาการ	“Effect of low-pressure DC plasma cleaning on leadframe surface: contact angle, wire pull and stitch pull strength studies” SPC2012: Siam Physics Congress 2012 The 7th Annual Conference of the Thai Physics Society, May 9-12, 2012, Phranakhon Si Ayutthaya, Thailand



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้